

STERKE LEKDIJK










Salmsteke Ontkiemt!

*Ontwerp-, beoordelings- en onderhoudsrichtlijn
van het kunststof filterscherm
bij deeltraject Salmsteke*

Documentnummer: P15540003-RAP-TMA-00416
Versie: 1.0
Status: Definitief
Datum: 26-05-2023



HOOGHEEMRAADSCHAP
DE STICHTSE
RIJNLANDEN

	Naam	Functie	Paraaf
Auteurs	T. Maatkamp	Geotechnisch specialist (ABT)	
	N. Overbosch	Adviseur geotechniek (RPS)	
	A. Rohe	Geotechnisch specialist (GeoHal Advies)	
	Y.R. Jongerius	Adviseur waterkeringen (RPS)	
	J. Bijnagte	Geotechnisch specialist (BGT-UGT)	
Gecontroleerd	V. Veenbergen	Ontwerpleider (ABT)	
	Th. Lankreijer	Geotechnisch specialist (ABT)	
Geautoriseerd	R.P. van Oosten	Technisch manager (RPS)	
	B. Brekelmans	Projectmanager (Mourik)	
	J. Altena	Projectmanager (HDSR)	John F. van Altena <small>Digitaal ondertekend door John F. van Altena Datum: 2023.06.01 10:24:10 +02'00'</small>

Revisiebeheer

Versie	Omschrijving	Door	Datum
0.1	60% conceptversie van de ontwerprichtlijn	T. Maatkamp N. Overbosch	22-09-2022
0.2	80% conceptversie van de ontwerprichtlijn	T. Maatkamp N. Overbosch A. Rohe J. Bijnage Y.R. Jongerius	06-03-2023
0.3	100% conceptversie van de ontwerprichtlijn	T. Maatkamp N. Overbosch A. Rohe J. Bijnage Y.R. Jongerius	05-05-2023
1.0	Definitieve versie van de ontwerprichtlijn	T. Maatkamp N. Overbosch A. Rohe J. Bijnage Y.R. Jongerius	26-05-2023



STERKE
LEKDIJK

Voorwoord

Binnen het innovatiepartnerschap Sterke Lekdijk is het deeltraject Salmsteke een samenwerking tussen het Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden en Mourik Infra B.V. Door het projectteam Salmsteke is in 2021 het initiatief genomen om het kunststof filterscherf met Prolock profielen als innovatieve techniek door te ontwikkelen en als maatregel tegen piping toe te passen bij deeltraject Salmsteke.

Onderdeel van het ontwikkeltraject is het opstellen van voorliggende ontwerp-, beoordelings- en onderhoudsrichtlijn (OBOR) van het kunststof filterscherf. Dit document geeft de ontwerpers en beheerders van deeltraject Salmsteke richtlijnen voor de concrete uitwerking en uitvoering van deze innovatieve techniek. De inhoud van de richtlijn is gebaseerd op de tijdens het innovatie- en ontwikkeltraject opgedane kennis en ervaring. Deze ervaring bestaat onder andere uit:

- Bureaustudie en literatuuronderzoek;
- Schaalonderzoek in het laboratorium (kleine en medium schaalproeven);
- Maakbaarheidsproeven in het veld (installatie en verwijdering van kunststof profielen, ontwikkeling van het filter en onderzoek naar verstopping van het filter).

Het gehele ontwikkeltraject van het kunststof filterscherf is begeleid door een onafhankelijke externe expertgroep bestaande uit vertegenwoordigers van Rijkswaterstaat (Henk van Hemert), Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden (Rutger Bolt), Deltares (Huub de Bruijn) en Fugro (Martin van der Meer). Voorliggende richtlijn is door De Innovatieversneller, Adviesteam Dijkontwerp en de externe expertgroep inhoudelijk beoordeeld. Wij danken hen voor hun kritische blik en ondersteuning.

Door het opstellen van deze project-specifieke en aan deeltraject Salmsteke gerelateerde richtlijn wordt de kennis over en de ervaring met het kunststof filterscherf gedeeld om de verdere ontwikkeling tot een landelijk toepasbare techniek te stimuleren en mogelijk te maken. Na realisatie van het kunststof filterscherf bij deeltraject Salmsteke wordt de opgedane kennis en ervaring bij het ontwerpproces en de uitvoering opgenomen in een geüpdatet versie van voorliggende richtlijn. Daarna zal deze richtlijn door DIV worden aangevuld met nieuwe kennis en ervaring, die met de toepassing van deze richtlijn worden opgedaan, in nauwe samenspraak met de sector.

Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden en Mourik Infra B.V. danken alle betrokkenen die op enigerlei wijze hebben bijgedragen aan de ontwikkeling van het kunststof filterscherf en de totstandkoming van deze richtlijn.

Symbolenlijst

Latijnse symbolen

Symbol	Beschrijving	Eenheid
a	Mechanismegevoelige fractie van de dijktrajectlengte	[-]
A	Doorsnede oppervlak van het kunststof profiel	[mm ² /m]
a_{scherm}	Adhesie	[kN/m ²]
b	Lengtemaat die de intensiteit van het lengte-effect weergeeft binnen de mechanismegevoelige lengte van het dijktraject	[m]
$b_{\text{achterkant}}$	Benodigde afstand aan de achterkant van het filterscherm tijdens inbrengen	[m]
b_{voorkant}	Benodigde afstand aan de voorkant van het filterscherm tijdens inbrengen	[m]
$b_{\text{werksleuf}}$	Breedte van de werksleuf	[m]
b_{wig}	Breedte van de passieve wig	[m]
$B_{\text{filter,eq}}$	Invloedsgebied van het filterscherm	[m]
c'	Cohesie van de grond (effectieve waarde)	[kN/m ²]
C_u	Uniformiteitscoëfficiënt korrelverdeling (= d_{60}/d_{10})	[-]
C_{uS}	Uniformiteitscoëfficiënt in-situ zand (= d_{60S}/d_{10S})	[-]
C'_u	Lineaire uniformiteitscoëfficiënt korrelverdeling (= d'_{60}/d'_{10})	[-]
C'_{uF}	Lineaire uniformiteitscoëfficiënt filterzand (= d'_{60F}/d'_{10F})	[-]
C'_{uS}	Lineaire uniformiteitscoëfficiënt in-situ zand (= d'_{60S}/d'_{10S})	[-]
d	Dikte van de deklaag in het achterland	[m]
d_{profiel}	Inwendige cirkeldiameter van de kokers van het kunststof profiel	[m]
$d_{\text{sterkte/stijfheid}}$	Minimale diameter van de trilnaald om voldoende sterkte en stijfheid te garanderen	[m]
$d_{\text{trilnaald}}$	Diameter van de trilnaald	[m]
d_x	Zeefmaat die $x\%$ van de massa van de korrels laat passeren	[μm]
d_{xF}	Zeefmaat die $x\%$ van de massa van de korrels van het filterzand laat passeren	[μm]
d_{xS}	Zeefmaat die $x\%$ van de massa van de korrels van het in-situ zand laat passeren	[μm]
d'_x	Gelineariseerde zeefmaat die $x\%$ van de massa van de korrels laat passeren	[μm]
d'_{xF}	Gelineariseerde zeefmaat die $x\%$ van de massa van de korrels van het filterzand laat passeren	[μm]
d'_{xS}	Gelineariseerde zeefmaat die $x\%$ van de massa van de korrels van het in-situ zand laat passeren	[μm]
$d'_{15F,gem}$	Gemiddelde waarde van d'_{15F}	[μm]
$d'_{15F,kar}$	Karakteristieke waarde van d'_{15F}	[μm]
$d'_{15F,kar,gem}$	Gemiddelde waarde van $d'_{15F,kar}$	[μm]
$d'_{15F,kar,max}$	Maximale waarde van $d'_{15F,kar}$	[μm]
EA_{kar}	Karakteristieke axiale stijfheid van het kunststof profiel per strekkende meter	[kN/m]

Symbool	Beschrijving	Eenheid
EI_{kar}	Karakteristieke buigstijfheid van het kunststof profiel per strekkende meter	[kNm ² /m]
$h_{afzuigen}$	Hoogte boven de perforaties waarop de zuigmond in de kokers wordt geplaatst tijdens het afzuigen	[m]
$h_{cleaning}$	Hoogte onder en boven de perforaties tot waar gereinigd wordt	[m]
h_i	Inbedding in grondlaag i	[m]
$h_{installatie}$	Hoogte waarover het kunststof profiel bij installatie boven de onderkant van de werksleuf uitsteekt	[m]
$h_{perforaties}$	Hoogte waarover de kokers geperforeerd zijn	[m]
$h_{profiel}$	Aanlegdiepte onder maaiveldniveau van omliggend terrein	[m]
$h_{trilblok}$	Hoogte van het trilblok	[m]
h_{werk}	Benodigde werkhoogte onder de makelaar	[m]
$h_{werksleuf}$	Diepte van de werksleuf onder maaiveldniveau	[m]
$h_{zandinloop}$	Laagdikte van het ingestroomde in-situ zand in de kokers tijdens installatie	[m]
$h_{zweklei}$	Laagdikte van de zweklei aan onderkant van de kokers voor afdichting	[m]
I_d	Relatieve dichtheid	[%]
$k_{filtermateriaal}$	Doorlatendheid van het filterzand	[m/d]
$k_{filter,eq}$	Equivalentente doorlatendheid van het geperforeerde deel van het filterscherm	[m/d]
$k_{filter,eq,m}$	Equivalentente doorlatendheid van het geperforeerde deel van het filterscherm op basis van modellering	[m/d]
$k_{in-situ}$	Doorlatendheid van het in-situ zand	[m/d]
k_{pvc}	Doorlatendheid van het PVC	[m/d]
$k_{pvc,open,eq}$	Equivalentente doorlatendheid van de geperforeerde delen van de koker	[m/d]
L	Minimumafstand tussen de perforaties aan de voor- en achterkant van het kokerprofiel	[mm]
L_{dijk}	Lengte van het dijktraject	[m]
$L_{aanwezig}$	Aanwezige horizontale kwelweglengte	[m]
L_{extra}	Benodigde extra strekking met een filterscherm ten behoeve van achterloopsheid	[m]
$l_{overlengte}$	Extra lengte van de trilnaald	[m]
$l_{profiel}$	Ontwerplengte van het kunststof profiel	[m]
L_{tekort}	Horizontaal kwelweglengtetekort	[m]
$l_{tolerantie}$	Productietolerantie in de lengte van de kunststof profielen	[m]
$l_{trilnaald}$	Lengte van de trilnaald	[m]
$L_{vereist}$	Benodigde horizontale kwelweglengte	[m]
M	Berekend buigend moment in profielen van filterscherm	[kNm/m]
n	Aantal grondlagen dat het filterscherm doorsnijdt	[-]
n	Aantal kunststof profielen binnen vak aanwezig	[-]
N	Aantal waarnemingen (metingen van een parameter)	[-]
N	Berekende normaalkracht in profielen van filterscherm	[kN/m]
N_{dsn}	Lengte-effect factor voor een doorsnede	[-]
O_F	Breedte van de perforatie	[mm]

Symbol	Beschrijving	Eenheid
$O_{F,F}$	Toelaatbare perforatiebreedte voor het filterzand	[mm]
$O_{F,max}$	Maximaal toelaatbare breedte van de perforatie	[mm]
$O_{F,S}$	Toelaatbare perforatiebreedte voor het in-situ zand	[mm]
$O_{F,S,kar}$	Karakteristieke ondergrenswaarde van $O_{F,S}$	[mm]
P_{eis}	Faalkanseis (norm) van het dijktraject	[1/jaar]
$P_{eis;dsn}$	Faalkanseis per doorsnede	[1/jaar]
$P_{eis;dsn;STBI}$	Faalkanseis voor het faalmechanisme binnenwaartse macrostabiliteit op doorsnedeniveau	[1/jaar]
P_f	Faalkans	[1/jaar]
$P_{f,dsn}$	Faalkans van de doorsnede	[1/jaar]
$P_f(\text{doorloopsheid})$	Kans op doorloopsheid door uit het slot lopen	[1/jaar]
$P_f(\text{onderloopsheid})$	Kans op onderloopsheid door verstopping	[1/jaar]
$P_f(\text{voorloopsheid})$	Kans op voorloopsheid door verstopping	[1/jaar]
$P_{STBI;filter}$	Faalkanseis op doorsnedeniveau voor het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts gegeven een verstopping van het filter	[1/jaar]
$P_{uit\ het\ slot,per\ vak}$	Kans dat er na de uitvoering binnen een vak minstens één profiel ongemerkt uit het slot zit	[-]
$P(A)$	Kans dat verstopping niet gedetecteerd en hersteld is voor hoogwater	[-]
$P(B)$	Kans dat zandmeevoerende wel niet is gedetecteerd of dat de noodmaatregel niet succesvol is	[-]
$P(C)$	Kans op opbarsten bovenstrooms van het filterscherm gegeven verstopping	[1/jaar]
$P(D)$	Kans op heave bovenstrooms van het filterscherm gegeven verstopping	[1/jaar]
$P(E)$	Kans op heave aan benedenstroomse zijde van het filterscherm	[1/jaar]
$P(F)$	Kans op opbarsten ter plaatse van uittredepunt	[1/jaar]
$P(F_d)$	Faalkans veroorzaakt door doorloopsheid	[1/jaar]
$P(F_{dsn})$	Faalkans van het filterscherm door significante bedreigingen in een doorsnede	[1/jaar]
$P(F_o)$	Faalkans veroorzaakt door onderloopsheid	[1/jaar]
$P(F_v)$	Faalkans veroorzaakt door voorloopsheid	[1/jaar]
$P(F S_i)$	Kans op falen gegeven scenario S_i	[1/jaar]
$P(F uit\ slot)$	Kans op falen gegeven uit-het-slot-lopen	[1/jaar]
$P(F verstopping)$	Kans op falen gegeven een verstopping	[1/jaar]
$P(G)$	Kans op heave ter plaatse van uittredepunt	[1/jaar]
$P(H)$	Kans op horizontale pipegroei/terugschrijdende erosie gegeven verstopping en een uittredepunt voor het scherm	[1/jaar]
$P(I)$	Kans dat uit-het-slot-lopen niet gedetecteerd en hersteld wordt voor hoogwater	[-]
$P(\text{pipegroei tot scherm})$	Kans op pipegroei tot filterscherm	[1/jaar]
$P(S_i)$	Kans op verschillende bedreigingen en het gewenste gedrag (scenario's)	[1/jaar]

Symbool	Beschrijving	Eenheid
$P(\text{uit slot})$	Kans dat een individueel kunststof profiel bij installatie uit het slot loopt	[-]
$P(\text{verstopping})$	Kans op (chemische/bacteriologische) verstopping	[-]
R_a	Het gemiddelde van de pieken en dalen die met een ruwheidsmeter binnen een bepaalde steekproeflengte wordt gemeten	[μm]
R_{inter}	Reductiefactor voor interfacesterkte	[-]
SF	Vereiste stabiliteitsfactor tegen macro-instabiliteit	[-]
$t_{N-1}^{0,95}$	Student t-factor bij N waarnemingen en een 5% onderschrijdingskans	[-]
w	Gewicht van het filterscherm	[kN/m/m]
W	Elastisch weerstandsmoment van het kunststof profiel	[cm ³ /m]

Griekse symbolen

Symbool	Beschrijving	Eenheid
α_F	Dichtheidsfactor op d'_{15F} van het filterzand gegeven de lineaire uniformiteitscoëfficiënt van het filterzand	[-]
α_s	Paalklassefactor voor de schachtwrijving bij een op druk belaste paal	[-]
α_S	Dichtheidsfactor op d'_{15S} van het in-situ zand gegeven de lineaire uniformiteitscoëfficiënt van het in-situ zand	[-]
$\alpha_{s;klei}$	Paalklassefactor voor de schachtwrijving in klei bij een op druk belaste paal	[-]
α_t	Paalklassefactor voor de schachtwrijving bij een op trek belaste paal	[-]
$\alpha_{t;klei}$	Paalklassefactor voor de schachtwrijving in klei bij een op trek belaste paal	[-]
$\alpha_{t;zand}$	Paalklassefactor voor de schachtwrijving in zand bij een op trek belaste paal	[-]
$\beta_{eis,dsn}$	Geëiste betrouwbaarheidsindex voor een doorsnede	[-]
β_F	Correctiefactor op de installatiefactor voor veranderingen van de dichtheid van het filtermateriaal in de tijd	[-]
β_S	Installatiefactor die de ontspanning of verdichting beschrijft van het in-situ zand tijdens het installeren van het filterscherm	[-]
$\beta_{STBI;filter}$	Geëiste betrouwbaarheidsindex op doorsnedeniveau voor het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts bij verstopping van het filter	[-]
δ	Wandwrijvingshoek	[°]
γ_{add}	Belastingeffect factor	[-]
$\gamma_{b;GEO}$	Geotechnische schematiseringsfactor	[-]
$\gamma_{b;STR}$	Constructieve schematiseringsfactor	[-]
γ_d	Modelfactor	[-]
$\gamma_{d;vervorming}$	Modelfactor op de berekende vervormingen uit een eindige-elementenberekening	[-]
γ_i	Reductiefactor ten gevolge van installatie	[-]
γ_n	Schadefactor	[-]
$\gamma_{n;STBI}$	Schadefactor voor de geotechnische stabiliteit	[-]

Symbol	Beschrijving	Eenheid
$\gamma_{n;STPH}$	Schadefactor voor de snedekrachten	[-]
γ_v	Reductiefactor ten gevolge van verstopping	[-]
μ_{ln}	Gemiddelde waarde van de natuurlijke logaritme van een parameter	[variabel]
$\mu_{lnO_{F,S}}$	Gemiddelde waarde van de natuurlijke logaritme van de toelaatbare perforatiebreedte voor het in-situ zand	[mm]
μ_{lnS}	Gemiddelde waarde van de natuurlijke logaritme van $\alpha_S \beta_S d'_{85S}$	[μm]
ξ	Reductiefactor voor de perforatiebreedte ten gevolge van biofilm op de perforaties	[-]
σ	Standaardafwijking van een parameter	[variabel]
σ_{ln}	Standaardafwijking van de natuurlijke logaritme van een parameter	[variabel]
$\sigma_{lnO_{F,S}}$	Standaardafwijking van de natuurlijke logaritme van de toelaatbare perforatiebreedte voor het in-situ zand	[mm]
σ_{lnS}	Standaardafwijking van de natuurlijke logaritme van $\alpha_S \beta_S d'_{85S}$	[μm]
$\sigma_{N;scherp}$	Normaalspanning in de uiterste vezel van het kunststof profiel	[N/mm ²]
σ'_v	Effectieve verticale spanning (verticale korrelspanning)	[kPa]
τ_{rel}	Relatieve schuifspanning	[-]
ϕ_{AL}	Stijghoogte onder de deklaag in het achterland	[m NAP]
ϕ'	Effectieve hoek van inwendige wrijving	[°]
ϕ'_i	Effectieve hoek van inwendige wrijving van grondlaag i	[°]
ϕ'_k	Karakteristieke waarde van de effectieve hoek van inwendige wrijving	[°]
Φ^{-1}	Inverse van de cumulatieve normale standaardverdeling	[-]
ω	Faalkansruimtefactor	[-]
ω_{pipe}	Weerstand in de pipe	[m/m]

Begrippenlijst

Begrip	Betekenis
Piping	Het optreden van zandtransport onder een cohesieve deklaag als gevolg van terugschrijdende erosie bij een hoog verval.
Dichtscherm	Het bovenste deel van het kunststof profiel tot aan de bovenkant van de perforaties.
Blinde buis	Het deel van het kunststof profiel vanaf de onderkant van de perforaties tot aan de onderzijde van het profiel.
Perforaties	Verticale sleuven (openingen) in de wanden van de kokers van het kunststof profiel.
Flens	Het vlakke deel van het kunststof profiel tussen de kokers.
Stalen punt	Stalen voetplaat met opstaande rand aan de onderzijde van de kokers van het kunststof profiel.
Deeltraject Salmsteke	De dijkstrekking binnen het dijkversterkingsproject Sterke Lekdijk, gelegen tussen dijkpalen 89 en 108 nabij Lopik (Provincie Utrecht).
Filter	Het geheel van het opgespannen in-situ zand, het filterzand en de geperforeerde kokerwanden van het filterscherf.
Filterzand	Het zand dat in de kokers van het kunststof profiel is aangebracht.
In-situ zand	Het van nature aanwezige zand in de ondergrond.
Granulair geometrisch gesloten filter	Een filter waarbij zowel het filterzand als de perforaties het uitspoelen van korrels uit het in-situ zand tegenhoudt zonder dat het filterzand uit de kokers kan spoelen.
Voorloopsheid	Het ontstaan van een doorgaande pipe met een uittredepunt aan de rivierzijde van het filterscherf. Het filterscherf bevindt zich niet in het traject van de pipe.
Onderloopsheid	Het ontstaan van een doorgaande pipe met een uittredepunt aan de landzijde van het filterscherf. De pipe groeit onder het filterscherf door.
Doorloopsheid	Het ontstaan van een doorgaande pipe met een uittredepunt aan de landzijde van het filterscherf. De pipe groeit door de perforaties van het filterscherf heen.
Bovenloopsheid	Het ontstaan van een doorgaande pipe met een uittredepunt ter plaatse van: <u>Variant 1:</u> het filterscherf. De pipe groeit door de koker en één geperforeerde wand van het filterscherf heen. <u>Variant 2:</u> de landzijde van het filterscherf. De pipe groeit over het filterscherf heen.
Achterloopsheid	Het ontstaan van een doorgaande pipe met een uittredepunt aan de landzijde van het filterscherf. De pipe groeit langs het filterscherf.

Lijst van afkortingen

Afkorting	Betekenis
AL	Achterland
BGT	Bruikbaarheidsgrenstoestand
BIK	Binnenkruin van de kering
BiTa	Binnentalud van de kering
BIT	Binnenteen van de kering
BUK	Buitenkruin van de kering
BUT	Buitenteen van de kering
CAUc triaxiaalproef	Triaxiaalproef met anisotrope consolidatiefase en ongedraineerde afschuiffase bij druk
CRS-proef	Constant rate of strain proef
DIV	De innovatieversneller
DSS-proef	Direct simple shear proef
EEM	Eindige elementen methode
FMECA	Failure Mode Effect and Criticality Analysis
GABI	Faalmechanisme afschuiving grasbekleding binnentalud
GZB	Grofzandbarrière
HDSR	Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden
HS-model	Hardening Soil constitutief grondmodel
HWBP	Hoogwaterbeschermingsprogramma
OI	Ontwerpinstrumentarium
OOO	Onderzoek ontplofbare oorlogsresten
POVM	Project overstijgende verkenning macrostabiliteit
PPE	POVM Publicatie Eindige-elementenmethode (POV Macrostabiliteit, 2020a)
PPL	POVM Publicatie Langsconstructies (POV Macrostabiliteit, 2020b)
PVC	Polyvinylchloride
SSC-model	Soft Soil Creep constitutief grondmodel
STBI	Faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts
STMI	Faalmechanisme microstabiliteit
STPH	Faalmechanisme piping
TRL	Technology Readiness Level
TRWD	Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken (TAW, 2004)
UGT	Uiterste grenstoestand
VZG	Verticaal zanddicht geotextiel
WBI	Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017
WBN	Waterstand bij norm (in het beschouwde zichtjaar)
WS	Waterstand

Lijst van figuren

Figuur 1-1. Locatie van het deeltraject Salmsteke (boven) en de trajectindeling van Sterke Lekdijk (onder).....	18
Figuur 1-2. Principeschets van het kunststof filterscherm met Prolock profielen.....	20
Figuur 1-3. Generieke structuur van de DIV-publicatie Piping (De Innovatieversneller, 2022).....	23
Figuur 2-1. Faalmechanisme piping uit onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen (Rijkswaterstaat, 2012).	29
Figuur 2-2. Gebeurtenissenboom kunststof filterscherm (groter weergegeven in bijlage B). In de gebeurtenissen-boom heeft elk geel vierkant een gezamenlijke kans (of de gebeurtenis optreedt of niet) van 1. De blauwe driehoeken geven tezamen de kans op 'geen overstroming' .	31
Figuur 2-3. Primair faalpad kunststof filterscherm: doorloopsheid door te fijn in-situ zand.	33
Figuur 2-4. Foutenboom van de bedreiging 'voorloopsheid door verstopping' (afhankelijke gebeurtenissen zijn met blauwe pijlen weergegeven en onafhankelijke gebeurtenissen met oranje pijlen).	36
Figuur 2-5. Foutenboom van de bedreiging 'onderloopsheid door verstopping' (afhankelijke gebeurtenissen zijn met blauwe pijlen weergegeven en onafhankelijke gebeurtenissen met oranje pijlen).	39
Figuur 2-6. Foutenboom van de bedreiging 'doorloopsheid door uit het slot lopen' (afhankelijke gebeurtenissen zijn met blauwe pijlen weergegeven en onafhankelijke gebeurtenissen met oranje pijlen).	41
Figuur 3-1. Ontwerpproces van het kunststof filterscherm.....	45
Figuur 5-1: Randvoorwaarden voor de positionering van het kunststof filterscherm binnen het dijkprofiel.	52
Figuur 6-1: Dimensionering van de uniforme profiellengte binnen een (dijk)vak.	54
Figuur 7-1. Schematische weergave van boogwerking voor een opening in een geotextiel.....	57
Figuur 7-2. Lineaire uniformiteitscoëfficiënt $C'_u = d'_{60}/d'_{10}$ (in rood).	58
Figuur 7-3. Retentiecriteriën voor geotextiele filters volgens Giroud, met in rood de relatie van Terzaghi.	59
Figuur 7-4. Grenzen toelaatbare verhouding d'_{15F}/d'_{85S} volgens Giroud voor verschillende dichtheden van het in-situ zand, met in rood de relatie van Terzaghi.	59
Figuur 7-5. Kritieke dichtheid van zand, afhankelijk van de schuifvervorming (Jefferies & Shuttle, 2020).	61
Figuur 7-6. Minimumafstand L tussen de perforaties in de voor- en achterkant van het kokerprofiel en ontwerpregels volgens (Wittmann, 1980) en (TAW, 1985).....	62
Figuur 7-7. Grenzen toelaatbare verhouding $d'_{15F, kar, max}/(\alpha_S \beta_S d'_{85S})_{kar}$ volgens Giroud.	68
Figuur 8-1. Beschouwing effecten doorlatendheid van het filterscherm ($k_{filter, eq}$ met $B_{filter, eq}$ en k_{pvc}) op dijkdoorsnedeniveau.	71
Figuur 8-2. Schematisering dijkdoorsnede inclusief belangrijke geohydrologische parameters t.b.v. beschouwing heave situatie (Lekensembel, 2022).	73
Figuur 8-3. Rekenschema in eindige-elementenberekeningen met bijbehorende factoren en toetsingen voor het kunststof filterscherm.	78
Figuur 11-1. Relatie tussen eisen uit ontwerp-, uitvoerings- en beheer en onderhoudsfase met bijbehorende monitoring, grondonderzoek en gegevensverzameling.....	93

Figuur 12-1. Relevante systeemonderdelen voor de realisatie van een filterscherm met kunststof profielen.	94
Figuur 12-2. Geperforeerd kunststof profiel met maatvoering.	96
Figuur 12-3. Stalen punt met maatvoering.	98
Figuur 12-4. Kunststof afsluiting van bovenkant koker (opzetstuk met schroefdeksel).....	100
Figuur 13-1. Werkprocessen voor de aanleg van een filterscherm met geperforeerde kunststof profielen. Beginsituatie, stap 1 t/m stap 7 en eindsituatie.....	102
Figuur 13-2. Afmetingen werksleuf.	104
Figuur 13-3. Aansluiting stalen punt op trilnaald in relatie tot profiellengte.	108
Figuur 13-4. Uitvoering stap 3 – verwijderen of voorkomen zandinloop. Optie A (links): Spoelen achteraf. Optie B (rechts): Vullen direct na installatie.....	110
Figuur 13-5. Werkwijze stap 4 – reinigingsproces. Afsluiten (links). Schoonspuiten (midden). Afzuigen (rechts).	112
Figuur 13-6. Schets aanbrengen filterzand.	115

Lijst van tabellen

Tabel 1-1. Trajectindeling van Sterke Lekdijk met planning van de versterkingsopgave.	19
Tabel 1-2. Overzicht van documenten die ten grondslag liggen aan de ontwikkeling van het kunststof filterscherm.	24
Tabel 2-1. Voorbeeld van bedreigingen per projectfase.	34
Tabel 4-1. Richtlijnen voor veld- en laboratoriumonderzoek ten behoeve van het ontwerp.	48
Tabel 7-1. Formules retentiecriteriën voor geotextiele filters volgens (Giroud, 2003).	58
Tabel 7-2. Minimale filterdiktes (L in figuur 7-6) voor retentie van een granulair filter.	62
Tabel 7-3. Beschikbare handelsgraderingen filtermateriaal.	64
Tabel 7-4. Correlatie dichtheid en α_S -waarden voor in-situ zand.	65
Tabel 7-5. Maximale perforatiebreedte (incl. nauwkeurigheidsmarge) voor het in-situ zand, zie ook figuur 7-3.	65
Tabel 7-6. Correlatie dichtheid en α_F -waarden voor filterzand.	66
Tabel 7-7. Correlatie maximale perforatiebreedte (incl. nauwkeurigheidsmarge) voor filterzand.	66
Tabel 7-8. Student t-toets waarden.	66
Tabel 8-1. Te verrichten toetsingen op het ontwerp van het kunststof filterscherm.	70
Tabel 8-2. Uitgangspunten geohydrologische beschouwing van heave achter filterscherm (Lekensembles, 2022).	74
Tabel 8-3. Mechanische eigenschappen van het kunststof filterscherm, afgeleid op basis van het productblad van het Prolock Sigma scherm (Profextru, 2021).	77
Tabel 8-4. Limietspanningen voor het kunststof filterscherm bij verschillende zichtjaren (L.J. van der Meer, 2023).	82
Tabel 8-5. Gehanteerde uitgangspunten met betrekking tot de limietspanning.	82
Tabel 8-6. Overzicht van de invloed van het kunststof filterscherm op de directe faalmechanismen van de dijk.	83
Tabel 8-7. Overzicht van de invloed van het optreden van de directe faalmechanismen van de dijk op het functioneren van het kunststof filterscherm.	83
Tabel 12-1. Materiaalaspecten geperforeerde kunststof profielen.	96
Tabel 12-2. Materiaalaspecten stalen punt.	98
Tabel 12-3. Materiaalaspecten filterzand.	99
Tabel 12-4. Materiaalaspecten kunststof afsluiting.	100
Tabel 12-5. Materiaalaspecten aanvulklei.	101
Tabel 13-1. Uitvoeringsaspecten aanleg werksleuf (werkproces stap 1).	105
Tabel 13-2. Uitvoeringsaspecten installeren kunststof profielen (werkproces stap 2).	109
Tabel 13-3. Afwegingskader voor keuze spoelen of vullen kokers (werkproces stap 3).	110
Tabel 13-4. Uitvoeringsaspecten verwijderen zandinloop (werkproces stap 3).	111
Tabel 13-5. Uitvoeringsaspecten reinigen filterperforaties (werkproces stap 4).	114
Tabel 13-6. Uitvoeringsaspecten aanbrengen filterzand (werkproces stap 5).	115
Tabel 13-7. Uitvoeringsaspecten afsluiten bovenkant koker (werkproces stap 6).	116
Tabel 13-8. Uitvoeringsaspecten afwerken deklaag (werkproces stap 7).	117
Tabel 14-1. Opleverdossier (as-built situatie).	120

Inhoudsopgave

Voorwoord	4
Symbolenlijst	5
Begrippenlijst.....	10
Lijst van afkortingen	11
Lijst van figuren	12
Lijst van tabellen.....	14
1 Inleiding	18
1.1 Sterke Lekdijk en Salmsteke	18
1.2 Kunststof filterscherm	19
1.2.1 Werkingsprincipe.....	19
1.2.2 Installatiemethode	20
1.2.3 Duurzaamheid	21
1.2.4 Verschillen met andere filtertechnieken.....	21
1.3 Relatie met De Innovatieversneller	22
1.4 Ontwikkeltraject kunststof filterscherm	23
1.4.1 Ontwikkelstappen.....	23
1.4.2 Ontwikkelstadium.....	23
1.5 Bruikbaarheid van de richtlijn	24
1.5.1 Status	24
1.5.2 Toepassingsgebied	24
1.6 Leeswijzer	25
Deel A – Systeem en veiligheid	27
2 Veiligheidsbenadering	28
2.1 Inleiding	28
2.2 Aanpak onderbouwen veiligheid.....	28
2.3 Verhaal van de innovatie.....	28
2.4 Toelaatbare overstromingskans.....	31
2.5 Onderbouwen veiligheid op basis van FMECA.....	32
2.5.1 Gewenst gedrag en primaire faalpad	32
2.5.2 Mogelijke bedreigingen en maatregelen	34
2.5.3 Significante bedreigingen	35
2.6 Uitwerking significante bedreigingen met faalpaden	35
2.6.1 Voorloopsheid door verstopping	36
2.6.2 Onderloopsheid door verstopping	38
2.6.3 Doorloopsheid door uit het slot lopen	41
2.7 Overzicht handelingsperspectief.....	42
Deel B – Ontwerp	44
3 Inleiding	45
4 Benodigde onderzoeksgegevens	46
4.1 Inleiding	46
4.2 Milieukundig onderzoek.....	46
4.3 Geotechnisch en geohydrologisch onderzoek	46
5 Positionering.....	51
6 Profiellengte	53

7	Filterontwerp	55
7.1	Inleiding	55
7.2	Interne stabiliteit van grond	55
7.3	Filtercriteria	56
7.3.1	Inleiding	56
7.3.2	Het permeabiliteitscriterium	56
7.3.3	Het retentie criterium	57
7.4	Benodigde gegevens voor het bepalen van de filterwerking	63
7.5	Stappenplan ontwerp filterfunctie	63
8	Toetsingen	70
8.1	Geohydrologische toetsing	70
8.1.1	Benodigde uitgangspunten rekenmodel	70
8.1.2	Rekenmodel	71
8.1.3	Geohydrologische toetsen	72
8.2	Mechanische toetsing	75
8.2.1	Benodigde uitgangspunten rekenmodel	75
8.2.2	Opzet van het rekenmodel	76
8.2.3	Negatieve kleeft	79
8.2.4	Schadefactor	79
8.2.5	Mechanische toetsen	80
8.3	Raakvlakken met andere faalmechanismen	83
8.3.1	Macrostabiliteit binnenwaarts	84
8.3.2	Grasbekleding afschuiving binnentalud	85
9	Ontwerpaspecten bij de aansluitingen	86
10	Robuustheid in het ontwerp	88
10.1	Profiellengte	88
10.2	Filterontwerp	88
10.3	Toetsingen	88
	Deel C – Uitvoering	90
11	Inleiding	91
11.1	Kader	91
11.2	Installatiemethode	91
11.3	Relatie tussen ontwerp, uitvoering en beheer	92
12	Materiaalaspecten	94
12.1	Geperforeerde kunststof profielen	95
12.2	Stalen punt	97
12.3	Filterzand	99
12.4	Kunststof afsluiting	100
12.5	Aanvulklei	101
13	Werkproces en uitvoeringsaspecten	102
13.1	Aanleg werksleuf (stap 1)	103
13.2	Installeren kunststof profielen (stap 2)	105
13.3	Verwijderen zandinloop (stap 3)	109
13.4	Reinigen filterperforaties (stap 4)	112
13.5	Aanbrengen filterzand (stap 5)	114
13.6	Afsluiten bovenkant koker (stap 6)	116
13.7	Afwerken deklaag (stap 7)	117
14	Monitoring en uitvoeringsgegevens	118

14.1	Nulmeting	118
14.2	Uitvoeringsmonitoring	119
14.3	Opleverdossier.....	119
14.4	Ervaringsdatabase	120
15	Bijzondere aspecten	122
15.1	Uitvoeringsrisico's en mitigerende maatregelen	122
15.2	Omgevingsbeïnvloeding	123
15.3	Aansluiting op andere constructies.....	124
Deel D – Gebruiksfase.....		125
16	Beheer en onderhoud.....	126
17	Aanbevelingen voor vervolgonwikkelingen	127
Referenties		129
Bijlagen		
Bijlage A	FMECA-tabel	132
Bijlage B	Fouten- en gebeurtenissenboom	139
Bijlage C	Equivalente doorlatendheid	147
Bijlage D	Interfacesterkte reductiefactor	150
Bijlage E	Achterloopsheid	154

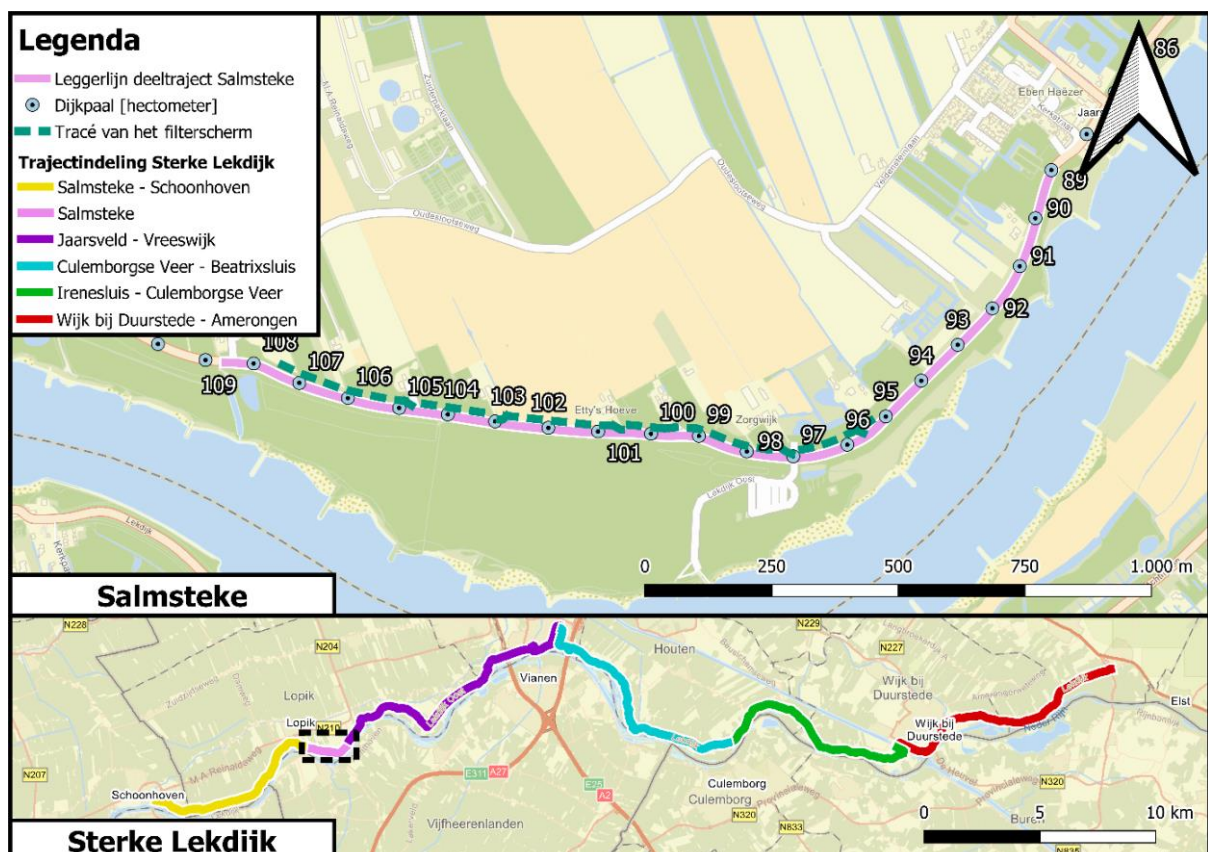
1 Inleiding

1.1 Sterke Lekdijk en Salmsteke

De Sterke Lekdijk is een primaire waterkering langs de Lek en ligt tussen Schoonhoven nabij de veerpont en Amerongen bij het Kasteel Amerongen. De Sterke Lekdijk bestaat uit twee normtrajecten: normtraject 15-1 tussen Schoonhoven en de Beatrixsluis in Nieuwegein en normtraject 44-1 tussen de Beatrixsluis in Nieuwegein en Amerongen.

Het veiligheidsoordeel voor de Sterke Lekdijk is in 2017 voor normtraject 44-1 en in 2018 voor normtraject 15-1 vastgesteld. Uit beide beoordelingen is gebleken dat de Sterke Lekdijk op trajectniveau op zowel de signaleringsnorm als de ondergrensnorm is afgekeurd. De grootste bijdrage aan de faalkans werd vastgesteld voor het toetsspoor piping. Om aan de norm uit de Waterwet te kunnen voldoen, wordt de Sterke Lekdijk versterkt.

Voor de versterkingsopgave is de Sterke Lekdijk in zes deeltrajecten opgesplitst zoals in figuur 1-1 en tabel 1-1 is weergegeven. Het eerste deeltraject dat wordt versterkt is Salmsteke. Binnen deeltraject Salmsteke wordt de dijk tussen dijkpalen 95,5 en 107,5 versterkt door middel van een innovatieve oplossing tegen piping. Voor deeltraject Salmsteke is gekozen om een kunststof filterscherm met Prolock profielen als innovatieve maatregel te ontwikkelen (Brekelmans, 2020) en vervolgens toe te passen (Veenbergen, 2023). Voor het ontwerpen van het kunststof filterscherm is voorliggende project-specifieke richtlijn opgesteld voor deeltraject Salmsteke.



Figuur 1-1. Locatie van het deeltraject Salmsteke (boven) en de trajectindeling van Sterke Lekdijk (onder).

Tabel 1-1. Trajectindeling van Sterke Lekdijk met planning van de versterkingsopgave.

Deeltraject van Sterke Lekdijk	Onderdeel van normtraject	Lengte deeltraject [km]	Planning van de versterking
Salmsteke – Schoonhoven	15-1	8,34	Verkenningfase: 2021 Planuitwerking: 2022–2023 Realisatiefase: 2024–2027
Salmsteke	15-1	1,95	Verkenningfase: 2017–2021 Planuitwerking: 2021 Realisatiefase: 2022–2024
Jaarsveld – Vreeswijk	15-1	11,35	Verkenningfase: 2021–2022 Planuitwerking: 2023–2024 Realisatiefase: 2025–2029
Culemborgse Veer – Beatrixsluis	44-1	10,11	Verkenningfase: 2021 Planuitwerking: 2021–2022 Realisatiefase: 2023–2026
Irenesluis – Culemborgse Veer	44-1	9,54	Verkenningfase: 2021–2023 Planuitwerking: 2024–2025 Realisatiefase: 2026–2031
Wijk bij Duurstede – Amerongen	44-1	9,80	Verkenningfase: 2017–2020 Planuitwerking: 2021–2022 Realisatiefase: 2023–2026

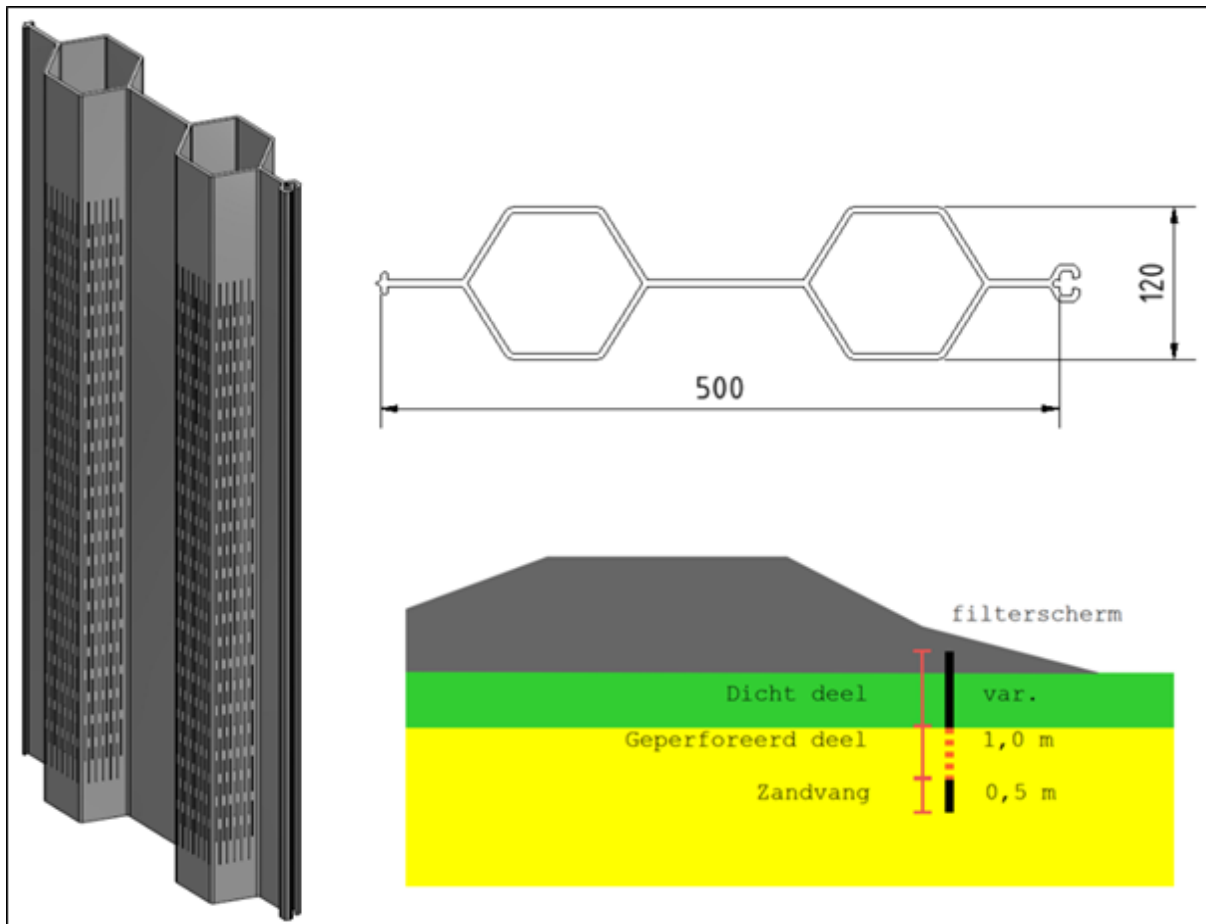
1.2 Kunststof filterscherm

1.2.1 Werkingsprincipe

Het kunststof filterscherm is een maatregel tegen piping gebaseerd op het filterwerkingsprincipe van een granulair geometrisch gesloten filter. Het filterscherm bestaat uit 0,50 m brede kunststof profielen (Prolock profielen) die bestaan uit twee holle kokers verbonden met een flens in de vorm van een honingraat. De profielen worden vervaardigd door middel van extrusie waarbij de nominale wanddikte van de flenzen 5,0 mm en van de kokerwanden 4,5 mm bedraagt. De maximale produceerbare lengte bedraagt 12 m, daaronder is iedere lengte leverbaar.

De wanden van de kokers zijn over een beperkte lengte voorzien van perforaties waardoor het filterscherm waterdoorlatend wordt. De holle kokers worden gevuld met filterzand waarvan de samenstelling is afgesteld op de piping-gevoelige in-situ zandlaag. Door het aangebrachte filterzand krijgt het scherm zijn volledige filterwerking: het filterscherm laat het grondwater (nagenoeg) ongehinderd door en verhindert zandtransport. Doordat het filterzand bijdraagt aan de filterwerking, kunnen de perforaties breder worden gemaakt dan de korreldiameter van het in-situ zand. Met deze filterwerking grijpt het kunststof filterscherm direct in op het deelmechanisme terugschrijdende erosie en is het hiermee een effectieve maatregel tegen piping. Een principeschets van het kunststof filterscherm met Prolock profielen is gegeven in figuur 1-2.

Het kunststof filterscherm wordt in de binnenteen van het dijkprofiel ingebracht tot minstens 1,50 m in de piping-gevoelige zandlaag en daarna onder maaiveld afgewerkt. De kokerwanden zijn voorzien van perforaties over een hoogte van 1,00 m. Hierboven is het filterscherm dicht, dat wil zeggen zonder perforaties. Ook onder de perforaties is nog 0,50 m dichtschermbaan aanwezig dat fungeert als zandvang. De zandvang is bedoeld voor het opvangen van zandkorrels die tijdens de installatie de koker in kunnen stromen via de perforaties of de onderkant. De zandvang dient ook als ruimte voor het afsluiten van de onderkant met een kleiprof en als werkruimte voor het reinigingsmateriaal.



Figuur 1-2. Principeschets van het kunststof filterscherm met Prolock profielen.

1.2.2 Installatiemethode

De installatie van de kunststof profielen van het filterscherm geschiedt door trillen. Bij deze techniek worden trilnaalden in beide kokers geschoven die aan de onderkant van de profielen aansluiten op vlakke stalen punten. De energie van het trilblok wordt zodoende overgebracht op de stalen punten waardoor de grond opzij wordt gedrukt. Het profiel zakt er vervolgens onder de push-down van het trilblok achteraan. De stalen punten zijn zeshoekig van vorm en blijven na installatie achter in de grond. Na installatie worden de perforaties gereinigd. Tijdens installatie door de deklaag heen bestaat immers het risico dat de perforaties dichtslibben met klei/veen waardoor de doorlatendheid van het filterscherm afneemt. Hierdoor kan de filterwerking zonder reiniging van de perforaties niet volledig gegarandeerd worden. Na het schoonspuiten wordt het filter ontwikkelt door water uit de kokers af te pompen en zodoende de doorlatendheid aan te tonen. Daarna worden de kokers gevuld met filterzand en aan de bovenzijde afgesloten. In deel C van deze richtlijn wordt uitgebreid op het werkproces en uitvoeringsaspecten van de installatie ingegaan.

De kunststof profielen hebben een aangetoonde installeerbare lengte van maximaal 8 m. Op dit moment wordt de installeerbare lengte beperkt, doordat de beschikbare stelling bij de genoemde installatiemethode geen langere vaste makelaar heeft. Met voorgenoemde stelling is bij deeltraject Salmsteke aangetoond dat de kunststof profielen naast de dijk te installeren zijn bij:

- deklagen tot 6 m dikte en inbedding in de zandlaag tot 2 m;
- deklagen tot 2 m dikte en inbedding in de zandlaag tot 5 m;
- grondlagen met conusweerstand tot 20 MPa;
- ondergronden die tussen voorgenoemde eigenschappen en afmetingen in vallen.

De toepassing van een kunststof filterscherm hoeft echter niet beperkt te zijn tot enkel voorgenoemde maximale profiellengte en ondergronden aangezien het nog een jonge techniek betreft (zie het ontwikkeltraject in paragraaf 1.4 en de ontwikkelkansen in hoofdstuk 17).

1.2.3 Duurzaamheid

Duurzaamheid is een aspect van een product waarmee aan de levensbehoeften van de huidige generatie wordt voldaan zonder hierbij de levensbehoeften van de toekomstige generaties tekort te doen. Het gaat hierbij om economische, sociale en leefomgevingsomstandigheden. Op het gebied van duurzaamheid, met name met betrekking tot het milieu, is een kunststof filterscherm om de volgende redenen een goede maatregel tegen piping:

- De kunststof profielen van het filterscherm zijn vervaardigd uit gerecycled PVC afkomstig van onder andere kunststoffen raamkozijnen. Hierdoor hoeven geen nieuwe grondstoffen te worden gewonnen en valt de Milieu Kosten Indicator (MKI) score, mede door een lage CO₂-uitstoot, zeer laag uit ten opzichte van vergelijkbare oplossingen met staal. Uit de MKI- en CO₂-berekeningen volgt dat beide waarden circa een factor 10 lager uitvallen bij een kunststof filterscherm dan bij een stalen damwand (Noordergraaf, 2022).
- Het kunststof filterscherm is vanwege de doorlatendheid minder lang dan een traditioneel stalen of kunststoffen kwel- of heavescherm. Dit komt doordat de perforaties water (nagenoeg) ongehinderd doorlaten en zanduitspoeling voorkomen. Hiermee wordt heave voorkomen en is een kwelwegverlenging niet nodig, waardoor een minder lang scherm benodigd is. Hiermee wordt uitstoot van CO₂ bespaard.
- De kunststof profielen zijn recyclebaar. Aan het einde van de levensduur kunnen de profielen worden verwijderd en als grondstof worden hergebruikt voor de vervaardiging van nieuwe kunststoffen producten.
- Bij toepassing van het kunststof filterscherm is het risico op het vrijkomen van plastic micro- en nanodeeltjes nihil (Van den Boer, 2023).

Het systeem kent ook aspecten die de duurzaamheid van het systeem kunnen inperken:

- Het kunststof filterscherm is in principe onderhoudsvrij. Ofschoon het risico op filterverstopping onderzocht is en als zeer klein is geclassificeerd, kan het kunststof filterscherm onverhoopt toch mechanisch, chemisch en/of biologisch verstopt raken. Hierdoor is de filterwerking niet langer gegarandeerd en moet het filterzand met behulp van materieel worden vervangen tijdens groot onderhoud. Dit leidt tot extra CO₂-uitstoot.
- Het kunststof filterscherm is relatief zwak, kan niet worden versterkt en kan niet worden uitgebreid. Bij overbelasting als gevolg van toekomstige maaiveldophogingen of aanleg van infrastructuur op of nabij het filterscherm kan het filterscherm bezwijken, waardoor met materieel een complete vervanging van het filterscherm gerealiseerd moet worden. Dit leidt tot extra CO₂-uitstoot.

1.2.4 Verschillen met andere filtertechnieken

Het kunststof filterscherm is samen met onder andere het verticaal zanddicht geotextiel (VZG) en de grofzandbarrière (GZB) een filterconstructie die als innovatieve maatregel tegen piping kan worden toegepast. Het kunststof filterscherm kent de volgende verschillen ten opzichte van andere filterconstructies:

- De filterwerking van elk ingebracht profiel van het kunststof filterscherm wordt tijdens de installatie aangetoond door middel van een validatieproef (bewezen sterkte). Tijdens de validatieproef wordt het water uit elke koker van het scherm afgezogen totdat helder water wordt opgepompt. Het afzuigdebiet wordt geregistreerd. Met deze informatie kan de

doorlatendheid van het filterscherm worden afgeleid. De grootte van de doorlatendheid geeft aan of de perforaties tijdens installatie wel of niet beschadigd of extreem vervormd zijn geraakt. Bij een te hoge doorlatendheid is sprake van schade of te grote vervormingen en wordt een maatregel getroffen. Door deze werkwijze zal bij de installatie altijd een werkend filterscherm worden gecreëerd. Een validatie van de werking tijdens installatie van het VZG en de GZB is niet mogelijk.

- Door de ondiepe afwerking onder maaiveld en toegang tot het filterzand in de kokers bestaat de mogelijkheid tot het uitvoeren van inspecties en onderhoud aan het kunststof filterscherm gedurende de gehele levensduur. Hierdoor kan bijvoorbeeld een eventuele verstopping van het filterzand of de perforaties worden verholpen waarmee de levensduur wordt verlengd. Onderhoud en inspecties aan het VZG en de GZB zijn aanzienlijk lastiger.
- Het kunststof filterscherm is, in tegenstelling tot de GZB, ongevoelig voor toekomstige waterstandstijgingen. Dit adaptief vermogen stelt het kunststof filterscherm in staat om piping ook tegen te blijven houden bij veranderende inzichten en bij klimaatveranderingen.
- Het kunststof filterscherm vormt een ondoorlatende barrière in de deklaag en veroorzaakt daardoor, in tegenstelling tot het VZG en de GZB, vernatting aan de dijkzijde en verdroging aan de landzijde van het filterscherm. Daarnaast heeft het kunststof filterscherm een lagere doorlatendheid dan het in-situ zand. Hierdoor heeft het kunststof filterscherm in tegenstelling tot de GZB geen drainerende werking.

1.3 Relatie met De Innovatieversneller

De Innovatieversneller (DIV) van het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) bundelt de beschikbare kennis op het gebied van innovatieve oplossingen voor macrostabiliteit, piping, bekledingen en niet-waterkerende objecten. Voor elk toetspoot worden enkele generieke en maatregel-specifieke DIV-publicaties opgesteld. Aan de maatregel-specifieke publicaties zijn weer ontwerp-, beoordelings- en onderhoudsrichtlijnen gekoppeld voor de verschillende innovaties die onder de desbetreffende type maatregel vallen.

Op het gebied van piping worden vier generieke en vier maatregel-specifieke DIV-publicaties geschreven zoals in figuur 1-3 is weergegeven. In de generieke publicaties worden de overkoepelende principes die voor alle soorten piping-maatregelen gelden uitgewerkt, waaronder de aanpak, de veiligheidsfilosofie en het afwegingskader. In de maatregel-specifieke publicaties worden daarentegen de principes uitgewerkt die gelden voor alle innovaties binnen de desbetreffende maatregel. De vier soorten maatregelen die voor piping worden onderscheiden betreffen heaveschermen, drainagetechnieken, filtertechnieken en stromingsweerstand verhogende maatregelen. Het kunststof filterscherm is een filtertechniek en zal daarom onderdeel zijn van de DIV-publicatie 'Filtertechnieken'.

Inleiding / algemeen (beheersen overstromingsrisico's door piping, waterveiligheidsbeleid)			
Aanpak / werkwijzer Piping (meten, schematiseren, rekenen)			
Veiligheidsfilosofie (onzekerheden, veiligheidsformat)			
Maatregelen en afweegkader (karakteristieken, beheer en beleid)			
Heave- schermen	Drainage- techniek	Filter- techniek	Verhogen weerstand
Veiligheid en beoordeling (methode, rekenmodellen, veiligheidsfactoren, ...)			
Ontwerp en uitvoering (dimensionering, verificatiemethoden, aansluitingen, ...)			
Beheer en onderhoud (aantasting, maatregelen, ...)			

Figuur 1-3. Generieke structuur van de DIV-publicatie Piping (De Innovatieversneller, 2022).

1.4 Ontwikkeltraject kunststof filterscherm

1.4.1 Ontwikkelstappen

Het ontwikkeltraject van het kunststof filterscherm met Prolock profielen is opgedeeld in meerdere ontwikkelstappen, aangeduid met PF (Prolock Filterscherm). Binnen deeltraject Salmsteke zijn de ontwikkelstappen PF-1 t/m PF-4 en PF-A t/m PF-C doorlopen (Veenbergen & Van der Mieden, 2021). Ontwikkelstap PF-4 behelst het opstellen van voorliggende project-specifieke ontwerp-, beoordelings- en onderhoudsrichtlijn van het kunststof filterscherm voor deeltraject Salmsteke waarin de resultaten van de overige ontwikkelstappen samen komen. De documenten vanuit de verschillende ontwikkelstappen die rechtstreeks verband houden met of onderliggend zijn aan de inhoud van voorliggende richtlijn zijn opgenomen in tabel 1-2.

Ontwikkelstap PF-6 behelst het opstellen van een generieke ontwerprichtlijn van het kunststof filterscherm. Deze ontwikkelstap wordt binnen Sterke Lekdijk uitgevoerd door het volgende deeltraject waar middels een innovatiebesluit voor het kunststof filterscherm wordt gekozen. Vanuit de relatie met De Innovatieversneller is het aannemelijk dat de generieke ontwerprichtlijn als eindproduct van ontwikkelstap PF-6 één-op-één gelijk is aan de invulling voor kunststof filterschermen in de DIV-publicatie Filtertechnieken.

1.4.2 Ontwikkelstadium

Om het stadium van de ontwikkeling van een innovatie uit te kunnen drukken, wordt gebruik gemaakt van de zogeheten Technology Readiness Levels (TRL's). In (Veenbergen & Van der Mieden, 2021) is de binnen Sterke Lekdijk aangehouden definitie van de TRL's vastgelegd. Bij aanvang van het ontwikkeltraject binnen deeltraject Salmsteke bevond het kunststof filterscherm zich op TRL 3. Met de afronding van ontwikkelstappen PF-1, PF-2 en PF-4 is het kunststof filterscherm doorontwikkeld tot TRL 6. Na een succesvolle realisatie bij deeltraject Salmsteke zal het kunststof filterscherm het ontwikkelstadium TRL 7 bereiken. Na toepassing bij een tweede dijktraject bevindt het kunststof filterscherm zich in TRL 8, waarbij tevens in de genoemde generieke ontwerprichtlijn is voorzien.

1.5 Bruikbaarheid van de richtlijn

1.5.1 Status

Voorliggend document betreft de definitieve versie 1.0 van de project-specifieke ontwerp-, beoordelings- en onderhoudsrichtlijn (OBOR) van het kunststof filterscherm voor toepassing bij deeltraject Salmsteke, waarin de randvoorwaarden voor het ontwerp, de uitvoering en het beheer en onderhoud zijn vastgelegd.

Voorliggend document wordt na de realisatie van het kunststof filterscherm bij deeltraject Salmsteke geüpdatet naar versie 2.0 waarin de ervaringen uit het ontwerpproces en de realisatie bij deeltraject Salmsteke zijn opgenomen. Hierin wordt ook het uitvoeringsontwerp als voorbeeldcasus opgenomen.

1.5.2 Toepassingsgebied

Deze project-specifieke richtlijn is primair opgesteld voor een toepassing bij deeltraject Salmsteke. Bij de totstandkoming van voorliggend document is de inhoud waar mogelijk wel zo generiek mogelijk opgesteld zodat deze ook toepasbaar zal zijn voor andere locaties dan deeltraject Salmsteke en als opmaat dient naar de generieke richtlijn. Voorliggende project-specifieke richtlijn is daarmee al breder bruikbaar voor andere locaties en trajecten, met dien verstande dat de gebruiker moet beschouwen of de inhoud één-op-één toepasbaar is en of project-specifieke aspecten voldoende worden afgedekt.

Tabel 1-2. Overzicht van documenten die ten grondslag liggen aan de ontwikkeling van het kunststof filterscherm.

Referentie	Documentnaam	Documentnummer
Projectmanagementplan (PMP)		
(Brekelmans, 2020)	Projectmanagementplan planuitwerkingsfase	P15540003-PLA-PBE-00009
Innovatiebesluit		
(Van Oosten, 2021)	Innovatiebesluit Salmsteke	P15540003-PLA-TMA-00335
(Veenbergen, 2023)	Notitie innovatiebesluit toepassing Prolock in deelproject Salmsteke – 4 ^e beslismoment	P15540003-MEM-TMA- 01476
Ontwikkelplan		
(Veenbergen & Van der Mieden, 2021)	Ontwikkelplan Prolock Filterscherm	P15540003-RAP-TMA-00404
Onderzoeksrapportages		
(Maatkamp et al., 2021)	Doorontwikkeling werkingsprincipe en installatie	P15540003-RAP-TMA-00403
(I. van der Meer, 2021a)	Draaiboek kleine schaalproef	P15540003-RAP-TMA-00405
(I. van der Meer, 2021b)	Factual report kleine schaalproef	P15540003-RAP-TMA-00406
(I. van der Meer, 2022a)	Analyserapport kleine schaalproef	P15540003-RAP-TMA-00689
(Rohe, 2021a)	Draaiboek mediumschaalproef	P15540003-RAP-TMA-00407
(Rohe, 2021b)	Factual report mediumschaalproef	P15540003-RAP-TMA-00408
(Rohe, 2022)	Analyserapport medium schaalproef	P15540003-RAP-TMA-00690
(Maatkamp, 2021)	Afweging installatietechnieken Prolock filterscherm	P15540003-RAP-TMA-00714
(Everts, 2021)	Draaiboek 1 ^e veldproef	P15540003-RAP-TMA-00409
(Van Arkel, 2022)	Factual report 1 ^e veldproef	P15540003-RAP-TMA-00410

Referentie	Documentnaam	Documentnummer
(Van Arkel & Veenbergen, 2022)	Analyserapport 1 ^e veldproef	P15540003-RAP-TMA-00715
(Rohe, 2023)	Draaiboek 2 ^e veldproef	P15540003-RAP-TMA-00411
(Van Arkel et al., 2022)	Factual report 2 ^e veldproef	P15540003-RAP-TMA-00412
(Rohe & Van der Geer, 2023)	Analyserapport 2 ^e veldproef	P15540003-RAP-TMA-00716
(Van Arkel, 2023)	Draaiboek 2 ^e trekproef	P15540003-RAP-TMA-01496
(Van der Geer, 2023)	Analyserapport 2 ^e trekproef	P15540003-RAP-TMA-01492
(Van den Boer, 2023)	PF-C. Toetsen (ongewenst) vrijkomen van micro- en nanodeeltjes van Prolock Filterscherm – ALG-2	P15540003-RAP-TMA-00719
(Waterloo & Verhagen, 2023)	Lekdijk Prolock Delta scherm – Risico op verstopping – water en biofilmcompositie	P15540003-RAP-TMA-01146
(I. van der Meer, 2022b)	Draaiboek medium cleaningproef	P15540003-RAP-TMA-01480
(I. van der Meer, 2023)	Factual report medium cleaningproef	P15540003-RAP-TMA-01478
(I. van der Meer, 2022c)	Draaiboek veldproef 2 – cleaning	P15540003-RAP-TMA-01481
(Kuiper & Van der Meer, 2023b)	Factual report veldproef 2 – cleaning	P15540003-RAP-TMA-01479
(Kuiper & Van der Meer, 2023a)	Analyserapport Cleaningproeven	P15540003-RAP-TMA-01482
(L.J. van der Meer, 2023)	Achtergrondrapport limietspanningen Prolock	P15540003-RAP-TMA-01508
(Bijnagte, 2023)	Achtergrondrapport filtertheorie Prolock	P15540003-RAP-TMA-01550
Beheer- en onderhoudsplan		
(De Gee & Waagmeester, 2023)	Beheer- en Onderhoudsstrategie Prolock Filterscherm Salmsteke (in ontwikkeling)	P15540003-PLA-TMA-01092

1.6 Leeswijzer

Deze richtlijn is onderverdeeld in vier delen. Ieder deel is gerelateerd aan een aparte fase binnen het proces: van het opstellen van een ontwerp tot de installatie en het daaropvolgende gebruik. Elk deel is vervolgens opgedeeld in afzonderlijke hoofdstukken waarin onderwerpen aan bod komen die gekoppeld zijn aan de bijbehorende fase in het ontwerp-, uitvoerings- en beheerproces.

In **deel A** wordt ingegaan op het systeem (kunststof filterscherm) en de veiligheidsbenadering. Hierbij wordt inzicht gegeven in het handelingsperspectief zodat voldaan wordt aan het vereiste veiligheidsniveau conform de geldende regelgeving. Het handelingsperspectief, toegespitst op deeltraject Salmsteke, vormt de basis voor de gestelde eisen in de ontwerp-, uitvoerings- en beheerfase.

In **deel B** zijn alle ontwerpaspecten van het kunststof filterscherm opgenomen. Bij elk ontwerpaspect is op basis van voorgaande onderzoeken en de gangbare praktijk een methode opgenomen waarin beschreven wordt op welke wijze bij deeltraject Salmsteke veilig en verantwoord kan worden ontworpen rekening houdend met de vereiste veiligheid zoals uitgelicht in deel A.

In **deel C** worden richtlijnen gegeven voor de uitvoeringsfase op basis van de opgedane ervaring bij maakbaarheidsproeven in het veld. Er wordt ingegaan op materiaalaspecten, het werkproces inclusief uitvoeringsaspecten, monitoring en uitvoeringsgegevens. Daarnaast wordt aandacht besteed aan uitvoeringsrisico's, omgevingsbeïnvloeding en aansluiting op andere constructies.

Deel D bestaat uit de beheer- en onderhoudsstrategie van deeltraject Salmsteke voor de gebruiksfase. Het hieruit volgende beheer en onderhoudsplan heeft betrekking op de monitoring, het beoordelen en het beheer van het kunststof filterscherm.

Tot slot eindigt de ontwerprichtlijn met aanbevelingen voor verdere ontwikkeling van het kunststof filterscherm die vanuit eerdere onderzoeken en het opstellen van deze richtlijn naar voren zijn gekomen.

Deel A

Systeem en veiligheid

2 Veiligheidsbenadering

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de dominante faalmechanismen die relevant zijn voor het kunststof filterscherm. Middels een methodische aanpak, waar de faalpadanalyse centraal staat, wordt inzicht gegeven in de dominante faalpaden en de bijbehorende overstromingskans. Vervolgens wordt vanuit de overstromingskansbenadering een overzicht gegeven van het handelingsperspectief en zodoende voldaan wordt aan het benodigde veiligheidsniveau conform de geldende regelgeving.

Op het moment van schrijven wordt voor filtertechnieken, waar het kunststof filterscherm toe behoort, een algemene ontwerp- en beoordelingsrichtlijn opgesteld waarin onder andere aandacht wordt besteed aan de verschillende faalmechanismen van een filtertechniek.

2.2 Aanpak onderbouwen veiligheid

Voor het onderbouwen van de veiligheid van het kunststof filterscherm is aangesloten op het algemene veiligheidsraamwerk van De Innovatieversneller (DIV), zie ook paragraaf 1.3. Doordat het opstellen van deze richtlijn en het ontwikkelen van het veiligheidsraamwerk parallel hebben gelopen zijn deze (nog) niet volledig consistent, maar de hoofdlijnen en ingrediënten zijn wel gelijk. Het veiligheidsraamwerk bestaat uit zes stappen. De invulling van deze stappen in voorliggende richtlijn, is in onderstaand overzicht toegelicht:

1. Het verhaal van de innovatie. Dit is in paragraaf 2.3 toegelicht.
2. De systeemeisen (toelaatbare overstromingskans). Deze zijn is uitgewerkt in paragraaf 2.4.
3. De systeembeschrijving. Deze is opgenomen in paragraaf 1.2.
4. Het opstellen van de 'Failure Mode Effect and Criticality Analysis' (FMECA), zie paragraaf 2.5. Hiermee wordt de veiligheid van het geheel onderbouwd en bepaald welke gebeurtenissen niet eenvoudig op basis van een maatregel kunnen worden ondervangen. Deze gebeurtenissen worden verder uitgewerkt in stap 5.
5. Uitwerken van de dominante faalpaden. Dit is opgenomen in paragraaf 2.6.
6. Verificatie met een overzicht van het handelingsperspectief, en het totaal aan benodigde maatregelen om de vereiste veiligheid te garanderen. Dit is beschreven in paragraaf 2.7.

In stap 4 (paragraaf 2.5) zijn verschillende stappen doorlopen om een overzicht van alle bedreigingen te krijgen en inzicht in de dominante bedreigingen. Hierbij wordt onderscheid gemaakt in twee verschillende scenario's:

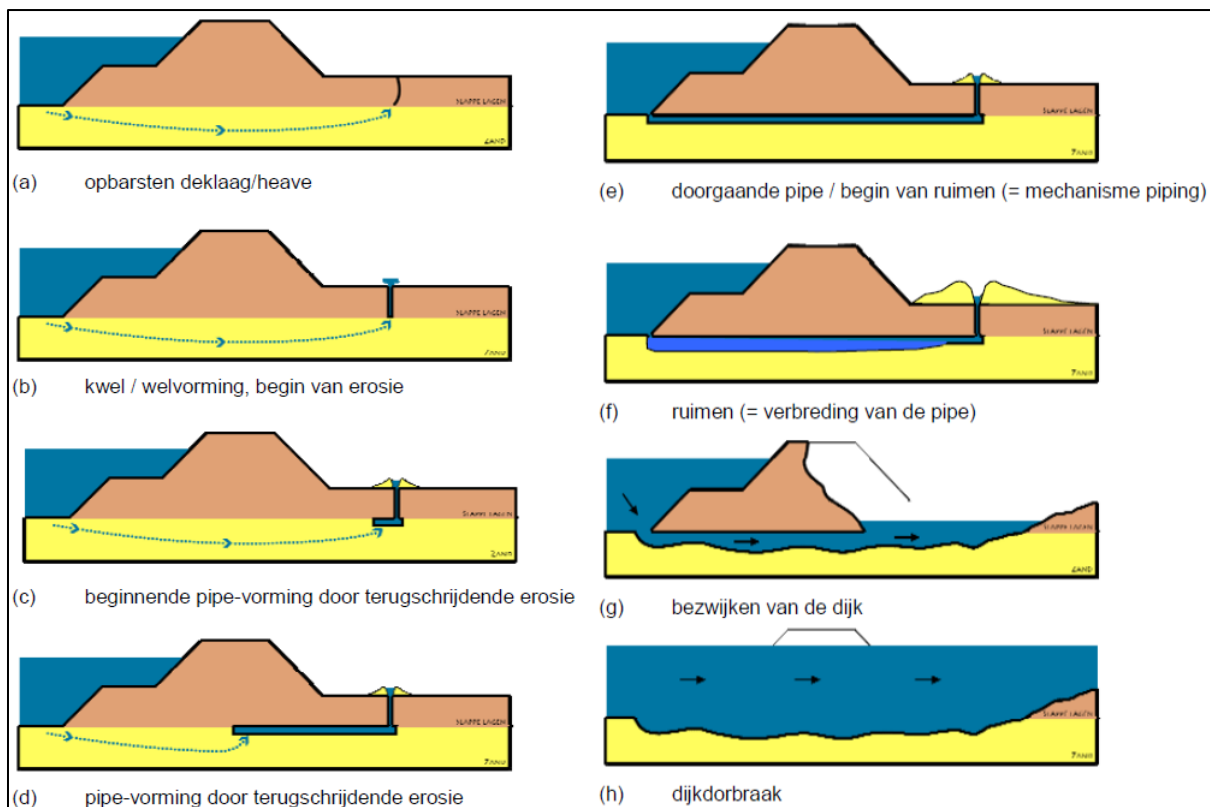
- i. Gewenst gedrag, waarbij het filterscherm conform ontwerp functioneert.
- ii. Bedreigingen (ongewenst gedrag), waarbij het filterscherm niet meer conform ontwerp functioneert. Hierbij kan gedacht worden aan gebreken die tijdens de uitvoering of tijdens de beheerfase ontstaan. Een voorbeeld hiervan is verstopping van het filterscherm.

2.3 Verhaal van de innovatie

De beschrijving van de wijze waarop een overstroming kan optreden, focust zich op een situatie waar een kunststof filterscherm aan de binnenzijde (van de kruin) van de waterkering is voorzien. Het filterscherm wordt toegepast in de waterkering wanneer er onvoldoende veiligheid is ten aanzien van het faalmechanisme piping. Verondersteld wordt dat de veiligheid tegen het optreden van overige faalmechanismen voldoet aan de norm of dat er andere maatregelen beoogd zijn die zorgen voor voldoende veiligheid ten aanzien van de andere faalmechanismen.

Het kunststof filterscherm voorziet in de huidige vorm en staat van de innovatie alleen in veiligheid tegen piping. Een gecombineerde functie ten aanzien van macrostabiliteit behoort in een later stadium wellicht tot de mogelijkheden, maar maakt geen onderdeel uit van de scope van deze richtlijn.

Het kunststof filterscherm grijpt in op het algemene faalpad, c.q. faalmechanisme, piping, welke uiteindelijk kan leiden tot een overstroming. Meer specifiek grijpt het kunststof filterscherm in op de gebeurtenis 'pipe vorming door terugschrijdende erosie' binnen de gebeurtenissenboom die centraal staat bij het faalmechanisme piping (stap d in figuur 2-1). De initiërende gebeurtenis van het faalpad is hoogwater.



Figuur 2-1. Faalmechanisme piping uit onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen (Rijkswaterstaat, 2012).

Zoals in paragraaf 1.2.1 is beschreven voorkomt het kunststof filterscherm piping door het stoppen van zandtransport. Het filterscherm zorgt voor een zanddichte barrière tussen de pipe en het aan de rivierzijde gelegen zand, terwijl water ongehinderd kan doorstromen (gewenst gedrag). Het kunststof filterscherm voorkomt daarmee het doorgroeien van de pipe onder de waterkering. Dit betekent ook dat de vervolgmecanismen, zoals gegeven in figuur 2-1 (stappen e tot h), niet zullen optreden.

Indien het kunststof filterscherm niet conform ontwerp functioneert, wordt doorgaande pipegroei mogelijk niet (volledig) verhinderd, en kan dit leiden tot een overstroming. Doorgaande pipegroei is alleen mogelijk als de pipe toch onder, door, boven of langs het filterscherm zijn weg vindt. Piping wordt ook niet verhinderd als het uittredepunt voor het filterscherm ligt. De faalmechanismen van het kunststof filterscherm zijn dus: voor-, onder-, door-, boven- en achterloopsheid. De volgende definities worden gehanteerd voor deze begrippen:

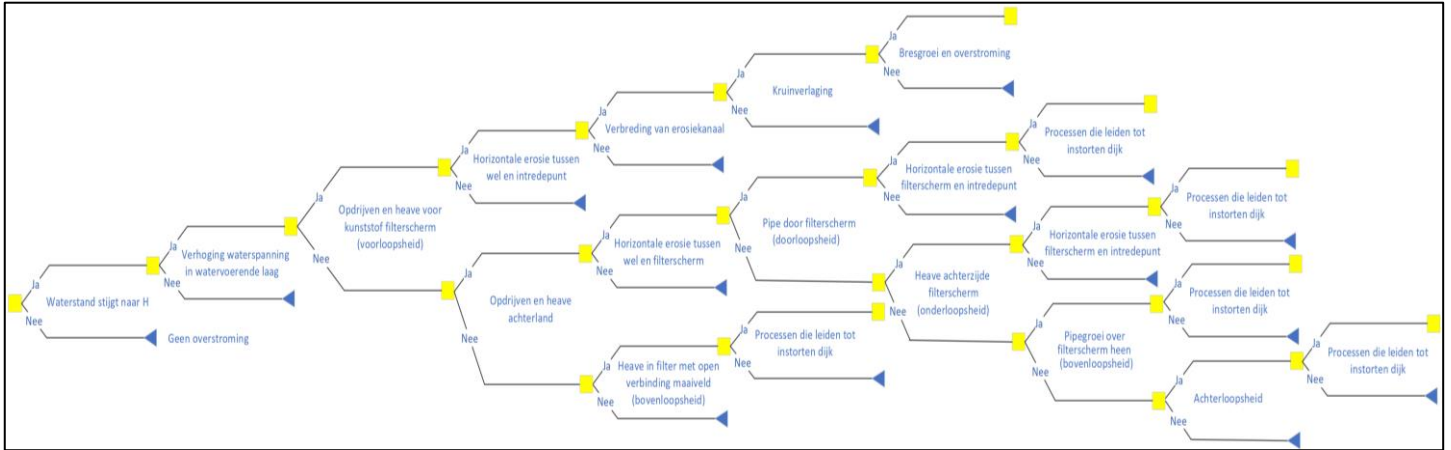
- **Voorloopsheid:** Het uittredepunt bevindt zich aan de rivierzijde van het filterscherm. Het filterscherm bevindt zich niet in het traject van de pipe.

- **Onderloopsheid:** Het uittredepunt bevindt zich aan de landzijde van het filterscherm. De pipe groeit onder het filterscherm door en er treedt heave op aan de achterlandzijde van het scherm.
- **Doorloopsheid:** Het uittredepunt bevindt zich aan de landzijde van het filterscherm. De pipe groeit door het (geperforeerde gedeelte van het) filterscherm. Dit zou mogelijk kunnen gebeuren als de combinatie van perforaties en filterzand niet goed functioneren als filter.
- **Bovenloopsheid:**
 - (a) Het uittredepunt bevindt zich ter plaatse van het filterscherm. De pipe groeit door de koker en één geperforeerde filterwand van het filterscherm.
 - (b) Het uittredepunt bevindt zich aan de landzijde van het filterscherm. De pipe groeit over het filterscherm.
- **Achterloopsheid:** Het uittredepunt bevindt zich aan de landzijde van het filterscherm. De pipe groeit langs het filterscherm.

Het optreden van één van de 'loopsheden' hoeft niet direct tot een overstroming te leiden. Het kunststof filterscherm heeft bij het optreden van bepaalde faalpaden nog steeds een remmende werking op het ontstaan van een doorgaande (ruimende) pipe.

Op basis van de geïdentificeerde opeenvolgende gebeurtenissen (figuur 2-1 en de loopsheden) die leiden tot een overstroming, zijn de faalpaden voor het kunststof filterscherm opgesteld. Faalpaden geven een overzicht van de initiërende gebeurtenis tot de ongewenste gebeurtenis van een overstroming via een aantal opeenvolgende gebeurtenissen; zogenaamde knopen. Een knoop beschrijft een fysieke (onafhankelijke) gebeurtenis. Een belangrijk uitgangspunt bij het opstellen van de knopen en daarmee faalpaden is dat de kans dat een gebeurtenis tot een vervolg gebeurtenis in het faalpad leidt tezamen met de kans dat dit faalpad niet wordt gecontinueerd altijd 1 (100%) is. Het systeem (van faalpaden, aaneenschakeling van gebeurtenissen) bepaalt vervolgens de kans op een overstroming. De eis hierbij luidt dat het systeem veiliger moet zijn dan de bij norm vastgestelde toelaatbare overstromingskans (WBI, Ministerie van Infrastructuur en Milieu 2017).

De faalpaden kunnen worden gevisualiseerd in een gebeurtenissenboom (figuur 2-2). De gebeurtenissenboom vertoont veel overeenkomsten met het faalpad dat centraal staat als gevolg van piping (figuur 2-1). In het faalmechanisme piping zijn de specifieke faalpaden voor de met het kunststof filterscherm versterkte kering ingepast: voor-, onder-, door-, boven- en achterloopsheid. De verschillende faalpaden starten met de initiërende gebeurtenis: 'hoogwater' en eindigen bij 'overstroming'. De knopen in de gebeurtenissenboom zijn gegeven met een geel vierkant. De situatie dat een overstroming niet optreedt is in de gebeurtenissenboom met een blauwe driehoek weergegeven. In de gebeurtenissenboom van figuur 2-2 zijn de gebeurtenissen volgend op voorloopsheid volledig uitgeschreven. Bij de overige faalmechanismen ('loopsheden') zijn de knopen samengevat in de knoop 'Processen die leiden tot instorten dijk' om de leesbaarheid te vergroten. De gebeurtenissenboom is in het groot weergegeven in bijlage B.



Figuur 2-2. Gebeurtenissenboom kunststof filterscherm (groter weergegeven in bijlage B). In de gebeurtenissenboom heeft elk geel vierkant een gezamenlijke kans (of de gebeurtenis optreedt of niet) van 1. De blauwe driehoeken geven tezamen de kans op 'geen overstroming'.

2.4 Toelaatbare overstromingskans

Voor het kunststof filterscherm dient aannemelijk gemaakt te worden dat de overstromingskans voldoende klein is. Voor de bedreigingen en het gewenste gedrag wordt onderscheid gemaakt in verschillende scenario's. De scenario's zijn hierin mogelijkheden van de staat van het filterscherm. De verschillende bedreigingen en het gewenste gedrag dienen gezamenlijk te voldoen aan de faalkanseis uit vergelijking (2-1)¹.

$$P_f = \sum [P(S_i) \cdot P(F|S_i)] < P_{eis} \tag{2-1}$$

waarbij:

- $P(S_i)$ - Kans op verschillende bedreigingen en het gewenste gedrag (scenario's)
- $P(F|S_i)$ - Kans op falen gegeven scenario S_i

Voor het ontwerp van het kunststof filterscherm kan getoetst worden aan de faalkanseis op doorsnedeniveau van het piping faalmechanisme (STPH). Bij het bepalen van deze eis wordt (doorgaans) een faalkansruimte van 24% gehanteerd en is het lengte-effect in rekening gebracht. Door gebruik te maken van de reguliere piping lengte-effect factoren heeft de doorsnede-eis mogelijk een conservatief karakter omdat door de aanwezigheid van een piping maatregel het lengte-effect mogelijk kleiner kan zijn. Op basis van het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI) 2017 kan de ondergrenswaarde van het normtraject vertaald worden naar een eis per doorsnede conform vergelijking (2-2) in combinatie met vergelijking (2-3).

$$P_{eis;dsn} = \frac{\omega P_{eis}}{N_{dsn}} \tag{2-2}$$

waarbij:

- $P_{eis;dsn}$ - Faalkanseis per doorsnede [1/jaar]
- ω - Faalkansruimtefactor (0,24 voor STPH) [-]
- P_{eis} - Norm van het dijktraject [1/jaar]
- N_{dsn} - Lengte-effect factor voor een doorsnede [-]

¹ In deze formule is verondersteld dat de verschillende scenario's een onafhankelijk seriesysteem vormen.

$$N_{dsn} = 1 + \frac{aL_{dijk}}{b} \quad (2-3)$$

waarbij:

N_{dsn}	- Lengte-effect factor voor een doorsnede	[-]
a	- Mechanismegevoelige fractie van de dijktrajectlengte (0,4 voor STPH en deeltraject Salmsteke)	[-]
b	- Lengtemaat die de intensiteit van het lengte-effect weergeeft binnen de mechanismegevoelige lengte van het dijktraject (300 m voor STPH)	[m]
L_{dijk}	- Lengte van het dijktraject	[m]

2.5 Onderbouwen veiligheid op basis van FMECA

Voor het kunststof filterscherm zijn alle gebeurtenissen, van gewenst tot ongewenst gedrag, geïdentificeerd. Deze gebeurtenissen zijn beschouwd in een 'Failure Mode Effect and Criticality Analysis' (FMECA). In een FMECA is onderzocht op welke wijze een waterkering kan falen (Failure Mode) en welke effecten (Effect) dat heeft. Daarna is geduid hoe significant de bijdrage aan de overstromingskans is (Criticality). Deze analyse is in hoofdlijnen behandeld in voorliggende paragraaf en het totaalresultaat is opgenomen in tabelvorm in bijlage A.

De FMECA-tabel met alle gebeurtenissen en maatregelen is opgesteld door de volgende stappen te doorlopen:

- **Uitwerken van gewenst gedrag en bepalen van primaire faalpad.**
Als eerste wordt het gewenste gedrag uitgewerkt met faalpaden. Vervolgens wordt het primaire faalpad bepaald. Het primaire faalpad is het faalpad waarop het kunststof filterscherm wordt ontworpen, gegeven dat het filterscherm functioneert conform ontwerp.
- **Inventarisatie mogelijke bedreigingen**
Vervolgens worden mogelijke bedreigingen geïdentificeerd die afwijkingen van het gewenste gedrag kunnen veroorzaken.
- **Inventarisatie invloed bedreigingen op faalpad(en)**
Na de inventarisatie wordt voor elke bedreiging beschreven hoe het optreden hiervan tot het falen van het filterscherm kan leiden.
- **Inventarisatie mogelijke maatregelen**
Op basis van de inventarisatie van de bedreigingen worden maatregelen uitgewerkt waarmee doelmatig bedreigingen kunnen worden uitgesloten of de kans erop kan worden verkleind.
- **Iteratief bepalen meest significante bedreigingen**
Op basis van de inventarisatie van bedreigingen en de eventuele beschikbare maatregelen wordt kwalitatief onderbouwd welke bedreigingen significant zijn (mogelijk een bijdrage leveren aan de overstromingskans van de kering). Deze zijn in paragraaf 2.6 vervolgens verder uitgewerkt.

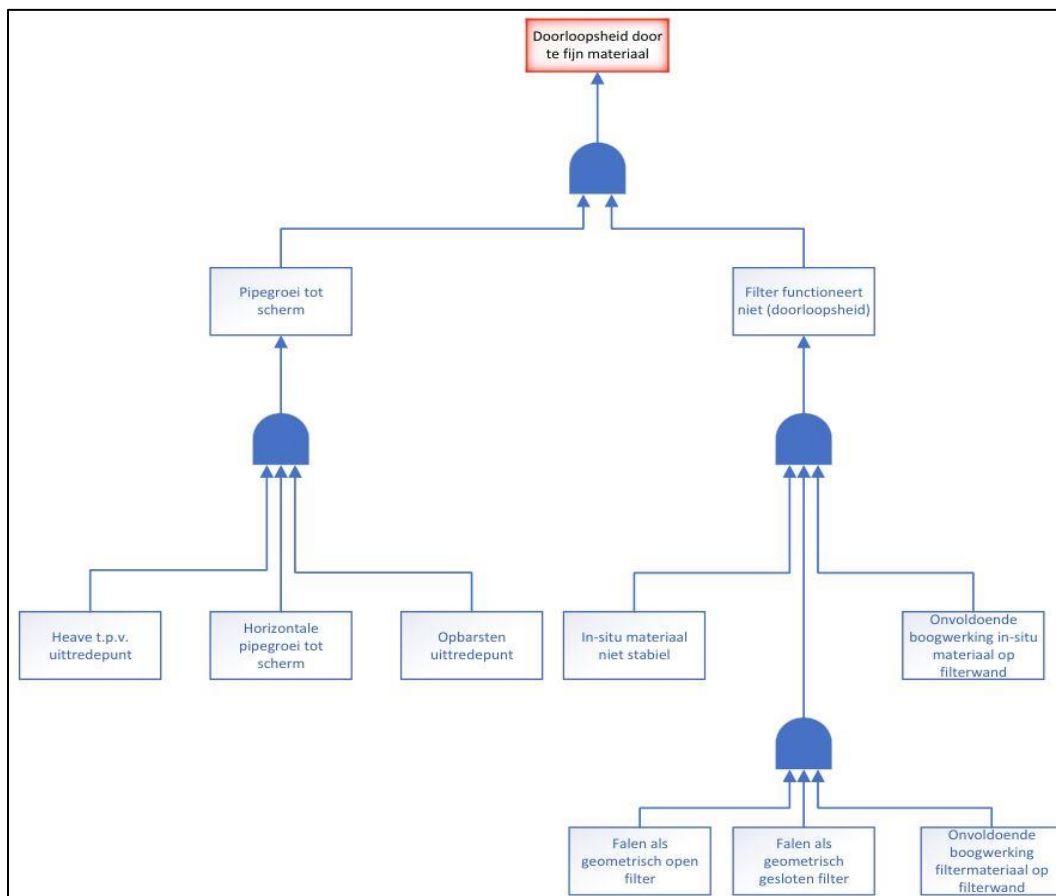
Door de faalpaden te hanteren wordt inzicht verkregen in het gewenste gedrag en de bedreigingen van het kunststof filterscherm. Door vervolgens de gedefinieerde faalpaden en de daarbij beschikbare maatregelen te beschouwen worden de faalpaden die een significante bijdrage leveren aan de overstromingskans kwalitatief bepaald.

2.5.1 Gewenst gedrag en primaire faalpad

In paragraaf 2.3 is het verhaal van de met het kunststof filterscherm versterkte kering toegelicht, waarbij de gebeurtenissenboom (figuur 2-2) inzicht geeft in de faalmechanismen (loopsheden). Het optreden van één van de faalmechanismen is ook afhankelijk van de staat van het filterscherm. Voor de staat van het filterscherm wordt onderscheid gemaakt in gewenst gedrag, oftewel het

filterscherm functioneert conform ontwerp, en bedreigingen, oftewel het filterscherm functioneert niet meer conform ontwerp. In deze paragraaf is het gewenste gedrag beschouwd.

De primaire functie van het kunststof filterscherm is om zandtransport, tussen het filterscherm en het intredepunt, tegen te gaan en tegelijkertijd water door te laten. Het filterontwerp is gebaseerd op de rekenregels gegeven in hoofdstuk 7. Het primaire faalpad is het optreden van doorloopsheid doordat het in-situ zand te fijn is waardoor het filter niet functioneert. Een foutenboom van het primaire faalpad (tot het faalmechanisme doorloopsheid) is in onderstaande figuur gegeven. Daarna volgen nog de gebeurtenissen zoals gegeven in figuur 2-2. In bijlage A is dit faalpad en de overige faalpaden, waarbij het filterscherm conform ontwerp functioneert (gewenst gedrag), verder uitgewerkt.



Figuur 2-3. Primair faalpad kunststof filterscherm: doorloopsheid door te fijn in-situ zand.

Zoals weergegeven in bovenstaande foutenboom bestaat het primaire faalpad uit meerdere gebeurtenissen die allen moeten optreden om tot doorloopsheid te leiden. Sommige gebeurtenissen zijn onafhankelijk of slechts deels afhankelijk van elkaar.

Voor doorloopsheid moet het in-situ zand, in grote hoeveelheden, zowel door de perforaties als door het filterzand kunnen spoelen. Onderstaand zijn enkele argumenten opgenomen waardoor dit onwaarschijnlijk is:

- In het filterontwerp is veel veiligheid aanwezig doordat het granulaire filterontwerp uitgaat van gesloten filterregels.
- Aanvullende veiligheidsmaatregelen zijn boogwerking van het in-situ zand en het filterzand op de perforaties en de aanvullende mogelijkheid om uit te gaan van open filterregels.

- Anderzijds moet er (op dezelfde locatie) pipegroei tot het scherm optreden voordat het in-situ zand ook daadwerkelijk er doorheen spoelt.
- In dit faalpad is er ook nog aanvullende veiligheid in het ruimingsproces (filterscherm werkt als flessenhals bij een doorgaande pipe) voordat een overstroming optreedt.

Het optreden van de verschillende gebeurtenissen (uit de foutenboom) en het uiteindelijk leiden tot een overstroming is hiermee onwaarschijnlijk. Daarmee is de bijdrage aan de overstromingskans door het primaire faalpad niet significant. Voorwaarde hierbij is wel dat alle maatregelen uit bijlage A uitgevoerd worden.

Naast het primaire faalpad zijn er ook andere faalpaden te definiëren die via één specifiek faalmechanisme (loopsheden) leiden tot een overstroming. Om de faalpaden inzichtelijk te maken is gebruik gemaakt van één foutenboom per faalmechanisme: doorloopsheid, voorloopsheid, onderloopsheid, bovenloopsheid en achterloopsheid. Daarnaast is er ook een foutenboom opgesteld waarin de faalpaden die een negatieve invloed hebben op STBI zijn beschouwd. Hierbij moet worden opgemerkt dat na het optreden van één van deze faalmechanismen er nog vervolgebeurtenissen nodig zijn om daadwerkelijk te kunnen leiden tot een overstroming (zie ook de gebeurtenissenboom in figuur 2-2). De foutenboom voor ieder faalmechanisme is gegeven in bijlage B.

2.5.2 Mogelijke bedreigingen en maatregelen

In de voorgaande paragraaf is het gewenste gedrag van het kunststof filterscherm beschreven. Er zijn echter ook bedreigingen denkbaar waardoor het filterscherm niet meer werkt conform ontwerp en daarmee potentieel kunnen leiden tot het optreden van één van de faalmechanismen en vervolgens een overstroming. Per faalpad is aangegeven bij welke projectfase (ontwerp, uitvoering of beheer) het pad hoort. In tabel 2-1 is per projectfase één voorbeeldbedreiging beschreven. Hierbij is kwalitatief een eerste kansinschatting van de bedreiging, $P(S)$, en de conditionele faalkans, $P(F|S)$, gegeven. Tot slot zijn maatregelen geïnventariseerd waarmee doelmatig bedreigingen kunnen worden uitgesloten of de kans erop kan worden verkleind.

Tabel 2-1. Voorbeeld van bedreigingen per projectfase.

Bedreiging	Inschatting kans $P(S)$	Invloed op faalpad	Inschatting faalkans $P(F S)$	Maatregel
30. Bovenkant koker open: afsluiting onvoldoende sterk (ontwerp)	Klein	Bovenloopsheid	Klein	1. Voldoende sterkte-capaciteit van afsluiting (en verbinding) tegen waterdruk.
2. Gat in scherm: profiel uit het slot gelopen (uitvoering)	Klein	Doorloopsheid	Groot	1. Slotverklikkers in combinatie met installatieprotocol en correctieve maatregel
13. Filter functioneert niet: biologische of chemische verstopping (beheer)	Klein	Onderloopsheid	Groot	1. In ontwerp rekening houden met verminderde doorlatendheid. 2. Monitoring doorlatendheid 3. Reinigingstool als correctieve maatregel

Tabel 2-1 bevat slechts een drietal voorbeelden. In bijlage A is een volledig overzicht gegeven van alle faalpaden (gewenst gedrag en bedreigingen). Daarin is het risico van alle faalpaden beschouwd. Per faalpad zijn onderstaande gegevens en toelichting opgenomen:

- Codering;
- Naam faalpad;
- Gewenst gedrag of bedreiging;
- Invalshoek: ontwerp, uitvoering of beheer;
- Toelichting van het faalpad;
- Beschikbare maatregelen per bouwfase (ontwerp, uitvoering of beheer);
- Invloed van de beschikbare maatregelen op het faalpad;
- Beschouwing van faalkansbijdrage ('significant' of 'niet significant') inclusief motivatie.

2.5.3 Significante bedreigingen

Op basis van de ervaringen uit het innovatietraject zijn alle faalpaden uit het overzicht in bijlage A en de foutenboom in bijlage B beoordeeld. Er wordt onderscheid gemaakt tussen faalpaden die mogelijk een significante bijdrage leveren aan de overstromingskans en degene die dit niet doen, eventueel door het nemen van maatregelen in ontwerp-, uitvoerings- of beheerfase.

Om te bepalen of een faalpad een significante bijdrage levert aan de overstromingskans is ieder faalpad beoordeeld op de volgende aspecten:

- Fase waarin de ten grondslag liggende causale gebeurtenis optreedt, te weten: ontwerp, uitvoering of beheer.
- Toelichting/beschrijving faalpad; aaneenschakeling van gebeurtenissen onder invloed van één causale gebeurtenis.
- Maatregelen die in de fases ontwerp, uitvoering of beheer worden genomen om het risico (op het optreden van het faalpad) te beheersen.

In bijlage A zijn de resultaten van deze analyse gegeven. De significante faalpaden die een nadere (kwantitatieve) uitwerking behoeven om de faalkans van het systeem te bepalen zijn:

- **Faalpad 2:** 'Gat in scherm doordat profiel uit het slot is gelopen (doorloopsheid)';
- **Faalpad 13:** 'Filter functioneert niet door een chemische en/of bacteriologische verstopping (onderloopsheid)';
- **Faalpad 22:** 'Filter functioneert niet door een chemische en/of bacteriologische verstopping (voorloopsheid)'.

De overige faalpaden uit de FMECA-tabel (bijlage A) hebben geen significante bijdrage aan de faalkans in het geval de voorgestelde beheersmaatregelen worden getroffen. De ontwerpmaatregelen zijn gegeven in deel B. De maatregelen die in de uitvoeringsfase genomen dienen te worden, zijn gegeven in deel C. De benodigde maatregelen (monitoring en beheer) in de beheerfase zijn gegeven in deel D en het beheer- en onderhoudsplan (De Gee & Waagmeester, 2023).

2.6 Uitwerking significante bedreigingen met faalpaden

Uit de kwalitatieve analyse van de verschillende bedreigingen (stappen 2 t/m 5, paragraaf 2.2) zijn drie significante bedreigingen bepaald (paragraaf 2.5.3):

1. Voorloopsheid veroorzaakt door een (chemische of bacteriologische) verstopping (faalpad 22);
2. Onderloopsheid veroorzaakt door een (chemische of bacteriologische) verstopping (faalpad 13);
3. Doorloopsheid veroorzaakt doordat een profiel uit het slot is gelopen (faalpad 2).

Deze drie bedreigingen hebben mogelijk een significante bijdrage aan de overstromingskans. Derhalve dient aangetoond te worden dat deze bijdrage voldoende klein is. In deze paragraaf is beschreven hoe tot een faalkansinschatting van deze bedreigingen gekomen kan worden. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de foutenbomen van de verschillende loopsheden uit bijlage B waarin de (on)afhankelijkheden tussen de verschillende gebeurtenissen inzichtelijk zijn gemaakt.

De totale bijdrage van drie bedreigingen kan met vergelijking (2-4) worden bepaald. Hierin is verondersteld dat de bedreigingen onderling een onafhankelijk seriesysteem vormen. Dit betreft een conservatieve aanname.

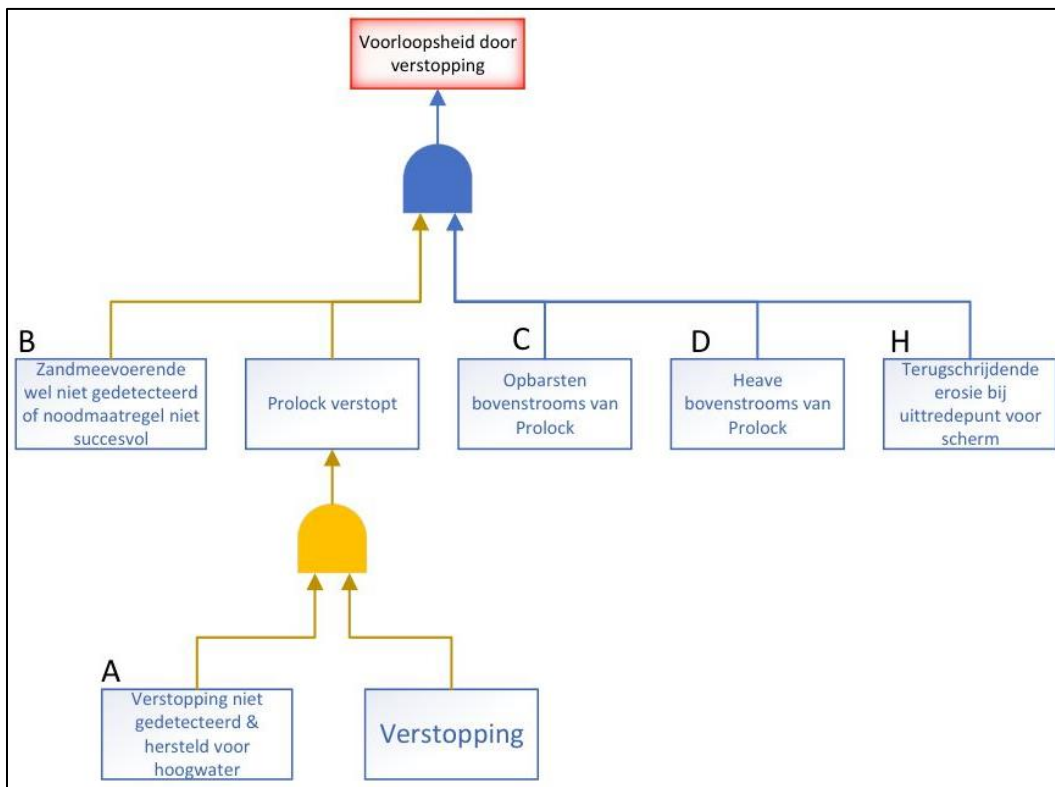
$$P(F_{dsn}) = 1 - \{[1 - P(F_v)] \cdot [1 - P(F_o)] \cdot [1 - P(F_d)]\} \quad (2-4)$$

waarbij:

- | | | |
|--------------|---|----------|
| $P(F_{dsn})$ | - Faalkans filterscherm door significante bedreigingen in een doorsnede | [1/jaar] |
| $P(F_v)$ | - Faalkans veroorzaakt door voorloopsheid | [1/jaar] |
| $P(F_o)$ | - Faalkans veroorzaakt door onderloopsheid | [1/jaar] |
| $P(F_d)$ | - Faalkans veroorzaakt door doorloopsheid | [1/jaar] |

2.6.1 Voorloopsheid door verstopping

In figuur 2-4 is de foutenboom voor de bedreiging 'voorloopsheid door verstopping' uitgewerkt.



Figuur 2-4. Foutenboom van de bedreiging 'voorloopsheid door verstopping' (afhankelijke gebeurtenissen zijn met blauwe pijlen weergegeven en onafhankelijke gebeurtenissen met oranje pijlen).

Met vergelijkingen (2-5) en (2-6) wordt de kans op 'voorloopsheid door verstopping' ingeschat. In beide vergelijkingen is verondersteld dat de gebeurtenissen A en B onderling volledig afhankelijk zijn en C, D en H ook onderling volledig afhankelijk zijn. In werkelijkheid zijn deze gebeurtenissen echter niet volledig afhankelijk, het betreft dus een veilige aanname. Het optreden van een verstopping en de gebeurtenissen A/B en C/D/H zijn ten opzichte van elkaar onafhankelijk verondersteld.

$$P_f(\text{voorloopsheid}) = P(\text{verstopping}) \cdot P(F|\text{verstopping}) \quad (2-5)$$

$$P(F|\text{verstopping}) = \min[P(A), P(B)] \cdot \min[P(C), P(D), P(H)] \quad (2-6)$$

waarbij:

$P(\text{verstopping})$	- Kans op (chemische/bacteriologische) verstopping	[-]
$P(F \text{verstopping})$	- Kans op falen (voorloopsheid) gegeven een verstopping	[1/jaar]
$P(A)$	- Kans dat verstopping niet gedetecteerd en hersteld is voor hoogwater	[-]
$P(B)$	- Kans dat zandmeevoerende wel niet is gedetecteerd of dat noodmaatregel niet succesvol is	[-]
$P(C)$	- Kans op opbarsten bovenstrooms van filterscherm gegeven verstopping	[1/jaar]
$P(D)$	- Kans op heave bovenstrooms van filterscherm gegeven verstopping	[1/jaar]
$P(H)$	- Kans op terugschrijdende erosie gegeven verstopping en een uittredepunt voor het scherm	[1/jaar]

Verstopping: P(verstopping)

Bij een verstopping over een significante lengte kan er een heave-situatie optreden achter het filterscherm met piping tot gevolg. Verstopping van een enkel profiel geeft geen verhoogd risico op voor- of onderloopsheid.

Het optreden van deze bedreiging is onderzocht en gedocumenteerd (Waterloo & Verhagen, 2023). Uit het onderzoek blijkt dat de kans op optreden van (biologische/chemische) verstopping verwaarloosbaar wordt geacht in het geval dat de kokers van het kunststof filterscherm worden gevuld met filterzand, de bovenkant van de kokers wordt afgesloten en de beschreven installatiewijze wordt gevolgd. De kans op verstopping is voor deeltraject Salmsteke ingeschat op 1/1000.

Verstopping niet gedetecteerd en hersteld voor hoogwater: P(A)

In het faalpad is een mitigerende maatregel opgenomen, te weten het monitoren van de doorlatendheid van het filterscherm. Dit maakt deel uit van de beheer- en onderhoudsplan, zoals beschreven in (De Gee & Waagmeester, 2023). Hierin wordt nader ingegaan op de maatregelen waarmee verstopping gedurende de levensduur wordt gemonitord. Daarnaast wordt hierin beschreven hoe de monitoringsgegevens moeten worden geïnterpreteerd om verstopping te constateren en wat het geldende veiligheidsniveau is. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een drietal scenario's die een waarneming koppelen aan de overstromingskans en waterstand. Ondanks de monitoring blijft er een kans dat verstopping optreedt en deze niet wordt gedetecteerd of niet wordt hersteld voordat hoogwater optreedt. Deze kans kan middels expert judgement worden ingeschat. Geadviseerd wordt om deze kans te bepalen in afstemming met de beheer- en onderhoudsorganisatie van het waterschap en de afdeling die verantwoordelijk is voor de monitoring. Voor deeltraject Salmsteke is deze kans voorlopig ingeschat op 1/50.

Zandmeevoerende wel niet gedetecteerd of noodmaatregel niet succesvol: P(B)

Indien een zandmeevoerende wel wordt waargenomen aan de bovenstroomse zijde van het filterscherm, moet deze worden opgekist. Dit maakt deel uit van het beheer- en onderhoudsplan, hiervoor wordt verwezen naar (De Gee & Waagmeester, 2023). Geadviseerd wordt om voor deeltraject Salmsteke een kans tussen de 1 en 1/100 hiervoor te hanteren en dit nader te onderzoeken met de beheerorganisatie. Hiervoor kan gebruikt worden gemaakt van het navolgende onderzoek en referenties: (Lendering et al., 2014; Lendering, 2018).

Opbarsten bovenstrooms van filterscherm gegeven verstopping: P(C)

De kans op opbarsten bovenstrooms van het filterscherm wordt bepaald met de semi-probabilistische correlaties conform WBI 2017 (Bijlage III Sterkte en Veiligheid) en bijbehorende analytische formules. De faalkans wordt bepaald op basis van de stabiliteitsfactor tegen opbarsten. De stabiliteitsfactor (vgl. 7.1) is de verhouding tussen het kritisch stijghoogteverschil (effectieve neerwaartse sterkte) (vgl. 7.2) en het optredend stijghoogteverschil (opwaartse belasting) (vgl. 7.3). De genoemde vergelijkingen (nummers) verwijzen naar WBI 2017 (Bijlage III Sterkte en Veiligheid).

Het optredende stijghoogte verschil wordt beïnvloed door het eventueel optreden van opbarsten in het achterland. De kans op opbarsten en heave voor het filterscherm is daardoor afhankelijk van de kans op opbarsten achter het filterscherm. Wanneer opbarsten achter het filterscherm optreedt is door de begrenzing van de stijghoogte (d.i. grenspotentiaal) de kans op opbarsten voor het filterscherm kleiner. Dit betekent dat twee scenario's beschouwd moeten worden:

1. De kans op opbarsten voor het filterscherm ervan uitgaande van het niet opbarsten achter het filterscherm.
2. De kans op opbarsten voor het filterscherm gegeven opbarsten achter het filterscherm, waardoor de stijghoogte voor het filterscherm is gereduceerd.

Het filterscherm wordt vanuit veiligheidsoogpunt dusdanig gepositioneerd dat de kans op opbarsten (indien geen verstopping) achter het filterscherm altijd significant (d.i. een orde) groter is dan voor het filterscherm. Daarmee wordt de kans op voorloopsheid (scenario 1) ook bij verstopping beperkt. Deze kans wordt gedurende en na het ontwerpproces bij deeltraject Salmsteke bepaald.

In het optredende stijghoogteverschil moet in het geval van een verstopping (of verminderde doorlatendheid) het effect van opstuwung door verstopping van het filterscherm worden meegenomen. Het effect van de opstuwung wordt bepaald middels een stromingsberekening waarbij het filterscherm veiligheidshalve volledig ondoorlatend wordt gesteld.

Heave bovenstrooms van filterscherm gegeven verstopping: P(D)

Ook de kans op (deklaag-)heave bovenstrooms van het filterscherm wordt bepaald met de semi-probabilistische correlaties conform WBI 2017 (Bijlage III Sterkte en Veiligheid) en bijbehorende formules. De faalkans wordt bepaald op basis van de stabiliteitsfactor tegen heave. De stabiliteitsfactor (vgl. 7.5) is de verhouding tussen de berekende heave gradiënt (vgl. 7.6) en de kritieke heave gradiënt (0,3 [-]) over de deklaag. Hierbij dient ook het effect van een eventueel aanwezige opbarstzone achter het filterscherm meegenomen te worden.

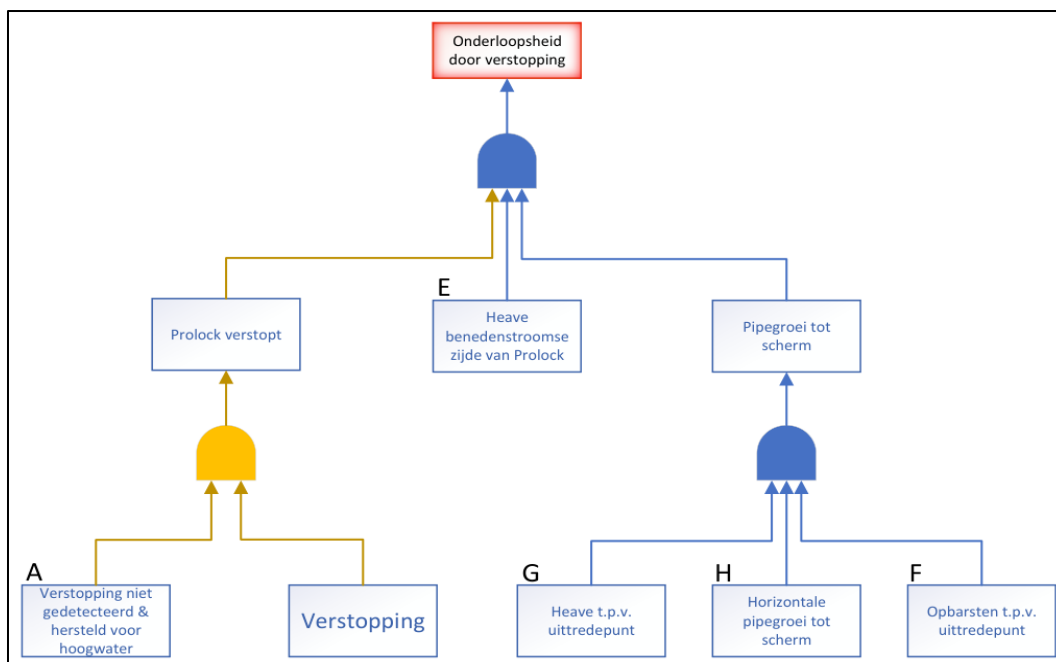
In de berekening van de optredende heave-gradiënt moet het effect van verstopping van het filterscherm worden meegenomen. Dit wordt gedaan door in de stromingsberekening het filterscherm veiligheidshalve volledig ondoorlatend te stellen en de daarbij berekende gradiënt voor het filterscherm (over de deklaag) te hanteren als heave-gradiënt.

Terugschrijdende erosie: P(H)

Bij een uittredepunt voor het filterscherm kan de kans op terugschrijdende erosie bepaald worden met de semi-probabilistische correlaties conform WBI 2017 en bijbehorende analytische formules. Hiervoor wordt verwezen naar de vergelijkingen 7.8 en 7.9 uit WBI 2017 (Bijlage III Sterkte en Veiligheid).

2.6.2 Onderloopsheid door verstopping

In figuur 2-5 is de foutenboom voor de bedreiging 'onderloopsheid door verstopping' uitgewerkt.



Figuur 2-5. Foutenboom van de bedreiging 'onderloopsheid door verstopping' (afhankelijke gebeurtenissen zijn met blauwe pijlen weergegeven en onafhankelijke gebeurtenissen met oranje pijlen).

Met vergelijkingen (2-7), (2-8) en (2-9) wordt de kans op 'onderloopsheid door verstopping' ingeschat. In de vergelijkingen is verondersteld dat de gebeurtenissen E, F, G en H volledig afhankelijk zijn. In werkelijkheid zijn deze gebeurtenissen echter niet volledig afhankelijk, het betreft dus een veilige aanname. Het optreden van een verstopping en de gebeurtenissen A en E/F/G/H zijn ten opzichte van elkaar onafhankelijk verondersteld.

$$P_f(\text{onderloopsheid}) = P(\text{verstopping}) \cdot P(F|\text{verstopping}) \quad (2-7)$$

$$P(F|\text{verstopping}) = P(A) \cdot \min[P(E), P(\text{pipegroeitot scherm})] \quad (2-8)$$

$$P(\text{pipegroeitot scherm}) = \min[P(F), P(G), P(H)] \quad (2-9)$$

waarbij:

$P(\text{verstopping})$	- Kans op verstopping	[-]
$P(F \text{verstopping})$	- Kans op falen (onderloopsheid) gegeven een verstopping	[1/jaar]
$P(\text{pipegroeitot scherm})$	- Kans op pipegroeitot scherm	[1/jaar]
$P(A)$	- Kans dat verstopping niet gedetecteerd en hersteld is voor hoogwater	[-]
$P(E)$	- Kans op heave aan benedenstroomse zijde van filterscherm	[1/jaar]
$P(F)$	- Kans op opbarsten ter plaatse van uittredepunt	[1/jaar]
$P(G)$	- Kans op heave ter plaatse van uittredepunt	[1/jaar]
$P(H)$	- Kans op horizontale pipegroeitussen uittredepunt en filterscherm	[1/jaar]

De kansen op verstopping en gebeurtenis A zijn reeds in paragraaf 2.6.1 toegelicht. Deze kansen zijn voor dit faalpad ook van toepassing maar onderstaand niet opnieuw beschreven.

Heave benedenstroomse zijde: P(E)

Voor heave aan de benedenstroomse zijde van het (verstopte) filterscherm wordt aangesloten bij de gangbare werkwijze voor heave-/kwelschermen (paragraaf 8.1.3). In de praktijk wordt hiervoor een

rekenwaarde van het kritiek verhang van $i_{c,h}=0,5$ gehanteerd. Het daadwerkelijke kritieke verhang bij opwaartse gerichte grondwaterstroming is afhankelijk van de uitstroomcondities (geconcentreerd via wel en pipesysteem of vrije uitstroming), geohydrologische condities en van geotechnische condities zoals de relatieve dichtheid en de porositeit. Het kritieke verhang varieert tussen de 0,85 (zeer losse pakking) en 1,20 (vast gepakt). Voor het kritiek verhang wordt in de praktijk een algehele veiligheidsfactor van ongeveer 2 gehanteerd (Calle, 1998). Wanneer de uitstroomcondities en geohydrologische condities dusdanig zijn geschematiseerd dat onzekerheid in deze uitgangspunten vrijwel niet bijdragen aan de faalkans dan kan met onderstaande aanpak een veilige schatting worden gemaakt van de faalkans voor heave.

Voor een faalkansinschatting kan geen gebruik gemaakt worden van de WBI-correlaties, omdat deze niet gekalibreerd zijn voor heave achter een scherm maar voor heave over een deklaag. Deze kans kan worden ingeschat door iteratief met een stromingsberekening de buitenwaterstand te bepalen waarbij het kritiek verhang van $i_{c,h}=0,5$ wordt overschreden. Vervolgens kan de overschrijdingskans van deze waterstand worden bepaald om tot een kansinschatting te komen.

In de berekening van de optredende heave-gradiënt moet het effect van verstopping van het filterscherm worden meegenomen. Dit wordt gedaan door in de stromingsberekening het filterscherm veiligheidshalve volledig ondoorlatend te stellen en de daarbij berekende gradiënt direct achter het filterscherm (tussen punt en onderkant deklaag) te hanteren als heave-gradiënt. Voor de uitvoering van deze analyses wordt geadviseerd om aan te sluiten bij de (nog te verschijnen) DIV-publicatie over heave schermen.

Opbarsten ter plaatse van uittredepunt: P(F)

De kans op opbarsten ter plaatse van het uittredepunt kan bepaald worden middels semi-probabilistische correlaties conform WBI 2017 (Bijlage III Sterkte en Veiligheid). Deze kans wordt niet significant beïnvloed door het optreden van verstopping van het filterscherm. De faalkans wordt bepaald op basis van de stabiliteitsfactor tegen opbarsten en de betrouwbaarheidsindex van het dijktraject (vgl. 7.4) gelijk aan de ondergrens waarde van de norm. De stabiliteitsfactor (vgl. 7.1) is de verhouding tussen het kritisch stijghoogteverschil (effectieve neerwaartse sterkte) (vgl. 7.2) en het optredend stijghoogteverschil (opwaartse belasting) (vgl. 7.3).

Heave ter plaatse van uittredepunt: P(G)

De kans op (deklaag-)heave ter plaatse van het uittredepunt kan bepaald worden met de semi-probabilistische correlaties conform WBI 2017 (Bijlage III Sterkte en Veiligheid) en bijbehorende formules. Deze kans wordt niet significant beïnvloed door het optreden van verstopping van het filterscherm. De faalkans wordt bepaald op basis van de stabiliteitsfactor tegen heave en de betrouwbaarheids-index van het dijktraject (vgl. 7.7) gelijk aan de ondergrens waarde van de norm. De stabiliteitsfactor (vgl. 7.5) is de verhouding tussen de berekende heave gradiënt (vgl. 7.6) en de kritieke heave-gradiënt (0,3 [-]) over de deklaag.

Horizontale pipegroei tot filterscherm: P(H)

De kans op horizontale pipegroei tot het filterscherm wordt grotendeels beïnvloed door de afstand tussen het filterscherm en het uittredepunt en de ontwikkeling van de pipelengte. Indien de kritieke pipelengte gelijk of kleiner is dan de afstand tussen het filterscherm en het uittredepunt kan de kans van horizontale pipegroei tot het filterscherm bepaald worden met vgl. 7.8 en vgl. 7.9 uit WBI 2017 (Bijlage III Sterkte en Veiligheid). De kritieke pipelengte kan berekend worden aan de hand van de methode die beschreven is in (Rosenbrand et al., 2022) en/of met rekensoftware zoals D-Geo Flow.

Indien de afstand tussen het uittredepunt en het filterscherm kleiner is dan de kritieke pipelengte kunnen de WBI-correlaties niet gebruikt worden. Om tot een grove kansinschatting te komen, kunnen onderstaande stappen worden gevolgd:

1. Bepaal de onbegrensde kwelweglengte en het bijbehorende kritiek verval met behulp van de rekenregel van Sellmeijer.
2. Bepaal de pipelengte bij het kritiek verval op basis van figuur 12.1 uit (Rosenbrand et al., 2022).
3. Bepaal vervolgens het verval waarbij de pipelengte gelijk is aan de afstand tussen het filterscherm en het uittredepunt op basis van figuur 12.2 uit (Rosenbrand et al., 2022).
4. Bepaal de buitenwaterstand waarbij dit verval overschreden wordt.
5. Bepaal de overschrijdingskans van deze waterstand om tot de kansinschatting te komen van pipegroei tot aan het filterscherm.

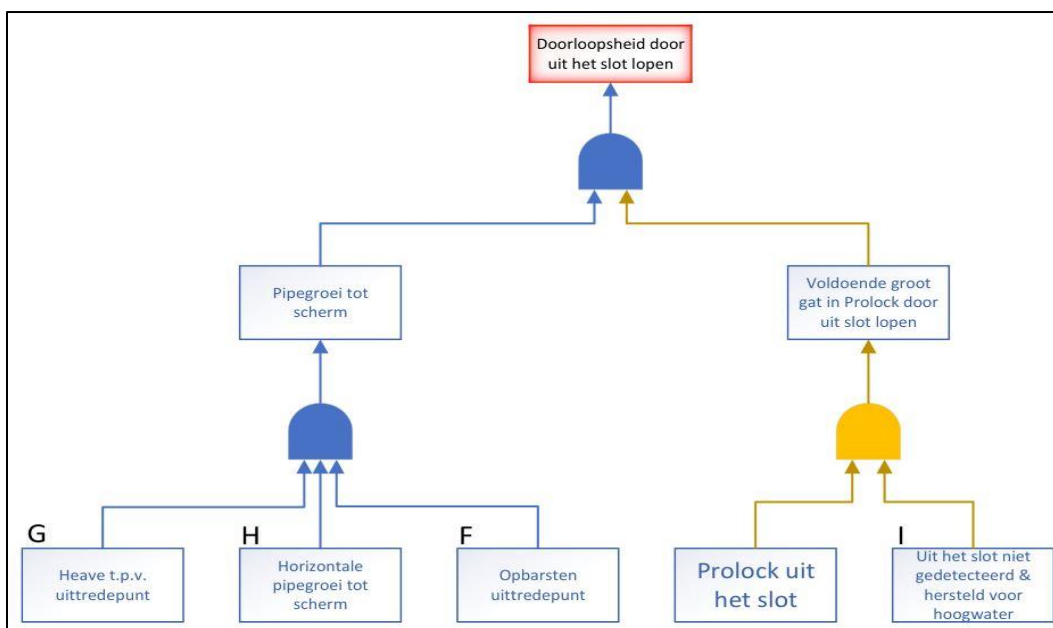
Bij het inschatten van de kans op horizontale pipegroei tot het filterscherm, op basis van bovenstaande stappen dient opgemerkt te worden dat:

1. Er hierbij geen onzekerheid in de pipelengte meegenomen wordt.
2. Het pipegroeimodel niet is afgeleid voor een situatie met een filterscherm.

Daarom wordt geadviseerd om hiervoor een voldoende veilige schematisering aan te houden, zodat de berekende kans ook voldoende veilig is.

2.6.3 Doorloopsheid door uit het slot lopen

In figuur 2-6 is de foutenboom voor de bedreiging 'doorloopsheid door uit het slot lopen' uitgewerkt.



Figuur 2-6. Foutenboom van de bedreiging 'doorloopsheid door uit het slot lopen' (afhankelijke gebeurtenissen zijn met blauwe pijlen weergegeven en onafhankelijke gebeurtenissen met oranje pijlen).

Met vergelijkingen (2-10), (2-11) en (2-12) wordt de kans op 'doorloopsheid door uit het slot lopen' ingeschat. Opgemerkt wordt dat er nog conservatisme zit in de gepresenteerde aanpak. De mogelijkheid tot doorloopsheid is waarschijnlijk afhankelijk van de mate waarin een profiel uit het slot loopt. En het ruimingsproces na doorgaande pipevorming zal waarschijnlijk ook langzamer verlopen. Deze aspecten zijn nu (nog) niet meegenomen in voorliggende werkwijze. Indien benodigd kunnen deze aspecten verder worden uitgewerkt om te integreren in de faalkansanalyse.

In de vergelijkingen is verondersteld dat de gebeurtenissen F, G en H volledig afhankelijk zijn. In werkelijkheid zijn deze gebeurtenissen echter niet volledig afhankelijk, het betreft dus een veilige

aanname. Het optreden van het uit het slot lopen en de gebeurtenissen I en F/G/H zijn ten opzichte van elkaar onafhankelijk verondersteld.

Voor een dijkvak met n kunststof profielen kan de kans op een voldoende groot gat door uit het slot lopen beschouwd worden als een serie-systeem met n onafhankelijk gebeurtenissen. De kans dat ten minste één profiel binnen een vak uit het slot loopt en dat dit niet gedetecteerd en hersteld wordt, door de inzet van slotverklikkers, kan met vergelijking (2-12) berekend worden:

$$P_f(\text{doorloopsheid}) = P_{\text{uit het slot, per vak}} \cdot P(F|\text{uit slot}) \quad (2-10)$$

$$P(F|\text{uit slot}) = P(\text{pipegroei tot scherm}) = \min[P(F), P(G), P(H)] \quad (2-11)$$

$$P_{\text{uit het slot, per vak}} = 1 - \{1 - [P(\text{uit slot}) \cdot P(I)]\}^n \quad (2-12)$$

waarbij:

$P_{\text{uit het slot, per vak}}$	- Kans dat er na de uitvoering binnen een vak minstens één profiel ongemerkt uit het slot zit	[-]
$P(F \text{uit slot})$	- Kans op falen (doorloopsheid) gegeven uit het slot lopen	[1/jaar]
$P(\text{pipegroei tot scherm})$	- Kans op pipegroei tot filterscherm	[1/jaar]
$P(F)$	- Kans op opbarsten ter plaatse van uittredepunt	[1/jaar]
$P(G)$	- Kans op heave ter plaatse van uittredepunt	[1/jaar]
$P(H)$	- Kans op horizontale pipegroei tussen uittredepunt en filterscherm	[1/jaar]
$P(\text{uit slot})$	- Kans dat een individueel profiel bij installatie uit het slot loopt	[-]
$P(I)$	- Kans dat uit het slot lopen niet gedetecteerd en hersteld wordt voor hoogwater	[-]
n	- Aantal kunststof profielen binnen vak aanwezig	[-]

De kansen op gebeurtenissen F, G en H zijn reeds in paragraaf 2.6.2 toegelicht. Deze kansen zijn voor dit faalpad ook van toepassing maar onderstaand niet opnieuw beschreven.

Uit het slot gelopen: P (uit het slot)

Het optreden van deze bedreiging is onderzocht door middel van twee maakbaarheidsproeven en gedocumenteerd in (Van Arkel & Veenbergen, 2022) en (Rohe & Van der Geer, 2023). Tijdens de installatie van circa 120 kunststof profielen bij de maakbaarheidsproeven is één profiel uit het slot gelopen. Op basis van deze faalfrequentie is de kans op deze gebeurtenis ingeschat op 1% bij het installeren van één kunststof profiel. De kans op deze gebeurtenis wordt tijdens het ontwerpproces en na realisatie bij deeltraject Salmsteke geëvalueerd.

Uit het slot lopen niet gedetecteerd en hersteld voor hoogwater: P(I)

In het faalpad is als mitigerende maatregel het toepassen van slotverklikkers opgenomen, zoals beschreven in het installatieprotocol (paragraaf 13.2). Het is denkbaar dat een slotverklikker in een enkele situatie het uit het slot lopen niet kan detecteren. De kans dat het uit het slot lopen niet gedetecteerd en hersteld wordt is middels expert judgement ingeschat op 0,1%. Dit kan als bovengrens aangehouden worden aangezien het profiel niet over de hele diepte uit het slot zal lopen en niet noodzakelijkerwijs op de meest kritieke locaties waar pipevorming zal optreden.

2.7 Overzicht handelingsperspectief

In de voorgaande paragrafen is ingegaan op het gewenste gedrag van het kunststof filterscherm, het primaire faalpad en de bedreigingen die invloed hebben op de staat van het filterscherm. Alle

faalpaden zijn vervolgens geanalyseerd op de bijdrage die zij leveren aan de overstromingskans van de kering. Hierbij is rekening gehouden met de te treffen maatregelen in iedere projectfase: ontwerp, uitvoering en beheer. Het totaaloverzicht van alle faalpaden, de maatregelen die getroffen moeten worden, de optionele maatregelen (cursief gedrukt) en de bijdrage van de faalpaden aan de overstromingskans zijn opgenomen in bijlage A.

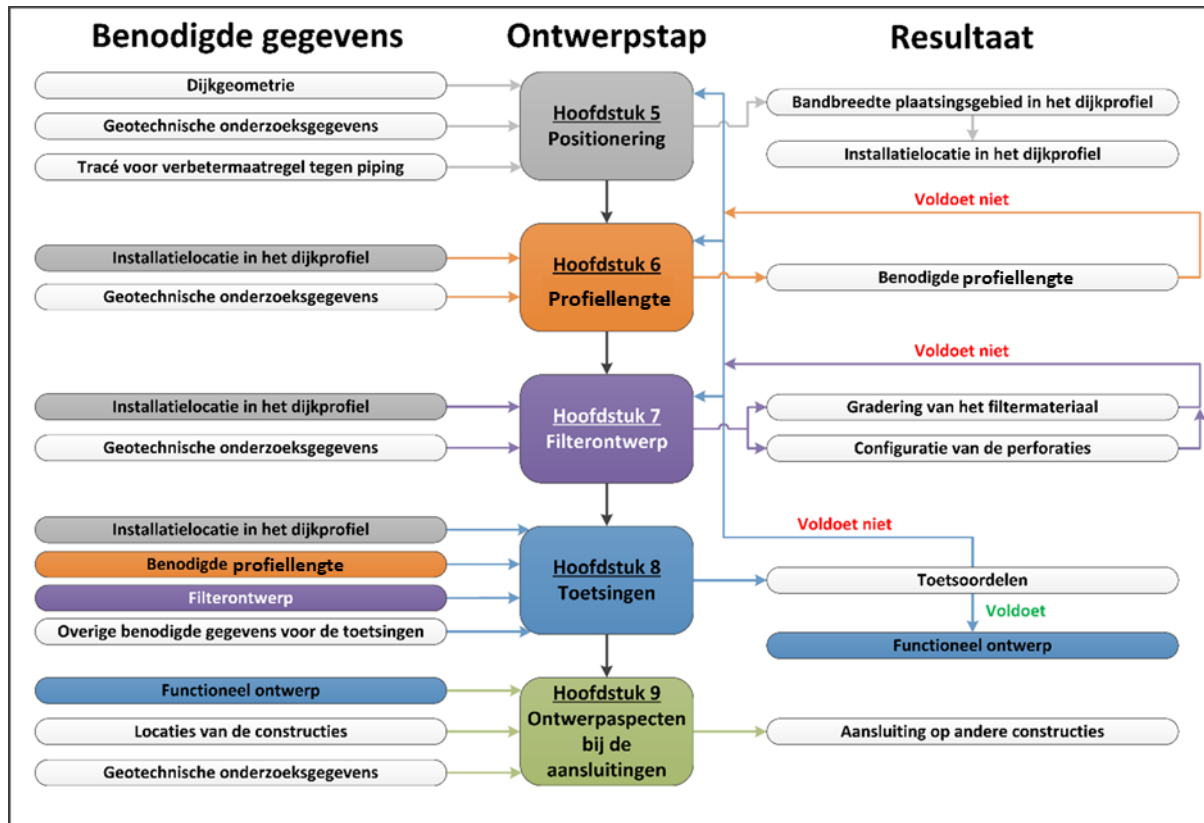
De beschreven maatregelen (niet cursief) uit bijlage A dienen uitgevoerd te worden om te garanderen dat de bijdrage van deze faalpaden niet significant is. Van de significante faalpaden conform paragraaf 2.6 dient daarnaast aangetoond te worden dat de bijdrage aan de overstromingskans voldoende klein is. Indien hieraan wordt voldaan, voldoet het ontwerp aan de waterveiligheidseisen.

Deel B

Ontwerp

3 Inleiding

Het ontwerp van het kunststof filterscherm dient zodanig te zijn opgesteld dat het gedurende de levensduur zijn functie als maatregel tegen piping kan vervullen. Het ontwerp dient opgesteld te worden aan de hand van de hoofdstukken in deel B van deze richtlijn. Hierbij dienen de hoofdstukken chronologisch te worden afgegaan. In figuur 3-1 is het ontwerpproces schematisch weergegeven.



Figuur 3-1. Ontwerpproces van het kunststof filterscherm.

De eerste ontwerpstap is het bepalen van de locatie van het kunststof filterscherm in het dijckprofiel conform hoofdstuk 5. Hiertoe dient de bandbreedte van het plaatsingsgebied binnen het dijckprofiel bepaald te worden, waarna een locatie binnen deze bandbreedte gekozen wordt. Aan de hand van de gekozen locatie van het filterscherm binnen het dijckprofiel wordt conform hoofdstuk 6 de benodigde profiellengte bepaald. Hierna wordt in hoofdstuk 7 het filterontwerp afgestemd op de gekozen locatie binnen het dijckprofiel. Voor het opgestelde ontwerp dienen vervolgens de toetsingen uit hoofdstuk 8 te worden uitgevoerd. Indien aan één of meerdere toetsingen niet wordt voldaan, dient de positie van het filterscherm, de profiellengte of het filterontwerp te worden gewijzigd. Een functioneel ontwerp wordt verkregen zodra aan alle toetsingen wordt voldaan. Tot slot worden de ontwerpaspecten bij eventuele aansluitingen van het kunststof filterscherm op andere constructies beschouwd in hoofdstuk 9.

In deel B van deze richtlijn zijn tevens twee aanvullende hoofdstukken opgenomen, die gerelateerd zijn aan het ontwerp. Hoofdstuk 4 behandelt de randvoorwaarden voor het geotechnisch grond- en laboratoriumonderzoek die specifiek voor het kunststof filterscherm van toepassing zijn. Hoofdstuk 10 behandelt de robuustheden van het ontwerp.

4 Benodigde onderzoeksgegevens

4.1 Inleiding

Om het ontwerpproces (figuur 3-1) te kunnen doorlopen zijn verschillende onderzoeksgegevens benodigd. De basis voor het bepalen van de benodigde onderzoeksgegevens is de faalpadanalyse (hoofdstuk 2). Daarin is per faalpad de relatie tussen de benodigde onderzoeksgegevens en de kans van optreden bepaald. Dit betekent dat intensiever onderzoek nodig is waar een groter risico is geïdentificeerd ten aanzien van de overstromingskans. Daarnaast zijn er voor bepaalde ontwerpstappen specifieke uitgangspunten benodigd die alleen kunnen worden verkregen door middel van veldonderzoek. In dit hoofdstuk zijn concrete handvatten gegeven, onder andere op basis van bekende richtlijnen, waarop het onderzoek voor deeltraject Salmsteke moet worden gebaseerd.

Bij het ontwerpen van het kunststof filterscherm zijn gegevens van de ondergrond, de geohydrologie, de dijkgeometrie en ondergrondse obstakels nodig. Deze gegevens worden ingewonnen door het uitvoeren van een bureaustudie aangevuld met veld- en laboratoriumonderzoek. In paragraaf 4.2 is nader ingegaan op het milieukundig onderzoek en in paragraaf 4.3 op het inwinnen van gegevens van de ondergrond en de geohydrologie. Het inwinnen van gebiedsdekkende geometrische data en het vaststellen van de ligging van eventuele ondergrondse obstakels wijkt niet af van andere type dijkversterkingen. Hierom is het inwinnen van deze gegevens en de eventueel daaraan gekoppelde eisen in voorliggende richtlijn niet nader uitgewerkt.

4.2 Milieukundig onderzoek

Op basis van de faalpadanalyse (hoofdstuk 2), inclusief bijbehorende achtergrondrapporten, is specifiek onderzoek naar milieukundige aspecten niet benodigd. De randvoorwaarde dat ter hoogte van de filterperforaties anaerobe condities aanwezig zijn, is voldoende om het chemisch/bacteriologisch verstopping van het filterscherm te voorkomen. Doordat met het afsluiten van de kokers aan de bovenkant (paragraaf 13.6) en het afwerken van het filterscherm onder maaiveld (paragraaf 13.7) de toevoer van zuurstof naar de filterperforaties wordt voorkomen, is het risico op chemisch/bacteriologisch verstopping verwaarloosbaar (Waterloo & Verhagen, 2023).

Handelingen tijdens de uitvoering en de gebruiksfase kunnen echter wel tot een potentiële verstopping leiden. Voorkomen dient te worden dat organische stoffen, zoals (strooi)zouten, olie en koelvloeistoffen, tijdens installatie of inspectie in de kokers belanden. Dergelijke organische stoffen zijn een voedingsbodem voor bacteriën en kunnen (tijdelijk) tot bacteriegroei en daarmee verstopping leiden. Daarnaast dient het reinigen van de kokers met schoon water te worden uitgevoerd (paragraaf 13.4). Hiermee wordt voorkomen dat eventuele bacteriën, die in zuurstofloze omgevingen biofilm kunnen vormen, in de kokers belanden (Waterloo & Verhagen, 2023).

Tot slot is het PVC van de kunststof profielen niet vatbaar voor een mogelijk agressief milieu (hoge resistentie tegen veel organische en anorganische stoffen), wordt het in de gebruiksfase niet blootgesteld aan UV-straling en vormt het PVC geen voedingsbodem voor bacteriën. Uitloging van plastic micro- en nanodeeltjes en verstopping van het filterscherm door bacteriën zijn hiermee verwaarloosbaar (Van den Boer, 2023).

4.3 Geotechnisch en geohydrologisch onderzoek

Geotechnische en geohydrologische gegevens, en de bijbehorende variatie hierin, zijn belangrijke uitgangspunten voor het ontwerp van het kunststof filterscherm. Bij het ontwerpen zijn de volgende geotechnische en geohydrologische gegevens benodigd:

- Grondopbouw;
- Dikte van de deklaag;

- Volumiek gewicht van de grondlagen;
- Sterkte- en stijfheidseigenschappen (inclusief dichtheid) van de grondlagen;
- De voor piping gevoelige (maatgevende) zandlaag;
- Gradatie van de voor piping gevoelige zandlaag;
- Doorlatendheid van de voor piping gevoelige zandlaag;
- Geohydrologie, d.i. de buitenwaterstand, de freatische grondwaterstand, de stijghoogte en het verloop van de waterspanningen in de diepte, voor alle omstandigheden (van GLG tot WBN).

Voorgenoemde gegevens kunnen in drie stappen van grof naar fijn worden ingewonnen om het ontwerpproces van het kunststof filterscherm te doorlopen:

Stap 1: Bureaustudie

Bij aanvang van het dijkversterkingsproject is reeds (in beperkte mate) informatie met betrekking tot de benodigde onderzoeksgegevens beschikbaar middels uitgevoerd grondonderzoek en geohydrologische gegevens. Deze gegevens werden gebruikt voor het vaststellen van het veiligheidsoordeel voor piping. Met voorgenoemde gegevens in combinatie met openbare gegevens, zoals een geologische kaart en een peilkaart, kan al een goed inzicht worden verkregen in de mogelijkheden voor het toepassen van het kunststof filterscherm als verbetermaatregel tegen piping. Ontwerpaspecten van het kunststof filterscherm, zoals lengte en de grofstoffelijke configuratie van de filterperforaties, kunnen indicatief worden bepaald waarmee de haalbaarheid voor de toepassing kan worden vastgesteld.

Stap 2: Gebiedsdekkend onderzoek

Aanvullend op de reeds beschikbare gegevens uit stap 1 dient een uitgebreid geotechnisch grond- en laboratoriumonderzoek en geohydrologisch onderzoek uitgevoerd te worden om inzicht te krijgen in de lokale grondeigenschappen. In tabel 4-1 is een overzicht gegeven van de benodigde onderzoeksgegevens, de mogelijke onderzoeksmethode(n) om de gegevens in te winnen, de ontwerpstap waarvoor de informatie benodigd is en tot slot een indicatie ten aanzien van aantallen, dieptes, locaties en onderlinge afstanden van de onderzoeken. Met deze gegevens kan vervolgens het ontwerp conform hoofdstukken 5 t/m 9 worden opgesteld.

Stap 3: Optioneel: aanvullend onderzoek

Indien noodzakelijk kan aanvullend geotechnisch en/of geohydrologisch onderzoek worden uitgevoerd. Redenen hiervoor kunnen zijn, maar zijn niet beperkt tot:

- Het lokaal aantreffen van een sterke variatie in de deklaagdikte. Op deze locaties kan een verfijning in de onderzoeksdichtheid worden toegepast.
- Het nodig hebben van aanvullende gegevens voor het ontwerp die niet voorzien waren, bijvoorbeeld korrelverdelingen op grotere dieptes dan op voorhand verwacht.
- Het nodig hebben van onderzoekspunten op het in stap 2 bepaalde tracé van het filterscherm, indien dit niet al (voldoende) beschikbaar was vanuit stap 2.
- Het vereisen van (aanvullende) onderzoeksgegevens op het in stap 2 bepaalde tracé van het filterscherm voor de uitvoering, indien dit niet al (voldoende) beschikbaar was vanuit stap 2. Voor de eisen aan deze eventuele onderzoeksgegevens wordt verwezen naar paragraaf 14.1.

Tabel 4-1. Richtlijnen voor veld- en laboratoriumonderzoek ten behoeve van het ontwerp.

Te onderzoeken eigenschap	Onderzoeksmethode(n)	Onderzoeksrichtlijn	Benodigd voor ontwerpstep kunststof filterscherm
<ul style="list-style-type: none"> - Grondopbouw - Dikte van de deklaag - Vaststellen van de voor piping gevoelige (maatgevende) zandlaag 	<p><i>Veldonderzoek</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Sonderingen, klasse 2, met waterspanningsmeting - Boringen <p><i>Laboratoriumonderzoek</i></p> <p>Niet van toepassing</p>	<p><i>Hart-op-hart afstand</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Dwarsraaien tot max. 250 m in langsrichting van de dijk (POV piping, 2018); - Bij de binnenteen/het achterland max. 30 m in langsrichting van de dijk (POV piping, 2018). <p><i>Aantallen</i></p> <p>Vast te stellen met de tracélengte en gehanteerde hart-op-hart afstand.</p> <p><i>Locatie</i></p> <p>In raaien (BIK/BUK, BiTa/BIT, AL) en tussen de raaien in bij de binnenteen of in het achterland.</p> <p><i>Diepte</i></p> <p>Vast te stellen op basis van geologische gegevens. Onderzoeken uitvoeren tot ten minste 3 m in de watervoerende zandlaag.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Positionering - Profiellengte - Toetsingen - Ontwerpaspecten bij de aansluitingen
<ul style="list-style-type: none"> - Gradatie van de voor piping gevoelige zandlaag - Korrelverdeling 	<p><i>Veldonderzoek</i></p> <p>Boringen i.c.m. monsternamen (gradatie)</p> <p><i>Laboratoriumonderzoek</i></p> <p>Zeefproef op genomen monster bij boring (korrelverdeling)</p>	<p><i>Hart-op-hart afstand</i></p> <p>Boringen bij de binnenteen/het achterland tot max. 40 m in langsrichting van de dijk (POV piping, 2018).</p> <p><i>Aantallen</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Elke meter 1 monsternamen vanaf de bovenkant van de zandlaag tot ten minste 3 m in de zandlaag. - Verspreid over de genomen monsters in het projectgebied minstens 75 zeefproeven voor een foutmarge van 5% (POV piping, 2018). <p><i>Locatie</i></p> <p>Bij de binnenteen of in het achterland.</p> <p><i>Diepte</i></p> <p>Vast te stellen op basis van geologische gegevens. Boringen uitvoeren tot ten minste 3 m in de voor piping gevoelige zandlaag.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Filterontwerp

Te onderzoeken eigenschap	Onderzoeksmethode(n)	Onderzoeksrichtlijn	Benodigd voor ontwerpstep kunststof filterscherm
Doorlatendheid van de voor piping gevoelige zandlaag	<p><i>Veldonderzoek</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - HPT-sonderingen (horizontaal) - Optioneel: HPT-AMPT sonderingen (horizontaal en verticaal) <p><i>Laboratoriumonderzoek</i></p> <p>Optioneel: uit correlaties met de korrelverdeling uit zeefproeven</p> <p><i>Literatuur</i></p> <p>Optioneel en/of aanvullend: doorlatendheid en anisotropie op basis van literatuur.</p>	<p><i>Hart-op-hart afstand</i></p> <p>Tot max. 300 m in langsrichting van de dijk voor metingen van de horizontale doorlatendheid (POV piping, 2018).</p> <p><i>Aantallen</i></p> <p>Vaststellen met de tracélengte en gehanteerde hart-op-hart afstand. Bij uitsluitend gebruik van correlaties dient per onderzoekspunt elke meter tot ten minste 10 m in de zandlaag een doorlatendheid te zijn afgeleid.</p> <p><i>Locatie</i></p> <p>Bij de binnenteen of in het achterland.</p> <p><i>Diepte</i></p> <p>Vast te stellen op basis van geologische gegevens. HPT-sonderingen en eventuele boringen voor monsternamen uitvoeren tot ten minste 10 m in de voor piping gevoelige zandlaag.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Filterontwerp - Toetsingen - Ontwerpaspecten bij de aansluitingen
Geohydrologie	<p><i>Veldonderzoek</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Peilbuizen of waterspanningsmeters (freatische grondwaterstand en stijghoogte) - Sonderingen, klasse 2, met waterspanningsmeting (verloop van de waterspanningen) <p><i>Laboratoriumonderzoek</i></p> <p>Niet van toepassing</p> <p><i>Literatuur</i></p> <p>Optioneel en/of aanvullend: geohydrologie op basis van literatuur en/of richtlijnen.</p>	<p><i>Hart-op-hart afstand</i></p> <p>Vast te stellen in overleg met het waterschap.</p> <p><i>Aantallen</i></p> <p>Ten minste 1 raai met peilbuizen en/of sonderingen.</p> <p><i>Locatie</i></p> <p>In raaien (BUT, BUK/BIK, BIT, AL).</p> <p><i>Diepte</i></p> <p>Vast te stellen op basis van geologische gegevens en/of grondonderzoek. De filters van de peilbuizen dienen in de deklaag (freatische grondwaterstand) of aan de bovenzijde van de watervoerende zandlaag (stijghoogte) te zijn gelegen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Positionering - Profiellengte - Filterontwerp - Toetsingen - Ontwerpaspecten bij de aansluitingen

Te onderzoeken eigenschap	Onderzoeksmethode(n)	Onderzoeksrichtlijn	Benodigd voor ontwerpstep kunststof filterscherm
<ul style="list-style-type: none"> - Volumiek gewicht van de grondlagen - Sterkte- en stijfheidseigenschappen van de grondlagen 	<p><i>Veldonderzoek</i> Niet van toepassing</p> <p><i>Laboratoriumonderzoek</i> Laboratoriumproeven op in het veld genomen ongeroerde grondmonsters:</p> <ul style="list-style-type: none"> - CAUc TX (klei) en/of DSS proef (veen) (sterkte) - CRS proef (stijfheid) - Bepaling volumiek gewicht <p><i>Literatuur</i> Optioneel en/of aanvullend: grondeigenschappen op basis van literatuur en/of richtlijnen.</p>	<p><i>Hart-op-hart afstand</i> Vast te stellen in overleg met het waterschap.</p> <p><i>Aantallen</i> Per relevante (unieke) klei- en veenlaag:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Minstens 10 CAUc triaxiaalproeven (in geval van klei) of minstens 10 DSS proeven (in geval van veen) voor voldoende kleine student-t factor bij 5% onderschrijdingskans; - Minstens 10 CRS proeven voor voldoende kleine student-t factor bij 5% overschrijdingskans; - Minstens 5 metingen van het volumieke gewicht voor een foutmarge van 5%. Dit aantal metingen geldt binnen de volledige lengte waarover geen structurele afwijking in het volumiek gewicht wordt verwacht (POV piping, 2018). <p>Voorgenoemde proeven uitvoeren conform de vigerende normen en/of protocollen.</p> <p><i>Locatie</i> Grondmonsters verspreid over het projectgebied nemen in het dijklichaam en bij de binnenteen/het achterland.</p> <p><i>Diepte</i> Diepte van de te beproeven grondmonsters vast te stellen op basis van geologische gegevens en/of grondonderzoek.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Positionering - Toetsingen

5 Positionering

De locatie van het kunststof filterscherm in het dijkprofiel bepaalt in grote mate de werking van het filterscherm. Hierom dient voor de met filterscherm voorziene dijkstrekking, inclusief de eventuele benodigde extra strekking voor achterloopsheid (zie bijlage E), bepaald te worden binnen welk gebied in het dijkprofiel, plaatsing van het filterscherm mogelijk is om de werking optimaal te kunnen garanderen. Voor deze bepaling zijn gegevens nodig over de dijkgeometrie, de geotechnische eigenschappen van de grond en de geohydrologie.

Het plaatsingsgebied wordt begrensd door het uittredepunt enerzijds en de buitenkruin anderzijds. Dit gebied wordt vervolgens aan de hand van de volgende criteria verder aangescherpt (Maatkamp et al., 2021) zoals ook in figuur 5-1 is weergegeven:

1. De afstand vanaf het filterscherm tot aan het uittredepunt dient op elke plek binnen het plaatsingsgebied veiligheidshalve ten minste 5 m te bedragen om de invloed van het ontstaan van een erosielens op het filterscherm te voorkomen (Koelewijn, 2021).
2. Het maaiveldniveau ter plaatse van het filterscherm dient ten minste 0,80 m boven de gemiddeld hoogste stijghoogte onder dagelijkse omstandigheden te liggen. Hiermee wordt tijdens de plaatsing van de kunststof profielen met dan nog open kokers (hoofdstuk 13) voorkomen dat maatregelen nodig zijn om uittredend kwelwater via de kokers te beperken.
3. De benodigde profiellengte mag door beperkingen in de stelling (paragraaf 13.2) niet groter zijn dan 8,00 m om het kunststof filterscherm voldoende diep in de voor piping gevoelige zandlaag in te kunnen bedden. Er dient een inbedding van 1,50 m in de voor piping gevoelige zandlaag aangehouden te worden. Indien volgens hoofdstuk 6 echter een grotere inbedding vereist is, dient deze grotere inbedding te worden gehanteerd.
4. Ten einde overmatig belasten van de profielen van het kunststof filterscherm te voorkomen, mag bij een eerste inschatting van het plaatsingsgebied het schuifvlak van de passieve wig het uittredepunt voor piping niet snijden. De hiervoor benodigde minimale afstand van het filterscherm tot het uittredepunt dient in een gelaagde grondopbouw vanaf het dwarskrachten-nulpunt in de constructie (of conservatief: vanaf de onderzijde ervan) te worden berekend met vergelijking (5-1) uitgaande van hoog-karakteristieke waarden van de grondparameters.²
5. Op de locatie dient bij een eerste inschatting van het plaatsingsgebied een minimale korrelspanning van 10 kPa bij hoogwater aanwezig te zijn om voorloopsheid bij het verstopt raken van het filterscherm te voorkomen. Hierbij dient de situatie zonder (invloed van het) filterscherm te worden beschouwd.³

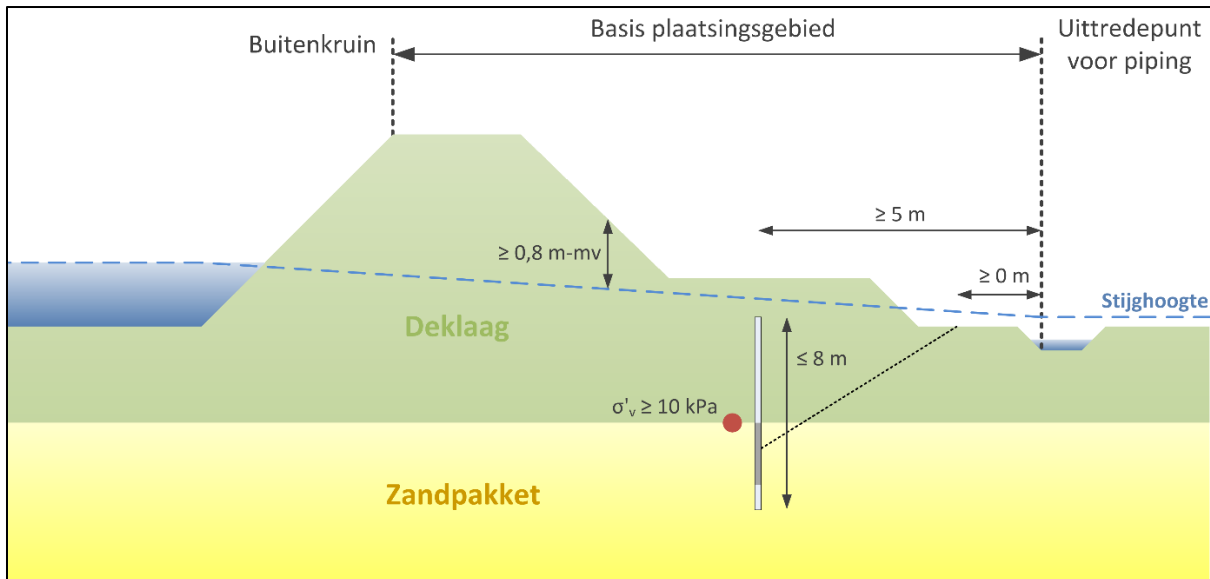
$$b_{wig} = \sum_{i=1}^n h_i \tan \left(45 + \frac{\varphi'_i}{2} \right) \quad (5-1)$$

waarbij:

b_{wig}	- Breedte van de passieve wig	[m]
n	- Aantal grondlagen dat het filterscherm doorsnijdt	[-]
h_i	- Inbedding in grondlaag i	[m]
φ'_i	- Effectieve hoek van interne wrijving van grondlaag i	[°]

² Dit criterium mag worden losgelaten als met een eindige-elementen berekening conform paragraaf 8.2 kan worden aangetoond dat voor kleinere afstanden tot het uittredepunt dan de breedte van de passieve wig aan de spanningscriteria van paragraaf 8.2.5 wordt voldaan.

³ Dit criterium mag worden losgelaten als met een eindige-elementen berekening conform paragraaf 8.1 kan worden aangetoond dat aan de eisen voor voorloopsheid van paragraaf 8.1.3 wordt voldaan.



Figuur 5-1: Randvoorwaarden voor de positionering van het kunststof filterscherm binnen het dijkprofiel.

Het kunststof filterscherm kan langs de gehele dijkstrekking op elke locatie binnen het plaatsingsgebied worden geïnstalleerd. Nadat een locatie is gekozen, dienen de volgende toetsingen te worden verricht:

- Om te garanderen dat de perforaties in de kunststof profielen gedurende de levensduur niet onacceptabel vervormen en daarmee de filterwerking in het geding brengen, moet aan de hand van paragraaf 8.2 worden getoetst of de vezelspanningen ten gevolge van de snedekrachten niet de toelaatbare spanningen overschrijden.
- Om te voorkomen dat de aanwezigheid van het kunststof filterscherm andere faalmechanismen van de dijk kan opwekken, moet aan de hand van paragraaf 8.3 worden getoetst of installatie van het filterscherm niet leidt tot een onacceptabele verlaging van de weerstand tegen andere directe faalmechanismen van de dijk.

Indien aan één of meerdere toetsingen niet wordt voldaan, dient de locatie van het filterscherm in het dijkprofiel te worden gewijzigd.

Het resultaat van deze ontwerpstep is:

- Langs de gehele dijkstrekking een locatie-specifiek plaatsingsgebied waarbinnen het filterscherm toegepast kan worden.
- Per locatie binnen de dijkstrekking een positie in het dijkprofiel waar het filterscherm wordt toegepast. Alle locaties samen vormen het tracé.

6 Profiellengte

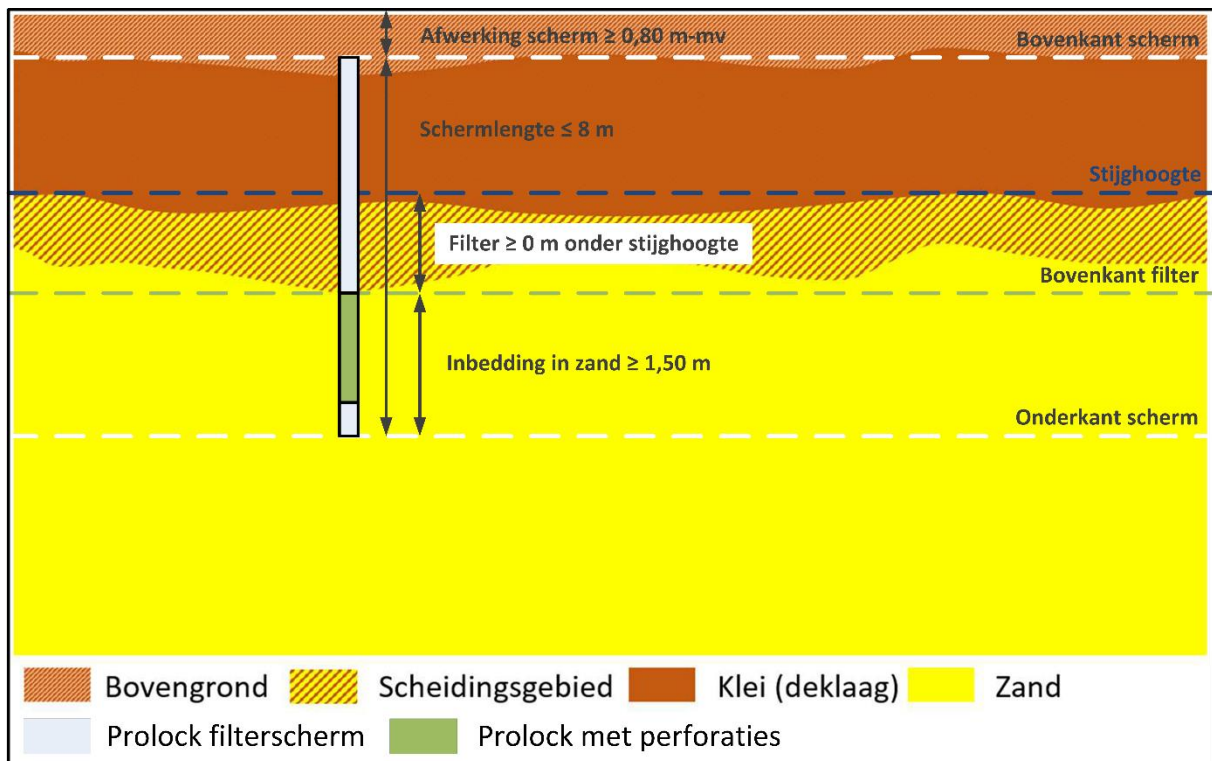
De lengte van de profielen van het kunststof filterscherm dient te worden gekwantificeerd ten einde de benodigde inbedding in de zandlaag en daarmee de werking tegen piping te realiseren. Voor de bepaling van de profiellengte zijn het geotechnisch grondonderzoek, de geohydrologie en de gekozen positie van het filterscherm in het dijkprofiel benodigd. Aan de hand van deze informatie dient bij elk geotechnisch onderzoekspunt langs de gekozen positie binnen de beschouwde dijkstrekking de profiellengte te worden bepaald. Bij de bepaling van de profiellengte dienen de volgende randvoorwaarden in acht te worden genomen (figuur 6-1):

1. De profielen van het kunststof filterscherm dienen ten minste 1,50 m in de voor piping gevoelige zandlaag te zijn ingebracht. Het in de zandlaag ingebedde deel van de kunststof profielen bestaat uit 1,00 m filterperforaties en 0,50 m blinde buis. Als de profielen dieper dan 1,50 m in de zandlaag moeten worden ingebracht, komen de perforaties dieper te zitten door beperkingen in de productiemethodiek (de perforaties worden altijd aangebracht op 0,50 m vanaf de onderkant van het profiel). Bij perforaties die dieper in de zandlaag zitten, ontstaat automatisch extra weerstand tegen piping vanwege de heave-component die erbij komt (extra robuustheid, hoofdstuk 10).
2. De filterperforaties dienen te allen tijde in een zuurstofloze omgeving te zijn gelegen om bacteriologische en chemische verstopping te voorkomen (Waterloo & Verhagen, 2023). Bij deeltraject Salmsteke is ervoor gekozen om een zuurstofloze omgeving te creëren door de filterperforaties in het grondwater te plaatsen. Hierom dienen de filterperforaties bij deeltraject Salmsteke onder de laagst mogelijke stijghoogte in de zandlaag (bijv. bij laagwaterstand in de rivier, droogte of een combinatie) te worden geplaatst om het droogvallen van de filterperforaties te voorkomen.
3. De bovenkant van de profielen van het kunststof filterscherm dient op minimaal 0,60 m onder maaiveld, maar bij voorkeur op ten minste 0,80 m onder maaiveld (vorstvrije aanlegdiepte) te zijn afgewerkt om invloeden van vorst op de kunststof profielen te voorkomen en het risico op schade door maaiveldgebruik te beperken. Voor de maximale afwerkingsdiepte dient rekening worden gehouden met het opbarsten van de werksleuf, het overlopen van de kokers met spanningswater en beperkingen vanuit de stelling (paragraaf 13.1).
4. De profiellengte mag niet groter zijn dan 8,00 m. Hoewel kunststof profielen tot een lengte van 12,00 m geproduceerd kunnen worden, passen profiellengtes groter dan 8,00 m met het vastgestelde werkproces (paragraaf 13.2) niet onder de beschikbare stelling.

Vanuit de productie en installatie is het wenselijk om met een zo beperkt mogelijk aantal verschillende profiellengtes te werken. Hiertoe kan worden gewerkt in (dijk)vakken waarbinnen één profiellengte wordt toegepast. Binnen deze vakken is het aan te raden de profiellengte te dimensioneren op het binnen het vak diepst bekende niveau van de zandlaag. Dit geeft aanvullende robuustheid aan het ontwerp (hoofdstuk 10), omdat het filter binnen het vak op de meeste plekken dieper in de zandlaag komt te liggen dan minimaal vereist (figuur 6-1). Hierdoor is op die plekken extra weerstand tegen piping door de bijkomende heave-component.

De bovenkant van de zandlaag is niet altijd even nauwkeurig vast te stellen. De overgang van de deklaag naar de zandlaag is grillig, waardoor sprake kan zijn van een kleiige/zandige overgangslaag (figuur 6-1). Het is aan te raden de overgangslaag als onderdeel van de deklaag te beschouwen ten einde de bovenkant van de zandlaag niet te onderschatten. Daarnaast bestaat de mogelijkheid dat de deklaag tussen onderzoekspunten in langs- en/of dwarsrichting van de dijk tot grotere diepte reikt dan op basis van het geotechnisch onderzoek blijkt, met als gevolg dat het filter (gedeeltelijk) in de deklaag zou komen te zitten. Dit risico is met de voorgeschreven onderzoeksdichtheid uit hoofdstuk 4 echter beperkt. Daarnaast is het filterscherm bij het dimensioneren van de profiellengte op het diepst bekende niveau van de zandlaag niet gevoelig voor dergelijke lokale afwijkingen in de

deklaagdiepte. Een pipe zal bij een uniforme maaiveldhoogte immers altijd ontstaan op het hoogste niveau van de zandlaag binnen het vak en niet op de plek met een lokaal dikkere deklaag.



Figuur 6-1: Dimensionering van de uniforme profiellengte binnen een (dijk)vak.

Nadat de profiellengte en de boven- en onderkant van het filterscherm zijn vastgesteld, dienen de volgende toetsingen te worden verricht:

- Voor de gekozen profiellengte moet aan de hand van paragraaf 8.1 worden getoetst of voldoende weerstand tegen heave aanwezig is in de voor piping gevoelige maatgevende zandlaag in het geval dat het filter functioneert.
- Voor het garanderen dat de perforaties in de kunststof profielen gedurende de levensduur niet onacceptabel vervormen en daarmee de filterwerking in het geding brengen, moet aan de hand van paragraaf 8.2 worden getoetst of de vezelspanningen ten gevolge van de snedekrachten niet de toelaatbare spanningen overschrijden.

Een toetsing op draagkracht van het kunststof filterscherm is niet noodzakelijk, omdat de effecten van een zakkend scherm geen negatieve gevolgen hebben op het functioneren van het filterscherm.

Indien niet aan één of meerdere toetsingen wordt voldaan, dient de profiellengte te worden gewijzigd totdat aan alle toetsingen wordt voldaan. Als door het wijzigen van de profiellengte niet meer aan de randvoorwaarden voor de profiellengte kan worden voldaan, dient de positie van het filterscherm in het dijkprofiel binnen het plaatsingsgebied van hoofdstuk 5 te worden gewijzigd.

Het resultaat van deze ontwerpstep is de profiellengte per locatie in de beschouwde dijkstrekking. Bij voorkeur wordt het aantal verschillende profiellengtes beperkt door het werken in (dijk)vakken.

7 Filterontwerp

7.1 Inleiding

Het kunststof filterscherm bestaat uit een profiel met twee kokers, die over de bovenste meter in de piping gevoelige zandlaag zijn voorzien van sleufvormige perforaties in de wanden. De kokers zijn gevuld met filterzand. De filterwerking wordt zowel door de geperforeerde kokerwanden als het filterzand verzorgd. Zowel de afmetingen van de perforaties als de gradatie van het filterzand moeten worden bepaald op basis van filterregels en het in-situ zand.

De geperforeerde kokerwanden zijn vergelijkbaar met geweven geotextielen (geotextielen met regelmatige openingen). Voor het ontwerp van de toegestane grootte van de perforaties wordt gebruik gemaakt van een ontwerpmethodode voor geotextielen. Het filterzand in de kokers is qua functie vergelijkbaar met een granulaire filter. Voor het ontwerp hiervan wordt aangesloten bij bestaande kennis over het ontwerp van een granulaire filter. In dit hoofdstuk worden eerst kort enkele basisbegrippen en basis filtertheorie behandeld. Het filterontwerp volgt vanaf paragraaf 7.4. Voor uitgebreidere informatie over de achtergronden wordt verwezen naar (Bijnagte, 2023) en de daarin genoemde literatuur.

Bij het bepalen van een ideale configuratie van de filterperforaties is sprake van tegenstrijdige eisen. Voor het zo min mogelijk verstoren van de geohydrologische situatie is een zo groot mogelijke doorlatendheid gewenst, dus zo veel mogelijk en zo groot mogelijke perforaties. Maar voor het installeren en de snedekrachten in de eindsituatie speelt de sterkte een belangrijke rol en die neemt af met een toenemend aantal en toenemende grootte van de perforaties. Smallere en langere stroken knikken namelijk makkelijker uit. Voor de retentie van het in-situ zand is juist een zo klein mogelijke breedte van de perforaties gewenst. Maar smallere perforaties zullen gemakkelijker dichtsmoren bij het passeren van de cohesieve deklagen en lastiger te reinigen zijn. Ook speelt de locatie van de perforaties bij de aansluiting van de koker op de flenzen een rol voor het behouden van retentie (paragraaf 7.3.3.5).

Uitgangspunt is dat het filter geometrisch gesloten is, en blijft, vanuit filterwerking. Dit betekent dat toekomstige stijgingen van de rivierwaterstand geen negatieve invloed hebben op de filterwerking.

7.2 Interne stabiliteit van grond

Grond die intern instabiel is, zal bij grondwaterstroming geleidelijk steeds verder wegspoelen (suffosie). Dit begint eerst met de kleinste delen gevolgd door steeds iets grotere delen, zodat de structuur van de grond steeds verder verloren gaat en in extreme gevallen de grond zelfs geheel kan wegspoelen. Met name voor filterzand is het een belangrijke eis dat dit niet optreedt. Interne stabiliteit van het granulaire filterzand moet dus gegarandeerd zijn.

Ook de interne stabiliteit van het in-situ zand is van belang. Intern instabiele grond kan in theorie voldoen aan de retentie-eisen voor een granulaire filter, maar losse fijne delen kunnen zich dan door de grond verplaatsen. Dat kan tot andere filterproblemen leiden zoals mechanische verstopping.

In de meeste gevallen kan worden volstaan met de volgende vereenvoudigde beoordeling. Een niet-cohesieve grond is intern stabiel bij:

- een uniformiteitscoëfficiënt $C_u = d_{60}/d_{10} < 8$ en
- een continu korrelverdelingsdiagram, d.w.z. niet 'gap-graded' en niet concaaf omhoog.

Bij gap-graded zanden ontbreken bepaalde korreldiameters, dat wil zeggen dat na het uitvoeren van een zeving, op één of meerdere zeven geen korrels achterblijven. Dit is te zien in korrelverdelings-

diagrammen door een horizontale lijn tussen twee of meer opeenvolgende zeven. Nederlandse zanden zijn over het algemeen intern stabiel.

Over de definitie van de uniformiteitscoëfficiënt C_u bestaat in de praktijk regelmatig verwarring. Om misverstanden te voorkomen: in deze richtlijn wordt onder deze term de waarde verstaan die wordt bepaald op basis van de gehele korrelverdeling en dus niet op basis van alleen de zandfractie. Bij het gebruik van korrelverdelingen moet worden gecontroleerd of daarbij de hier bedoelde methode voor de bepaling van de uniformiteitscoëfficiënt C_u is gehanteerd.

7.3 Filtercriteria

7.3.1 Inleiding

De eerste methode voor het ontwerpen van een filter is afkomstig van (Terzaghi, 1922) en gaat uit van twee criteria: het permeabiliteitscriterium en het retentiecriterium. Het permeabiliteitscriterium geeft een eis voor de relatieve doorlatendheid van het filter ten opzichte van het in-situ zand. Het retentiecriterium geeft een eis voor de korrelgrootte van het filtermateriaal. Dat mag niet te grof zijn om te voorkomen dat het in-situ zand door het filtermateriaal kan bewegen. Er moet sprake zijn van retentie (vasthouden) van het materiaal op de oorspronkelijke plaats.

7.3.2 Het permeabiliteitscriterium

(Giroud, 2010) geeft aan dat een geotextiel zowel de waterspanningen als de grondwaterstroming kan beïnvloeden en dat het permeabiliteitscriterium voor geotextielen moet bestaan uit een waterspanningscriterium (pore pressure criterium) en een grondwaterstromingscriterium (flow rate criterium). Voor grond is het 'flow rate criterium' gelijk aan het permeabiliteitscriterium van Terzaghi: $d_{15F} \geq 5d_{15S}$. Hierin heeft het subscript 'F' betrekking op het filtermateriaal en het subscript 'S' op het in-situ zand. Voor geotextielen gelden andere criteria, bv.: 'een openingspercentage van 10% of meer heeft een verwaarloosbare invloed op de grondwaterstroming'. Voor het kunststof filterscherm is sprake van een combinatie van twee 'geotextielen' (kokerwanden) met daartussen filterzand. Dat betekent dat een regel voor een enkel geotextiel niet automatisch geldig is voor deze situatie. Daarbij geldt dat door de vorm van de geperforeerde kokers en de flenzen het niet mogelijk is om te voldoen aan de bovenstaande regel van 10% openingspercentage. Grofweg wordt voor de geperforeerde delen van de kokers een openingspercentage van 10% bereikt. Een veel groter openingspercentage zou zorgen voor een te grote afname van de benodigde sterkte en weerstand tegen knik tijdens het installeren. Vanuit productietechnische redenen is een beperking dat de minimale hart-op-hart afstand van de perforaties ordegrrootte gelijk is aan de wanddikte van de kokers, dus ca. 4,5 mm.

De flenzen tussen de kokers zijn gesloten. Dat zorgt voor een gemiddeld openingspercentage over de gehele breedte van het profiel van ca. 4,7%. Ook is het geperforeerde deel beperkt tot een hoogte van 1,00 m; erboven en eronder is de koker niet geperforeerd. Dit betekent dat het kunststof filterscherm de grondwaterstand en -stroming zal beïnvloeden. Dat kan acceptabel zijn als de invloed beperkt is en moet per geval worden beschouwd. Voor het bepalen van die beïnvloeding is zowel een toetsing door middel van een numerieke analyse (Maatkamp et al., 2021) als een toetsing door middel van maakbaarheidsproeven (Rohe, 2022) toegepast. Uit beide toetsingen bleek dat het effect van het kunststof filterscherm op de stijghoogte beperkt blijft. In paragraaf 8.1 van deze richtlijn wordt hier nader op ingegaan. Bij het ontwerp van de perforaties wordt, vanuit het permeabiliteitscriterium, gestreefd naar een maximale doorlatendheid waarbij de sterkte van de kunststof profielen met perforaties nog voldoende is om deze te kunnen installeren.

7.3.3 Het retentie criterium

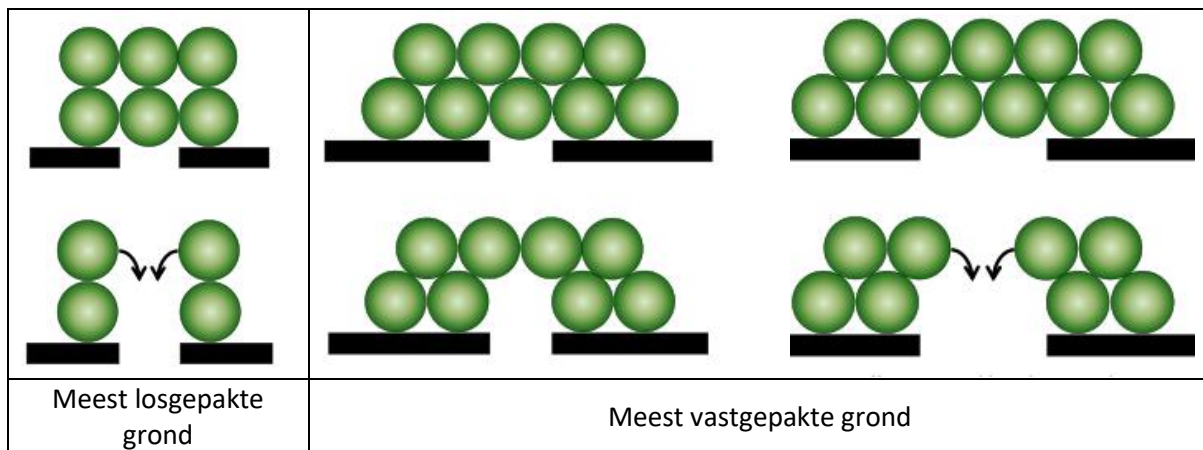
7.3.3.1 Inleiding

Voor de retentie van het in-situ zand geldt dat er bij voorkeur zowel voor het filtermateriaal in de kokers als de geperforeerde kokerwanden retentie wordt bereikt. Voor beide typen retentie bestaan zeer veel verschillende methoden. Zo geven (Palmeira & Fannin, 2002) in een overzicht 29 in de literatuur gepubliceerde methoden voor retentie door geotextielen. Inmiddels zijn daar weer veel nieuwe of aangepaste methoden aan toegevoegd. Voor het kunststof filterscherm is voor de retentiecriteria gebruik gemaakt van de methoden van Giroud. De argumenten om deze methoden te gebruiken zijn weergegeven en toegelicht in (Bijnagte, 2023).

7.3.3.2 Korte beschrijving van de methode van Giroud

In deze paragraaf wordt een sterk verkorte beschrijving gegeven van de methode(n) volgens Giroud. Een uitgebreidere beschrijving wordt gegeven in (Bijnagte, 2023) en in diverse artikelen van Giroud o.a. (Giroud, 1982, 1996, 2003, 2010).

Of een geotextiel grond tegenhoudt, is afhankelijk van de verhouding tussen de korrelgrootte van de grond en de openingsgrootte van het geotextiel. In tegenstelling tot wat vaak wordt gedacht, is het niet zo dat een filteropening zodanig klein moet worden gekozen dat de kleinste voorkomende korrel in de grond wordt tegengehouden. Niet alleen levert dat in veel gevallen problemen op gezien de beperkte doorlatendheid van een dergelijk geotextiel (zie het permeabiliteitscriterium in paragraaf 7.3.2), maar het gaat ook voorbij aan hoe grond zich daadwerkelijk gedraagt. Een belangrijk aspect dat bepaalt of een korrel door een opening kan, is de dichtheid van de grond. Voor de meest los gepakte grond, zie de linkerzijde van figuur 7-1, geldt dat een korrel door een opening gaat die gelijk is aan de diameter van de korrel.

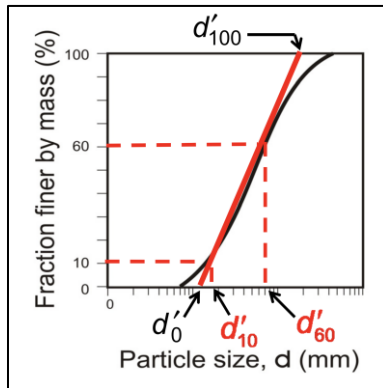


Figuur 7-1. Schematische weergave van boogwerking voor een opening in een geotextiel.

Voor de meest vast gepakte grond is in de rechterzijde van figuur 7-1 echter duidelijk zichtbaar dat er weliswaar een enkele korrel door een opening gaat die gelijk is aan de diameter van de korrel maar dat de overige korrels dat niet doen, doordat ze een soort brug vormen over de opening. Dit is een vorm van boogwerking. Pas bij openingen groter of gelijk aan tweemaal de diameter van de korrel treedt in het weergegeven geval grootschalig korreltransport door de opening op.

Hoewel de situatie in figuur 7-1 specifiek is afgeleid voor een geweven geotextiel is er eigenlijk sprake van een generieke situatie; namelijk een vlakke vervormingstoestand. Dat betekent dat dit ook van toepassing is voor de sleufvormige perforaties van het kunststof filterscherm (Giroud, 2022).

Aangezien natuurlijke grond niet bestaat uit korrels met een uniforme grootte, maar uit meerdere diameters, moet de bepalende diameter voor retentie van de hele korrelverdeling worden bepaald. Dit is, op wiskundige basis, uitgewerkt door (Giroud, 2003). Hij gaat daarbij uit van een linearisatie van de korrelverdeling, zie figuur 7-2, en heeft op basis daarvan de in tabel 7-1 weergegeven relaties afgeleid.



Figuur 7-2. Lineaire uniformiteitscoëfficiënt $C'_u = d'_{60}/d'_{10}$ (in rood).

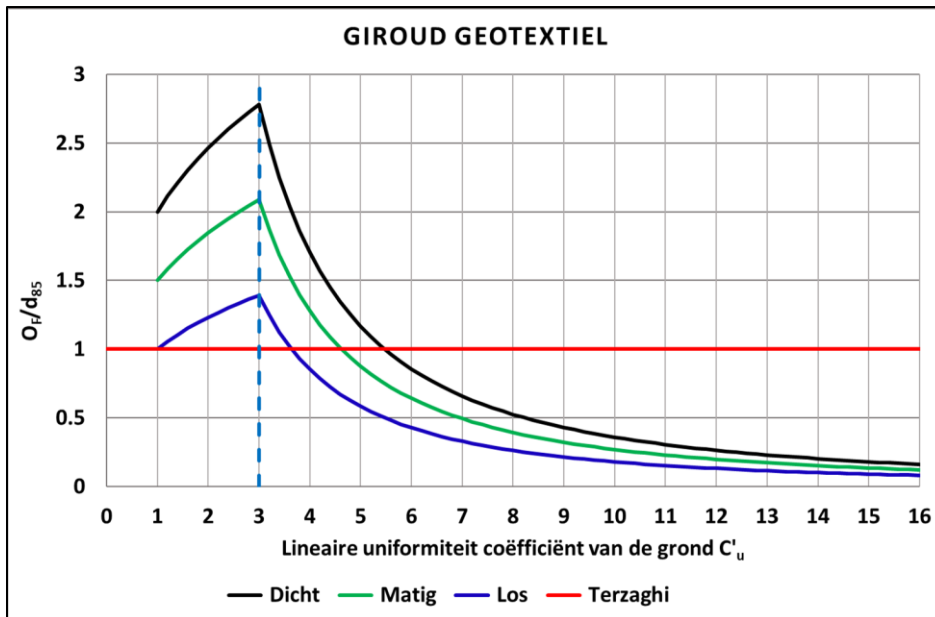
Tabel 7-1. Formules retentiecriteriën voor geotextiele filters volgens (Giroud, 2003).

Dichtheid	Relatieve dichtheid I_d [%]	Maximale perforatie breedte $C'_u \leq 3$ [mm]	Maximale perforatie breedte $C'_u \geq 3$ [mm]
Los gepakt	< 35	$O_F \leq (C'_u)^{0,3} d'_{85}$	$O_F \leq 9 \frac{d'_{85}}{(C'_u)^{1,7}}$
Matig vast gepakt	35 – 65	$O_F \leq 1,5(C'_u)^{0,3} d'_{85}$	$O_F \leq 13,5 \frac{d'_{85}}{(C'_u)^{1,7}}$
Vast gepakt	> 65	$O_F \leq 2(C'_u)^{0,3} d'_{85}$	$O_F \leq 18 \frac{d'_{85}}{(C'_u)^{1,7}}$

De begrippen los, matig vast en vast komen goed overeen met de in Nederland gebruikte grenzen in tabel 2b uit NEN 9997-1+C1:2017 waar 33% en 67% worden gebruikt.

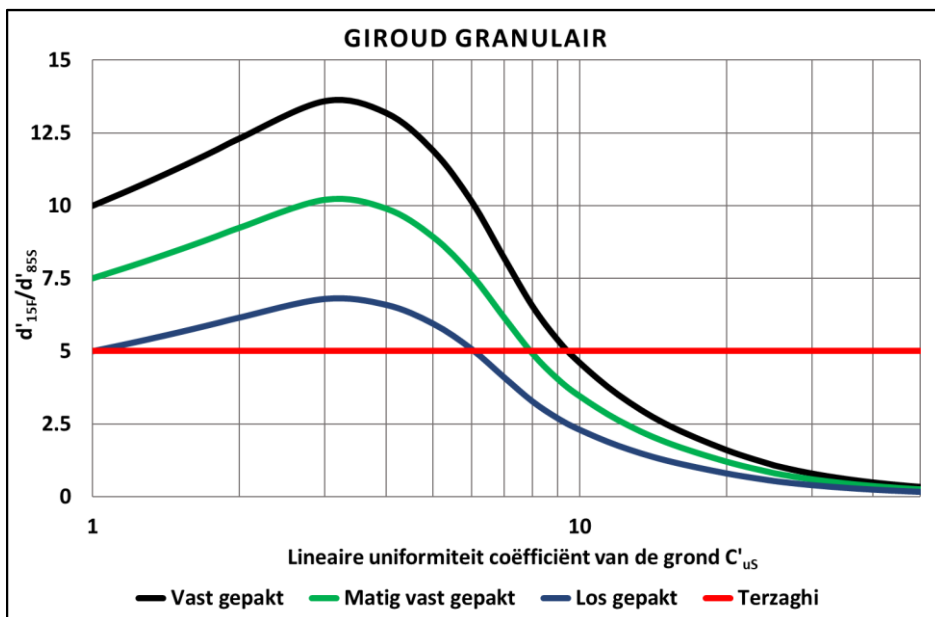
De formules in tabel 7-1 leiden tot de grenslijnen voor los, matig vast en dichtgepakte grond zoals weergegeven in figuur 7-3, die niet mogen worden overschreden. In deze figuur is:

- O_F - Perforatie grootte [mm]
- C'_u - Lineaire uniformiteitscoëfficiënt [-]
- d'_{85} - Korrelgrootte, behorende bij 85% massapercentage van de korrelverdeling [mm]



Figuur 7-3. Retentiecriteria voor geotextiele filters volgens Giroud, met in rood de relatie van Terzaghi.

Voor de situatie van een granulair filter heeft Giroud de grafiek uit figuur 7-4 afgeleid. In deze figuur is de verhouding d'_{15F}/d'_{85S} de gelineariseerde waarde van d_{15} voor het filtermateriaal en d'_{85S} de gelineariseerde waarde van d_{85} van het in-situ zand. Hierbij gelden voor de dichtheden van het in-situ zand dezelfde waarden als bij de geotextiele filters, zie tabel 7-1. In beide figuren is tevens het criterium van Terzaghi weergegeven (rode lijn). Wat in beide grafieken (figuur 7-3 en figuur 7-4) direct opvalt, is dat in Terzaghi's criterium geen rekening wordt gehouden met de uniformiteitscoëfficiënt van het in-situ zand. Dat heeft onder meer tot gevolg dat het criterium van Terzaghi voor grote waarden van C_u te grote openingen toelaat, waardoor retentie niet kan optreden. Bij kleine waarden van C_u geeft het juist kans op verstopping door de kleinere toelaatbare openingen. De meeste Nederlandse zanden hebben, in het algemeen, een $C_u < 3$, waardoor de kans op verstopping bij toepassing van de methode van Terzaghi dus een rol speelt. Dit is één van de argumenten die pleit voor een aanpak op basis van de methoden van Giroud.



Figuur 7-4. Grenzen toelaatbare verhouding d'_{15F}/d'_{85S} volgens Giroud voor verschillende dichtheden van het in-situ zand, met in rood de relatie van Terzaghi.

7.3.3.3 Toepassingsgebied van de methode van Giroud

Het toepassingsgebied van de methode Giroud betreft niet-cohesieve, granulaire materialen, dus zand of grind met geen of weinig toevoegingen zoals klei of silt. Dit is precies de situatie waar het kunststof filterscherm voor wordt ontworpen; namelijk om piping in zandlagen te voorkomen. (Giroud, 2010) heeft zijn methode getoetst aan meerdere praktijksituaties, waaronder het uitgebreid onderzochte en gerapporteerde geval van de Valcros dam. Hier bleek zijn methode nog zeer goed te voldoen voor grond met ca. 30% fijne delen ($<0,075$ mm). Dus die grens kan ook voor het ontwerp van het kunststof filterscherm worden toegestaan bij siltige zanden. De toelaatbare openingsgrootte zal bij zoveel fijne delen vermoedelijk de beperkende factor zijn voor een maakbare filterkoker. De methode geldt niet bij gronden met meer dan 20% klei, voor gronden met een concave korrelverdeling en zogenaamde 'gap-graded' gronden.

7.3.3.4 Retentie in de installatiefase en de gebruiksfase van het filterscherm

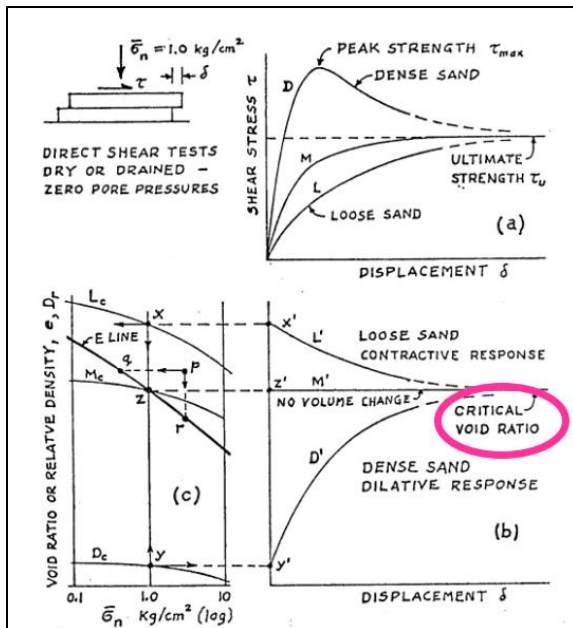
De theorie van Giroud is geldig voor statische situaties. Dat geldt overigens ook voor de andere in de literatuur gevonden alternatieven. Om deze reden is onderscheid gemaakt tussen de installatiefase en de gebruiksfase van het kunststof filterscherm.

In de installatiefase, waarbij de profielen met trilnaalden worden geïnstalleerd (paragraaf 13.2), geldt de theorie niet. Deze situatie is, door de niet statische situatie, ongunstiger dan de theorie aangeeft. Een gunstig effect tijdens deze fase is dat de profielen grondverdringend worden ingebracht. Dat betekent dat de in-situ grond van onder de punt van het profiel opzij beweegt en verlies van materiaal door indringen via de perforaties geheel of gedeeltelijk zal compenseren. Volgens NEN 9997-1+C2:2017 paragraaf 7.6.2.3 tabel 7.c geldt dat de paalklassefactoren voor geheide stalen palen gebruikt mogen worden voor 'constante dwarsafmeting; buis met gesloten punt' met als eis 'De voetplaat van een buispaal met een gesloten voet mag niet meer dan 10 mm uitsteken buiten de buis.' Dit betekent dat uitsluitend de stalen punt met kleine voetplaat (Rohe & Van der Geer, 2023) mag worden gebruikt om reductie van de dichtheid langs de schacht te voorkomen. Doordat de trilnaalden alleen drukkrachten overbrengen gebeurt de installatie in feite met hoogfrequent heien, dat is gunstiger dan trillen omdat de beweging omhoog ontbreekt.

Langs de schacht van de koker zal door schuifvervorming een dichtheid ontstaan die, bij voldoende schuifvervorming, naar de kritieke dichtheid convergeert (Jefferies, M. Shuttle, D., 2020). Hierbij geldt, zie ook figuur 7-5 waarin de kritieke dichtheid is gemarkeerd:

- Los gepakte zand ($I_d < 35\%$) gaat contracteren en wordt dus dichter gepakt;
- Matig gepakte zand ($35\% < I_d < 65\%$) verandert niet van volume en behoudt zijn dichtheid;
- Vastgepakte zand ($I_d > 65\%$) gaat dilateren en wordt lossier gepakt.

De uitgangssituatie na het installeren is dus de matig vast gepakte dichtheid in de formules van Giroud, zie tabel 7-1.



Figuur 7-5. Kritieke dichtheid van zand, afhankelijk van de schuifvorming (Jefferies & Shuttle, 2020).

Opmerkingen:

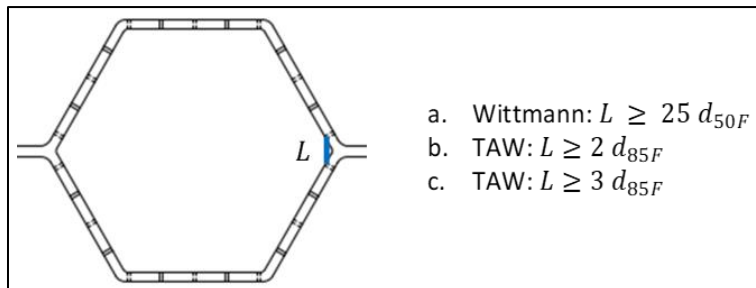
1. Bij de eerste maakbaarheidsproef in het veld bleek bij het reinigen van de perforaties (Van Arkel & Veenbergen, 2022) dat, bij kokers met een perforatiebreedte van 1,5 mm, aanzienlijk zandtransport door de perforaties in de kokers optrad. Gezien de perforatiebreedte is dit te verwachten.
2. Het verwijderen van het ingestroomde zand is per koker uitgevoerd door middel van spoelen (paragraaf 13.3). De zandinloop vlak na het spoelen en de dag erna bleek gering (Van Arkel & Veenbergen, 2022). Ook bij de tweede maakbaarheidsproef in het veld (Rohe & Van der Geer, 2023) bleek dit het geval indien het verval, over de kokerwanden naar binnen, niet te groot werd. Dit verval bleek een grote invloed te hebben op de hoeveelheid zandtransport en biedt de aannemer dus een sturingsmogelijkheid met betrekking tot het zand dat door de perforaties de koker in stroomt. Om deze reden is het aan de beoordeling van de aannemer of de minimale toelaatbare perforatiebreedte volgens een statistische analyse wordt aangehouden. Indien dat niet wordt gedaan bestaat de controle op het bereikt hebben van een voldoende lege koker uit controle van de uitkomende waterstroom. Indien dit schoon water betreft is voldoende zand uit de koker verwijderd.
3. Het filterzand moet uiteraard wel in de kokers kunnen worden aangebracht, dus de eis is dat ingestroomd zand voldoende uit de kokers wordt verwijderd. Dat wil zeggen: tot duidelijk beneden de onderkant van de filterperforaties van de koker. Standaard wordt uitgegaan van een losse pakking van het filterzand ten gevolge van de wijze van het aanbrengen (los storten).

Voor de gebruiksfase geldt dat:

- Retentie van het filterzand over de perforaties moet optreden (filterzand kan niet uitspoelen).
- Retentie van het in-situ zand door het filterzand moet optreden. Hierbij wordt wel altijd een statistische analyse toegepast.
- Retentie van het in-situ zand over de perforaties is niet strikt noodzakelijk. Retentie wordt namelijk altijd al door het filterzand verzorgd. Indien het optreedt is dit een extra veiligheid.

7.3.3.5 Controle retentie van de hoekdetailing van de kokerprofielen

Bij de hoeken waar de kokers van het kunststof profiel overgaan naar de dichte delen van de flenzen is een relatief kleine afstand, L , door het filtermateriaal tussen de perforaties van de kokerwanden aanwezig, zie figuur 7-6. Er geldt dat de diameter van poriekanalen (zgn. constrictions) door granulaire materialen tot een grenswaarde, omgekeerd evenredig is met de lengte van de afstand door het materiaal. Bij korte afstanden kan de minimale diameter van de constrictions mogelijk te groot zijn om de in-situ korrels tegen te houden. Omdat granulaire filters vaak relatief (t.o.v. de korreldiameters) dik zijn speelt dit daarbij meestal geen rol en bestaan voor de benodigde minimale afstand slechts enkele gepubliceerde eisen. Internationaal heeft (Wittmann, 1980) een regel gepubliceerd en in Nederland de (TAW, 1985), deze ontwerpregels zijn weergegeven in figuur 7-6. Voor een configuratie met perforatiebreedtes van 0,5 mm bedraagt de afstand L ongeveer 10 mm, zie figuur 7-6.



Figuur 7-6. Minimumafstand L tussen de perforaties in de voor- en achterkant van het kokerprofiel en ontwerpregels volgens (Wittmann, 1980) en (TAW, 1985).

Het verschil in uitkomst van toetsing met de bovenstaande regels is groot, zie tabel 7-2. Volgens de TAW-regels voldoen alleen de twee grootste vullingen niet, terwijl volgens Wittmann geen enkel filtermateriaal voldoet. Uit de uitgevoerde schaalproeven zijn, voor dit mechanisme, geen duidelijke conclusies te trekken. Bij kleine schaalproeven (I. van der Meer, 2022a) is geconstateerd dat bij doorslag van materiaal dit met name in het midden van de koker zichtbaar is. Dit filtermateriaal voldoet aan geen van de bovenstaande eisen maar de doorslag lijkt toch beperkt. Omdat de achtergrond van de regel van Wittmann niet bekend is, is aangesloten bij de Nederlandse praktijk en is de toetsing volgens de TAW aangehouden. Er geldt dat als retentie op de kokerwand voor het in-situ materiaal gegarandeerd is, dat dit aspect dan niet kritisch is, maar een extra veiligheid kan vormen.

Tabel 7-2. Minimale filterdiktes (L in figuur 7-6) voor retentie van een granulair filter.

Minimale filterdikte [mm]			
Filtermateriaal Korrelgrootte [mm]	Wittmann $25d_{50}$	TAW 1985 $2d_{85}$	TAW 1985 $3d_{85}$
0,32 - 0,71	12,8	1,2	1,3
0,4 - 0,8	14,3	1,4	1,4
0,4 - 0,9	15,3	1,6	1,6
0,71 - 1,25	26,1	2,5	2,5
0,9 - 1,6	31,8	3,1	3,2
1,0 - 2,0	38,0	4,0	4,2
1,4 - 2,5	48,0	4,7	4,9
2,0 - 3,55	69,5	6,9	7,0
3,15 - 5,6	108,8	10,6	11,0
4,0 - 9,0	170,0	16,5	17,4

7.4 Benodigde gegevens voor het bepalen van de filterwerking

Voor de hier gehanteerde methode zijn voor het ontwerp de volgende gegevens nodig:

De geperforeerde kunststof profielen

- De vorm van de profielen.
- De lengte van de profielen.
- De breedte en lengte van de perforaties. De maximale breedte wordt op basis van de korrelverdeling(en) van het in-situ zand bepaald, zie het stappenplan in paragraaf 7.5.
- De hart-op-hart afstand (h.o.h.) van de perforaties. De h.o.h. afstand moet vanuit het permeabiliteitscriterium zo klein mogelijk worden, maar er moet voldoende sterkte overblijven om het profiel te kunnen installeren. De h.o.h. afstand bepaalt samen met de perforatielengte en de verticale afstand tussen de perforaties het openingspercentage.
- De positie van de perforaties in het profiel, ook bij de hoekaansluiting op het gesloten deel.
- De wandruwheid van de buitenkant van de kokerwand ter plaatse van de perforaties.

Het filtermateriaal in de kokers

- De doorlatendheid.
- De relatieve dichtheid (initieel los en omdat het later kan verdichten ook in dichte pakking).
- De korrelverdeling (handelsgradaties conform NEN-EN:12904:2005 (Nederlandse Normalisatie-instituut, 2005)).
- De lineaire uniformiteitscoëfficiënt C'_u , deze is af te leiden uit de korrelverdeling (zie het stappenplan in paragraaf 7.5).

Het in-situ zand

- De doorlatendheid.
- De relatieve dichtheid na installatie van de kunststof profielen.
- De korrelverdeling.
- De lineaire uniformiteitscoëfficiënt C'_u , deze is af te leiden uit de korrelverdeling.

Voor de beoordeling van de filterwerking moeten de interacties worden beschouwd tussen alle drie de materialen: geperforeerd kunststof profiel, het filtermateriaal in de kokers en het in-situ zand.

7.5 Stappenplan ontwerp filterfunctie

Verzamel de benodigde gegevens voor het ontwerp

1. Maak een lijst met de verschillende perforatiebreedtes en bijbehorende nauwkeurigheidsmarges van het kunststof filterscherm. De perforaties in de kunststof profielen hebben een minimale maakbare breedte van 0,4 mm. Deze breedte kan in stappen van 0,2 mm toenemen tot een maximum van 1,6 mm breed. Er geldt een onnauwkeurigheid van 10% van de perforatiebreedte. Door optimalisaties in het productieproces zal deze onnauwkeurigheid naar verwachting in de toekomst afnemen.
2. Voor het filterzand wordt uitgegaan van de specificaties van NEN-EN:12904:2005. Dit betekent dat rekening moet worden gehouden met een 5-10% onder-/overschrijdingskans van de d_5 en d_{95} , afhankelijk van de filtersamenstelling (enkel of meerlaags) en de grofheid van het materiaal. Voor verschillende leveranciers gelden verschillende benamingen en licht afwijkende graderingsgrenzen. Een lijst met filterzanden van een van de leveranciers is weergegeven in tabel 7-3.

Tabel 7-3. Beschikbare handelsgraderingen filtermateriaal.

Handelsnaam	Korrelgrootte [mm]	d_5 [mm]	d_{10} [mm]	d_{15} [mm]	d_{50} [mm]	d_{60} [mm]	d_{85} [mm]	d_{90} [mm]
FS00	0,32 - 0,71	0,37	0,41	0,42	0,51	0,54	0,62	0,63
FS0A	0,4 - 0,8	0,41	0,44	0,46	0,57	0,60	0,68	0,70
FS1	0,4 - 0,9	0,43	0,46	0,50	0,61	0,66	0,78	0,82
FS2	0,71 - 1,25	0,83	0,86	0,91	1,05	1,07	1,23	1,25
FS3	0,9 - 1,6	0,85	0,92	1,00	1,27	1,33	1,55	1,59
FS4	1,0 - 2,0	1,12	1,19	1,27	1,52	1,60	1,98	2,10
FS5	1,4 - 2,5	1,40	1,55	1,63	1,92	2,01	2,35	2,45
FS6	2,0 - 3,55	2,00	2,10	2,24	2,78	2,90	3,45	3,51
FS7	3,15 - 5,6	3,30	3,60	3,70	4,35	4,50	5,30	5,50
FS8	4,0 - 9,0	5,10	5,55	5,75	6,80	7,15	8,25	8,70

De uniformiteitscoëfficiënt, C_u , is in NEN-EN:12904:2005 gelimiteerd op een maximum van 1,5. Desondanks blijkt uit de specificaties van verschillende leveranciers dat er spreiding in de standaardmengsels zit. Om een veilig ontwerp te maken, waarbij het uitgangspunt is dat voldaan wordt aan de retentiecriteriën, wordt uitgegaan van de bandbreedte die de leverancier opgeeft. Bepaal op basis hiervan de d'_{15F} waarde. Het betreft hier in principe twee waarden. Voor retentie van het in-situ zand moet worden uitgegaan van de grofste waarden omdat die de grootste constricties geven en daarmee bepalend zijn voor de retentie. Deze waarde wordt verder gehanteerd als $d'_{15F, kar, max}$. Voor retentie van het filterzand zelf kan de gemiddelde waarde worden toegepast: $d'_{15F, kar, gem}$.

- Leg het lengtetracé vast van de aslijn van het kunststof filterscherm conform hoofdstuk 5.
- Ga uit van de profiellengte(n) zoals bepaald in hoofdstuk 6. Aangezien er aan de onderkant van de koker sprake is van een blinde buis van 0,50 m lang, ligt de positie van de filterperforaties hiermee vast.
- Bepaal het relevante grondonderzoek, d.w.z. de korrelverdelingen met een afstand tot de hartlijn van het kunststof filterscherm ≤ 25 m. Selecteer tevens alleen die korrelverdelingen die zich op of dicht bij de hoogte bevinden van het filter. Default hoogte afstand ≤ 1 m boven of onder de filterperforaties.
- Controleer voor elke korrelverdeling of er sprake is van intern stabiele grond; toets op $C_{us} < 8$. Zo ja, dan is het in-situ zand intern stabiel. Zo niet, dan is het in-situ zand intern instabiel. Intern instabiel in-situ zand kan leiden tot mechanische verstopping. Hier dient een geheel dicht (niet-geperforeerd) deel van het kunststof filterscherm te worden toegepast.
- Bepaal voor elke korrelverdeling of er sprake is van zand met meer dan 30% fijne delen $< 75 \mu\text{m}$. Als dat zo is, of als het geen zand betreft, valt de korrelverdeling buiten het toepassingsgebied van de methode Giroud. Verwerking volgens die methode is dan dus niet correct. Hier dient een geheel dicht (niet-geperforeerd) deel van het kunststof filterscherm te worden toegepast.
- Maak op basis daarvan een laagindeling ter plaatse van het kunststof filterscherm tracé.
- Maak een lijst van de monsters van de korrelverdelingen van het in-situ zand, inclusief RD-coördinaten plus NAP diepte en diepte ten opzichte van maaiveld binnen de bij stap 5 gehanteerde afstand tot de hartlijn van het kunststof filterscherm ≤ 25 m.
- Zoek bij elke relevante korrelverdeling de dichtstbijzijnde sondeergrafiek.
- Bepaal per korrelverdeling locatie de waarde van de installatiefactor β_s die de ontspanning of verdichting beschrijft van het in-situ zand tijdens het installeren van het kunststof filterscherm. Default geldt dat $\alpha_s \beta_s = 1,5$, zie paragraaf 7.3.3.4.
- Omdat het filterzand pas na het installeren van de profielen in de kokers wordt aangebracht is er geen invloed van het installeren en reinigen op de dichtheid van het filterzand. De dichtheid van het filterzand is daardoor alleen afhankelijk van de methode van aanbrengen. Voor onvoorziene

omstandigheden waardoor, bijvoorbeeld in de tijd, een verandering van de dichtheid zou moeten worden meegenomen is in het stappenplan een correctiefactor β_F opgenomen die default de waarde 1,0 heeft (losse pakking).

13. Voor de doorlatendheid heeft resterende aanslag na het schoonmaken een negatief effect. Het kan zowel de breedte als de lengte van de perforaties effectief verkleinen waardoor de doorlatendheid afneemt. Voor stromingsberekeningen, zie paragraaf 8.1, moet dit effect worden meegenomen. De mogelijkheid dat verstopping optreedt door het ophopen van kleine deeltjes in de perforaties (clogging) zal in dit geval niet optreden (Bijnagte, 2023). Voor de retentie op de perforaties is aanslag, die de breedte verkleint, juist gunstig. Uit de maakbaarheidsproeven blijkt dat er na reinigen geen noemenswaardige aanslag aanwezig was (Rohe & Van der Geer, 2023). Voor de reductiefactor ξ ten gevolge van aanslag, waarmee de breedte wordt vermenigvuldigd, wordt daarom de waarde 1,0 aangehouden. De factor ξ blijft wel onderdeel van het stappenplan zodat, mocht er toch aanslag aanwezig blijken te zijn, dit eenvoudig in de analyses kan worden meegenomen.

Bepaal de perforatiebreedte op basis van het in-situ zand

14. Bepaal voor elke relevante korrelverdeling van het in-situ zand:
- de d_{70S} (niet van belang voor retentie, maar wel van belang voor piping analyses);
 - de raaklijn aan de curve ter plaatse van d_{50S} ;
 - met de raaklijn de $d'_{0S}, d'_{5S}, d'_{10S}, d'_{15S}, d'_{50S}, d'_{60S}, d'_{70S}, d'_{85S}, d'_{90S}, d'_{100S}$;
 - $C'_{uS} = d'_{60S}/d'_{10S}$;
 - een plot van de korrelverdeling met de oorspronkelijke meetpunten en de raaklijn.
15. Bepaal op basis van tabel 7-4 de waarde van $\alpha_S d'_{85S}$. In paragraaf 7.3.3.4 is aangegeven waarom altijd sprake is van matig vast gepakt in-situ zand. Voor de meeste zanden in Nederland geldt dat $C'_u \leq 3$ dus $\alpha_S = 1,5$.

Tabel 7-4. Correlatie dichtheid en α_S -waarden voor in-situ zand.

Dichtheid	Relatieve dichtheid I_d [%]	$C'_u \leq 3$	$C'_u > 3$
Los gepakt	< 35	$\alpha_S = 1,0$	$\alpha_S = 9,0$
Matig vast gepakt	35 – 65	$\alpha_S = 1,5$	$\alpha_S = 13,5$
Vast gepakt	> 65	$\alpha_S = 2,0$	$\alpha_S = 19,0$

Bepaal voor elke korrelverdeling uit de vorige stap de toelaatbare perforatiebreedte $O_{F,S}$ (incl. nauwkeurigheidsmarge) volgens

16. tabel 7-5.

Tabel 7-5. Maximale perforatiebreedte (incl. nauwkeurigheidsmarge) voor het in-situ zand, zie ook figuur 7-3.

Maximale perforatiebreedte [mm] $C'_{uS} \leq 3$	Maximale perforatiebreedte [mm] $C'_{uS} > 3$
$O_{F,S} \leq \frac{(C'_{uS})^{0,3} (\alpha_S d'_{85S})}{\xi}$	$O_{F,S} \leq \frac{\alpha_S d'_{85S}}{(C'_{uS})^{1,7} \xi}$

Bepaal geschikt filterzand op basis van de perforatiebreedte

17. Bepaal voor de beschikbare filterzanden op basis van de korrelverdeling:
- de raaklijn aan de curve t.p.v. d_{50} ;
 - met de raaklijn de $d'_{0F}, d'_{10F}, d'_{15F}, d'_{50F}, d'_{60F}, d'_{70F}, d'_{85F}, d'_{90F}, d'_{100F}$;
 - $C'_{uF} = d'_{60F}/d'_{10F}$;
 - een plot van de korrelverdeling met de oorspronkelijke meetpunten en de raaklijn.

18. Bepaal voor alle beschikbare filterzanden en de drie dichtheidsgebieden van tabel 7-6 de bijbehorende waarden $\alpha_F d'_{15F}$. Er wordt geen aparte statistische analyse gedaan voor de korreldiameters van het filterzand. De reden is dat het materiaal betreft met een bekende samenstelling en variatie in korreldiameters, zie ook stap 2. Daarbij wordt al standaard gewerkt met de perforatiebreedte incl. nauwkeurigheidsmarge. Dat is daarvoor alk het meest ongunstige scenario. Gebruik dus voor d'_{15F} de gemiddelde waarde $d'_{15F, gem}$ volgens opgave van de leverancier als $d'_{15F, kar}$.

Tabel 7-6. Correlatie dichtheid en α_F -waarden voor filterzand.

Dichtheid	Relatieve dichtheid I_d [%]	$C'_u \leq 3$	$C'_u > 3$
Los gepakt	< 35	$\alpha_F = 1,0$	$\alpha_F = 9,0$
Matig vast gepakt	35 – 65	$\alpha_F = 1,5$	$\alpha_F = 13,5$
Vast gepakt	> 65	$\alpha_F = 2,0$	$\alpha_F = 19,0$

De waarde van α_F hangt af van de methode van aanbrengen van het filterzand en eventueel verdichten. Tenzij het uit bepalingen bekend is: α_F -waarden voor los gepakt filtermateriaal. Voor filterzand volgens NEN-EN:12904:2005 geldt dat $C'_u \leq 3$, dus $\alpha_F = 1,5$.

19. Bepaal voor de beschikbare filterzanden uit de vorige stap per filterzand alle toelaatbare perforatiebreedtes $O_{F,F}$ (incl. nauwkeurigheidsmarge) volgens tabel 7-7.

Tabel 7-7. Correlatie maximale perforatiebreedte (incl. nauwkeurigheidsmarge) voor filterzand.

Maximale perforatiebreedte [mm] $C'_{uF} \leq 3$	Maximale perforatiebreedte [mm] $C'_{uF} > 3$
$O_{F,F} \leq \frac{(C'_{uF})^{0,3} (\alpha_F d'_{85F})}{\xi}$	$O_{F,F} \leq \frac{\alpha_F d'_{85F}}{(C'_{uF})^{1,7} \xi}$

Variaties van het in-situ zand en de maximale perforatiebreedte

20. Bepaal de gemiddelde waarde, μ_{ln} , en de variatiecoëfficiënt, σ_{ln} , van alle relevante $O_{F,S}$ -waarden, N , volgens de lognormale verdeling met vergelijkingen (7-1) en (7-2).

$$\mu_{ln O_{F,S}} = \frac{\sum_1^N \ln(O_{F,S})}{N} \quad (7-1)$$

$$\sigma_{ln O_{F,S}} = \sqrt{\frac{\sum_1^N (\ln(O_{F,S}) - \mu_{ln O_{F,S}})^2}{N - 1}} \quad (7-2)$$

Voor de 5% onderschrijdingskans geldt, volgens de Student t-toets, de volgende karakteristieke (ondergrens) waarde: $O_{F,S, kar} = \exp(\mu_{ln O_{F,S}} \pm t_{N-1}^{0,95} \sigma_{ln O_{F,S}})$. De waarden van $t_{N-1}^{0,95}$ zijn weergegeven in tabel 7-8.

Tabel 7-8. Student t-toets waarden.

$N - 1$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_{N-1}^{0,95}$	6,314	2,920	2,353	2,132	2,015	1,943	1,895	1,860	1,833	1,812
$N - 1$	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$t_{N-1}^{0,95}$	1,796	1,782	1,771	1,761	1,753	1,746	1,740	1,734	1,729	1,725
$N - 1$	21	22	23	24	25	26	27	28	29	∞
$t_{N-1}^{0,95}$	1,721	1,717	1,714	1,711	1,708	1,706	1,703	1,701	1,699	1,645

Voor deze formules geldt dat de σ daarin de standaardafwijking betreft volgens de gangbare statistiek en dat deze geen relatie heeft tot de verticale korrelspanning σ'_v die gebruikt wordt bij het bepalen van de relatieve dichtheid.

21. Voer alle waarden van $O_{F,S}$ uit, met locatiegegevens, evenals de 5%-ondergrenswaarde van $O_{F,S,kar}$.
22. Maak een plot over de lengte van het tracé van de maximaal toelaatbare $O_{F,S}$. Deze plot kan als hulp dienen voor het onderverdelen van het tracé in secties waarbij per sectie een ander profiel kan worden toegepast. Als er ergens op het tracé geen perforatiebreedte is die aan de minimaal maakbare breedte voldoet kan het kunststof filterscherm niet over het hele traject worden ontworpen met retentie op de kokerwand voor het in-situ zand.
23. Deel als niet over het gehele tracé retentie op de kokerwand kan worden bereikt het traject, op basis van stap 23, op in secties en herhaal per sectie de bovenstaande stappen 21 t/m 22. Als er secties zijn waar de benodigde perforatiebreedte kleiner is dan de minimum maakbare breedte geef dat dan aan.

NB. Deze statistische verwerking kan, door in de uitvoeringsfase te werken met een voldoende klein verhang naar binnen, worden genegeerd (paragraaf 7.3.3.4). Dat betekent dat de stappen 20 t/m 23 dan vervallen.

Variaties van het in-situ zand en retentie door het filterzand

Voor de retentie van het in-situ zand door het filterzand wordt altijd rekening gehouden met de aanwezige spreiding in de korreldiameters omdat dit de primaire functie van het filterscherm betreft, en die moet altijd met voldoende zekerheid gewaarborgd zijn.

24. Bepaal de gemiddelde waarde, μ_{lnS} , en de variatiecoëfficiënt, σ_{lnS} , van alle relevante $\alpha_S \beta_S d'_{85S}$ waarden, N , volgens de lognormale verdeling met vergelijkingen (7-3) en (7-4).

$$\mu_{lnS} = \frac{\sum_1^N (\alpha_S \beta_S d'_{85S})}{N} \quad (7-3)$$

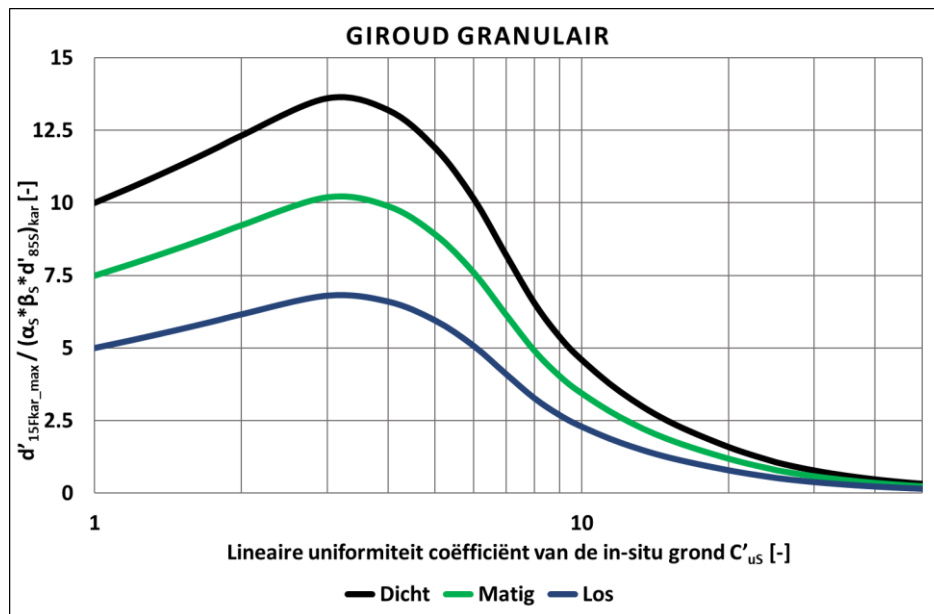
$$\sigma_{lnS} = \sqrt{\frac{\sum_1^N (\alpha_S \beta_S d'_{85S} - \mu_{lnS})^2}{N - 1}} \quad (7-4)$$

Voor de 5% onderschrijdingskans geldt, volgens de Student t-toets, de volgende karakteristieke (ondergrens) waarde: $(\alpha_S \beta_S d'_{85S})_{kar} = \exp(\mu_{lnS} \pm t_{N-1}^{0,95} \sigma_{lnS})$. De waarden van $t_{N-1}^{0,95}$ zijn weergegeven in tabel 7-8. Voor deze formules geldt dat de σ daarin de standaardafwijking betreft volgens de gangbare statistiek en dat deze geen relatie heeft tot de verticale korrelspanning σ'_v die gebruikt wordt bij het bepalen van de relatieve dichtheid.

25. Voer alle waarden van de $\alpha_S \beta_S d'_{85S}$ uit, met locatie gegevens, evenals de 5% ondergrens waarde van $(\alpha_S \beta_S d'_{85S})_{kar}$.

Keuze van het filterzand

26. Bepaal voor het hele tracé en alle secties de filterzanden waarbij het filterzand zorgt voor retentie van het in-situ zand. Voor de controle op granulaire geometrische dichtheid (granulaire retentie) wordt opnieuw een methode van Giroud (Giroud, 2003, 2010) gehanteerd. Volgens het criterium zijn filterzanden toepasbaar waarvoor geldt dat de verhouding $d'_{15F, kar, max} / (\alpha_S \beta_S d'_{85S})_{kar}$, kleiner of gelijk is aan de waarden horend bij de lijnen in figuur 7-7. Deze lijnen gelden voor de dichtheid van het in-situ zand. Door aan de eis in deze stap te voldoen wordt in-situ zand dat door de perforaties van de koker beweegt alsnog tegengehouden door het filterzand.



Figuur 7-7. Grenzen toelaatbare verhouding $d'_{15F, kar, max} / (\alpha_S \beta_S d'_{85S})_{kar}$ volgens Giroud.

27. Bepaal de minimale afstand tussen de perforaties in de hoek van het profiel, zie figuur 7-6. Voor de hierboven genoemde handelsgraderingen zijn de resultaten weergegeven in tabel 7-2.
28. Koppel de toepasbare filterzanden uit stap 26 aan de bijbehorende toelaatbare perforatiebreedtes $O_{F,F}$ (incl. nauwkeurigheidsmarge) bepaald in stap 19.

Ontwerpkeuze

29. Kies op basis van het bovenstaande de perforatiebreedte en het filterzand. Vanuit het oogpunt van doorlatendheid verdienen het grofste filterzand en de grootste toelaatbare perforatiebreedte de voorkeur.
30. Maak een plot over de lengte van het tracé van de maximaal toelaatbare perforatiebreedte $O_{F, max}$ (minimum van $O_{F,S}$ en $O_{F,F}$) met het grofste toelaatbare filterzand en een onderscheid voor de volgende gevallen:
 - (a) Geometrisch gesloten granulair filterontwerp, retentie in-situ zand door kokerwand en retentie filterzand door kokerwand (veilig ontwerp);
 - (b) Geometrisch gesloten granulair filterontwerp, geen retentie in-situ zand door kokerwand, retentie filterzand door kokerwand (veilig ontwerp gebruiksfase, aanpassing werkmethode nodig voor bouwfase);
 - (c) Geometrisch gesloten granulair filterontwerp, retentie in-situ zand door kokerwand, geen retentie filterzand door kokerwand (veilig ontwerp, maar filtermateriaal kan mogelijk door de filterperforaties heen);
 - (d) Geometrisch gesloten granulair filterontwerp, geen retentie in-situ zand door kokerwand, geen retentie filterzand door kokerwand (onveilig ontwerp, kokerwand biedt onvoldoende veiligheid);
 - (e) Geometrisch open granulair filterontwerp, retentie in-situ zand door kokerwand, retentie filterzand door kokerwand (veilig ontwerp, maar filtermateriaal biedt onvoldoende veiligheid);
 - (f) Geometrisch open granulair filterontwerp, retentie in-situ zand door kokerwand, geen retentie filterzand door kokerwand (veilig ontwerp, maar pipe kan doorgroeien in de koker tot kokerwand aan de rivierzijde koker; filtermateriaal biedt onvoldoende veiligheid);

- (g) Geometrisch open granulair filterontwerp, geen retentie in-situ zand door kokerwand, retentie filterzand door kokerwand (onveilig ontwerp, pipe kan in-situ materiaal mogelijk door filterscherm heen trekken);
- (h) Geometrisch open granulair filterontwerp, geen retentie in-situ zand door kokerwand, geen retentie filterzand door kokerwand (onveilig ontwerp, pipe kan door filterscherm heen groeien).

31. Pas, op basis van de resultaten van de bovenstaande stappen, waar nodig, de profiellengte aan en doorloop daarvoor het stappenplan opnieuw vanaf stap 5.

Bepaal op basis van alle resultaten een zo eenvoudig mogelijke onderverdeling in (dijk)vakken met profiellengten en perforatie afmetingen.

8 Toetsingen

Nadat de locatie in het dijkprofiel, de profiellengte en het filterontwerp van het kunststof filterscherm zijn vastgesteld, dienen toetsingen te worden uitgevoerd. De in dit hoofdstuk benoemde toetsingen hebben betrekking op verschillende ontwerpstappen. In tabel 8-1 is een overzicht van de toetsingen opgenomen en op welk onderdeel van het ontwerp de toetsingen betrekking hebben. Indien het ontwerp bij alle toetsingen aan de bijbehorende criteria voldoet, wordt als resultaat een functioneel ontwerp verkregen.

Tabel 8-1. Te verrichten toetsingen op het ontwerp van het kunststof filterscherm.

Paragraaf	Toetsing	Toetsing heeft invloed op
8.1	Geohydrologische toetsing	Profiellengte (hoofdstuk 6) Filterontwerp (hoofdstuk 7)
8.2	Mechanische toetsing	Positie (hoofdstuk 5) Profiellengte (hoofdstuk 6)
8.3	Raakvlakken met andere faalmechanismen	Positie (hoofdstuk 5)

8.1 Geohydrologische toetsing

In deze paragraaf worden handvatten gegeven voor de bij het kunststof filterscherm noodzakelijke onderdelen van de geohydrologische toetsing:

- Vernatting/verdroging onder dagelijkse omstandigheden door gewijzigde freatische grondwaterstand;
- Binnenwaartse (macro)stabiliteit;
- Het optreden van heave achter het filterscherm;
- Opbarsten voor het filterscherm.

Voor het uitvoeren van de geohydrologische toetsing is een rekenmodel benodigd. De benodigde uitgangspunten voor het rekenmodel zijn gegeven in paragraaf 8.1.1. Het rekenmodel is gegeven in paragraaf 8.1.2. De toetsingen zijn uitgewerkt in paragraaf 8.1.3.

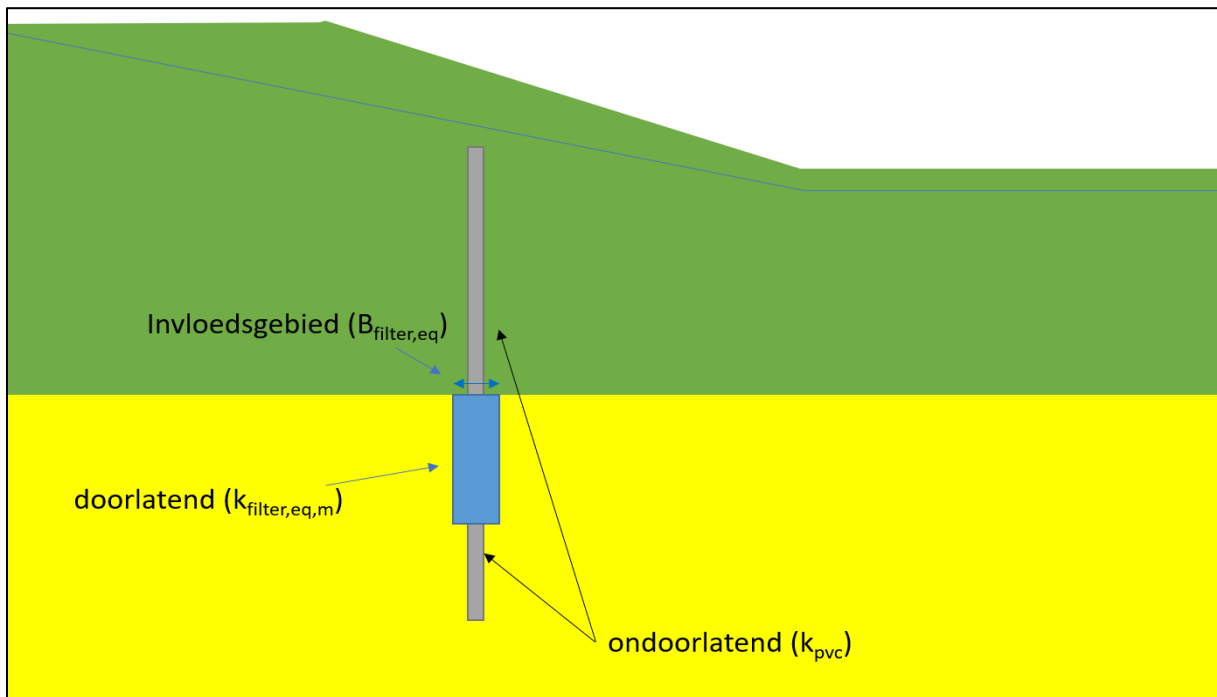
8.1.1 Benodigde uitgangspunten rekenmodel

Om de invloed van het kunststof filterscherm op de geohydrologische omstandigheden te bepalen, zijn de volgende gegevens benodigd:

- De geometrie van het kunststof filterscherm:
 - o Geometrische vorm
 - o Wanddikte
 - o Lengte van geperforeerde deel
 - o Afwerkingsniveau onder maaiveld
 - o Punt niveau.
- De configuratie van het geperforeerde deel van de koker:
 - o Openingspercentage (vastgesteld op minimaal 10% per kokerzijde)
 - o Perforatiegrootte (tussen 0,4 – 1,6 mm in stappen van 0,2 mm)
 - o Hart-op-hart afstand perforaties (afhankelijk van openingspercentage en perforatiegrootte)
 - o Afstand tussen perforaties in de tegenovergestelde hoek (paragraaf 7.3.3.5 – filterregels).
- Het filterzand.
- Doorlatendheid (incl. anisotropie) in-situ zand (o.a. piping gevoelige laag).
- Installatie-effecten:
 - o Mate van grondverdringing en/of ontspanning (dit heeft invloed op de doorlatendheid van het in-situ materiaal rondom het filterscherm).
 - o Mate van versmering van de perforaties (afname van doorlatendheid).

8.1.2 Rekenmodel

Met behulp van de hierboven genoemde uitgangspunten dient met de methode die gegeven is in bijlage C de doorlatendheid van het geperforeerde deel van het kunststof filterscherm $k_{filter,eq,m}$ bepaald te worden. De doorlatendheid van het geperforeerde deel van het kunststof filterscherm $k_{filter,eq,m}$ wordt vervolgens gebruikt in een rekenmodel op dijkdoorsnede niveau om inzicht te krijgen in de geohydrologische effecten. De te beschouwen situatie op dijkdoorsnede niveau is schematisch weergegeven in figuur 8-1. Let hierbij op dat de $k_{filter,eq,m}$ is afgeleid en moet worden toegepast voor een invloedsgebied ($B_{filter,eq}$), welke groter is dan de breedte van het filterscherm.



Figuur 8-1. Beschouwing effecten doorlatendheid van het filterscherm ($k_{filter,eq}$ met $B_{filter,eq}$ en k_{pvc}) op dijkdoorsnedeniveau.

In de bepaling van de doorlatendheid van het geperforeerde deel van het scherm middels bijlage C is nog geen rekening gehouden met installatie-effecten: mogelijk gedeeltelijk blijvende versmering van perforaties en reductie doorlatendheid van het in-situ materiaal als gevolg van grondverdringing. Op basis van proefresultaten (Kuiper & Van der Meer, 2023a) wordt veiligheidshalve verondersteld dat het totale effect, inclusief de installatie-effecten zorgen voor een gereduceerde doorlatendheid van het filter ter grootte van 50% ($\gamma_i = 0,5$) van het in-situ zand (met mogelijk een kleine verandering van de grondwaterstroming; d.i. richting en verhang). In het rapport van Acacia Water (Waterloo & Verhagen, 2023) is bepaald dat het risico op verstopping bij deeltraject Salmsteke verwaarloosbaar is. Er hoeft daarom geen reductiefactor ($\gamma_v = 1$) ten aanzien van verstopping in rekening te worden gebracht. Met vergelijking (8-1) kan vervolgens de equivalente doorlatendheid van het filter worden bepaald.

$$k_{filter,eq} = k_{filter,eq,m} \gamma_i \gamma_v \approx 0,5 k_{in-situ} \quad (8-1)$$

waarbij:

$k_{filter,eq}$	- Equivalente doorlatendheid geperforeerde deel incl. installatie-effecten	[m/d]
$k_{filter,eq,m}$	- Equivalente doorlatendheid geperforeerde deel op basis van modellering	[m/d]
γ_i	- Reductiefactor ten gevolge van installatie	[-]
γ_v	- Reductiefactor ten gevolge van verstopping	[-]
$k_{in-situ}$	- Doorlatendheid van het in-situ zand	[m/d]

Daarnaast kan met behulp van de geohydrologische analyse ook inzicht worden verkregen in de gevoeligheid ten aanzien van de verschillende faalpaden en de benodigde intensiteit wat betreft monitoring. Hierbij kan gedacht worden aan, maar niet beperkt tot, het onderzoeken van de volgende aspecten:

- Afname van doorlatendheid van het filterscherm (tot volledig ondoorlatend) door verstopping, $k_{filter,eq} = 0$ m/d.
- Filterscherm lokaal niet op diepte gekomen of lokaal dikkere deklaag.
- Effect van meer of minder doorlatend in-situ zand dan aangehouden.
- Installatie effecten leidend tot verdichting of ontspanning van omliggende zandlaag en daarmee op de doorlatendheid rondom het filterscherm.
- 3D situatie waarbij een deel van het filterscherm niet meer doorlatend is.

8.1.3 Geohydrologische toetsen

Aan de hand van de hiervoor geschetste opzet van het rekenmodel moeten verschillende aspecten worden getoetst. Onderstaand wordt onderscheid gemaakt in de toetsen die betrekking hebben op de situatie onder dagelijkse omstandigheden en hoogwatercondities. Onder hoogwatercondities wordt tevens onderscheid gemaakt tussen effecten die leiden tot overlast en die mogelijk invloed hebben op de waterveiligheid. Een ander doel van het geohydrologische model is om inzicht te krijgen in de robuustheid van het systeem, waarbij een duidelijke koppeling is met de faalpaden, en de bijpassende monitoringsaspecten en -strategie.

Dagelijkse omstandigheden

Vernatting/verdroging door effecten op de freatische grondwaterstand

Het kunststof filterscherm is volledig ondoorlatend in de deklaag. Dit betekent dat de freatische grondwaterstand wordt beïnvloed. Ook de hydraulische weerstand van het geperforeerde gedeelte kan theoretisch tot beïnvloeding van de freatische grondwaterstand leiden indien sprake is van opstuwung van de stijghoogte. De doorlatendheid van het kunststof filterscherm is hierbij gelijk aan de afgeleide doorlatendheid, $k_{filter,eq}$, inclusief installatie-effecten.

Door in een geohydrologisch model op dijkdoorsnede-schaal de situatie met dagelijkse omstandigheden beide aspecten te analyseren kan de invloed op de freatische grondwaterstand worden gekwantificeerd. Hiermee kan een oordeel gegeven worden omtrent vernatting/verdroging in de omgeving van het scherm en of mitigerende maatregelen, bijv. een drainageconstructie, noodzakelijk zijn.

Hoogwatercondities

Beïnvloeding binnenwaartse (macro)stabiliteit door toename waterspanningen

Wanneer opstuwung wordt geconstateerd in het geohydrologische model als gevolg van aanwezigheid van het kunststof filterscherm neemt de waterspanning toe, in zowel de zandlaag als in de deklaag, en daardoor de effectieve korrelspanning af. Eén van de mogelijke gevolgen van toegenomen waterspanningen onder hoogwatercondities is een afname van stabiliteit. Een toetsing op stabiliteit (STBI) geeft hier inzicht in. In de geohydrologische analyse dient veiligheidshalve uit te worden gegaan van een geheel ondoorlatend filterscherm, $k_{filter,eq} = 0$ m/d. Hiermee wordt een bovengrens van de opstuwung verkregen. De constructieve sterkte van het kunststof filterscherm aan de stabiliteitstoetsing wordt verwaarloosd. In paragraaf 8.3.1 wordt de aan te houden stabiliteitseis uitgewerkt waaraan voldaan moet worden vanuit de faalpadanalyse om deze bedreiging weg te kunnen redeneren (zie paragraaf 2.6).

Optreden van heave aan de achterzijde van het filterscherm

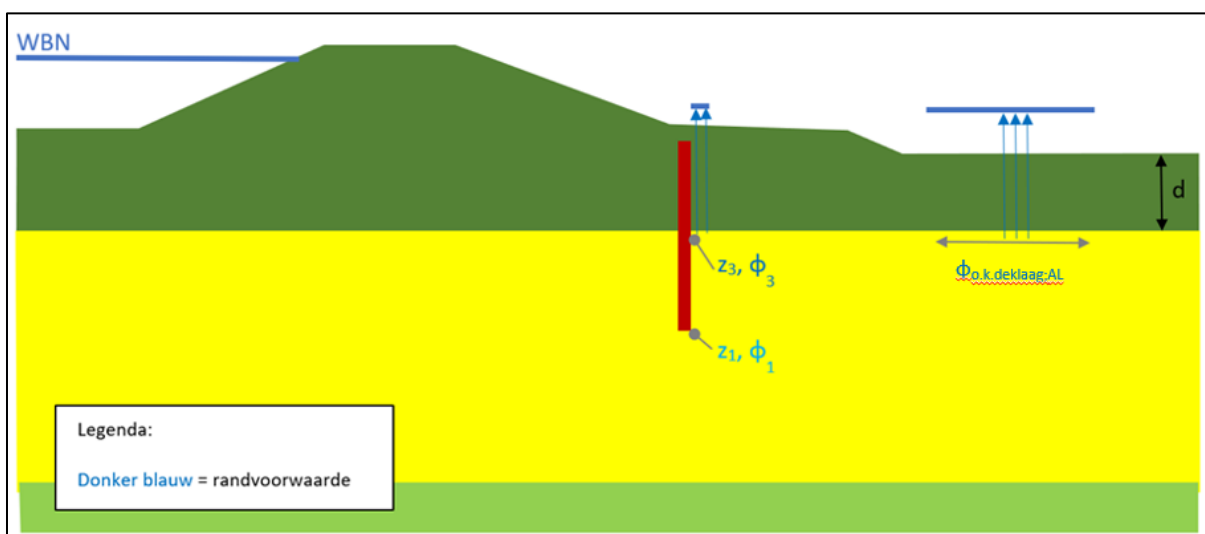
Momenteel zijn er veel landelijke ontwikkelingen gaande ten aanzien van het onderwerp heave achter een (filter)scherm en de bijbehorende modellerings- en berekeningswijze. De laatste inzichten, op basis van (Lekensemble, 2022) en na afstemming met DIV over de in bewerking zijnde DIV-publicatie heaveschermen, waar nu op aan wordt gesloten, zijn hieronder weergegeven en kunnen nog worden geactualiseerd gedurende het ontwerpproces (d.i. überhaupt toetsen op heave achter een filterconstructie VZG-GZB-Prolock, dan wel met welke randvoorwaarden). Het toetsen op heave kan ertoe leiden dat het filterscherm dieper in het zand geplaatst moet worden. Daarmee is een afhankelijkheid ontstaan met de rivierwaterstand vergelijkbaar aan een heavescherm daar waar het kunststof filterscherm vanwege het geometrisch gesloten principe juist onafhankelijk van de waterstand en daarmee toekomstbestendig is.

Heave treedt op aan de achterzijde van het filterscherm en kan leiden tot onderloopsheid en bijgevolg bezwijken van de dijk. Het risico op onderloopsheid is één van de drie significante bedreigingen, zie paragraaf 2.6. Heave treedt pas dan op als eerst opbarsten van het achterland heeft plaatsgevonden en de pipe tot het scherm is gegroeid. In die situatie zijn twee varianten te onderscheiden (Lekensemble, 2022; DIV-publicatie heaveschermen), waarbij uit moet worden gegaan van verschillende hydraulische randvoorwaarden:

- 1) Pipe groeit in boomstructuur tot scherm;
- 2) Enkele pipe groeit tot scherm en groeit vervolgens in lengterichting evenwijdig aan het scherm.

In beide situaties moet getoetst worden dat de (gemiddelde) gradiënt tussen de onderkant van de deklaag en de onderzijde van het filterscherm in de richting van de stroombanen, Δh , kleiner is dan 0,5, conform Schematiseringshandleiding piping bij kunstwerken (Rijkswaterstaat, 2021). Zodoende wordt getoetst dat er geen heave ontstaat achter het filterscherm. Hierbij wordt een normaal functionerend filterscherm verondersteld, oftewel de doorlatendheid van het geperforeerde deel is gelijk aan $k_{filter,eq}$.

De schematisering van een dijkdoorsnede inclusief belangrijke parameters is gegeven (figuur 8-2) en bijbehorende randvoorwaarden ten behoeve van modellering (tabel 8-2).



Figuur 8-2. Schematisering dijkdoorsnede inclusief belangrijke geohydrologische parameters t.b.v. beschouwing heave situatie (Lekensemble, 2022).

Tabel 8-2. Uitgangspunten geohydrologische beschouwing van heave achter filterscherm (Lekensemble, 2022).

Faalpad	Randvoorwaarden t.b.v. stijghoogtebepaling in watervoerend pakket ter hoogte van o.k. scherm (ϕ_1)				Stijghoogte in pipe nabij scherm ϕ_3
	Rivier	Achterland		Langspipe naast scherm	
		ϕ_{AL}	Locatie	ϕ_3	
Heave grote schaal (boomstructuur)	$WBN_{zichtjaar} +$ zettingscomponent	$WS_{AL} + 0d$	Vanaf opbarstlocatie over breedte van $2d$	n.v.t.	$WS_{AL} + 0d$
Heave lokaal (T-Bar)	$WBN_{zichtjaar} +$ zettingscomponent	Grenspotentiaal	Vanaf opbarstlocatie tot modelrand	$WS_{AL} + 0,3d + \omega_{pipe}$	$WS_{AL} + 0,3d + \omega_{pipe}$

Waarbij:

$WBN_{zichtjaar}$	- Waterstand bij norm in het zichtjaar	[m NAP]
ϕ_{AL}	- Stijghoogte onder de deklaag in het achterland, die over een lengte van 2 maal de dikte van deklaag (d) wordt geschematiseerd	[m NAP]
d	- Dikte van de deklaag in het achterland	[m]
WS_{AL}	- Waterstand in het achterland (= maaiveld t.p.v. opbarstlocatie)	[m NAP]
ω_{pipe}	- Weerstand in de pipe (indicatief 0 tot 0,03 m/m)	[m/m]

Aanvullend moet in een EEM-berekening rekening worden gehouden dat de randvoorwaarde in het achterland dusdanig wordt gemodelleerd dat deze geen voeding kan geven. Modelranden (onderzijde en zijkanten) moeten als ondoorlatend ('closed') worden gehanteerd.

Voor de situatie dat het filterscherm onverhoopt verstopt is geraakt, functioneert het scherm als een conventioneel, maar te kort heavescherm. Optioneel kan in het beheer- en onderhoudsplan (Van Gee & Waagmeester, 2023) worden opgenomen tot welke rivierwaterstand nog aan de faalkanseis voldaan wordt met het te korte heavescherm, oftewel er zijn dan nog geen aanvullende calamiteitenmaatregelen nodig. Bij hogere waterstanden moeten dan maatregelen worden genomen in geval van welvorming.

Opbarsten voor het filterscherm

Opbarsten voor het filterscherm – gegeven verstopping van het filterscherm – en daarmee het risico op voorloopsheid is één van de drie significante bedreigingen, zie paragraaf 2.6. Om inzicht te krijgen in dit aspect is een geohydrologische beschouwing nodig waarbij onder hoogwatercondities de effectieve korrelspanning (inclusief het effect van opstuwning ten gevolge van het filterscherm) bovenstrooms van het filterscherm, net onder de deklaag, wordt bepaald. Vervolgens gelden de evenwichtsformules uit Bijlage III Sterke en Veiligheid (WBI) om opbarsten te controleren. De kans op opbarsten voor het filterscherm (onder hoogwatercondities inclusief opstuwning) dient conform paragraaf 2.6 te worden vergeleken met de kans op opbarsten in het achterland, waarbij uitgangspunt is dat opbarsten/opdrijven van het achterland altijd een significant grotere kans van voorkomen heeft.

De berekende faalkans van opbarsten voor het filterscherm en bijgevolg voorloopsheid dient vervolgens conform vergelijking (2-1) uit paragraaf 2.4 (samen met de faalkans van de overige significante bedreigingen) getoetst te worden aan de faalkanseis P_{eis} . In de geohydrologische analyse

dient veiligheidshalve uit te worden gegaan van een geheel ondoorlatend filterscherm ($k_{filter,eq} = 0$ m/d). Hiermee wordt een bovengrens van de opstuwing verkregen.

Bezwijken bovenkant kokerafsluiting door waterdruk in koker

De gehele met filtermateriaal gevulde koker staat in open verbinding met de watervoerende, piping gevoelige zandlaag. Dit betekent dat de stijghoogte ter plaatse van het filterscherm ter hoogte van de bovenkant van de perforaties, uitgaande van de potentialen in het achterland volgens tabel 8-2, een maat is waarmee de afsluiting aan de bovenzijde van de koker belast wordt onder maatgevende omstandigheden.

De rekenwaarde van de waterdruk die de afsluiting op kan nemen volgt uit de materiaalspecificaties in paragraaf 12.4. De rekenwaarde van de optredende waterdruk op het vastgestelde afwerkniveau onder maaiveld dient hieraan getoetst te worden.

Indien aan één of meerdere toetsingen niet wordt voldaan, moet de volgende ontwerploop worden doorlopen:

- Vernatting/verdroging: aangepast afwerkniveau onder maaiveld (hoofdstuk 6) of aanleg van een drainagevoorziening (met impact op de beheerorganisatie);
- Effect op STBI: aangepaste positionering en/of afwerkniveau teneinde de toename van waterspanningen te reduceren (hoofdstuk 5 en 6);
- Toetsen op heave: filterscherm dieper in het zand plaatsen (hoofdstuk 6) en daarbij controleren of het filterontwerp wijzigt door mogelijk andere gradatie van het in-situ zand (hoofdstuk 7);
- Opbarsten voor het filterscherm: filterscherm dichter naar het talud plaatsen ~ herpositionering (hoofdstuk 5);
- Waterdruk op dop: gewijzigd afwerkniveau onder maaiveld (hoofdstuk 6) of positionering hoger in het talud (hoofdstuk 5).

Het resultaat van deze toetsing is dat de hinder door vernatting/verdroging in de gebruiksfase klein is, dat invulling wordt gegeven aan de ontwerpmaatregel waarmee de faalpaden 'bezwijken afsluiting bovenkant koker' en 'verstopping leidt tot toename waterspanningen met effect op STBI' zijn weggeredeneerd en tot slot de bijdrage aan het toetsen van de faalkans van de significante faalpaden (voorloopsheid en onderloopsheid) aan de faalkanseis, zie paragraaf 2.5 en 2.6.

8.2 Mechanische toetsing

Na installatie van het kunststof filterscherm zullen de profielen door de grond op druk en buiging worden belast. De drukcomponent ontstaat als gevolg van negatieve kleef in de tijd. De buigcomponent ontstaat door vervormingen van het dijklichaam tijdens hoogwater. Het kunststof filterscherm moet in staat zijn deze belasting op te nemen zonder hierbij de filterwerking te verliezen. Doordat bij deeltraject Salmsteke sprake is van opdrijfsituaties, zijn ongekoppelde verenmodellen (bijv. D-Sheet Piling) niet geschikt voor de berekening van de snedekrachten. Hierom moet met een eindige-elementen berekening een toetsing van de snedekrachten over de volledige hoogte van het filterscherm worden uitgevoerd. Met deze berekening kan eventueel ook het plaatsingscriterium van de passieve wig worden aangescherpt (zie hoofdstuk 5). In deze paragraaf zijn de opzet en de toetsing van de uitkomsten van de eindige-elementen berekening behandeld. Hierbij zijn handvatten gegeven voor een eindige-elementenberekening met Plaxis.

8.2.1 Benodigde uitgangspunten rekenmodel

Voor het uitvoeren van een eindige-elementenberekening zijn de volgende invoergegevens benodigd:

- Geotechnische randvoorwaarden (afkomstig uit hoofdstuk 4):
 - o De grondopbouw ter plaatse van de beschouwde locatie;
 - o De volumieke gewichten en de sterkte- en stijfheidseigenschappen van de aanwezige grondlagen;
- Geohydrologische randvoorwaarden (afkomstig uit hoofdstuk 4):
 - o Verloop van de freatische lijn onder dagelijkse omstandigheden en bij hoogwater;
 - o Gemiddelde buitenwaterstand in de rivier;
 - o WBN voor het huidige zichtjaar en de situatie over 100 jaar;
 - o Verloop van de waterspanningen in de diepte;
 - o Verloop van de stijghoogte in alle relevante watervoerende zandpakketten;
- Geometrie van het kunststof filterscherm (afkomstig uit hoofdstukken 5 en 6):
 - o De beschouwde locatie van het filterscherm in het dijkprofiel;
 - o De beschouwde profiellengte en het diepteniveau van de boven- en onderkant van het filterscherm;
- De configuratie van de perforaties, d.w.z. de perforatiebreedte, het perforatiepatroon en de onderlinge afstand tussen de perforaties (afkomstig uit hoofdstuk 7).

8.2.2 Opzet van het rekenmodel

De eindige elementenberekening moet worden opgezet conform de werkwijze van (POV Macrostabieliteit 2020a; 2020b): de POVM Publicatie Eindige elementenmethode (hierna: PPE) en Langsconstructies (hierna: PPL) voor een onverankerde damwand. In de berekening dient het rekenschema uit figuur 8-3 te worden geïmplementeerd. Dit rekenschema is opgesteld in lijn met rekenschema B uit de PPE voor een onverankerde damwand, maar wijkt op de volgende punten af van de PPE:

- Een toetsing van de optredende snedekrachten dient ook te worden uitgevoerd na rekenfase 3. Dit wordt nader toegelicht in paragraaf 8.2.5.
- Binnen de rekenfasering worden twee schadefactoren toegepast. Deze schadefactoren vertegenwoordigen de verschillen tussen de vereiste veiligheid voor de snedekrachten en de geotechnische macrostabieliteit. Dit wordt nader toegelicht in paragraaf 8.2.4.
- De binnenwaartse macrostabieliteit van de dijk bij hoogwater wordt in rekenfase 6b getoetst zonder aanwezigheid van het filterscherm, maar met de opstuwning in de freatische lijn conform paragraaf 8.1 die het filterscherm veroorzaakt bij een functionerend, niet verstopt filter. Hiermee wordt voor deeltraject Salmsteke getoetst of de aanwezigheid van het filterscherm de stabiliteitsfactor niet tot onder de ondergrenswaarde doet zakken.⁴ Het filterscherm mag bij de geotechnische toets niet worden gemodelleerd, omdat het filterscherm geen stabiliteitsverhogende functie voor macrostabieliteit heeft.
- Rekenfase 4b, 5 en 6 worden doorgerekend met een initiële toestand afkomstig van het einde van rekenfase 4a. Hierbij dient in rekenfase 4a reeds de opstuwning in de freatische lijn bij hoogwater bij een functionerend, niet verstopt filter te zijn verwerkt. Deze werkwijze is noodzakelijk in verband met de verschillen in de vereiste veiligheid tussen de snedekrachten en de geotechnische macrostabieliteit.

⁴ Voor een partiële versterking (versterking van een kering op slechts één faalmechanisme) geldt normaliter niet dat als op STPH wordt versterkt, de kering nog steeds aan de doorsnede-eis voor STBI dient te voldoen. Hierbij is toegestaan een verzwakking op STBI te realiseren als de verbetering op STPH dusdanig effectief is dat het trajectoordeel door het combineren van de faalkansbijdragen van STBI en STPH alsnog verbetert. Doordat binnen deeltraject Salmsteke ook strekkingen op STBI zijn afgekeurd, is vastgelegd dat ook binnen de strekkingen zonder opgave voor STBI met een partiële versterking aan de doorsnede-eis voor STBI bij 4% faalkansruimte moet worden voldaan.

- De snedekrachten en de macrostabiliteit van de dijk dienen bij de waterstand bij norm (WBN) voor zowel de korte- (T = 0 jaar) als de langetermijnsituatie (T = 100 jaar) te worden getoetst.⁵

Het kunststof filterscherm moet worden gemodelleerd als een plaalement met de mechanische eigenschappen uit tabel 8-3. De mechanische eigenschappen uit tabel 8-3 mogen isotroop worden verondersteld en zijn afgeleid op basis van het productblad van het Prolock Sigma scherm dat dezelfde mechanische eigenschappen heeft als het niet-geperforeerde deel van het op deeltraject Salmsteke toegepaste kunststof filterscherm. Doordat het materiaalverlies door het aanbrengen van de perforaties minimaal is, mag het gehele filterscherm worden gemodelleerd met de mechanische eigenschappen uit tabel 8-3. Hoewel het aanbrengen van perforaties de eigenschappen uit tabel 8-3 slechts minimaal doet veranderen, neemt de sterkte daarentegen wel af zoals in (L.J. van der Meer, 2023) is aangetoond.

Tabel 8-3. Mechanische eigenschappen van het kunststof filterscherm, afgeleid op basis van het productblad van het Prolock Sigma scherm (Profextru, 2021).

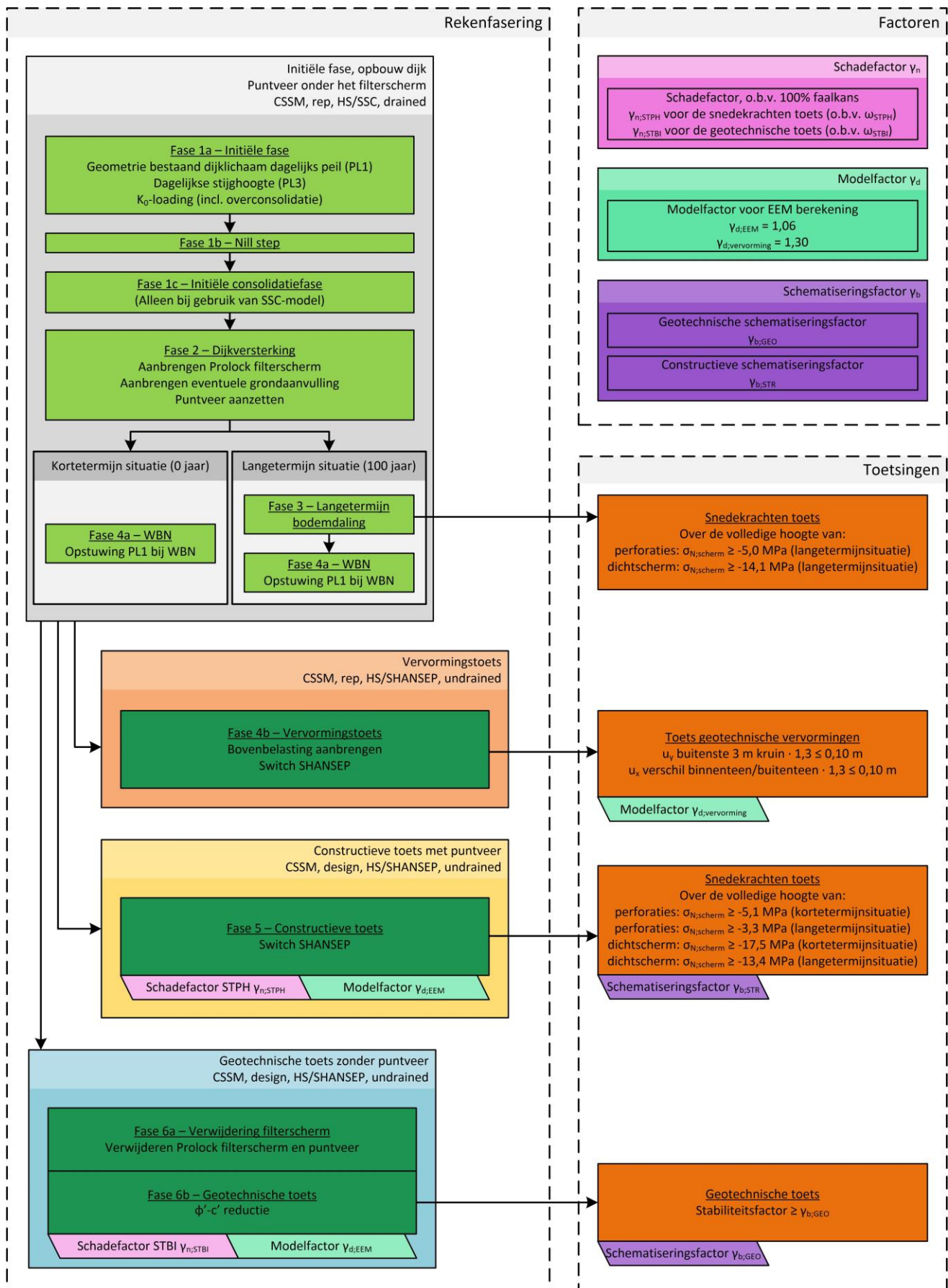
EI_{kar} [kNm ² /m]	EA_{kar} [kN/m]	w [kN/m/m]	W [cm ³ /m]	A [mm ² /m]
34,71	26.234	0,1393	222,5	10103,9

Onder het kunststof filterscherm moet een puntveer worden gemodelleerd. De puntveer dient om de zakking van het filterscherm tegen te gaan ten einde de normaalkrachten door negatieve kleef niet te onderschatten. De puntveer wordt elasto-plastisch en 'compression-only' gemodelleerd om te voorkomen dat er trekkrachten ontstaan als het filterscherm bij hoogwater door de toegenomen waterspanningen wordt ontlast.

Het maaiveldniveau dient in de eindige-elementenberekening niet geometrisch te worden gecorrigeerd voor bodemdaling, omdat negatieve kleef een maatgevend mechanisme betreft voor de belasting van het filterscherm (zie paragraaf 8.2.3).

Tot slot dienen eventuele maatregelen die benodigd zijn vanuit andere faalmechanismen (zie paragraaf 8.3) in de eindige-elementenberekening te worden opgenomen indien deze invloed hebben op de snedekrachten in het filterscherm.

⁵ Indien met proefberekeningen aangetoond kan worden dat de langetermijnsituatie maatgevend is, mag de toetsing voor de kortetermijnsituatie achterwege worden gelaten.



Figuur 8-3. Rekenschema in eindige-elementenberekeningen met bijbehorende factoren en toetsingen voor het kunststof filterscherm.

8.2.3 Negatieve kleef

Negatieve kleef levert een bijdrage aan de belasting van het kunststof filterscherm in de vorm van een normaalkracht. Binnen het rekenmodel bepalen twee componenten de grootte van de normaalkracht ten gevolge van negatieve kleef: zetting/kruip en de interfacesterkte reductiefactor. Voor beide componenten is voor het kunststof filterscherm een werkwijze opgesteld.

In de eindige-elementenberekening wordt de negatieve kleef in rekenstap 3 berekend voor de langetermijnsituatie. Voor het berekenen van de negatieve kleef voor verschillende grondmodellen worden de volgende handvatten meegegeven:

- Voor klei- en veenlagen met het Soft Soil Creep (SSC) model wordt de bodemdaling bestaande uit zetting en kruip ontwikkeld door een tijdsperiode van 100 jaar toe te kennen aan de rekenfase.
- Voor zandige kleilagen met het Hardening Soil (HS) model wordt de bodemdaling ontwikkeld door een verticale rek toe te kennen aan de grondlaag. Hierbij dient de verticale rek zo gekozen te worden dat in de interface van het plaalement in de desbetreffende grondlaag een relatieve schuifspanning, τ_{rel} , gelijk aan 1 berekend wordt.
- Aan zandlagen met het HS-model wordt geen verticale rek toegekend. Zandlagen zijn weinig samendrukbaar en kruipen niet, waardoor zandlagen van zichzelf weinig tot geen bijdrage aan de negatieve kleef leveren.
- In verband met verschillen in werkwijze tussen het SSC- en HS-model dient rekenstap 3 te worden opgesplitst in twee deelstappen: 3a en 3b. In rekenstap 3a wordt de negatieve kleef voor SSC-grondlagen berekend. In rekenstap 3b wordt de negatieve kleef voor HS-grondlagen berekend.

De grootte van de interfacesterkte reductiefactor, R_{inter} , bepaalt de mate van krachtsoverdracht van de grond naar de constructie. Hoe hoger de waarde voor R_{inter} , hoe meer de negatieve kleef wordt omgezet in een normaalkracht in het filterscherm. Voor het kunststof filterscherm zijn op basis van metingen de volgende waarden voor R_{inter} vastgesteld:

- $R_{inter} = 0,50$ in klei;
- $R_{inter} = 0,33$ in zand;
- $R_{inter} = 0$ in veen. Plaxis kan hier echter slecht mee om gaan. Een praktischere waarde is 0,2.

In bijlage D is de achtergrond op de interfacesterkte reductiefactor bij het kunststof filterscherm opgenomen.

8.2.4 Schadefactor

Het kunststof filterscherm dient te voldoen aan de faalkanseis per doorsnede voor het faalmechanisme piping. In een eindige-elementenberekening voor snedekrachten kan de vanuit piping vereiste veiligheid niet op de voor piping relevante grondparameters worden geplaatst, omdat deze grondparameters binnen een snedekrachtberekening geen rol spelen. Hierom is voor het kunststof filterscherm een alternatieve werkwijze opgesteld.

In het rekenmodel dienen twee schadefactoren te worden beschouwd: $\gamma_{n,STBI}$ voor geotechnische stabiliteit in rekenfase 6 en $\gamma_{n,STPH}$ voor snedekrachten in rekenfase 5. Beide schadefactoren dienen met vergelijkingen (8-2) en (8-3) en de lengte-effectfactor, N_{dsn} , voor macrostabiliteit binnenwaarts te worden gekwantificeerd. Daarentegen dienen beide schadefactoren met aparte faalkansruimtefactoren te worden afgeleid: bij deeltraject Salmsteke geldt $\gamma_{n,STBI} = 0,04$ en $\gamma_{n,STPH} = 0,24$. Met deze werkwijze wordt bij de berekening van de snedekrachten de vereiste veiligheid voor piping geprojecteerd op de sterkteparameters van de grond, terwijl bij de berekening van de geotechnische stabiliteit de vereiste veiligheid voor macrostabiliteit binnenwaarts gewaarborgd blijft.

$$\gamma_n = 0,15 \beta_{eis,dsn} + 0,41 \quad (8-2)$$

$$\beta_{eis,dsn} = -\phi^{-1}(P_{eis,dsn}) \quad (8-3)$$

waarbij:

γ_n	- Schadefactor	[-]
$\beta_{eis,dsn}$	- Geëiste betrouwbaarheidsindex voor een doorsnede	[-]
$P_{eis,dsn}$	- Faalkanseis per doorsnede voor macrostabiliteit binnenwaarts, afgeleid met $\omega = 0,04$ voor geotechnische stabiliteit en $\omega = 0,24$ voor snedekrachten	[1/jaar]

In de PPE wordt voorgeschreven dat bij stabiliteitsvergrotenende constructies de faalkanseis per doorsnede $P_{eis,dsn}$ evenredig moet worden verdeeld over de hoofdfaaloorzaken geotechnisch falen, constructief falen en het falen van de verankering. Voor het kunststof filterscherm is deze verdeling voor de berekening van zowel de snedekrachten als de geotechnische stabiliteit niet nodig:

- Bij de berekening van de geotechnische stabiliteit in rekenstap 6 is sprake van een groene dijk situatie, waardoor enkel geotechnisch falen kan optreden.
- Bij de berekening van de snedekrachten in rekenstap 5 kan de kering enkel op piping bezwijken als het filterscherm ter plaatse van de perforaties constructief bezwijkt, d.w.z. de perforaties vernauwen en/of verwijden. Geotechnisch falen van de kering op piping kan bij een werkend filterscherm niet optreden. Tot slot kan bezwijken van een verankering niet plaatsvinden, omdat het filterscherm onverankerd is.

8.2.5 Mechanische toetsen

De eindige-elementen berekening moet zowel met laag- als met hoog-karakteristieke waarden voor de sterkte- en stijfheidsparameters van de grond worden uitgevoerd, omdat op voorhand niet bekend is welke tot de maatgevende snedekrachten leidt.⁶ De uitkomsten van de maatgevende berekening moeten worden getoetst. Hierbij moet worden getoetst op vervormingen van de dijk en het filterscherm, de geotechnische stabiliteit en de optredende snedekrachten.

De vervormingen worden berekend in rekenfase 4b en naderhand vermenigvuldigd met de modelfactor voor de vervorming, $\gamma_{d,vervorming}$. Vervolgens dienen conform de PPE de volgende toetsingen te worden verricht voor zowel de korte- (T = 0 jaar) als de langetermijnsituatie (T = 100 jaar):

- De verticale verplaatsing van de buitenste 3 m kruin mag niet groter zijn dan 0,10 m.
- Het verschil in horizontale verplaatsing tussen de binnenteen en de buitenteen mag niet groter zijn dan 0,10 m.

Een toetsing van de kopvervorming van het kunststof filterscherm is niet benodigd, omdat het filterscherm binnen deeltraject Salmsteke geen stabiliteitsverhogende functie heeft.

⁶ De berekening met hoogkarakteristieke waarden voor de grondparameters mag achterwege worden gelaten als met proefberekeningen kan worden aangetoond dat met laagkarakteristieke waarden voor de grondparameters maatgevende snedekrachten worden berekend. Het omgekeerde geldt ook voor een berekening met laagkarakteristieke waarden voor de grondparameters.

De geotechnische stabiliteit wordt berekend in rekenfase 6b. De berekende stabiliteitsfactor mag voor zowel de korte- (T = 0 jaar) als de langetermijnsituatie (T = 100 jaar) niet kleiner zijn dan de geotechnische schematiseringsfactor, $\gamma_{b;GEO}$. Indien hier niet aan voldaan wordt, dienen stabiliteitsverhogende maatregelen te worden getroffen. Deze maatregelen dienen meegenomen te worden in de berekening, omdat deze de snedekrachten in het kunststof filterscherm beïnvloeden.

De snedekrachten worden berekend in rekenfasen 3 en 5. De berekende snedekrachten uit rekenfase 5 dienen naderhand voor zowel de korte- (0 jaar) als de langetermijnsituatie (100 jaar) te worden vermenigvuldigd met de constructieve schematiseringsfactor, $\gamma_{b;STR}$. Een aanvullende vermenigvuldiging met belastingeffect-factoren, γ_{add} , is niet nodig, omdat conform de PPL de belastingeffect-factoren op de snedekrachten voor een onverankerde damwand gelijk zijn aan 1,0. Uit de snedekrachten wordt vervolgens met vergelijking (8-4) de normaalspanning in de uiterste vezel berekend voor zowel de landzijde als de dijkzijde van het filterscherm. Bij het gebruik van vergelijking (8-4) geldt het volgende:

- Voor het weerstandsmoment W en het doorsnede-oppervlak A mogen de waarden uit tabel 8-3 worden toegepast.
- Voor de normaalkracht wordt een drukkracht uitgedrukt als een negatieve waarde en een trekkracht als een positieve waarde.
- Het moment kan zowel positief als negatief zijn, afhankelijk van of naar de ene of de andere uiterste vezel wordt gekeken.

$$\sigma_{N;scher m} = 1000 \left(\frac{N}{A} \pm \frac{M}{W} \right) \quad (8-4)$$

waarbij:

$\sigma_{N;scher m}$	- Normaalspanning in de uiterste vezel van het filterscherm	[N/mm ²]
M	- Berekende moment	[kNm/m]
W	- Weerstandsmoment van het filterscherm zonder perforaties	[cm ³ /m]
N	- Berekende normaalkracht	[kN/m]
A	- Doorsnedeoppervlak van het filterscherm zonder perforaties	[mm ² /m]

Vervolgens dienen de berekende normaalspanningen in de uiterste vezel uit rekenstappen 3 en 5 te worden getoetst aan de bijbehorende limietspanningen uit tabel 8-4. Hierbij dient zowel een toetsing van de snedekrachten in het niet-geperforeerde deel als bij de perforaties te worden uitgevoerd. De limietspanningen uit tabel 8-4 voor het geperforeerde deel van het filterscherm zijn enkel toepasbaar voor de configuratie van 0,5 mm brede perforaties met onderlinge hart-op-hart afstand van 4,5 mm in het patroon van figuur 12-2. Bij toepassing van een andere configuratie van de perforaties dient het effect op de spanningscriteria te worden bepaald.

Op de limietspanningen van het niet-geperforeerde deel uit (L.J. van der Meer, 2023) is in voorliggend document tevens een partiële materiaalfactor van 1,20 verwerkt, omdat vervormingen bij het niet-geperforeerde deel, in tegenstelling tot het geperforeerde deel, geen rol spelen. Enkel bij bezwijken van het niet-geperforeerde deel ontstaan potentiële risico's op piping waarmee de toetsing op normaalspanning voor dit deel van het kunststof filterscherm enkel een sterkteprobleem is. De limietspanningen van het niet-geperforeerde deel kunnen daarom ook als UGT-waarden worden beschouwd. Bij het geperforeerde deel zijn de limietspanningen gekoppeld aan toelaatbare vervormingen, omdat te grote vervormingen van de perforaties tot doorloopbaarheid kunnen leiden. Hierom kunnen de limietspanningen van het geperforeerde deel als BGT-waarden worden beschouwd en is op deze limietspanningen geen partiële factor verwerkt.

Tabel 8-4. Limietspanningen voor het kunststof filterscherm bij verschillende zichtjaren (L.J. van der Meer, 2023).

Deel van het filterscherm	Limietspanning op druk [N/mm ²] bij		
	Kortetermijnsituatie (T = 0 jaar)	Langetermijnsituatie (T = 100 jaar)	
	Rekenfase 5	Rekenfase 3	Rekenfase 5
Geperforeerd	-5,1 ¹⁾	-5,0 ¹⁾	-3,3 ¹⁾
Niet-geperforeerd	-17,5	-14,1	-13,4

¹⁾ Deze limietspanningen zijn geldig bij perforaties van 0,5 mm breed en een hart-op-hart afstand van 4,5 mm.

De limietspanningen uit tabel 8-4 zijn enkel van toepassing voor de situatie op druk. Indien echter over (een deel van) het kunststof filterscherm een normaalspanning in de uiterste vezel op trek wordt berekend, dan dient een toetsing op snedekrachten horende bij de situatie op trek te worden verricht. Hierbij dient voor trek uit te worden gegaan van een hogere kruipfactor dan bij druk.⁷

De limietspanningen zijn vastgesteld op basis van drukproeven, literatuur, modellering en de uitgangspunten uit tabel 8-5. Voor de achtergrond op de afleiding van de limietspanningen wordt verwezen naar (L.J. van der Meer, 2023). Een belangrijke factor die de hoogte van de limietspanning bepaalt is de E-modulus. Aangezien de profielen van het kunststof filterscherm worden vervaardigd van gerecycled PVC met per batch wisselende samenstellingen verschilt de bandbreedte van de E-modulus hiermee dus ook per batch. Voorgenoemde limietspanningen mogen daarom ook alleen gehanteerd worden als aangetoond wordt dat de E-modulus van het toe te passen filterscherm ook aan in de tabel 8-5 genoemde randvoorwaarden voldoet. Hierbij hoeft geen rekening te worden gehouden met eventuele degradatie van het PVC, omdat het PVC van het filterscherm geen weekmakers bevat en inert is (Van den Boer, 2023).

Tabel 8-5: Gehanteerde uitgangspunten met betrekking tot de limietspanning.

Parameter	Eenheid	Kortetermijnsituatie	Langetermijnsituatie	
		Rekenfase 5	Rekenfase 3	Rekenfase 5
E-modulus	[MPa]	2.500 (ondergrens)	3.000 (gemiddelde)	2.500 (ondergrens)
Kruipfactor bij druk	[-]	0,0	1,5	1,5
Percentage toelaatbare spanning t.o.v. de sterkte	[%]	70 (perforaties) 90 (dichtschermb)	90 (perforaties) 90 (dichtschermb)	70 (perforaties) 90 (dichtschermb)

Indien de spanningen in de uiterste vezel bij één of meerdere rekenfasen de bijbehorende limietspanning overschrijdt, dient de positie van het filterscherm binnen het plaatsingsgebied van hoofdstuk 5 verplaatst te worden totdat in alle rekenfasen aan de bijbehorende limietspanningen wordt voldaan. Een alternatief is het vergroten van de scherm lengte binnen de randvoorwaarden van hoofdstuk 6. Bij een dieper ingebracht scherm liggen de perforaties dieper in het zand waardoor deze minder belast worden (zie productiebeperking uit hoofdstuk 6).

Het resultaat van deze toetsing is:

- dat de filterwerking van het filterscherm gedurende de levensduur ten gevolge van de optredende snedekrachten niet in het geding komt.

⁷ Voor deeltraject Salmsteke is de verwachting dat in de uiterste vezel geen normaalspanningen op trek worden berekend. Hierom zijn geen limietspanningen voor de situatie op trek bepaald.

- dat doorloopsheid door bezwijken van het dichtscherp gedurende de levensduur ten gevolge van de optredende snedekrachten niet optreedt.
- dat de binnenwaartse macrostabiliteit van het dijklichaam gedurende de gehele levensduur van het filterscherp aan de eisen van het normtraject voldoet.

8.3 Raakvlakken met andere faalmechanismen

De aanwezigheid van het kunststof filterscherp veroorzaakt veranderingen in de freatische grondwaterstand en bij verstopping van het filter ook veranderingen in de stijghoogte in de watervoerende zandlaag. Deze invloeden kunnen ertoe leiden dat de weerstand tegen één of meerdere directe faalmechanismen van de dijk afneemt. Hierom is in tabel 8-6 een overzicht opgenomen van de door het filterscherp beïnvloede directe faalmechanismen van een dijk. Andersom kan het optreden van een faalmechanisme van de dijk ook de werking van het kunststof filterscherp beïnvloeden. Hierom is in tabel 8-7 een overzicht opgenomen van de door het filterscherp beïnvloede directe faalmechanismen van een dijk.

Tabel 8-6. Overzicht van de invloed van het kunststof filterscherp op de directe faalmechanismen van de dijk.

Hoofd-faalmechanismen	Onderverdeling faalmechanismen	Locatie van het filterscherp in het dijkprofiel		
		Achterland of binnenteen	Binnentalud	Binnenkruin
Erosie door overslag of overloop	GEKB	Geen invloed	Geen invloed	Geen invloed
Piping	STPH	Wordt verbeterd	Wordt verbeterd	Wordt verbeterd
Instabiliteit	STBI, STMI/GABI	Wordt beïnvloed	Wordt beïnvloed	Wordt beïnvloed
	STBU	Geen invloed	Geen invloed	Geen invloed
Overige erosiesporen	GEBU, AGK, AWO, GABU, ZST	Geen invloed	Geen invloed	Geen invloed

Tabel 8-7. Overzicht van de invloed van het optreden van de directe faalmechanismen van de dijk op het functioneren van het kunststof filterscherp.

Hoofd-faalmechanismen	Onderverdeling faalmechanismen	Locatie van het filterscherp in het dijkprofiel		
		Achterland of binnenteen	Binnentalud	Binnenkruin
Erosie door overslag of overloop	GEKB	Geen invloed	Geen invloed	Geen invloed
Piping	STPH	Geen invloed	Geen invloed	Geen invloed
Instabiliteit	STBI	Wordt beïnvloed	Wordt beïnvloed	Wordt beïnvloed
	STBU, STMI/GABI	Geen invloed	Geen invloed	Geen invloed
Overige erosiesporen	GEBU, AGK, AWO, GABU, ZST	Geen invloed	Geen invloed	Geen invloed

Het kunststof filterscherp kan enkel door het optreden van een binnenwaartse afschuiving negatief worden beïnvloed (zie tabel 8-7). Als het schuifvlak het filterscherp doorsnijdt, ontstaan grote snedekrachten die niet opgenomen kunnen worden met bezwijken tot gevolg. Bij deeltraject Salmsteke is de faalkansruimte voor macrostabiliteit (4%) echter kleiner dan voor piping (24%), waardoor de toelaatbare faalkans van het bezwijken van de kering op piping groter is dan op macrostabiliteit. Hierdoor is meer veiligheid tegen macro-instabiliteit geborgd dan tegen piping en treedt piping in theorie dus makkelijker op. Afwijkende veiligheidseisen aan macrostabiliteit binnenwaarts hoeven daarom dan ook niet te worden gesteld bij de toepassing van het kunststof filterscherp, mits geen partiële afschuiving en/of restbreedtebenadering wordt toegepast.

Het kunststof filterscherm beïnvloedt de faalmechanismen macrostabiliteit binnenwaarts (STBI) en microstabiliteit (STMI)/grasbekleding afschuiving binnentalud (GABI) (zie tabel 8-6). Binnen deeltraject Salmsteke is echter enkel sprake van GABI, omdat door de aanwezigheid van kleikernen geen STMI kan optreden (Kentrop, 2021). Het beïnvloeden van STBI en GABI is onafhankelijk van de locatie van het filterscherm in het dijkprofiel. Voor beide faalmechanismen dient daarom aangetoond te worden dat geen onacceptabele vermindering van de weerstand optreedt.

8.3.1 Macrostabiliteit binnenwaarts

Bij het verstoppingen van het filterscherm kunnen verhoogde waterspanningen aan de bovenzijde van de voor piping gevoelige zandlaag ontstaan als gevolg van opstuwing. In de situatie dat de opstuwing leidt tot een niet-verwaarloosbare toename van de waterspanningen dient de binnenwaartse macrostabiliteit van de kering te worden getoetst. Hierbij dient de situatie bij hoogwater aan het einde van de ontwerplevensduur van de kering te worden beschouwd. Dit betreft de situatie 50 jaar na installatie van het kunststof filterscherm. In de toetsing dient de freatische grondwaterstand en de stijghoogte bij een volledig verstopt filter te worden beschouwd (zie paragraaf 8.1). De bijdrage van de constructieve sterkte van het kunststof filterscherm aan de binnenwaartse macrostabiliteit van de kering dient hierbij te worden verwaarloosd. Een toetsing van de binnenwaartse macrostabiliteit bij hoogwater met een functionerend filterscherm (d.w.z. zonder aanpassing van de stijghoogtelijn) hoeft hierbij niet aanvullend te worden beschouwd, omdat deze reeds is opgenomen in de snedekrachtberekening van paragraaf 8.2.

De faalkanseis waaraan getoetst moet worden dient met vergelijkingen (8-5), (8-6) en (8-7) te worden bepaald. Verondersteld wordt dat het bezwijken van de dijk op macro-instabiliteit bij hoogwater als gevolg van een verstopt filter een faalgebeurtenis is die afhangt van de kans dat het filter verstopt raakt. Voor de kans op een verstopping van het filter kan worden aangesloten bij de kans op verstopping uit paragraaf 2.6.1. Eventueel kunnen ook vervolgebeurtenissen na het verstopt raken van het filter worden beschouwd in de afleiding van de faalkanseis.

$$P_{STBI;filter} = \frac{P_{eis;dsn;STBI}}{P_{verstopping}} \quad (8-5)$$

$$\beta_{STBI;filter} = -\Phi^{-1}(P_{STBI;filter}) \quad (8-6)$$

$$SF = \gamma_d(0,15 \beta_{STBI;filter} + 0,41) \quad (8-7)$$

waarbij:

$P_{STBI;filter}$	- Faalkanseis op doorsnedeniveau voor het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts gegeven een verstopping van het filter	[1/jaar]
$P_{eis;dsn;STBI}$	- Faalkanseis voor het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts op doorsnedeniveau	[1/jaar]
$P_{verstopping}$	- Kans dat een verstopping van het filter niet tijdig wordt opgemerkt en verholpen voorafgaand aan een hoogwater	[-]
$\beta_{STBI;filter}$	- Geëiste betrouwbaarheidsindex op doorsnedeniveau voor het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts bij verstopping van het filter	[-]
Φ^{-1}	- Inverse van de standaardnormale verdelingsfunctie	[-]
SF	- Vereiste stabiliteitsfactor tegen macro-instabiliteit	[-]
γ_d	- Modelfactor	[-]

Indien de berekende stabiliteitsfactor met vgl. 5.2 uit Bijlage III Sterkte en Veiligheid tot een faalkans leidt die groter is dan de faalkanseis uit vergelijking (8-5), dienen stabiliteitsverhogende maatregelen

te worden getroffen zodat aan de faalkanseis uit vergelijking (8-5) wordt voldaan. Voor stabiliteitsverhogende maatregelen kan onder andere worden gedacht aan het verflauwen van het binnentalud, maar ook aan bijvoorbeeld het verplaatsen van het filterscherm binnen het plaatsingsgebied van hoofdstuk 5. De stabiliteitsverhogende maatregelen dienen vervolgens te worden beschouwd bij het opstellen van het ontwerp van het filterscherm conform hoofdstukken 5 t/m 9.

Het resultaat van deze toetsing is dat het dijklichaam gedurende de ontwerplevensduur van de kering voldoende veiligheid tegen macro-instabiliteit heeft bij het ontstaan van een verstopping van het filterscherm op de beschouwde locatie in het dijkprofiel.

8.3.2 Grasbekleding afschuiving binnentalud

Door het aanbrengen van het kunststof filterscherm zal de freatische lijn aan de dijkzijde van het scherm stijgen en aan de landzijde van het scherm dalen. De stijging van de freatische lijn heeft bij kleidijken met de rekenregels voor GABI geen invloed op het oordeel van GABI. Op deze locaties is bij de toepassing van het kunststof filterscherm geen toetsing op GABI benodigd en hoeven geen maatregelen tegen GABI te worden getroffen.

Indien sprake is van een kleibekleding op een zandige ondergrond, kan door de verhoogde waterspanningen de weerstand tegen opdrukken van de kleibekleding, afschuiven van de kleibekleding en/of zandtransport door de kleibekleding afnemen. Op deze locaties dienen maatwerkoplossingen te worden toegepast om te voorkomen dat dit gebeurt. Voor maatwerkoplossingen kan worden gedacht aan, maar niet beperkt tot:

- Het aanbrengen van een drainage in de zandige ondergrond aan de landzijde van het filterscherm;
- Het doorlatend maken van het filterscherm in de zandige ondergrond, bijvoorbeeld door het maken van een doorvoer in de flens van het filterscherm;
- Het afwerken van de bovenkant van het filterscherm op de onderzijde van de zandige ondergrond of dieper;
- Het vervangen van de zandige ondergrond door klei.

De haalbaarheid van de maatwerkoplossing is afhankelijk van de dikte van de zandige ondergrond onder de kleibekleding in combinatie met de gekozen positie van het kunststof filterscherm in het dijkprofiel en dient hierom per locatie te worden bepaald. De toegepaste maatwerkoplossing dient te worden beschouwd bij het opstellen van het ontwerp van het filterscherm conform hoofdstukken 5 t/m 9.

Het resultaat van deze toetsing is een op de beschouwde locatie voldoende stabiel dijklichaam met eventuele maatwerkoplossingen tegen GABI.

9 Ontwerpaspecten bij de aansluitingen

Om obstakels in het tracé met betrekking tot het ontwerp en/of de installatie van het kunststof filterscherm te vermijden kan gebruik worden gemaakt van andere (constructieve) maatregelen tegen piping. Door de (constructieve) maatregelen zo te kiezen dat de beperkingen vanuit het kunststof filterscherm niet gelden voor de toe te passen maatregel kan binnen de gehele dijkstrekking een maatregel tegen piping worden gerealiseerd. Het kunststof filterscherm dient vervolgens aangesloten te worden op de andere (constructieve) maatregelen om een doorgaande barrière tegen piping te realiseren.

Voor het uitvoeren van deze ontwerpstep zijn de volgende gegevens benodigd:

- De ligging van de reeds bestaande constructies waar met het kunststof filterscherm op aangesloten wordt, indien van toepassing;
- Het functioneel ontwerp van het kunststof filterscherm zoals verkregen na het uitvoeren van de ontwerpsteps uit hoofdstukken 5 t/m 8.
- Alle benodigde gegevens voor het uitvoeren van de ontwerpsteps uit hoofdstukken 5 t/m 8.

Bij de aansluitingen van het kunststof filterscherm op stalen heaveschermen⁸ dient aan de volgende voorwaarden te worden voldaan:

- Het punt waarop het kunststof filterscherm wordt aangesloten op een stalen heavescherm dient te zijn gelegen binnen het plaatsingsgebied zoals bepaald in hoofdstuk 5.
- Binnen de zone rondom de aansluiting met door de aansluiting beïnvloede waterspanningen dient:
 - o per profiel de profiellengte van het kunststof filterscherm te voldoen aan de randvoorwaarden zoals gesteld in hoofdstuk 6.
 - o per profiel het filterontwerp van het kunststof filterscherm te voldoen aan de randvoorwaarden zoals gesteld in hoofdstuk 7.
 - o het ontwerp met het kunststof filterscherm te worden getoetst op geohydrologie (zie paragraaf 8.1) en snedekrachten (zie paragraaf 8.2).

Indien niet aan één of meerdere voorwaarden wordt voldaan, dient het ontwerp bij de aansluitingen te worden gewijzigd totdat aan alle voorwaarden wordt voldaan. Hierbij kan onder andere worden gedacht aan het aanpassen van de filterschermen of het aanpassen van de stalen heaveschermen.

De zone met de door de aansluiting beïnvloede waterspanningen kan worden vastgesteld door middel van een 3D-grondwaterstromingsberekening. De 3D-grondwaterstromingsberekening dient te worden opgezet en uitgevoerd aan de hand van de meest recente inzichten en richtlijnen binnen de waterveiligheid. Hierbij dienen onder andere geohydrologische aspecten zoals anisotropie en intredeweerstand te worden beschouwd. Aan de hand van de grondwaterstromingsberekening kunnen de stromingsbanen rondom de aansluiting worden berekend. Met deze informatie kunnen de toetsingen op geohydrologie en snedekrachten worden uitgevoerd. Daarnaast kan met deze informatie worden bepaald of een eventueel verloop in de profiellengte tot aan de aansluiting mogelijk is. Tot slot dient voor deeltraject Salmsteke in de grondwaterstromingsberekening rekening te zijn gehouden met de nieuw gegraven geul in de uiterwaard.

⁸ Binnen deeltraject Salmsteke wordt het kunststof filterscherm enkel aangesloten op stalen heaveschermen. Aansluitingen op andere (constructieve) maatregelen tegen piping dan stalen heaveschermen zijn daarom niet beschouwd.

De aansluiting van een kunststof profiel op een stalen damwandprofiel kan op meerdere wijzen worden gerealiseerd. In paragraaf 15.3 van deel C wordt hier nader op ingegaan.

Het resultaat van deze ontwerpstep is een functionerende aansluiting waarbij het kunststof filterscherm bij de aansluiting in staat is pipegroei tot voorbij het filterscherm te voorkomen.

10 Robuustheid in het ontwerp

De in voorliggende richtlijn opgenomen werkwijze voor het opstellen van een ontwerp met het kunststof filterscherm bevat enkele conservatieve uitgangspunten ten aanzien van de veiligheid. Dit leidt tot een robuust ontwerp. Binnen de voorgeschreven werkwijze worden de robuustheden geïdentificeerd bij de profiellengte (hoofdstuk 6), het filterontwerp (hoofdstuk 7) en de toetsingen (hoofdstuk 8). De robuustheden vanuit voorgenoemde ontwerpstappen zijn in onderstaande paragrafen toegelicht. Het gehele ontwerp van het kunststof filterscherm kent de robuustheid dat de filterwerking tijdens de installatie door middel van afpompen (paragraaf 13.4) wordt aangetoond.

10.1 Profiellengte

Bij de keuze om de profiellengte binnen de beschouwde strekking(en) te dimensioneren op het diepste niveau van de bovenkant van de zandlaag komen de perforaties in de rest van de strekking dieper in de zandlaag te liggen dan minimaal nodig. Hiermee ontstaat binnen het grootste deel van de strekking extra weerstand tegen piping doordat er (extra) weerstand tegen heave wordt gecreëerd. Dit geeft robuustheid aan het ontwerp. Tevens worden de perforaties op deze locaties minder op snedekrachten belast.

10.2 Filterontwerp

In het filterontwerp van hoofdstuk 7 zijn de volgende robuustheden te identificeren:

- De kokerprofielen zijn relatief stijf. Een relatief stijve koker heeft minder last van verstopping dan een flexibeler geotextiel wat het uitgangspunt is van de in hoofdstuk 7 gehanteerde theoretische achtergrond.
- De korrels zijn in de afleiding van de methode van Giroud volledig rond, maar in werkelijkheid hoekig. Dit geeft, door haakweerstand, extra veiligheid doordat boogwerking gemakkelijker optreedt.
- In de methode van Giroud wordt onderscheid gemaakt tussen slechts drie dichtheidsklassen: los, matig vast en vast gepakt zand. Dat levert, wanneer de dichtheid tussen de grenslijnen valt, extra veiligheid op.
- Voor waarden van de gelineariseerde uniformiteitscoëfficiënt $C'_u \geq 3$ wordt niet de theoretische maximaal toelaatbare d'_{15}/d'_{85} -waarde aangehouden maar een geïnterpoleerde lagere tot veel lagere waarde, zie ook (Giroud, 2003). De achtergrond van de interpolatiewijze wordt niet gegeven maar, gezien de veel hogere theoretische grenzen, is dit een veilige benadering.
- Analoog aan de werkwijze bij het plaatsen van onttrekkingsfilters worden de kokers van het kunststof filterscherm na installatie afgepompt (paragraaf 13.4). Bij dit zogenaamde ontwikkelen van het filter wordt, per koker, duidelijk of boogwerking voldoende optreedt. Mocht dat niet het geval zijn dan zorgt het filterzand alsnog voor retentie.
- Door afstemming tussen perforatiegrootte en het geometrisch gesloten granulaire filterontwerp kan het filterzand niet uit de kokers spoelen.

10.3 Toetsingen

In de toetsingen zijn de volgende robuustheden ingebouwd:

- Het kritieke verhang voor heave bij de geohydrologische toetsing is in lijn met de Schematiseringshandleiding Piping bij Kunstwerk (Rijkswaterstaat, 2021) gelijk aan 0,5 gehanteerd, waarmee impliciet een veiligheidsfactor van 2,0 op het kritieke verval wordt aangenomen. Door het uit het ontwerp volgende verhang in de zandlaag langs het filterscherm te toetsen aan dit kritieke verhang wordt robuust ontworpen op de profiellengte ten aanzien van heave.

- In de mechanische toetsing geldt het uitgangspunt dat negatieve kleeft over de volledige deklaag volledig wordt gemobiliseerd. Dit levert een bovengrens van de negatieve kleeft op wat tot extra robuustheid in het ontwerp leidt.
- De limietspanningen die bij de mechanische toetsing worden aangehouden zijn begrensd op een percentage van de pieksterkte. Hierbij is het percentage op de pieksterkte bij hoogwater (rekenfase 5 in paragraaf 8.2.2) zo gekozen dat dit correspondeert met het deel van het belastingtraject waarbij de vervormingen van de perforaties nog nihil zijn. Hiermee wordt invulling gegeven aan het retentiecriterium van het in-situ zand op de perforaties. Op het traject tussen de limietspanningen en de pieksterkte nemen de vervormingen van de perforaties (in beperkte mate) toe, waardoor op enig moment niet meer aan het retentiecriterium van het in-situ zand op de perforaties voldaan wordt. De vervormingen van de perforaties (met name het breder worden) tot aan de pieksterkte zijn echter dusdanig beperkt (L.J. van der Meer, 2023) dat naar verwachting tot aan de pieksterkte aan het retentiecriterium van het filterzand op de perforaties wordt voldaan. Uitspoeling van het filterzand door de perforaties treedt dus niet op, waarbij het filterzand op zijn beurt het in-situ zand weer tegenhoudt. Deze tweetraps filterwerking, door de keuze van de limietspanning te baseren op een percentage van de pieksterkte, is daarmee een robuustheid voor het functioneren op lange termijn.

Deel C

Uitvoering

11 Inleiding

11.1 Kader

In deel C van deze richtlijn wordt de uitvoeringsmethodiek voor de aanleg van een filterscherf met geperforeerde kunststof profielen op locatie Salmsteke behandeld. Alle relevante uitvoeringsaspecten worden beschreven en er wordt aandacht besteed aan het materiaal, het materieel, de werkprocessen voor installatie en reiniging, de monitoring en de kwaliteitsborging. Hierbij wordt gebruikt gemaakt van de kennis en ervaring die bij de verschillende maakbaarheidsproeven op locatie Salmsteke, dat zijn installatieproeven (Van Arkel & Veenbergen, 2022; Rohe & Van der Geer, 2023), cleaningproeven (Kuiper & Van der Meer, 2023) en trekproeven (Van der Geer, 2023), en het onderzoek naar het optreden van biofilm (Waterloo & Verhagen, 2023), is opgedaan.

Er worden alleen de aspecten besproken die specifiek zijn voor de realisatie van een filterscherf met geperforeerde kunststof profielen. Voor algemene aspecten van de uitvoering en de aanleg van langsconstructies voor dijkversterkingen wordt op de betreffende plekken verwezen naar de geldende normen en richtlijnen.

11.2 Installatiemethode

Voor locatie Salmsteke is door middel van maakbaarheidsproeven een technisch geschikte installatiemethode bepaald (Van Arkel & Veenbergen, 2022; Rohe & Van der Geer, 2023). Hieruit volgt dat de geperforeerde kunststof profielen trillend geïnstalleerd kunnen worden. Voor locatie Salmsteke is dit aangetoond voor een deklaag van 3-6 m dikte en profielen tot 8 m lengte met filterperforaties van 0,5 mm breedte.

Bij deze installatiemethode wordt de grond door trillen verweekt, waardoor de kunststof profielen met een geringe drukkracht ingebracht kunnen worden. Om de kunststof profielen te kunnen trillen worden trilnaalden in de kokers geschoven die aan de onderkant op gesloten stalen punten aansluiten. De stalen punten zijn zeshoekig van vorm en hebben een platte voetplaat met een kleine overbreedte ten opzichte van de kokers van de kunststof profielen. Ze blijven na installatie achter in de grond. Na installatie worden de filterperforaties gereinigd. Tijdens het inbrengen door de deklaag heen bestaat immers het risico dat de perforaties dichtslibben met klei of veen, waardoor de filterwerking niet langer gegarandeerd is. Na de reiniging worden de kokers gevuld met filterzand, waarna de kokers aan de bovenzijde met een kunststof deksel worden afgesloten. Het volledige werkproces is stapsgewijs toegelicht in hoofdstuk 13.

Voor de keuze van een geschikt trilblok kan de theoretisch benodigde slagkracht worden bepaald met de Hypervib1-methode op basis van de conusweerstand uit sonderingen (Stichting CURNET, 2012). De methode is getoetst aan de maakbaarheidsproeven op Salmsteke waaruit blijkt dat de methode een conservatieve inschatting van de benodigde slagkracht geeft. Voor locatie Salmsteke was een trilblok met 1000 kN nominale slagkracht voldoende om alle profielen tijdens de maakbaarheidsproeven op diepte te brengen. Ervaring wijst uit om bij voorkeur te werken met een trilblok met overcapaciteit in plaats van een blok dat net boven de verwachte slagkracht ligt. Het benodigde materieel wordt nader toegelicht in hoofdstuk 13.

In de maakbaarheidsproeven op locatie Salmsteke zijn profielen met een snelheid van gemiddeld 3 m/min ingetrild. Er is een productiesnelheid van 3 profielen/uur (voor 8 m profielen) respectievelijk 4 profielen/uur (voor 6 m profielen) gerealiseerd. Dit geldt voor het trillend op diepte brengen van de profielen en de daarmee gemoeide activiteiten; de voor- en achterliggende werkprocessen (graven werksleuf, reinigen perforaties, vullen en afsluiten kokers, etc.) zijn hierin niet meegerekend.

Het trillend installeren van kunststof profielen kan effecten hebben op de omgeving:

- Trillingshinder. Trillingen in de omgeving kunnen leiden tot directe schade in nabij het werk gelegen bebouwing. Voor locatie Salmsteke is in maakbaarheidsproeven aangetoond dat de kans op schade op een afstand van meer dan 10-15 m verwaarloosbaar is (Rohe & Van der Geer, 2023). In paragraaf 15.2 zijn de effecten op de omgeving door trillingen nader toegelicht.
- Geluidshinder. De hinder is afhankelijk van het gebruikte trilblok. Het trillen gaat relatief snel waardoor de hinder beperkt blijft. Er zijn geluidafschermdende en -reducerende maatregelen beschikbaar die de geluidshinder beperken (Stichting CURNET, 2012). Er zijn geen specifieke maatregelen of eisen ten aanzien van het installeren van kunststof profielen.
- Deformaties in de omgeving. Door trillen kan los gepakt zand verdichten waardoor zettingen kunnen optreden. Door trillen kunnen wateroverspanningen in het dijklichaam ontstaan wat invloed heeft op de macrostabiliteit. In paragraaf 15.2 zijn deze aspecten nader toegelicht.

Geperforeerde kunststof profielen hebben andere trillingseigenschappen dan niet-geperforeerde profielen. Door de profielen de eerste 2 m in de grond te drukken, totdat de filterperforaties onder het grondoppervlak zijn, en daarna pas te trillen worden nadelige effecten bij geperforeerde profielen verminderd. Overmatige vibratie van het profiel, met kans op schade van de filterperforaties, wordt voorkomen en omgevingstrillingen worden gereduceerd. Deze specifieke uitvoeringsaanbeveling wordt nader toegelicht in het werkproces (stap 2) van paragraaf 13.2.

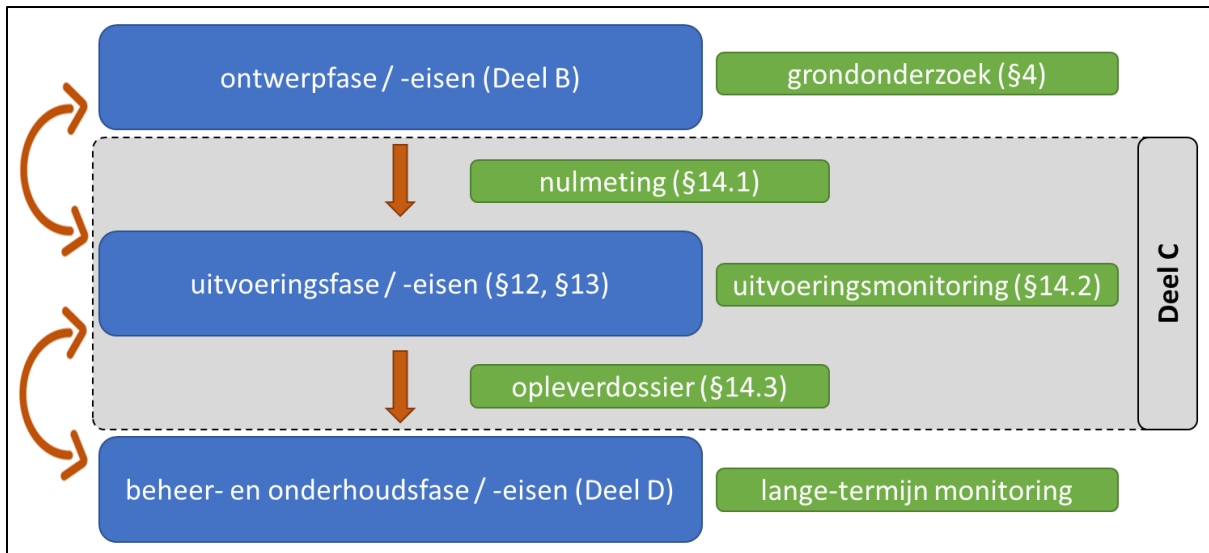
Kosten- en duurzaamheidsaspecten zijn voor de keuze van de installatiemethode niet beoordeeld.

11.3 Relatie tussen ontwerp, uitvoering en beheer

In figuur 11-1 zijn de onderlinge verhoudingen tussen de ontwerp-, uitvoerings- en beheer- en onderhoudsfase van het filterscherm schematisch weergegeven. Elke fase kent haar eigen monitoring of grondonderzoek (in groen weergegeven). In dit deel C worden de grijs gearceerde onderdelen toegelicht.

De eisen uit het ontwerp (deel B van deze richtlijn) kunnen effect hebben op de uitvoeringsfase en andersom. Hierbij valt bijvoorbeeld te denken aan de lengte van de profielen, de aanlegdiepte of de locatie. Hierdoor kunnen met betrekking tot de uitvoering aanvullende maatregelen of aanpassingen van het werkproces nodig zijn. De effecten van het ontwerp op de uitvoering en vice versa worden in hoofdstuk 13 in de betreffende paragrafen van het werkproces voor de aanleg van het filterscherm beschreven.

Het grondonderzoek en de nulmeting van de oorspronkelijke situatie, d.i. voor het begin van de uitvoeringsfase, dienen als referentiesituatie voor het ontwerp, de uitvoering en het beheer. Dit wordt aangevuld met voorspellingen van de te verwachten situatie aan het einde van de levensduur van 100 jaar. Enerzijds is een nulmeting van bijvoorbeeld de oorspronkelijke grondwatersituatie, door middel van peilbuismetingen, nodig om uitgangspunten voor het ontwerp vast te stellen. Anderzijds zijn nulmetingen noodzakelijk om verstoringen op de lange termijn doelgericht op te kunnen sporen. Idealiter wordt deze nulmeting uitgevoerd tijdens een periode die ook een hoogwater bevat om een geschikt bereik te meten in responstijden. Details betreffende de nulmeting van het filterscherm zijn toegelicht in paragraaf 14.1. De monitoring tijdens de uitvoeringsfase wordt in paragraaf 14.2 besproken. Het grondonderzoek en de benodigde onderzoeksgegevens voor het ontwerp zijn reeds in hoofdstuk 4 besproken.



Figuur 11-1. Relatie tussen eisen uit ontwerp-, uitvoerings- en beheer en onderhoudsfase met bijbehorende monitoring, grondonderzoek en gegevensverzameling.

De uitvoeringsfase eindigt met de oplevering van het filterscherm (as-built situatie) die wordt vastgelegd in het daarbij behorende opleverdossier (paragraaf 14.3). De eisen voor de gebruiksfase (deel D van deze richtlijn) zijn in het beheer- en onderhoudsplan (De Gee & Waagmeester, 2023) vastgelegd. Daarin worden de inspectie en langetermijnmonitoring gedurende de gebruiksfase gedefinieerd en toegelicht. Voor de in het beheer- en onderhoudsplan beschreven monitoring moet aan het einde van de uitvoeringsfase een nulmeting uitgevoerd en in het opleverdossier gedocumenteerd worden.

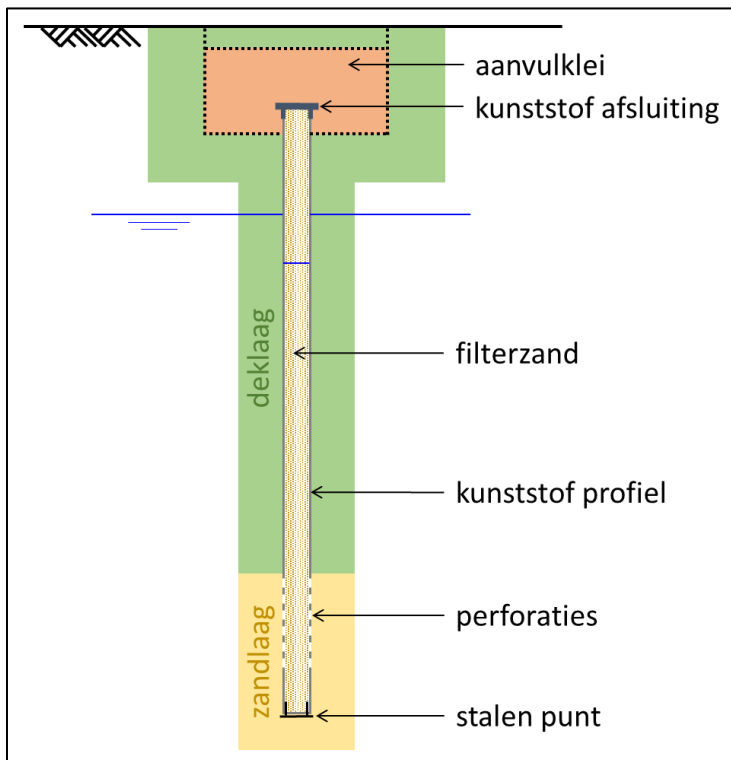
De eisen uit het beheer- en onderhoudsplan (De Gee & Waagmeester, 2023) kunnen effect hebben op de uitvoeringsfase en andersom. Hierbij valt bijvoorbeeld te denken aan een waterspanningsmeter of peilbuis aan de binnenkant van een koker van een profiel. Hiervoor moet het werkproces van de uitvoering plaatselijk aangepast worden. De locaties en specificaties voor de aanvullende (monitoring)maatregelen komen in het beheer- en onderhoudsplan aan de orde, op basis waarvan de uitvoeringstekeningen aangepast dienen te worden. Anderzijds kan op basis van ervaringen gedurende de uitvoering, bijvoorbeeld lokaal tegenvallende onttrekkingsdebieten tijdens het reinigingsproces, een extra controle noodzakelijk blijken om te toetsen of de voorziene monitoring tijdens de gebruiksfase nog voldoet of hierop aangepast moet worden.

12 Materiaalaspecten

Aspecten betreffende de eigenschappen en levering worden gedefinieerd voor de materialen van relevante onderdelen van het te realiseren filterscherm zoals weergegeven in figuur 12-1:

- de geperforeerde kunststof profielen (paragraaf 12.1),
- de stalen punt (paragraaf 12.2),
- het filterzand (paragraaf 12.3),
- de kunststof afsluiting (paragraaf 12.4) en
- de aanvulklei (paragraaf 12.5).

Verbruiks- en hulpmaterialen voor de uitvoering en het werkproces komen in dit hoofdstuk niet aan de orde en worden in de betreffende stappen van het werkproces in hoofdstuk 13 besproken.



Figuur 12-1. Relevante systeemonderdelen voor de realisatie van een filterscherm met kunststof profielen.

Kwaliteitscontrole kan plaatsvinden bij aflevering (ingangscntrole) of door de leverancier (leveringscertificaat) en de voor de waterveiligheid en functioneren van het filterscherm relevante aspecten worden gedocumenteerd in het opleverdossier (paragraaf 14.3). Afspraken hierover moeten worden vastgelegd in het uitvoeringsplan.

Er zijn materiaalaspecten die volgen uit en relevant zijn voor het ontwerp en functioneren van het filterscherm (bijvoorbeeld eisen t.a.v. kunststof profiel) en materiaalaspecten die volgen uit en relevant zijn voor de uitvoering en niet direct effect hebben op het functioneren van het filterscherm (bijvoorbeeld eisen t.a.v. stalen punt). Beiden worden hier besproken.

De hier gedefinieerde materiaalaspecten hebben betrekking op de fysische eigenschappen van het materiaal (bijvoorbeeld gradatie filterzand). De uitvoeringsaspecten worden in de betreffende stappen van het werkproces gedefinieerd en toegelicht (bijvoorbeeld hoeveelheid en verdichting filterzand).

12.1 Geperforeerde kunststof profielen

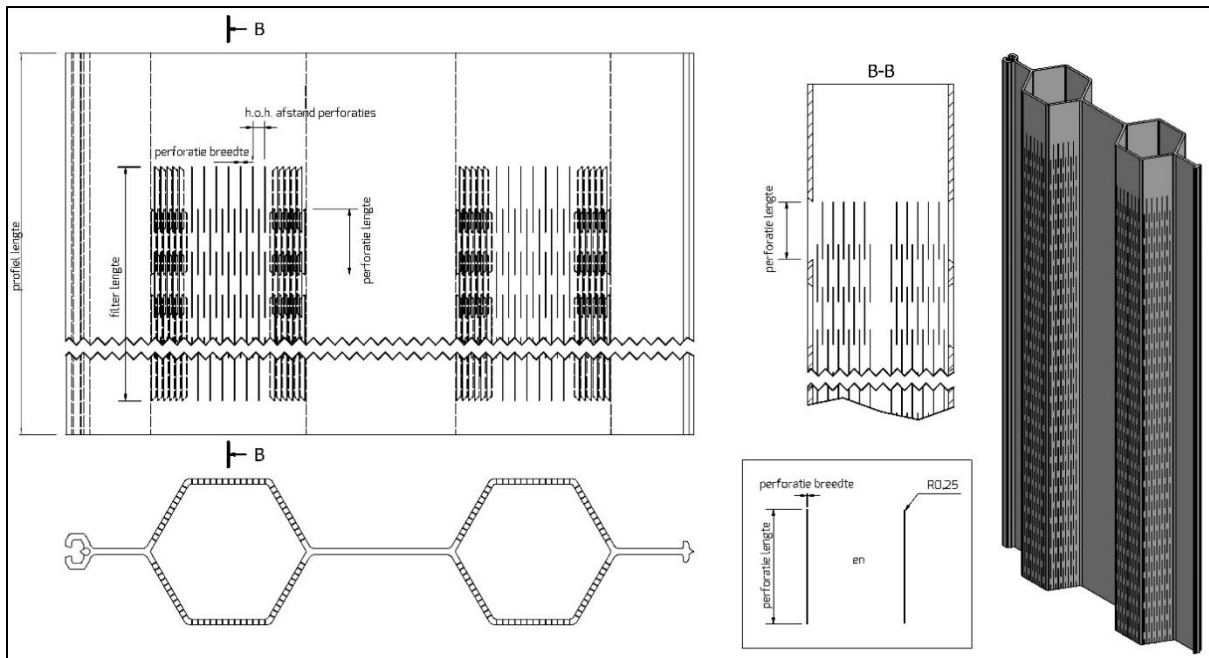
Het hoofdonderdeel van het filterscherm zijn kunststof profielen met kokers die deels voorzien zijn van perforaties. De volgende aspecten zijn van belang met betrekking tot de geperforeerde kunststof profielen:

- (a) De kunststof profielen zijn niet genormeerd maar worden geleverd met leveringscertificaat.
- (b) De mechanische eigenschappen moeten voldoen aan de eisen uit het ontwerp (tabel 8-3).
- (c) De dikte van de kokerwanden is 4,5 mm met een tolerantie van +1,0 mm en -0,3 mm. De dikte van de flensen is 5,0 mm met een tolerantie van +0,5 mm en -0,3 mm.
- (d) De perforaties moeten voldoen aan de eisen uit het filterontwerp (hoofdstuk 7). Dit betreft de locatie op het profiel, perforatiebreedte en -lengte en de hart-op-hart afstand.
- (e) De toegestane tolerantie op de configuratie van de perforaties is 10%.

De volgende aspecten zijn aanvullend van belang en hebben betrekking op de uitvoering en zijn deels gerelateerd aan de gekozen installatiemethode (paragraaf 13.2):

- (f) Er geldt een tolerantie van 10 mm op de lengte van de profielen ten opzichte van het ontwerp. Dit is essentieel voor de aansluiting van de trilnaalden op de stalen punten aan de onderkant van de kokers (zie paragraaf 13.2). Bij te korte profielen kunnen de stalen punten uit de koker vallen en is er onvoldoende aansluiting tussen punt en profiel. Bij te lange profielen heeft de trilnaald geen aansluiting op de stalen punt en kan de trillingsenergie niet overgedragen worden. In figuur 13-3 is de aansluiting in een detailtekening geschetst.
- (g) De profielen moeten de installatie kunnen weerstaan en de krachten tijdens het optillen, verplaatsen, trillen en drukken kunnen opnemen. De filterperforaties moeten onbeschadigd blijven. Voor profielen tot 8 m lengte en filterperforaties van 0,5 mm breedte is dit aangetoond in de maakbaarheidsproeven Salmsteke.
- (h) De profielen en filterperforaties moeten voor het inbrengen onbeschadigd zijn.
- (i) De profielen moeten bij levering vrij zijn van microplastics die tijdens het productieproces (snijden op lengte, frezen van perforaties) kunnen ontstaan.
- (j) Er mogen alleen nieuwe profielen worden gebruikt. Hergebruik van bijvoorbeeld getrokken profielen is niet toegestaan.
- (k) Afgekeurde en eventueel verwijderde profielen alsmede andere profielresten moeten worden afgevoerd naar de leverancier voor recycling.
- (l) Met degradatie van sterkte en stijfheid van de kunststof profielen door het trillend installeren wordt geen rekening gehouden. Het filterscherm heeft geen stabiliteitsfunctie, maar moet wel de krachten kunnen opnemen die tijdens de levensduur van 100 jaar optreden (zie toetsing in paragraaf 8.2).

De vorm en eigenschappen van de geperforeerde kunststof profielen zijn in de maakbaarheidsproeven Salmsteke afgeleid en getest. Een schets van een profiel met maatvoering is opgenomen in figuur 12-2. De materiaalaspecten ten aanzien van de kunststof profielen zijn samengevat in tabel 12-1. De aspecten ten aanzien van het installatieproces van de kunststof profielen zijn opgenomen in paragraaf 13.2 (stap 2).



Figuur 12-2. Geperforeerd kunststof profiel met maatvoering.

Tabel 12-1. Materiaalaspecten geperforeerde kunststof profielen.

Nr.	Naam	Beschrijving
1.1 – Materiaal: Geperforeerde kunststof profielen		
1.1.01	Leveringscertificaat	De kunststof profielen worden met leveringscertificaat geleverd.
1.1.02	Mechanische eigenschappen	De mechanische eigenschappen moeten voldoen aan de ontwerpeisen (tabel 8-3).
1.1.03	Configuratie perforaties	De configuratie van de perforaties – locatie, lengte, breedte, afstand – moet voldoen aan het filterontwerp (hoofdstuk 7).
1.1.04	Kwaliteit perforaties	Voor de maatvoering van de perforaties geldt een tolerantie van 10% t.o.v. het filterontwerp.
1.1.05	Profiellengte	Op de lengte van een profiel geldt een tolerantie van 10 mm.
1.1.06	Beschadiging	De profielen en filterperforaties moeten onbeschadigd zijn.
1.1.07	Microplastics	Er mogen geen microplastics aanwezig zijn.
1.1.08	Hergebruik	Er mogen alleen nieuwe profielen worden gebruikt. Afgekeurde of verwijderde profielen moeten worden afgevoerd naar de leverancier voor recycling.

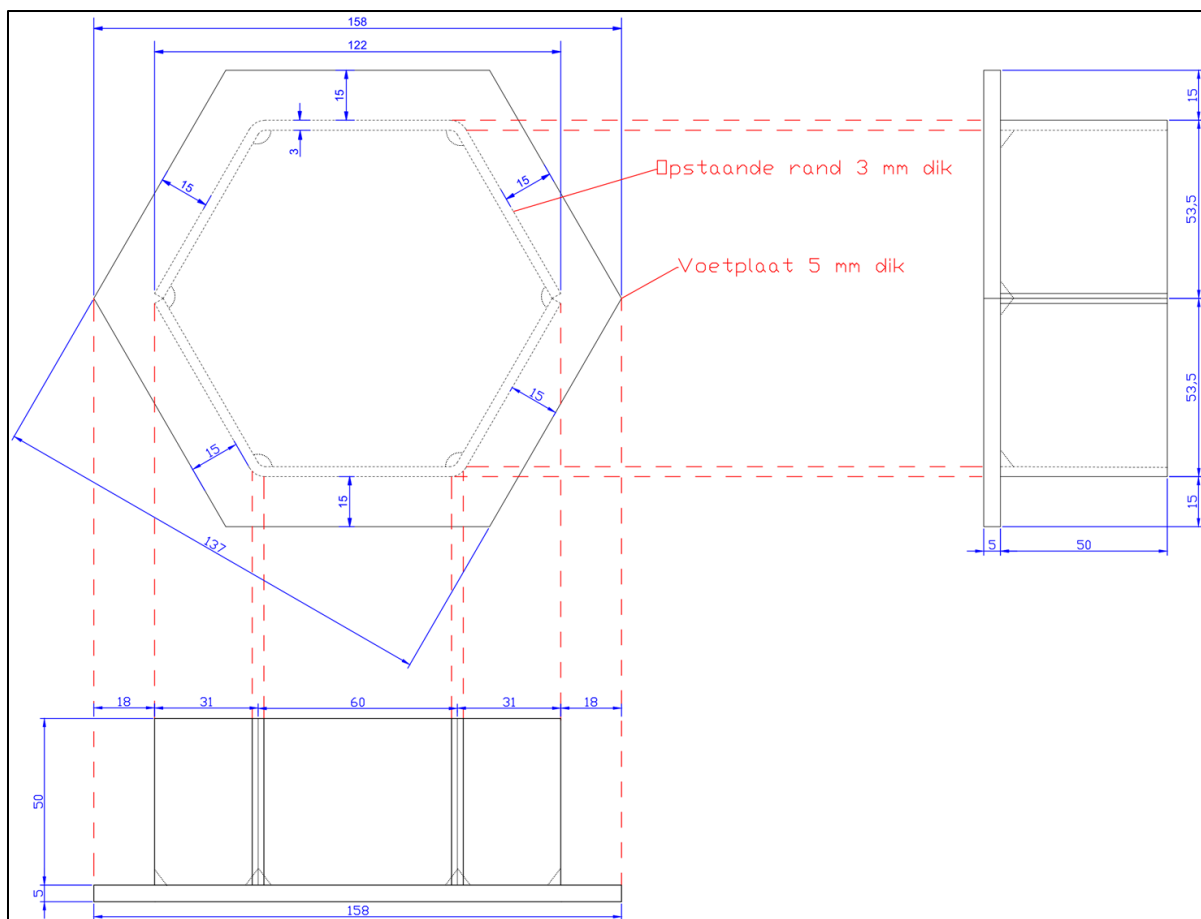
12.2 Stalen punt

Bij het trillend installeren van kunststof profielen kan de energie van het trilblok, in tegenstelling tot stalen damwandprofielen, niet direct via de profielen overgedragen worden. De kunststof profielen zijn niet bestand tegen deze krachten en kunnen de trillingen niet overdragen naar de punt van het profiel. Bij de maakbaarheidsproeven Salmsteke zijn trilnaalden gebruikt die door de kokers van de kunststof profielen geschoven worden. Aan de onderkant van de profielen sluiten de trilnaalden aan op een verloren stalen punt. De stalen punt wordt de grond ingetrild, dat wil zeggen hoogfrequent ingeslagen zonder dat er trekkrachten overgedragen kunnen worden van de trilnaalden naar de stalen punt. De kunststof profielen zakken met een lichte drukkracht achteraan. Zodoende fungeert de stalen punt als een voorloper om de grond opzij te drukken respectievelijk als kleefbreker. Het kunststof profiel wordt dus niet in een verticale op- en neergaande beweging gebracht zoals dit bij het intrillen van damwandplanken gebeurt. De eisen voor het materieel (trilblok en trilnaalden) zijn toegelicht in paragraaf 13.2 (stap 2). De volgende materiaalaspecten zijn van belang met betrekking tot de stalen punt:

- (a) Eisen t.a.v. vorm. De stalen punt bestaat uit een opstaande rand (zeskant) met een platte voetplaat die vast met elkaar verbonden zijn (6 laspunten). De verbinding hoeft niet water- of zanddicht uitgevoerd te worden. De opstaande rand zorgt voor een goede aansluiting tussen koker en punt en borgt de vormvastheid van de voetplaat onder invloed van de krachten vanuit de trilnaalden. De voetplaat zorgt voor een goede aansluiting tussen trilnaald en punt. De voetplaat moet over de kokerrand uitsteken om tijdens het trillend installeren grond opzij te drukken en kleef te breken (10 mm vanaf buitenkant kokerwand).
- (b) Eisen t.a.v. afmetingen met maatvoering en toleranties (figuur 12-3). De opstaande rand moet in de koker van het kunststof profiel passen. De maatvoering moet afgestemd zijn met de afmetingen en toleranties van de koker. De opstaande rand mag geen scherpe randen of hoeken hebben om te garanderen dat de punt goed in de koker past en om te voorkomen dat de punt de kunststof van de koker beschadigt.
- (c) Eisen t.a.v. staaldikte. De voetplaat en opstaande rand moeten voldoende dik zijn om een vervorming door de trilnaalden tijdens installatie te voorkomen (voetplaat 5 mm, rand 3 mm).
- (d) Eisen t.a.v. materiaaleigenschappen. De staalkwaliteit (S235) en laskwaliteit (hechtlassen) moeten voldoen aan de relevante normen.
- (e) De stalen punt blijft na installatie achter in de ondergrond.

De vorm, afmetingen en eigenschappen van de stalen punt zijn in de maakbaarheidsproeven Salmsteke afgeleid en getest. Een schets van de stalen punt met maatvoering is opgenomen in figuur 12-3. De stalen punt moet tijdens het installeren operationeel zijn en functioneren. Gedurende de levensduur van het filterscherm heeft de stalen punt alleen de functie om de verticale draagkracht te waarborgen (zie toetsing in paragraaf 8.2).

De materiaalaspecten ten aanzien van de stalen punt zijn opgenomen in tabel 12-2. De aspecten ten aanzien van het aanbrengen van de stalen punt zijn opgenomen in paragraaf 13.2 (stap 2).



Figuur 12-3. Stalen punt met maatvoering.

Tabel 12-2. Materiaalaspecten stalen punt.

Nr.	Naam	Beschrijving
1.2 – Materiaal: Stalen punt		
1.2.01	Staalkwaliteit	Minimaal staalsoort S235 of vergelijkbaar.
1.2.02	Staaldikte	De voetplaat moet een minimale dikte van 5 mm hebben. De opstaande rand moet een minimale dikte van 3 mm hebben.
1.2.03	Vorm en afmeting	Vorm en afmetingen volgens tekening in figuur 12-3. - Hoogte opstaande rand: minimaal 50 mm. - Breedte voetplaat: afmeting binnenzijde koker + 15 mm.
1.2.04	Toleranties	Voor de maatvoering geldt tolerantieklasse 'mk' volgens ISO-2768. Voor de opstaande rand geldt een tolerantie van 0,2 mm.
1.2.05	Uitvoering	De opstaande rand moet op minimaal 6 punten door lassen (of gelijkwaardig) aan de voetplaat bevestigd zijn. De verbinding hoeft niet water- of zanddicht te worden uitgevoerd.
1.2.06	Afwerking	Aan de opstaande rand en voetplaat mogen geen scherpe randen of kanten zitten (afbramen).

12.3 Filterzand

Na het installeren van de kunststof profielen en na het reinigen van de filterperforaties worden de kokers gevuld met filterzand. Het werkproces voor het aanbrengen van het filterzand met de benodigde hoeveelheid en verdichting is beschreven in paragraaf 13.5 (stap 5). De gradatie van het filterzand volgt uit het filterontwerp (zie hoofdstuk 7). Om een goede werking van het filter te waarborgen, dient het gebruikte filterzand aan de volgende eisen te voldoen:

- (a) Het filterzand moet voldoen aan de eisen gesteld in NEN-EN 12904:2005 (Materialen voor de behandeling van water bestemd voor menselijke consumptie - Silicazand en silicagrind).
- (b) De gradatie van het geleverde filterzand mag voor fijne mengsels ($\leq 0,71-1,25$ mm) maximaal 5% afwijken van de ontwerpgradatie. Voor grove mengsels ($> 0,71-1,25$ mm) is de maximale afwijking 10%. De afwijking geldt hierbij voor de maximale en minimale zeefdiameter, tussenliggende zeefdiameters worden niet beoordeeld.
- (c) De uniformiteitscoëfficiënt moet voldoen aan $C_u \leq 1,5$.
- (d) Het verdient de aanbeveling om de ontwerpgradatie van het filtermateriaal (bepaald in hoofdstuk 7) te baseren op de beschikbare handelsgradatie(s) van een vooraf vastgestelde leverancier.

De kwaliteit van het gebruikte filterzand dient aangetoond te worden en moet worden gedocumenteerd in het opleverdossier (paragraaf 14.3). Hiervoor geldt:

- (e) De samenstelling van het filterzand wordt bij voorkeur aangetoond middels een leveringscertificaat. Alternatief kunnen in-situ monsters genomen worden vóór het vullen van de kokers.
- (f) Voor het leveringscertificaat of de in-situ steekproeven moet minimaal 1 korrelgrootteverdeling per 10 m^3 filterzand worden bepaald voor de relevante zeefdiameters, d.i. de maximale en minimale korrelgrootte volgens ontwerp, en de uniformiteitscoëfficiënt C_u .

De materiaalaspecten ten aanzien van het filterzand zijn opgenomen in tabel 12-3. De aspecten ten aanzien van het aanbrengen van het filterzand zijn opgenomen in paragraaf 13.5 (stap 5).

Tabel 12-3. Materiaalaspecten filterzand.

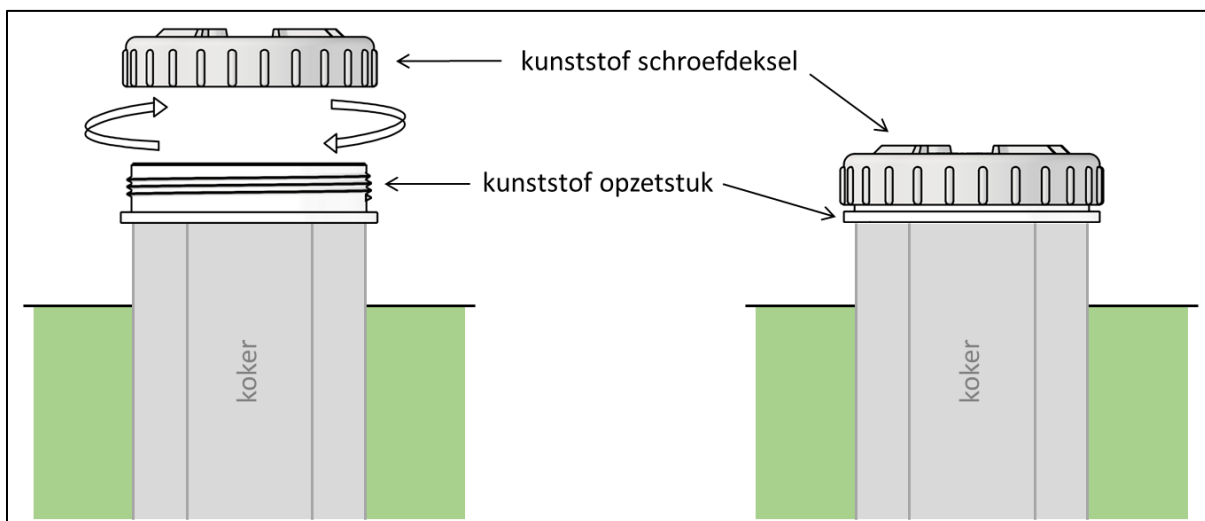
Nr.	Naam	Beschrijving
1.3 – Materiaal: Filterzand		
1.3.01	Norm	Het filterzand moet voldoen aan NEN-EN 12904:2005.
1.3.02	Type filterzand	De gradatie van het filterzand volgt uit het filterontwerp en is bij voorkeur gebaseerd op beschikbare handelsgradaties.
1.3.03	Gradatie	Voor de gradatie geldt een tolerantie van 5% (fijne mengsels) of 10% (groeve mengsels) op de maximale en minimale zeefdiameters. De uniformiteitscoëfficiënt moet kleiner of gelijk zijn dan 1,5.
1.3.04	Kwaliteit	De samenstelling en gradatie, zoals in het ontwerp gedefinieerd, moeten door de leverancier worden gegarandeerd door middel van een leveringscertificaat.
1.3.05	Korrelgrootteverdeling	Van het geleverde filterzand moet 1 korrelgrootteverdeling per 10 m^3 zijn bepaald (gedocumenteerd in leveringscertificaat of door in-situ monsternamen).

12.4 Kunststof afsluiting

De kokers van de kunststof profielen worden aan de bovenkant waterdicht afgesloten om kortsluiting tussen de watervoerende zandlaag en het achterland te voorkomen. In maakbaarheidsproven Salmsteke is een proces ontwikkeld en getest om de bovenkant van de kokers door middel van een kunststof opzetstuk met schroefdeksel af te sluiten, zie figuur 12-4. Het opzetstuk wordt door middel van spiegellassen aangebracht. Het werkproces voor het aanbrengen van de kunststof afsluiting is beschreven in paragraaf 13.6 (stap 6). De ontwerpeisen van de kunststof afsluiting volgen uit hoofdstuk 8.1 waarin onder WBN-condities de maximale waterdruk op de afsluiting is bepaald. De volgende materiaalaspecten zijn van belang met betrekking tot de kunststof afsluiting:

- (a) Voor het opzetstuk geldt voor de maatvoering: passend op koker, binnendiameter passend voor de spuitkop tijdens reiniging (paragraaf 13.4), afstemmen met toleranties van koker (paragraaf 12.1).
- (b) Het opzetstuk is van PVC heeft een uitwendige schroefdraad van 125 mm.
- (c) Het schroefdeksel is van PVC en een standaard hulpstuk volgens NEN-EN 1401-1 (Kunststofleidingssystemen voor vrij verval buitenriolering - Ongeplasticeerd PVC (PVC-U) - Deel 1: Eisen voor buizen, hulpstukken en het systeem) en NEN-EN 1329-1 (Kunststofleidingssystemen voor binnenriolering (lage en hoge temperatuur) - Ongeplasticeerd polyvinylchloride (PVC-U) - Deel 1: Specificaties voor leidingen, hulpstukken en het systeem).
- (d) Het schroefdeksel heeft een inwendige schroefdraad van 125 mm. De dikte van de deksel is 3,2 mm. Het schroefdeksel is voorzien van een rubberen dichtring en is gecertificeerd tot 0,5 bar.

De materiaalaspecten ten aanzien van de kunststof afsluiting zijn opgenomen in tabel 12-4. De aspecten ten aanzien van het aanbrengen van de kunststof afsluiting zijn opgenomen in paragraaf 13.6 (stap 6).



Figuur 12-4. Kunststof afsluiting van bovenkant koker (opzetstuk met schroefdeksel).

Tabel 12-4. Materiaalaspecten kunststof afsluiting.

Nr.	Naam	Beschrijving
1.4 – Materiaal: Kunststof afsluiting		
1.4.01	Norm	Het schroefdeksel is van PVC en moet voldoen aan NEN-EN 1401-1/NEN-EN 1329-1.
1.4.02	Afmeting	Vorm en afmeting opzetstuk volgens tekening in figuur 12-4. Schroefdeksel type 125/3,2.
1.4.03	Verbinding	Het opzetstuk heeft een uitwendige schroefdraad van 125 mm. Het schroefdeksel heeft een inwendige schroefdraad van 125 mm.

12.5 Aanvulklei

Het filterscherf wordt in een werksleuf aangebracht en met de bovenkant onder het oorspronkelijke maaiveld afgewerkt. Voor het vullen van de werksleuf wordt aanvulklei gebruikt. Hiermee wordt de deklaag en de oorspronkelijke waterremmende functie hersteld, met name in relatie tot voorloopseheid. De volgende materiaalaspecten zijn van belang met betrekking tot de aanvulklei:

- (a) De aanvulklei moet voldoen aan het 'Handboek Dijkenbouw' (HWBP, 2018).
- (b) Klei van erosieklasse 2 (of gelijkwaardig) dient te worden toegepast.
- (c) De kleikwaliteit moet voldoen aan paragraaf 8.3.3 in 'Handboek Dijkenbouw' (HWBP, 2018).
- (d) Het verdient de voorkeur om gebiedseigen klei te gebruiken.

De materiaalaspecten ten aanzien van de aanvulklei zijn opgenomen in tabel 12-5. De aspecten ten aanzien van het aanbrengen van de aanvulklei zijn opgenomen in paragraaf 13.7 (stap 7).

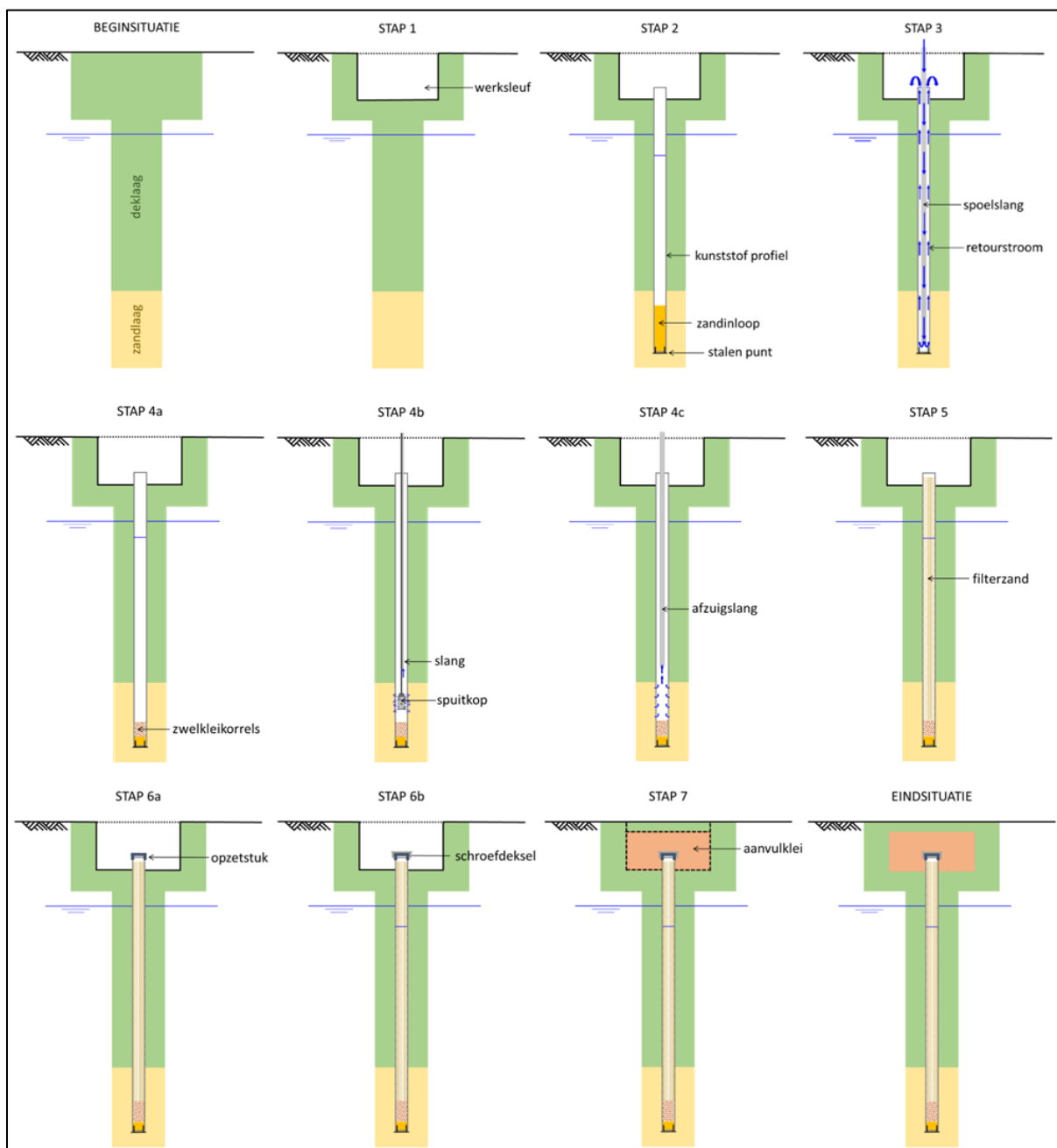
Tabel 12-5. Materiaalaspecten aanvulklei.

Nr.	Naam	Beschrijving
1.5 – Materiaal: Aanvulklei		
1.5.01	Norm	De aanvulklei moet voldoen aan 'Handboek Dijkenbouw' (HWBP, 2018).
1.5.02	Erosieklasse	Minimaal erosieklasse 2.
1.5.03	Kwaliteit	Volgens paragraaf 8.3.3 in 'Handboek Dijkenbouw' (HWBP, 2018).
1.5.04	Duurzaamheid	Gebruik van gebiedseigen klei heeft de voorkeur.

13 Werkproces en uitvoeringsaspecten

Voor de aanleg van een filterscherm met kunststof profielen is in maakbaarheidsproeven Salmsteke een werkproces in zeven stappen ontwikkeld en getest (zie ook figuur 13-1):

- Stap 1) Aanleg werksleuf;
- Stap 2) Installeren geperforeerde kunststof profielen door trillen;
- Stap 3) Verwijderen zandinloop;
- Stap 4) Reinigen filterperforaties (a. Afsluiten; b. Schoonspuiten; c. Afzuigen);
- Stap 5) Aanbrengen filterzand in kokers;
- Stap 6) Afsluiten bovenkant koker (a. Opzetstuk; b. Schroefdeksel);
- Stap 7) Afwerken deklaag.



Figuur 13-1. Werkprocessen voor de aanleg van een filterscherm met geperforeerde kunststof profielen. Beginsituatie, stap 1 t/m stap 7 en eindsituatie.

Per uitvoeringsstap wordt het doel, het benodigde materieel en gereedschap, de werkwijze en de uitvoering beschreven. Elke stap wordt afgesloten met een tabel met relevante aspecten voor de uitvoering die volgen uit de ervaringen uit de maakbaarheidsproef Salmsteke en van toepassing zijn voor locatie Salmsteke indien dezelfde werkwijze toegepast wordt. In onderstaande paragrafen zijn de ervaringen uit deze proeven in grijze kaders opgenomen.

De uitvoering en de inrichting van de bouwplaats inclusief transportbewegingen moet worden vastgelegd in een uitvoeringsplan (werkplan), bijvoorbeeld volgens CUR166 deel II, §5.1.3 en §5.1.6, (Stichting CURNET, 2012), waarin algemene handvaten worden gegeven. Er gelden geen aanvullende of afwijkende eisen t.a.v. de realisatie van een filterscherm met kunststof profielen.

13.1 Aanleg werksleuf (stap 1)

Doel: De werksleuf wordt aangelegd om de kunststof profielen met de bovenkant op een bepaalde diepte onder het oorspronkelijke maaiveld aan te brengen. Voor de bepaling van de aanlegdiepte zie hoofdstuk 6.

Werkwijze: Het proces bestaat uit het graven van een sleuf vanaf maaiveld en het afvoeren of opslaan van de vrijgekomen grond. De werksleuf wordt droog aangelegd, overtollig water, vrijkomend tijdens het werkproces, wordt uit de sleuf afgepompt.

Materieel en gereedschap: Voor het aanleggen van de werksleuf is een graafmachine met graafbak benodigd en eventueel transportmaterieel. Dompelpomp voor het afzuigen van overtollig water.

Uitvoering: Na het uitzetten van het tracé van het te realiseren filterscherm kan de sleuf vanaf maaiveld gegraven worden. De werksleuf wordt in den droge aangelegd.

De diepte van de werksleuf wordt bepaald door de aanlegdiepte van de te installeren kunststof profielen, dat wil zeggen de afstand van maaiveld tot de bovenkant van het profiel. De aanlegdiepte, $h_{profiel}$ [m], volgt uit het ontwerp in hoofdstuk 6. De profielen worden niet tot direct op het grondoppervlak ingebracht. De profielen steken een afstand, $h_{installatie}$ [m], boven het grondoppervlak uit. Voor de diepte van de werksleuf, $h_{werksleuf}$ [m], volgt:

$$h_{werksleuf} = h_{profiel} + h_{installatie} \quad (13-1)$$

Voor de bepaling van de maximaal realiseerbare diepte van de sleuf moet rekening gehouden worden met de volgende factoren:

- Stabiliteit van de sleufwanden. Afhankelijk van de grondgesteldheid van de deklaag kunnen vanaf een bepaalde sleufdiepte geen verticale sleufwanden meer toegepast worden of moeten aanvullende maatregelen genomen worden om de sleufwanden te stabiliseren (bekisting of getrapt talud). Hierbij is ook rekening te houden met de trillingsbelasting door het inbrengen van de profielen en de bovenbelasting van de trilstelling.
- Opbarsten van de sleufbodem. De stabiliteit van de sleufbodem moet getoetst worden op het risico voor opbarsten. De maatgevende stijghoogte in de zandlaag volgt uit het geohydrologisch ontwerp (zie paragraaf 8.1). Bij overschrijding van de maximaal toelaatbare stijghoogte moeten de werkzaamheden gestaakt worden.

Voor de bepaling van de maximale aanlegdiepte, $h_{profiel}$ [m], spelen de uitschuifbaarheid van de makelaar van de trilstelling onder de rupsonderkant en het overlopen van de kokers met water uit de zandlaag een rol, zoals gehanteerd in de geohydrologische uitgangspunten van het ontwerp in paragraaf 8.1.

In de maakbaarheidsproeven Salmsteke is een aanlegdiepte van $h_{\text{profiel}} = 0,50$ m onder maaiveld gerealiseerd. De profielen konden zonder problemen tot $h_{\text{installatie}} = 0,30$ m boven het grondoppervlak ingebracht worden. De totale diepte van de werksleuf was hierdoor $h_{\text{werksleuf}} = 0,80$ m. Deze sleufdiepte kan zonder aanvullende stabiliteitsmaatregelen verticaal worden uitgegraven. Let hierbij wel op de begaanbaarheid van de sleuf. De makelaar van de trilstelling, type ABI-MOBILRAM (zie paragraaf 13.2), vormde geen beperking doordat deze 1,50 m uitschuifbaar is onder de rupsonderkant.

De breedte van de werksleuf wordt bepaald door de benodigde werkruimte aan weerszijden van het tracé. De werksleuf moet aan de ene zijde voldoende ruimte bieden om het kunststof profiel met makelaar en trilblok (zie paragraaf 13.2) op diepte te kunnen brengen, b_{voorkant} [m]. Aan de andere zijde moet er voldoende ruimte zijn voor de grondwerkers om de installatie te begeleiden (zie paragraaf 13.2), $b_{\text{achterkant}}$ [m]. Voor de breedte van de werksleuf, $b_{\text{werksleuf}}$ [m], volgt:

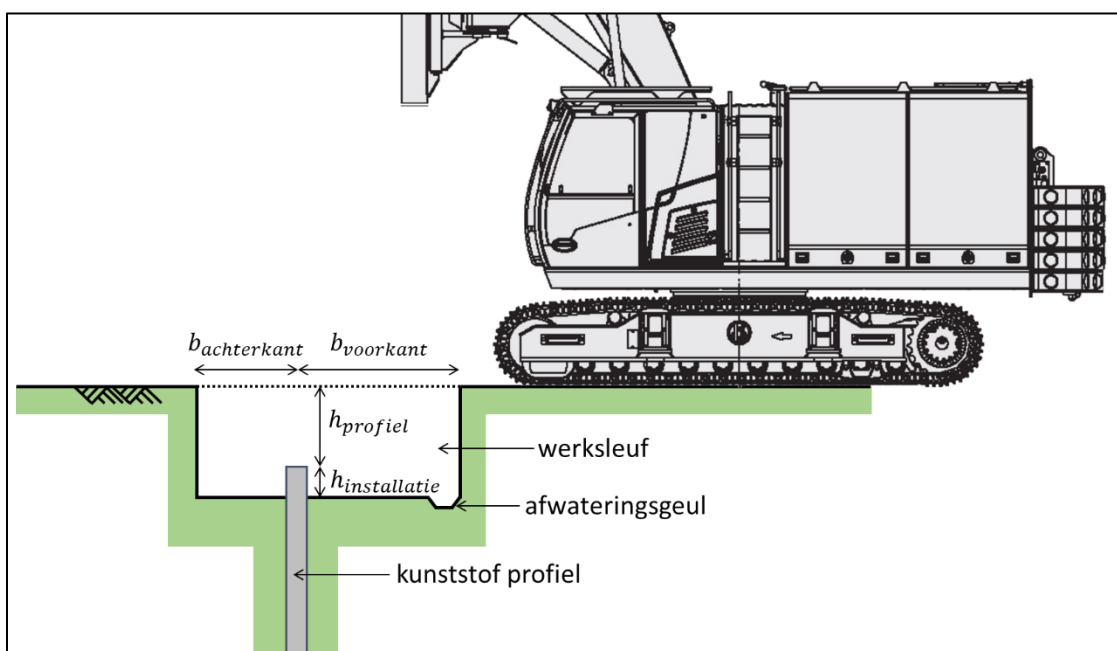
$$b_{\text{werksleuf}} = b_{\text{voorkant}} + b_{\text{achterkant}} \quad (13-2)$$

Uit de maakbaarheidsproeven Salmsteke volgt dat aan de voorkant van de kunststof profielen, dat is de zijde waar de trilstelling zich bevindt, een werkruimte van $b_{\text{voorkant}} = 1,00$ m benodigd is. Aan de achterkant van de kunststof profielen is $b_{\text{achterkant}} = 0,50$ m werkruimte benodigd. De totale breedte van de werksleuf was hierdoor $b_{\text{werksleuf}} = 1,50$ m.

Tijdens het uitvoeringsproces wordt in verschillende stappen water gebruikt dat ook in de werksleuf terecht kan komen. Daarom moeten er in de werksleuf voorzieningen worden getroffen om overtollig water af te kunnen voeren.

In de maakbaarheidsproeven Salmsteke is een afwateringsgeul gegraven om het water naar een dieper punt te laten stromen en vanaf daar met een pomp af te voeren.

In figuur 13-2 is een schets van de afmetingen van de werksleuf met afwateringsgeul gegeven. Als de werksleuf naast een bestaand (dijk)talud gegraven wordt dient rekening te worden gehouden met de uitvoeringsstabiliteit (zie hiervoor paragraaf 15.2).



Figuur 13-2. Afmetingen werksleuf.

Tabel 13-1. Uitvoeringsaspecten aanleg werksleuf (werkproces stap 1).

Nr.	Naam	Beschrijving
2.1 – Uitvoering: Aanleg werksleuf		
2.1.01	Veiligheid	De werksleuf moet ingericht worden volgens de vigerende richtlijnen voor veilig werken.
2.1.02	Diepte	De bovenkant van de kunststof profielen moet op de juiste diepte onder maaiveld aangelegd kunnen worden, vgl. (13-1): Diepte = aanlegdiepte profielen (h_{profiel}) + 0,30 m ($h_{\text{installatie}}$)
2.1.03	Breedte	Er moet voldoende ruimte zijn voor de makelaar met trilblok (voorkant) en als werkruimte (achterkant), vgl. (13-2): Breedte = 1,00 m (b_{voorkant}) + 0,50 m ($b_{\text{achterkant}}$)
2.1.04	Maximale diepte	Beperkt door bereik makelaar op $h_{\text{profiel}} = 1,50$ m (type ABI-MOBILRAM of gelijkwaardig).
2.1.05	Stabiliteit	Toets op stabiliteit sleufwanden (diepte en taludhelling).
2.1.06	Opbarsten	Toets op stabiliteit sleufbodem op opbarsten met signaleringswaarde voor stop werkzaamheden tijdens hoogwater.
2.1.07	Afwatering	Toepassing van een afwateringsgeul met dompelpomp voor de afvoer van overtollig water gedurende de uitvoering.
2.1.08	Hergebruik	Opslag en hergebruik of afvoer van vrijgekomen grond en water.

13.2 Installeren kunststof profielen (stap 2)

Doel: De geperforeerde kunststof profielen worden in een werksleuf op diepte gebracht.

Werkwijze: In de maakbaarheidsproeven Salmsteke is een proces ontwikkeld en getest om geperforeerde kunststof profielen trillend op diepte te brengen. De werkwijze bestaat uit de volgende onderdelen:

- (a) Makelaar verticaal oprichten en trilblok met trilnaalden op hoogst mogelijke stand brengen.
- (b) Profiel optillen met hijskettingen via lier van makelaar.
- (c) Kokers over de trilnaalden schuiven en profiel aan bovenkant in trilblok klemmen.
- (d) Slotverklikker op mannetjes slot plaatsen van bestaand profiel.
- (e) Profiel met vrouwtjes slot op het bestaande profiel schuiven tot circa 10 cm boven de grond en op houten balken neerzetten.
- (f) Stalen punten in onderkant van beide kokers drukken.
- (g) Houten balken verwijderen en profiel met stalen punten tot op de grond laten zakken.
- (h) Profiel recht stellen.
- (i) Profiel de eerste 2 m de grond indrukken.
- (j) Trilblok aanzetten en profiel trillend op installatiediepte brengen.
- (k) Makelaar met trilblok in hoogste stand brengen en trilnaalden uit het profiel hijsen.

Aandachtspunten voor de uitvoering van elk onderdeel zijn hieronder nader toegelicht. Deze werkwijze is getest met het materieel zoals hieronder beschreven en met geperforeerde kunststof profielen tot 8 m lengte die ingebracht worden tot een diepte van 0,50 m onder oorspronkelijk maaiveldniveau in een werksleuf van 0,80 m diepte.

Materieel en gereedschap: Voor het trillend op diepte brengen van de geperforeerde kunststof profielen is een stelling met een makelaar met vaste geleiding en een hoogfrequent trilblok benodigd. Aan het trilblok worden trilnaalden bevestigd die in de kokers geschoven worden. Aan de onderkant van de profielen wordt in elke koker een stalen punt geplaatst. De specificaties zijn hieronder beschreven. Een slotverklikker wordt op elke slotverbinding geplaatst.

Uitvoering onderdeel kunststof profielen:

- De materiaalspecificaties van de kunststof profielen zijn opgenomen in paragraaf 12.1.
- Opslag en transport tijdens uitvoering: Voorkomen van blootstelling aan overmatige UV-straling (afdekken indien langer dan 1 week). Voor verwerking gelden temperatuurgrenzen van minimaal 5°C (vanwege bros worden van het materiaal) en maximaal 50°C (in direct zonlicht). Beschadiging moet worden voorkomen (afbreken hoeken, gaten in kokers, etc.) door voorzichtig transport en bescherming tijdens opslag.
- Visuele inspectie: Voor installatie visuele inspectie uitvoeren op rechtheid, beschadiging slot, beschadigingen koker (b.v. gaten), beschadigingen perforaties, beschadigingen uiteinden (b.v. afgebroken stukken), mate van vervuiling (b.v. microplastic). Indien een profiel niet voldoet, moet het worden afgekeurd en afgevoerd en mag niet worden (her)gebruikt.
- Werkhoogte voor bevestiging profielen aan trilblok en inschuiven trilnaalden. De makelaar heeft een maximale werkhoogte waardoor de maximale profiellengte beperkt wordt. De benodigde vrije hoogte onder de makelaar is samengesteld uit:

$$h_{werk} = h_{trilblok} + l_{trilnaald} + l_{profiel} + h_{werksleuf} \quad (13-3)$$

waarbij $l_{trilnaald} \approx l_{profiel}$. Voor korte profielen (6 m lengte op Salmsteke) is de werkhoogte van de makelaar geen beperkende factor. Voor lange profielen (8 m lengte op Salmsteke) moet hier wel rekening mee worden gehouden bij gebruik van de bij de maakbaarheidsproeven gehanteerde ABI-stelling (zie hieronder). Eventueel kunnen de profielen direct boven de werksleuf over de trilnaalden geschoven worden, waardoor extra werkhoogte beschikbaar is.

- Bevestiging profiel aan trilblok en inschuiven trilnaalden. De kokers worden op enige hoogte, dat is de bovenkant van rechtopstaand profiel) over de trilnaalden geschoven. Aangezien zowel de trilnaalden als het profiel kunnen bewegen, is dit een moeizame aangelegenheid. Daarnaast is er een invloed van weer en wind wat het proces kan bemoeilijken. Dit heeft effecten op zowel de efficiëntie van het uitvoeringsproces als ook de veiligheid aangezien de profielen ook onverwachts los kunnen raken. Daarom wordt aanbevolen om de profielen aan de bovenkant zo veel mogelijk te geleiden om deze zo op een gecontroleerde en veilige manier over de trilnaalden te kunnen schuiven.
- De locatie tijdens de plaatsing van de profielen moet voldoen aan de maatvoering volgens ontwerp met toleranties volgens CUR166 deel II, §5.1.7 (Stichting CURNET, 2012). Indien er een afwijking ten aanzien van het ontwerptracé optreedt, kan de scheefstelling geleidelijk gecorrigeerd worden. De correctie mag niet te snel uitgevoerd worden om een te sterke verdraaiing van de slotverbinding, waardoor het profiel uit het slot zou kunnen lopen, te voorkomen. De maximaal toegestane verdraaiing van het slot is 15 graden voor de hier toegepaste slotverbinding met lip.
- Het profiel moet met een waterpas in alle richtingen verticaal gesteld worden. Hiermee wordt scheefstand en uit het slot lopen van het profiel tegengegaan.
- Op elke slotverbinding moet een slotverklikker toegepast worden. Indien tijdens installatie blijkt dat het profiel uit het slot loopt, moeten maatregelen worden genomen (paragraaf 15.1).
- De profielen worden de eerste 2 m drukkend ingebracht. Op dat moment zijn de filterperforaties een halve meter onder de grond. Dit reduceert de belasting op het profiel en dan met name op het geperforeerde deel van de kokers. Hiermee worden mogelijke beschadigingen van de filterperforaties voorkomen. Daarnaast reduceert dit ook de trillingen in de omgeving.
- Op elk profiel wordt een unieke markering (identificatie) aangebracht waarbij ook de beide kokers uniek geïdentificeerd kunnen worden. Een systeem met QR-codes en identificatienummer kan toegepast worden. Dit kan direct gekoppeld worden met een GIS-omgeving en het opleverdossier (paragraaf 14.3).

Uitvoering onderdeel stalen punt:

- De materiaalspecificaties van de stalen punt zijn opgenomen in paragraaf 12.2.
- Voor de plaatsing is het van belang dat er geen scherpe kanten aan de opstaande rand van de stalen punt aanwezig zijn. Dit kan enerzijds de plaatsing in de koker bemoeilijken anderzijds kan dit tot schade aan de koker leiden.
- De punten worden aan de onderkant handmatig in de kokers gedrukt. Voor de veiligheid gedurende de plaatsing is het van belang dat het profiel verticaal gefixeerd is en niet kan bewegen. Aan de bovenkant moet het profiel ingeklemd zijn in het trilblok, aan de onderkant moet het profiel vast gesteund worden. Hiervoor kunnen bijvoorbeeld houten balken van circa 10 cm hoogte gebruikt worden.
- Een afdichting of inklemming van de punten (met tochtband o.i.d.) is niet noodzakelijk. De opstaande rand klemt de stalen punt voldoende vast in de koker van het profiel.
- Voor plaatsing van de punt moet worden gecontroleerd of de trilnaalden aan de onderkant uit de kokers steken (minimaal 5 mm, maximaal 15 mm), waarbij het profiel aan de bovenzijde op het trilblok aansluit. Na plaatsing moet de stalen punt goed op de trilnaald aansluiten.
- De voetplaat van de stalen punt steekt 10 mm over de koker van het profiel uit (zie figuur 12-3). De effecten op de installeerbaarheid door de vergrootte punt zijn verwaarloosbaar.

Uitvoering onderdeel trilstelling (specificaties): De stelling moet geschikt zijn om de profielen met de vereiste ontwerplengte te kunnen installeren. Hiervoor moet de makelaar voldoende hoogte kunnen bereiken (zie hierboven) en het vereiste trilblok (zie hieronder) met trilnaalden kunnen dragen. Indien de stelling hiervoor geschikt is kunnen de profielen ook ingeschoven worden bij horizontale of schuine positie van de makelaar. Hierdoor is de hoogtebeperking (en lengtebeperking van de profielen) minder relevant.

Bij de inrichting van het bouwterrein moet rekening worden gehouden met de afmetingen van de stelling t.a.v. de werkruimte en bereikbaarheid/transport, en het gewicht van de stelling voor de draagkracht van de ondergrond en de stabiliteit van de werksleuf.

In de maakbaarheidsproeven Salmsteke is een ABI MOBILRAM-system TM 13/16 SL (versie B) gebruikt. Hiermee zijn profielen tot 8 m lengte geïnstalleerd. Deze stelling kan alleen verticaal gebruikt worden. Er waren geen beperkingen t.a.v. de werkruimte. De ondergrond had voldoende draagkracht. Aanvullend zijn rijplaten gebruikt.

Uitvoering onderdeel trilblok (specificaties): Het trilblok moet geschikt zijn om de profielen met de vereiste ontwerplengte te installeren bij de aanwezige grondopbouw. De hiervoor benodigde nominale slagkracht kan worden bepaald met de Hypervib1-methode.

Gebruik van een hoogfrequent trilblok met een variabel moment (VM). Een dergelijk type trilblok dat wordt opgestart, komt op toeren zonder dat er dynamische krachten op het kunststof profiel worden uitgeoefend en zonder dat uitstraling van alle frequenties tussen 0 Hz en maximaal toerental naar de omgeving plaats vindt. Pas als het blok op toeren is gekomen, neemt door het uitschuiven van de excenter gewichten de kracht geleidelijk toe tot de uiteindelijke slagkracht bereikt is. Bij het uitschakelen gebeurt het omgekeerde. Hierdoor wordt alleen de uiteindelijke trilfrequentie in de bodem aangestoten. Samengevat verdient het dus aanbeveling om altijd op vol vermogen van het trilblok te werken, dat wil zeggen het maximale toerental van de excentrieken, om heftige stoten in het systeem en eventuele beschadiging van de kunststof profielen te voorkomen.

In de maakbaarheidsproeven Salmsteke is een ABI MRZV 20VV trilblok gebruikt met een nominale slagkracht van 1000 kN en een nominaal toerental van 2135 1/min. Profielen tot 8 m lengte zijn hiermee op diepte gebracht met een voor locatie Salmsteke karakteristieke grondopbouw: een deklaag van 3 tot 5 m dikte en tot 3 m in de zandlaag met een conusweerstand tot 20 MPa.

Uitvoering onderdeel trilnaalden: De trilnaalden moeten in lengte en diameter afgestemd zijn op de dimensies en toleranties in maatvoering van de kunststof profielen. Voor de lengte van de trilnaalden geldt:

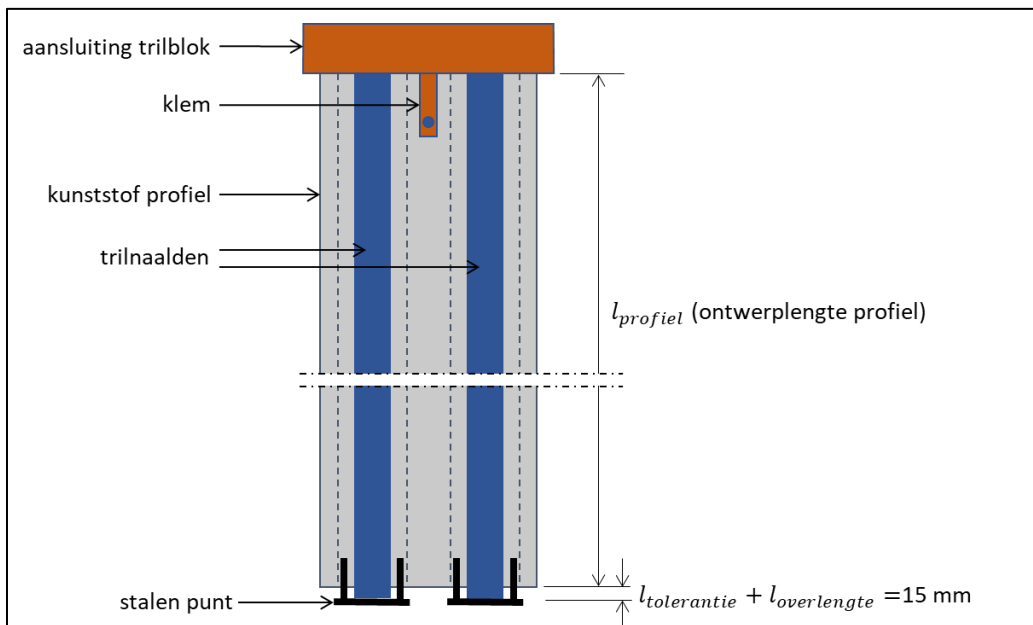
$$l_{\text{trilnaald}} = l_{\text{profiel}} + l_{\text{tolerantie}} + l_{\text{overlengte}} \quad (13-4)$$

Waarbij l_{profiel} de ontwerplengte van het kunststof profiel, $l_{\text{tolerantie}}$ de productietolerantie in de lengte van de kunststof profielen van 10 mm en $l_{\text{overlengte}}$ de extra lengte van de trilnaald van 5 mm, zie figuur 13-3. Hiermee wordt een goede aansluiting van de trilnaald op de stalen punt aan de onderkant van de koker gewaarborgd. Dit betekent dat voor verschillende profiellengtes ook in verschillende trilnaalden moet worden voorzien. Voor de diameter geldt dat de trilnaalden enerzijds goed in de kokers moeten passen, maar niet te strak mogen aansluiten, en anderzijds de krachten moeten kunnen overdragen en voldoende stijfheid moeten hebben om niet te breken:

$$d_{\text{sterkte/stijfheid}} \leq d_{\text{trilnaald}} \leq d_{\text{profiel}} \quad (13-5)$$

Waarbij $d_{\text{sterkte/stijfheid}}$ de minimale diameter van de trilnaald om voldoende sterkte en stijfheid te garanderen en d_{profiel} de inwendige cirkeldiameter van het zeshoekige profiel.

In de maakbaarheidsproeven Salmsteke zijn trilnaalden met lengte van 8015 mm gebruikt voor 8 m kunststof profielen bij een productietolerantie van 10 mm en een overlengte van 5 mm. Bij alle profielen is hiermee een goede aansluiting tussen trilnaald en stalen punt gerealiseerd. De diameter van de trilnaalden was 80 mm.



Figuur 13-3. Aansluiting stalen punt op trilnaald in relatie tot profiellengte.

Tabel 13-2. Uitvoeringsaspecten installeren kunststof profielen (werkproces stap 2).

Nr.	Naam	Beschrijving
2.2 – Uitvoering: Installeren kunststof profielen		
2.2.01	Resultaat	De profielen moeten onbeschadigd en in het slot op de juiste diepte zijn ingebracht.
2.2.02	Materialen	Kunststof profielen moet voldoen aan specificaties in tabel 12-1. Stalen punten moeten voldoen aan specificaties in tabel 12-2.
2.2.03	Bescherming	De kunststof profielen moeten tijdens transport en opslag tegen externe (weers-)invloeden beschermd worden.
2.2.05	Inbrengen	De eerste 2 m vanaf maaiveld worden de profielen drukkend ingebracht. Daarna worden de profielen trillend ingebracht.
2.2.06	Scheefstelling	Profielen moeten verticaal gesteld worden tijdens installatie. De maximale hoekverdraaiing in een slotverbinding is 15 graden.
2.2.07	Slotverklikker	Elke slotverbinding wordt voorzien van een slotverklikker.
2.2.08	Identificatie	Elk profiel wordt voorzien van een unieke identificatie (QR-code).
2.2.09	Plaatsing punt	Bij plaatsing van de stalen punt moet het profiel gezekeerd zijn (boven en onder) om niet te kunnen schuiven.
2.2.10	Stelling	De stelling moet geschikt zijn voor gekozen trilblok en trilnaalden (werkhoogte $h_{werk} = 20$ m). Voor Salmsteke is een stelling ABI MOBILRAM-system TM 13/16 SL, versie B (of vergelijkbaar) toepasbaar.
2.2.11	Trilblok	Keuze op basis van nominale slagkracht. Hoogfrequent blok met variabel moment. Voor Salmsteke is een trilblok ABI MRZV 20VV (of vergelijkbaar) toepasbaar.
2.2.12	Trilnaalden	Lengte: Ontwerplengte profiel + 15 mm ($l_{tolerantie} + l_{overlengte}$). Hiermee sluit de stalen punt aan op de trilnaald tijdens installatie. Diameter trilnaald: 80 mm.

13.3 Verwijderen zandinloop (stap 3)

Doel: Tijdens en na het installeren van de profielen kan zand van buitenaf de kokers in stromen door de onderkant van de koker langs de stalen punt en/of door de filterperforaties. Dit zand komt in de zandvang aan de onderkant van de kokers terecht. Het zand kan achteraf uit de kokers verwijderd worden of alternatief kan zandinloop (deels) voorkomen worden.

Werkwijze: Voor deze uitvoeringsstap zijn twee alternatieven beschikbaar. De keuze is afhankelijk van de lokale omstandigheden (zie 'afwegingskader' hieronder).

- Optie A: Zandinloop wordt achteraf uit de kokers verwijderd door deze met water te spoelen.
- Optie B: Zandinloop wordt voorkomen door de kokers direct nadat deze op diepte zijn gebracht met water te vullen.

Na het spoelen worden de kokers gecontroleerd op beschadigingen door inspectie met een onderwatercamera.

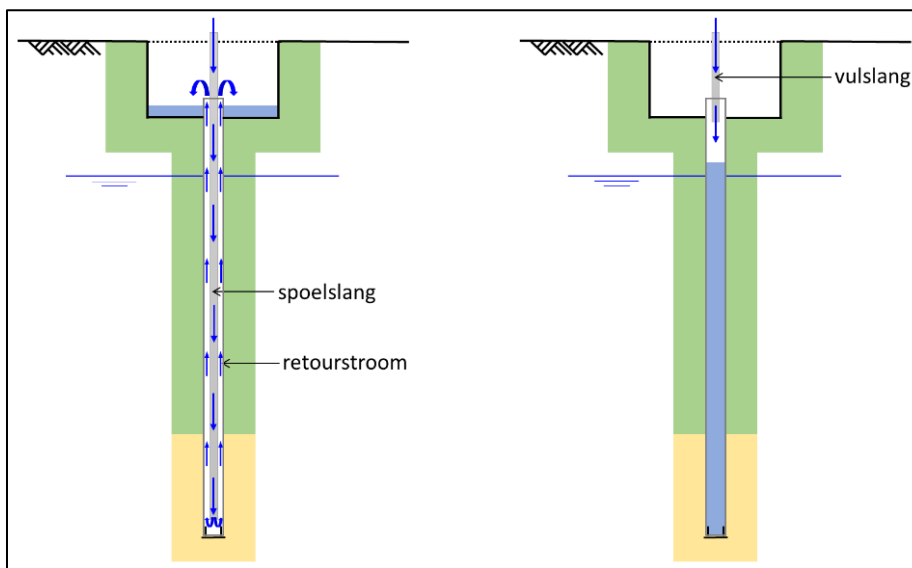
Materieel en gereedschap: Voor de uitvoering is een schone waterwagen en schoon water van drinkwaterkwaliteit benodigd. Het water wordt door middel van een slang en pomp in de kokers gebracht. Uitstromend water wordt met een dompelpomp uit de werksleuf gepompt of met een tweede slang aan de bovenzijde van de koker afgezogen. Onderwatercamera voor inspectie van de kokers.

Afwegingskader: De keuze tussen de uitvoeringsopties is afhankelijk van de lokale omstandigheden. Voor locatie Salmsteke zijn in de maakbaarheidsproeven de volgende randvoorwaarden afgeleid:

- Bij een potentiaalverschil van minder dan 3,00 m treedt gedurende installatie geen zandinloop op. Na installatie stroomt zand voornamelijk langs de zijkant van de stalen punt de koker in. Optie B kan effectief toegepast worden.
- Bij een potentiaalverschil van meer dan 3,00 m treedt al gedurende het inbrengen van de profielen zandinloop op. Het meeste zand stroomt langs de stalen punt in de koker en een (klein) deel van het zand stroomt via de filterperforaties naar binnen. Optie B heeft in dit geval weinig effect, maar optie A kan toegepast worden.

Het potentiaalverschil is het hoogteverschil tussen de stijghoogte in de watervoerende zandlaag en de onderkant van het profiel op einddiepte. In figuur 13-4 is de uitvoering van de twee alternatieve werkwijzen weergegeven. Optie A kan altijd worden toegepast. Dit is een robuuste en betrouwbare optie waarvan de werkwijze is aangetoond in de maakbaarheidsproeven Salmsteke.

Deze randvoorwaarden gelden voor de omstandigheden van de maakbaarheidsproeven Salmsteke waarbij profielen van 6 en 8 m lengte met filterperforaties van 0,5 mm breedte zijn toegepast die tijdens de installatie van een stalen punt waren voorzien (zie paragraaf 13.2); en de daar aanwezige grondopbouw, stijghoogte en gradatie van de zandlaag.



Figuur 13-4. Uitvoering stap 3 – verwijderen of voorkomen zandinloop. Optie A (links): Spoelen achteraf. Optie B (rechts): Vullen direct na installatie.

Naast de randvoorwaarden die gelden voor het potentiaalverschil voor de toepasbaarheid van elke optie zijn er enkele technische en praktische overwegingen zoals opgenomen in tabel 13-3.

Tabel 13-3. Afwegingskader voor keuze spoelen of vullen kokers (werkproces stap 3).

Afweging	Optie A Spoelen met water na installatie	Optie B Vullen met water na installatie
Toepasbaarheid	Altijd	Deels
Waterverbruik	Hoog	Gering
Technische uitvoering	Normaal	Eenvoudig
Uitvoeringsrisico	Klein	Klein
Aantonen resultaat	Visueel	Meting

Uitvoering optie A (spoelen achteraf): Het waterpeil in de kokers komt op natuurlijke wijze door toestroom van water uit de omgeving op peil. Door het toestromende water wordt zand meegevoerd. De kokers worden pas gespoeld nadat het waterpeil in de kokers in evenwicht is. Hiervoor wordt schoon water uit een schone waterwagen gebruikt. Het water wordt met een slang in de kokers gepompt. Er moet voldoende (pomp)druk beschikbaar zijn om een debiet te realiseren waarmee het zand vanuit de onderkant van de kokers naar boven getransporteerd kan worden. Hierbij moet de slang tot aan de onderkant van de kokers kunnen reiken. De diameter van de slang mag niet te groot zijn om de retourstroom van het water-zand-mengsel niet te belemmeren en mag niet te klein zijn om voldoende toestroomdebiet te kunnen waarborgen. Tijdens het spoelen moeten de kokers naast de gespoelde koker afgedekt worden om vervuiling te voorkomen. Het vrijkomende water moet uit de werksleuf afgepompt en afgevoerd worden. Het spoelproces wordt doorgezet totdat er helder water uit de kokers stroomt en de slang de onderkant van de koker heeft bereikt. De koker is dan vrij van zand en de zandinloop hoeft niet meer gemeten te worden.

In de maakbaarheidsproeven Salmsteke is optie A toegepast. Per koker is tussen 400 en 500 liter water gebruikt totdat de retourstroom helder water opleverde. Het water is met een waterwagen en een slang van 15 m lengte en 2" diameter in de kokers gepompt. De zandvang kon geheel zandvrij gemaakt worden. De andere uitvoeringsoptie (optie B) is niet getest.

Uitvoering optie B (vullen direct na installatie): Om toestroom van water uit de omgeving te voorkomen worden de kokers na installatie gevuld met water. Dit moet gelijk gebeuren nadat de profielen op diepte zijn gekomen, anders wordt de effectiviteit van deze maatregel tenietgedaan. Hiervoor wordt schoon water uit een schone waterwagen gebruikt. Het water wordt via een slang in de kokers gepompt. Er zijn geen specifieke eisen voor de slang of pompdruk. Het water kan vanaf de bovenkant in de koker stromen, de slang hoeft niet ver in de koker te reiken. Het vulproces wordt doorgezet totdat het waterniveau de bovenkant van de koker heeft bereikt. Na het vullen moet de zandinloop gemeten worden.

Uitvoering camera-inspectie: Elke koker wordt van bovenaf met een onderwatercamera geïnspecteerd. Hierbij worden zowel de niet-geperforeerde kokerwanden op gaten of scheuren onderzocht als ook met name de geperforeerde delen van de kokerwand. De camera wordt op verschillende hoogtes in de koker 360° gedraaid en de beelden worden real-time geëvalueerd. Het water moet voldoende helder zijn aangezien na het spoelen nog fijne deeltjes de zicht kunnen vertroebelen. Beelden van eventuele beschadigingen of afwijkingen worden geregistreerd in het opleverdossier (paragraaf 14.3). Mitigerende maatregelen zijn vermeld in paragraaf 15.1.

Tabel 13-4. Uitvoeringsaspecten verwijderen zandinloop (werkproces stap 3).

Nr.	Naam	Beschrijving
2.3 – Uitvoering: Verwijderen zandinloop		
2.3.01	Water	Voor het spoelen moet schoon water gebruikt worden dat aan de eisen voor leidingwater voldoet.
2.3.02	Materieel	Het materieel en gereedschap voor het spoelen moet schoon zijn.
2.3.03	Afmeting slang	Lengte: De slang moet minimaal tot aan de onderkant van de koker reiken (minimaal 15 m lengte). Diameter: De slang moet in de koker passen, retourstroom van water-zand-mengsel toelaten en voldoende debiet kunnen aanvoeren. Een diameter van 2" voldoet hieraan.
2.3.04	Uitvoering	Bij optie A spoelen totdat de slang de onderkant van de koker heeft bereikt en de retourstroom helder water is. Hiervoor is per koker circa 400 tot 500 liter water benodigd.

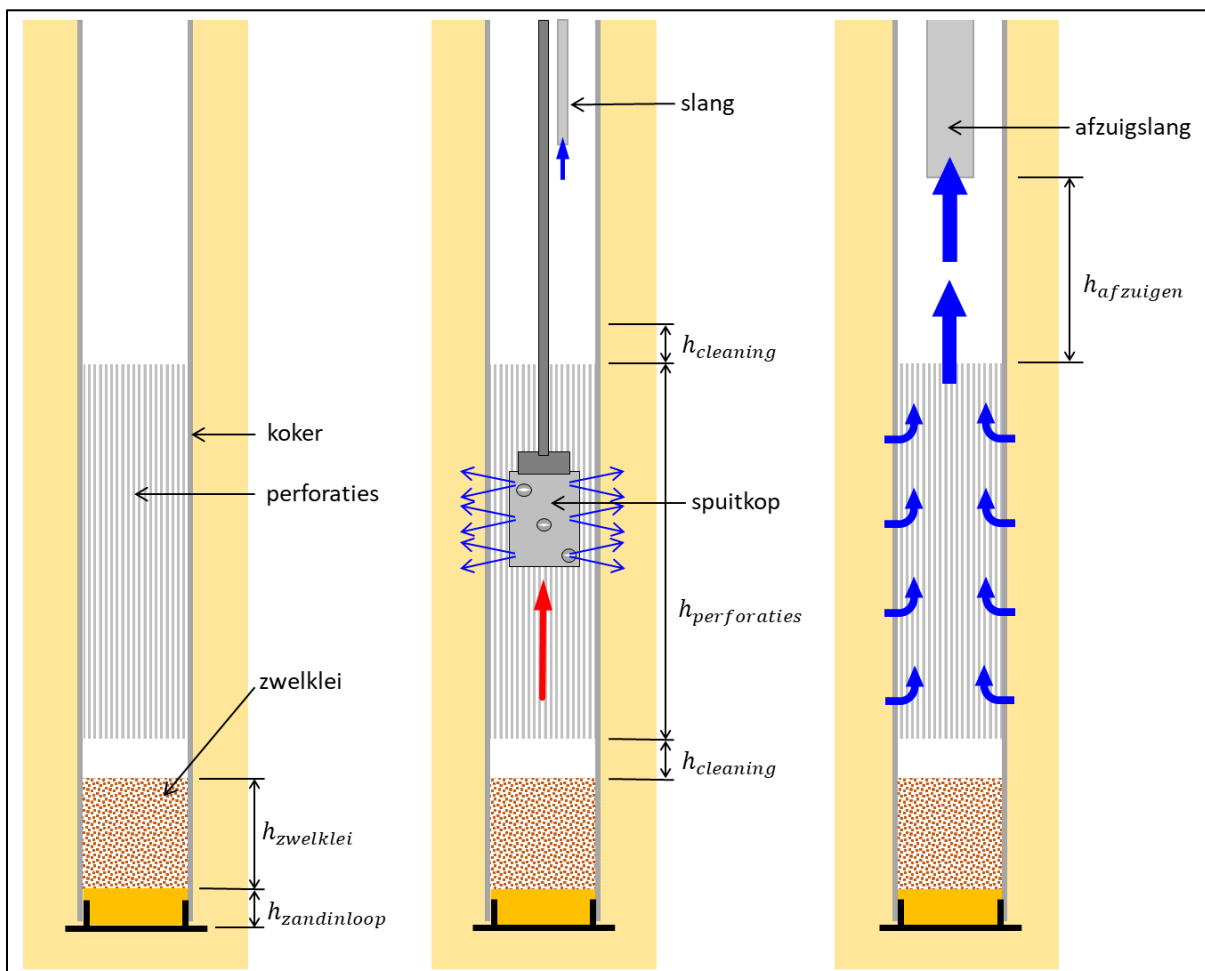
2.3.05	Hergebruik	Vrijkomend water moet hergebruikt of opgevangen worden om vernatting van de omgeving te voorkomen.
2.3.06	Resultaat	Na spoelen van de kokers mag in de zandvang maximaal 20 cm zand aanwezig zijn.

13.4 Reinigen filterperforaties (stap 4)

Doel: De filterperforaties worden gereinigd en daarna de gerealiseerde in-situ doorlatendheid aangetoond. Tijdens het installeren van de profielen kunnen de filterperforaties door de klei van de deklaag dichtsmoren en verstopt raken. Om de klei uit de perforaties te verwijderen worden de kokers vanuit de binnenkant gereinigd door water met hoge druk tegen de filterperforaties aan te spuiten. Het resultaat wordt aangetoond door water af te zuigen via de perforaties.

Werkwijze: In de maakbaarheidsproeven Salmsteke is een proces ontwikkeld om het reinigen van de perforaties uit te voeren en de gerealiseerde reiniging aan te tonen. De werkwijze is schetsmatig weergegeven in figuur 13-5 en bestaat uit de volgende drie onderdelen:

- 1) Afsluiten van de onderkant van de koker door het aanbrengen van zwelklei;
- 2) Schoonspuiten van de filterperforaties met spuitkop;
- 3) Afzuigen van water via de filterperforaties tot helder water.



Figuur 13-5. Werkwijze stap 4 – reinigingsproces. Afsluiten (links). Schoonspuiten (midden). Afzuigen (rechts).

Materieel en gereedschap: Het schoonspuiten wordt uitgevoerd met hoge waterdruk. Hiervoor is een pomp en geleiding van de spuitkop, de zogenaamde ‘mover’, nodig om de druk veilig en effectief

te kunnen toepassen in de kokers. Voor het afzuigen is een pomp nodig, een afzuigslang in combinatie met een debietmeter en de nodige slangen en aansluitingen.

Voor de uitvoering op locatie Salmsteke is een (rups)voertuig in ontwikkeling waarin het benodigde materiaal en materieel samengevoegd wordt om het proces betrouwbaar en efficiënt te laten verlopen. Dit omvat o.a. een pomp en een automatische mover waarmee de drukslang met een vastgestelde snelheid in de koker beweegt kan worden. De mover wordt met een kraan boven het profiel gehesen. Bij het afzuigen van het grondwater wordt gebruik gemaakt van een zuigerpomp, waarvan het debiet geregeld kan worden door middel van een handmatige afsluiter.

Uitvoering onderdeel ‘afsluiten’: Om het reinigen van de filterperforaties uit te kunnen voeren, moet de onderkant van de koker water- en zanddicht afgesloten worden. Voor de afsluiting van de onderkant is een laag van $h_{zwelkei} = 0,20$ tot $0,30$ m toereikend. Dit komt overeen met het vullen van elke koker met 2 tot 3 liter zwelkleikorrels. Bij de maakbaarheidsproeven Salmsteke is gebruik gemaakt van bentoniet-pellets (zwelvermogen > 400%) die aangebracht zijn door deze los van bovenaf te storten. De kleikorrels moeten 24 uur rusten om voldoende te kunnen zwellen. Een restant zand mag in de zandvang aanwezig zijn, maar dit moet beperkt blijven tot maximaal $h_{zandinloop} = 0,10$ m, om voldoende ruimte over te houden voor het gebruik van het materieel in de volgende stappen. De maximale hoogte, $h_{zandinloop} + h_{zwelkei}$, is $0,40$ m.

Uitvoering onderdeel ‘schoonspuiten’: De tweede stap is het schoonspuiten, ofwel het reinigen van de filterperforaties door middel van hoge waterdruk. De voor de maakbaarheidsproeven Salmsteke ontwikkelde spuitkop, de zogenaamde ‘mover’, is te zien in figuur 13-5 (midden) ongeveer halverwege de filterperforaties. De spuitkop wordt van onder naar boven langs de filterperforaties geleid. Overtollig water wordt binnen in de koker afgezogen om overlopen van water uit de koker te voorkomen. De uitgangspunten voor het schoonspuiten zijn tijdens de maakbaarheidsproeven voor locatie Salmsteke afgeleid als:

- Snelheid voor het naar boven trekken van de spuitkop afstellen op 1 m/min;
- Waterdruk in de spuitkop instellen op 20 bar;
- Het pompdebiet is circa 60 l/min;
- De kokers worden gereinigd ter plaatse van de filterperforaties met een hoogte van 1,00 m ($h_{perforaties}$) en 0,10 m ($h_{cleaning}$) boven en onder de filterperforaties. De totale reinigingshoogte is 1,20 m.
- Afzuigen van overtollig water in de koker op een hoogte van minimaal 0,50 m boven de filterperforaties.

Het is van belang om schoon water van drinkwaterkwaliteit te gebruiken, om zowel verstoppingen in de spuitkop te voorkomen als om de grondwaterkwaliteit zo weinig mogelijk te verstoren ter voorkoming van vorming van biofilm (Waterloo & Verhagen, 2023).

Uitvoering onderdeel ‘afzuigen’: Als derde stap wordt water onttrokken uit de koker met behulp van een afzuigslang, zie figuur 13-5 (rechts), die aangesloten is op een zuigerpomp. De slang is transparant om tijdens het afzuigen de overgang van troebel naar helder water te kunnen waarnemen. De zuigmond van de slang wordt op een hoogte van $h_{afzuigen} = 0,50$ m boven de filterperforaties in de koker geplaatst. Met een debietmeter wordt het afgezogen debiet geregistreerd. Het debiet geeft een waarde voor de doorlatendheid van de filterperforaties. Wanneer het onttrokken debiet hoger is dan de ondergrens kunnen de filterperforaties van deze koker als voldoende schoon worden beschouwd. De waarden voor deze ondergrens zijn in het ontwerp op basis van geohydrologische berekeningen vastgesteld (zie paragraaf 8.1). Indien het

debiet niet voldoet aan de ondergrens wordt het schoonspuiten, zo nodig intensiever, herhaald tot dit wel het geval is. Het onderdeel 'afzuigen' heeft meerdere functies:

- Het verwijderen van de door het schoonspuiten losgekomen vervuiling alsmede het verwijderen van de fijne deeltjes uit het in-situ zandpakket voor reductie van het risico op mechanische verstopping.
- Aantonen van de filterwerking ("bewezen sterkte") doordat het afgepompte water helder wordt hetgeen duidt op boogwerking van het in-situ zand ter plaatse van de perforaties.
- Aantonen van voldoende doorlatendheid van de filterperforaties door het afpompdebiet te vergelijken met een toetscriterium dat representatief is voor piping onder WBN-condities.
- Relatieve vergelijking van de kokers onderling om eventueel onvoldoende gereinigde kokers te kunnen opsporen.

Tabel 13-5. Uitvoeringsaspecten reinigen filterperforaties (werkproces stap 4).

Nr.	Naam	Beschrijving
2.4 – Uitvoering: Reinigen filterperforaties		
2.4.01	Zwelklei	De onderkant van de koker wordt water- en zanddicht afgesloten met zwelklei van bentoniet-pellets (zwellvermogen > 400%).
2.4.02	Aanbrengen zwelklei	Er mag maximaal 0,10 m zand in de koker aanwezig zijn. Er worden 0,20 tot 0,30 m zwelkleikorrels toegevoegd (= 2-3 liter per koker) door los te storten van bovenaf en 24 uur te laten zwellen.
2.4.03	Reinigen perforaties	De kokers worden gereinigd ter plaatse van de filterperforaties en tot 0,10 m daaronder en -boven.
2.4.04	Water	Voor het reinigen moet schoon water gebruikt worden dat aan de eisen voor leidingwater voldoet.
2.4.05	Aansturing spuitkop	Met een snelheid van 1 m/min van onder naar boven door de kokers bewegen met een waterdruk van 20 bar en pompdebiet van 60 l/min. Overtollig water wordt afgezogen op 0,50 m boven de perforaties.
2.4.06	Afzuigen	Het reinigingsresultaat wordt aangetoond door helder water op te zuigen met een transparante slang met zuigmond op 0,50 m hoogte boven de filterperforaties.
2.4.07	Afzuigdebiet	Het afzuigdebiet wordt geregistreerd, te verwachten zijn circa 4 tot 6 m ³ /uur, en vergeleken met: <ul style="list-style-type: none"> - een toetscriterium uit het filterontwerp (paragraaf 8.1); - kokers onderling om afwijkingen op te sporen.

13.5 Aanbrengen filterzand (stap 5)

Doel: Vullen van de kokers van de profielen met filterzand om de filterwerking van het scherm te realiseren. De gradatie van het filterzand is vastgesteld in het filterontwerp (hoofdstuk 7).

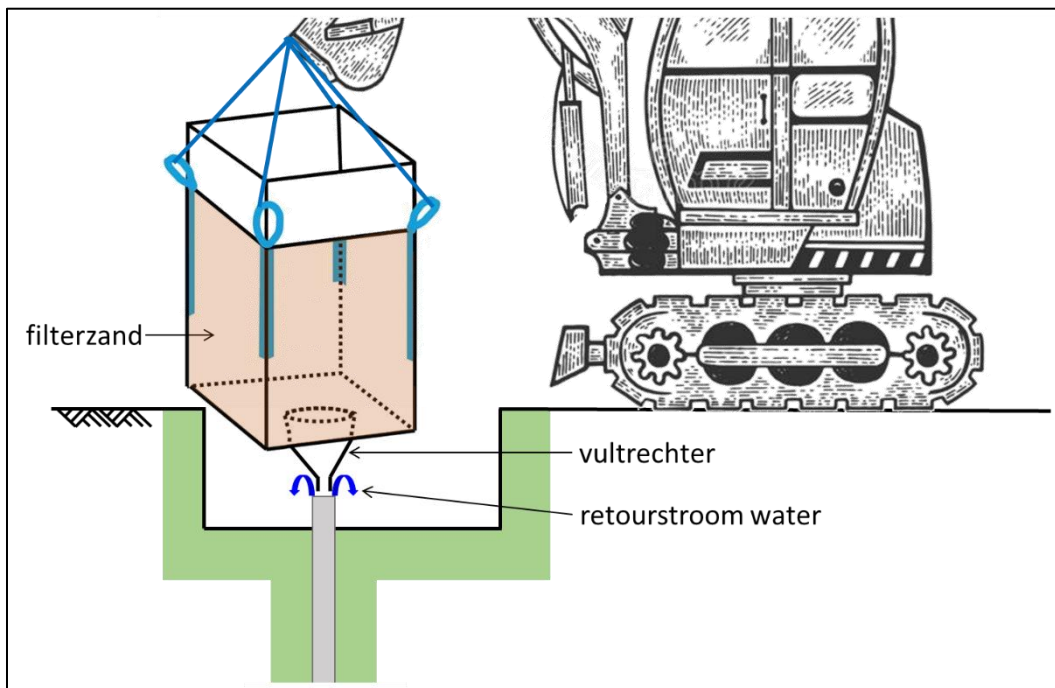
Werkwijze: Elke koker wordt van bovenaf gevuld met filterzand dat in bigbags geleverd wordt.

Materieel en gereedschap: Hijskraan (graafmachine) voor het verplaatsen en tillen van bigbags met filterzand. Vultrechter voor het gecontroleerd storten van het filterzand in de kokers.

Uitvoering: Het filterzand moet voldoen aan de materiaaleisen in paragraaf 12.3. Het filterzand wordt los van bovenaf in de kokers gestort zonder verdichting. Het stortproces vindt grotendeels onderwater plaats. Aan het begin van het storten is het waterniveau in de koker nog gelijk aan de stijghoogte in de watervoerende zandlaag. Tijdens het storten stijgt het waterniveau vrij snel aan en stroomt het water over de bovenkant van de koker af in de werksleuf. Hierbij moet rekening worden

gehouden dat er geen filterzand met het afstromende water uit de koker stroomt. Dit wordt bereikt door niet te snel te storten om de retourstroom van het water te beperken. De retourstroom van het water mag door het stortproces niet belemmerd worden. Dit wordt bereikt door de vultrechter niet direct op de kokerbovenkant aan te laten sluiten. Om verstopping van de koker tijdens het vullen te voorkomen mag de vulsnelheid niet te hoog zijn. Alhoewel het filterzand los gestort wordt, kan het later alsnog verdichten gedurende de levensduur. Dit heeft geen nadelige gevolgen voor de beoogde filterwerking en systeemdoorlatendheid (vergelijk ook paragraaf 8.1). Tijdens uitvoering moet het filtermateriaal zodanig opgeslagen worden dat algengroei en verontreiniging beperkt blijft.

In de maakbaarheidsproeven Salmsteke is aangetoond dat er geen ontmenging van het filterzand optreedt tijdens het storten onder de gegeven omstandigheden (los van bovenaf en onder water). Dit wordt in de literatuur bevestigd voor gradaties met een uniformiteit $C_u < 2,5$ (Douglas, 1974).



Figuur 13-6. Schets aanbrengen filterzand.

Tabel 13-6. Uitvoeringsaspecten aanbrengen filterzand (werkproces stap 5).

Nr.	Naam	Beschrijving
2.5 – Uitvoering: Aanbrengen filterzand		
2.5.01	Materiaal	Het filterzand moet voldoen aan de specificaties in tabel 12-3.
2.5.02	Opslag	Algengroei en verontreiniging tijdens opslag moet beperkt blijven.
2.5.03	Zandvang	Er mag maximaal 40 cm zand en zwelklei in de zandvang aanwezig zijn voor begin van het storten van het filterzand.
2.5.04	Stortproces	Filtermateriaal los storten van bovenaf zonder verdichting.
2.5.06	Vulhoogte	Kokers vullen tot maximaal 10 cm onder bovenkant.
2.5.07	Vulsnelheid	Maximale vulsnelheid aanhouden om retourstroom water in de perken te houden en verstopping door verklonteren van het filterzand in de koker te voorkomen.
2.5.08	Waterafvoer	Afvoer van uitstromend water met dompelpomp.
2.5.09	Vultrechter	Gebruik vultrechter voor dosering vulsnelheid.

13.6 Afsluiten bovenkant koker (stap 6)

Doel: De bovenkant van de koker moet waterdicht worden afgesloten. De koker staat via de perforaties in directe verbinding met de watervoerende zandlaag. De afsluiting aan de bovenkant moet de waterdruk onder WBN-condities kunnen standhouden zoals vastgesteld in de geohydrologische toetsing in paragraaf 8.1.

Werkwijze: Op de bovenkant van de koker wordt een kunststof opzetstuk aangebracht door middel van spiegellassen. Het opzetstuk heeft een schroefdraad aan de buitenkant waarop een kunststof schroefdeksel geschroefd wordt. Het schroefdeksel is verwijderbaar en de inwendige diameter van de koker wordt door het opzetstuk niet verkleind waardoor ook in de gebruiksfase, indien nodig, de cleaningtool gebruikt kan worden.

Materieel en gereedschap: Apparatuur om te kunnen spiegellassen. Bescherming tegen weersinvloeden.

Uitvoering: Het kunststof opzetstuk en het kunststof deksel moeten voldoen aan de specificaties in paragraaf 12.4. Het kunststof opzetstuk wordt door middel van spiegellassen aan de bovenkant van de koker bevestigd. Met het verwarmingselement van het lasapparaat wordt de bovenkant van de koker en de onderkant van het opzetstuk gelijktijdig verwarmd naar een temperatuur van 250°C. Dit duurt circa 3 minuten. Het verwarmingselement wordt verwijderd en het opzetstuk wordt op de bovenkant van de koker geplaatst en van een gewicht voorzien om druk te creëren. De druk wordt minimaal 3 minuten in stand gehouden. Tijdens het lassen wordt het opzetstuk met een mal in positie gehouden. De bovenkant van de koker van het profiel mag niet te sterk beschadigd zijn. Oneffenheden van de kokerrand tot 2 mm kunnen door het lassen gecompenseerd worden; bij grotere oneffenheden dient de desbetreffende koker eerst met een zaag vlak te worden afgewerkt. Na het spiegellassen wordt een kunststof deksel met inwendige schroefdraad handvast op het opzetstuk geschroefd.

In de maakbaarheidsproeven Salmsteke is aangetoond dat de kunststof afsluiting een waterdruk van minimaal 4 bar kan weerstaan. Het schroefdeksel weerstaat volgens leverancier een minimale druk van 0,5 bar. In het ontwerp moet getoetst worden dat de rekenwaarde van de waterdruk maximaal 0,5 bar bedraagt (zie paragraaf 8.1).

Tabel 13-7. Uitvoeringsaspecten afsluiten bovenkant koker (werkproces stap 6).

Nr.	Naam	Beschrijving
2.6 – Uitvoering: Afsluiten bovenkant koker		
2.6.01	Materiaal	De kunststof afsluiting (opzetstuk en deksel) moet voldoen aan de specificaties in tabel 12-4.
2.6.02	Spiegellassen	Kunststof opzetstuk wordt door spiegellassen vastgezet aan de bovenkant van de koker.
2.6.03	Temperatuur	De kunststof delen worden 3 minuten verwarmd om een temperatuur van 250°C te bereiken.
2.6.04	Aandrukken	Het opzetstuk wordt minimaal 2 minuten aangedrukt.
2.6.05	Bescherming	Tijdens het spiegellassen wordt voor bescherming tegen weersinvloeden gezorgd.
2.6.06	Beschadiging	De kokerrand mag geen beschadigingen hebben en een maximale oneffenheid van 2 mm.
2.6.07	Schroefdeksel	Het schroefdeksel wordt handvast aangedraaid.

13.7 Afwerken deklaag (stap 7)

Doel: Vullen en afsluiten werksleuf en afwerken deklaag. Herstel van het maaiveld in de oorspronkelijke staat.

Werkwijze: De werksleuf wordt opgevuld met klei geschikt voor het afwerken van dijken. Hierbij is een goede aansluiting op het aangebrachte filterscherm van belang. De bovenkant wordt met een leeflaag afgewerkt.

Materieel en gereedschap: Graafmachine en apparatuur voor verdichting.

Uitvoering: De aanvulklei moet voldoen aan de specificaties in paragraaf 12.5. Gezien de doorsnijding van het afdekkend kleipakket door het filterscherm is het herstel van de deklaag een belangrijk onderdeel van de algehele uitvoering. De aanvulling moet goed verdicht worden en bij het aanbrengen mogen geen holle ruimtes achterblijven. De klei mag niet te nat zijn tijdens het aanbrengen en moet overal goed op het filterscherm aansluiten. De klei heeft een extra waterremmende functie voor de afsluiting van het filterscherm aan de bovenkant, met name in relatie tot voorloopsheid. Dat geldt zowel ter plaatse van de kokers die met een schroefdeksel zijn dichtgezet, als ook voor de slotverbindingen waardoor water verticaal naar boven kan sijpelen. Het aanbrengen van de aanvulklei dient uitgevoerd te worden conform de eisen in het 'Handboek Dijkenbouw' (HWBP, 2018). Na het vullen van de werksleuf wordt een leeflaag aangebracht conform de specificaties uit het ontwerp (grondsoort, laagdikte, maaiveldverloop).

Tabel 13-8. Uitvoeringsaspecten afwerken deklaag (werkproces stap 7).

Nr.	Naam	Beschrijving
2.7 – Uitvoering: Afwerken deklaag		
2.7.01	Materiaal	De aanvulklei moet voldoen aan de specificaties in tabel 12-5.
2.7.03	Uitvoering	De uitvoering moet voldoen aan de eisen in het 'Handboek Dijkenbouw' (HWBP, 2018).
2.7.02	Verdichting	De aanvulling moet goed verdicht worden. Er mogen geen holle ruimtes achterblijven en de klei moet goed aansluiten op de profielen.

14 Monitoring en uitvoeringsgegevens

In dit hoofdstuk wordt de aan de uitvoering gerelateerde monitoring en gegevensverzameling beschreven. Dit omvat drie onderdelen (zie ook figuur 11-1):

- De nulmeting vóór uitvoeringsbegin (as-is situatie) in paragraaf 14.1;
- De uitvoeringsmonitoring gedurende de uitvoeringsfase in paragraaf 14.2;
- Het opleverdossier als afsluiting van de uitvoeringsfase (as-built situatie) in paragraaf 14.3.

Grondonderzoek en andere onderzoeksgegevens die voor het ontwerp benodigd zijn, worden in hoofdstuk 4 beschreven. Monitoring na oplevering van het filterscherm tijdens de gebruiksfase wordt in het beheer- en onderhoudsplan (De Gee & Waagmeester, 2023) beschreven.

14.1 Nulmeting

De hier genoemde gegevensverzameling en monitoring heeft betrekking op de voor de uitvoering benodigde informatie. De meeste gegevens reeds in de ontwerpfase verzameld en worden waar nodig aangevuld met voor de uitvoering relevante informatie. Alle gegevens samen vormen de as-is situatie voor uitvoeringsbegin en worden vastgelegd als nulmeting (figuur 11-1). Voor begin van de uitvoering zijn de volgende gegevens benodigd:

- Conusweerstand uit sonderingen langs het tracé om de theoretisch benodigde slagkracht te bepalen voor de keuze van een geschikt trilblok (zie paragraaf 13.2). Minimaal benodigd is één sondering (klasse 2, zonder waterspanningsmeting) per 50 m met een sonderdiepte gelijk aan de voorziene installatiediepte plus 2 m. Hiervoor kan gebruik worden gemaakt van de sonderingen in de ontwerpfase (zie tabel 4-1).
- Stijghoogte in de watervoerende zandlaag om het potentiaalverschil te bepalen voor een inschatting van de te verwachten zandinloop tijdens installatie (zie paragraaf 13.4) alsmede de beoordeling van het opbarstrisico van de werksleuf (zie paragraaf 13.1) en het overlopen van de profielen tijdens uitvoering. Hiervoor kan gebruik worden gemaakt van de peilbuismetingen in de ontwerpfase (zie tabel 4-1).
- Bepaling van de benodigde en beschikbare werkruimte, indien relevant voor de werkprocessen zoals beschreven in hoofdstuk 13, voor de beoordeling of een aanpassing van de werkwijze of het materieel nodig is.
- Bepaling afstand van belendingen en omliggende bouwwerken voor de beoordeling van omgevingshinder (paragraaf 15.2). Nulopname van bouwwerken en risico-inventarisatie om achteraf een schadebeoordeling uit te kunnen voeren en voor indeling in bouwwerk-categorieën volgens SBR-A (SBRCURnet, 2017). Voor de uitwerking wordt verwezen naar het vigerende monitoringsplan voor deeltraject Salmsteke (Boon, 2023).
- Onderzoek naar aanwezigheid van kabels en leidingen (KLIC-melding) en ondergrondse constructies. Onderzoek ontplofbare oorlogsresten (OOO) en archeologisch onderzoek. Hiervoor wordt verwezen naar de vigerende richtlijnen.

14.2 Uitvoeringsmonitoring

De hier genoemde monitoring heeft betrekking op de gegevensverzameling met betrekking tot de effecten op 1) de omgeving en 2) het filterscherm zelf. Het eerste aspect heeft een relatie met de omgevingsbeïnvloeding (zie paragraaf 15.2) zoals effecten van trillingen en het optreden van vervormingen van het dijklichaam en zetting van bebouwing. Voor de uitwerking hiervan wordt verwezen naar het vigerende monitoringsplan voor deeltraject Salmsteke (Boon, 2023). Aanvullend hierop is tijdens de uitvoering de volgende monitoring van de omgeving benodigd:

- Stijghoogtemeting in de watervoerende zandlaag om uitvoeringsrisico's zoals een hoogwatergolf, opbarsten of kwel te beoordelen.

Het tweede aspect heeft betrekking op de correcte installatie en werkwijze van het filterscherm en daarmee een directe relatie tot de waterveiligheid en is zodoende onderdeel van de faalpadanalyse. Deze monitoringgegevens worden per profiel, of indien van toepassing per koker, vastgelegd in het opleverdossier (zie paragraaf 14.3) en moeten aantonen dat een werkend filterscherm wordt opgeleverd conform de ontwerpspecificaties. Tijdens uitvoering is de volgende monitoring en gegevensverzameling van het filterscherm benodigd:

- Ingangscntrole relevante onderdelen filterschermen volgens specificaties in hoofdstuk 12:
 - o Geperforeerde kunststof profielen: leveringscertificaat, beschadigingen, profiellengte
 - o Filterzand: leveringscertificaat, gradatie
 - o Kunststof afsluiting: certificaat schroefdop
 - o Aanvulklei: leveringscertificaat
- Toepassing van slotverklikker op elke slotverbinding: controle op in het slot blijven door resterende kabel boven het profiel [m] vast te leggen (werkproces stap 2).
- Locatie en bereikte installatiediepte (werkproces stap 2) door inmeten geïnstalleerde profielen in RD-coördinaten [NAP+m] in x-, y-, z-richting.
- Toekennen en registreren van unieke ID per profiel en koker (werkproces stap 2).
- Camera-inspectie van kokers (werkproces stap 3).
- Zandinloop voorafgaand aan aanbrengen kleiprop (werkproces stap 4a).
- Bovenzijde kleiprop voorafgaand aan schoonspuiten kokers (werkproces stap 4a).
- Gebruikte hoeveelheid water tijdens schoonspuiten filterperforaties (werkproces stap 4b): debiet, druk, treksnelheid.
- Bij afpompen controle op helder water, registratie onttrekkingsdebiet, tijdsduur afpompen (werkproces stap 4c).
- Vulhoogte kokers met filtermateriaal ten opzichte van de bovenzijde profiel (werkproces stap 5).
- Registratie van de spiegellast temperatuur (werkproces stap 6a).
- Registratie van afsluiting met schroefdop (handvast/aandraaimoment) (werkproces stap 6b).
- Registratie van afwijkingen en uitgevoerde mitigerende maatregelen.

14.3 Opleverdossier

De tijdens de uitvoering verzamelde gegevens en monitoringdata wordt per profiel en, indien van toepassing, per koker geregistreerd en opgeslagen in het opleverdossier. Dit dient als certificaat van oplevering van het filterscherm en legt de as-built situatie vast. Met dit opleverdossier wordt invulling gegeven aan de noodzakelijke toetsingen en registraties teneinde het functioneren van het filterscherm bij oplevering aan te tonen. Met de in het beheer-en onderhoudsplan (De Gee & Waagmeester, 2023) genoemde monitoring van het filterscherm tijdens de gebruiksfase worden vervolgens de restrisico's geborgd.

De oplevergegevens zijn daarnaast samen met de monitoring in de gebruiksfase relevant voor toekomstige beoordelingen van het filterscherm. De structuur van het opleverdossier en de daarin minimaal te vermelden gegevens zijn verzameld in tabel 14-1.

Tabel 14-1. Opleverdossier (as-built situatie).

Nr.	Naam	Beschrijving
3.1 – Opleverdossier (as-built situatie)		
3.1.01	Identificatie	Per profiel en koker. Unieke ID (b.v. QR-code). Gekoppeld aan GIS-omgeving.
3.1.02	Locatie	Per profiel. RD-coördinaten (x, y, z).
3.1.03	Kunststof profiel	Per profiel. Leveringscertificaat. Profiellengte [m].
3.1.04	Perforaties	Per profiel. Configuratie, afmetingen, openingspercentage.
3.1.05	Slotverklikker	Per profiel. Resterende kabellengte [m]
3.1.06	Zandinloop	Per koker. Hoogte zandinloop voor reinigen [m].
3.1.07	Kleiprop	Per koker. Hoogte kleiprop [m].
3.1.08	Kengetallen schoonsputen	Per koker. Druk [bar], waterverbruik [m ³], treksnelheid [m/min].
3.1.09	Kengetallen afpompen	Per koker. Controle helder water, onttrekkingsdebiet [m ³ /uur], tijdsduur afpompen [min]
3.1.10	Filterzand	Per koker. Leveringscertificaat. Gradatie.
3.1.11	Kengetallen filter	Per koker. Vulhoogte filterzand in [m]
3.1.12	Spiegellassen	Per koker. Temperatuur [°C].
3.1.13	Afsluiting koker	Per koker. Registratie deksel aanbrengen, aandraaimoment/handvast
3.1.14	Afwijkingen	Per profiel en/of koker. Afwijkingen werkproces. Afwijkingen van ontwerp. Beschadigingen (tijdens camera-inspectie). Toegepaste mitigerende maatregelen.
3.1.15	Aanvulklei	Leveringscertificaat. Verdichting.
3.1.16	Andere observaties	Bijzonderheden tijdens uitvoering.
3.1.17	Tekeningen	As-built tekening.

14.4 Ervaringsdatabase

Naast het vereiste opleverdossier kunnen aanvullende informatie en gegevens van de uitvoering in een ervaringsdatabase opgeslagen worden. Hiermee kunnen in het kader van het innovatietraject aanvullende analyses uitgevoerd worden om het werkproces te verbeteren, het filterscherm te optimaliseren en de omgevingsbeïnvloeding te verminderen. Hiermee kunnen de huidige uitvoeringsrisico's betrouwbaar bepaald worden en toekomstige risico's verkleind worden. Gebaseerd op het voorbeeld van GeoBrain in CUR166 (Stichting CURNET, 2012) kan de database de volgende gegevens bevatten:

- Het versterkingsproject (locatie en tracé, type constructie, aantal profielen, etc.);
- Geotechniek (grondopbouw en -eigenschappen, waterstanden, aanwezigheid obstakels, etc.);
- Type kunststof profiel (type profiel, profiellengte, gegevens perforaties, etc.);
- Installatiemethode (inbrengmethode trillen, type blok, type funderingsmachine, type en lengte trilnaald, aanvullende maatregelen (b.v. voorboren), ervaring ploeg, etc.);
- Registratie kengetallen trilstelling tijdens installeren van profiel: slagkracht, installatietijd, toerental, stellingdruk.
- Type stalen punt (vorm, afmeting, bevestigingswijze, afdichting);
- Omgevingsinvloeden (aanwezigheid belendingen, evt. schade aan belendingen, gemeten trillingsniveaus, opgetreden zakkingen, etc.);

- De ongewenste gebeurtenissen als gevolg van het plaatsen van het filterscherm (dagen vertraging, niet op diepte komen, uit het slot lopen, zandtransport door de koker, etc.).
- Monitoring waterkwaliteit van gebiedseigen water (grondwater, water uit zandlaag) voor het beoordelen van mogelijke verstopping van filterperforaties door biofilm.
- Resultaten camera-inspectie van kokers voor controle op beschadigingen.
- Bepaling korrelverdelingen filterzand uit kokers voor een kwaliteitscontrole gestort filterzand.
- Sonderingen direct naast geïnstalleerde profielen voor een controle op de gerealiseerde verdichting van het zand in de omgeving.
- Aansluiting en waterremmende werking van de deklaag.

15 Bijzondere aspecten

15.1 Uitvoeringsrisico's en mitigerende maatregelen

In hoofdstuk 13 zijn de werkprocessen voor de aanleg van een filterscherf met geperforeerde kunststof profielen beschreven in de veronderstelling dat de uitvoering naar verwachting verloopt en geen aanpassingen van het werkproces nodig zijn. In deze paragraaf worden de mogelijke afwijkingen benoemd die invloed kunnen hebben op de juiste werking van het filterscherf volgens ontwerp (deel B) en zodoende een directe invloed op de waterveiligheid hebben en voortkomen uit de faalpadanalyse (deel A). De mogelijke mitigerende maatregelen bij afwijkingen worden genoemd. Uitvoeringsrisico's die geen directe of indirecte gevolgen hebben voor de waterveiligheid en het functioneren van het filterscherf of niet kunnen worden waargenomen, worden niet besproken.

Tijdens de maakbaarheidsproeven op locatie Salmsteke zijn de uitvoeringsrisico's gemonitord en beoordeeld. Hiervoor wordt verwezen naar de achtergrondrapporten van de installatieproeven (Van Arkel & Veenbergen, 2022; Rohe & Van der Geer, 2023), de cleaningproeven (Kuiper & Van der Meer, 2023) en de trekproeven (Van der Geer, 2023), en het onderzoek naar het optreden van biofilm (Waterloo & Verhagen, 2023). Gedurende de aanleg van het filterscherf kunnen de volgende waarneembare afwijkingen optreden:

- Locatie van profielen in het horizontale vlak wijkt af van ontwerplocatie (gerelateerd aan werkproces stap 2, paragraaf 13.2).
 - o Signalering: Profiel bevindt zich op 20 cm (of meer) afstand van het ontwerptrafé.
 - o Mitigerende maatregel: Richtingscorrectie door toepassen van hoekverdraaiing in slotverbinding. De maximaal toegestane hoekverdraaiing is 15 graden. Bij te snelle correctie bestaat verhoogde kans op uit slot lopen.

- Installatiediepte van profielen wijkt af van ontwerpdiepte: Profiel komt niet op diepte (gerelateerd aan werkproces stap 2, paragraaf 13.2).
 - o Signalering: Profiel is 5 cm (of meer) te hoog aangebracht en komt door trillen niet dieper.
 - o Mitigerende maatregel: a) Bij enkel profiel: profiel afzagen en jetgrout kolom aanbrengen om zandlaag lokaal af te dichten. b) Bij meerdere profielen: voorboren; indien nodig als (te) harde grondlagen of onverwachte obstakels in de ondergrond aanwezig zijn.

- Installatiediepte van profielen wijkt af van ontwerpdiepte: Profiel is te diep aangebracht (gerelateerd aan werkproces stap 2, paragraaf 13.2).
 - o Signalering: Profiel is 10 cm (of meer) te diep aangebracht.
 - o Mitigerende maatregel: Profiel niet terugtrekken.

- Profiel loopt uit het slot tijdens installatie (gerelateerd aan werkproces stap 2, paragraaf 13.2).
 - o Signalering: De slotverklikker zakt niet volledig met het profiel mee tot installatiediepte.
 - o Mitigerende maatregel: Jetgrout kolom aanbrengen om zandlaag lokaal af te dichten.

- Na het spoelen is te veel zand in de koker achtergebleven (gerelateerd aan werkproces stap 3, paragraaf 13.3).
 - o Signalering: Meer dan 10 cm zand in de koker bij het opmeten van de zandhoogte.
 - o Mitigerende maatregel: Extra spoelstap uitvoeren (werkproces stap 3 herhalen).

- Profiel raakt beschadigd tijdens installatie: Gat in koker ter hoogte van zandlaag (gerelateerd aan werkproces stap 3, paragraaf 13.3).
 - o Signalering: Visueel zichtbaar gat in kokerwand van 5 mm (of meer) tijdens camera-inspectie.
 - o Mitigerende maatregel: Koker afsluiten door te vullen met cement-bentoniet.

- Profiel raakt beschadigd tijdens installatie: Gat in koker ter hoogte van deklaag (gerelateerd aan werkproces stap 3, paragraaf 13.3).
 - o Signalering: Visueel zichtbaar gat in kokerwand van 5 mm (of meer) tijdens camera-inspectie.
 - o Mitigerende maatregel: Geen maatregel nodig omdat gat in deklaag zit, waardoor geen effect op werking filterscherm tegen piping.
- Profiel raakt beschadigd tijdens installatie: Gat in flens (hoog) in de deklaag.
 - o Signalering: Visueel zichtbaar gat in flens ter hoogte van de werksleuf. Gaten in de flens ter hoogte van de zandlaag zijn niet visueel zichtbaar.
 - o Mitigerende maatregel: Geen maatregel nodig omdat gat hoog in deklaag zit, waardoor geen effect op werking filterscherm tegen piping.
- Filterperforaties zijn door installatie vervormd (gerelateerd aan werkproces stappen 3 en 4, paragraaf 13.3 en 13.4). Door de vervorming past de spuitkop niet meer in de koker waardoor het schoonspuiten niet uitgevoerd kan worden. Ook kan het afpompen tijdens reinigen mogelijk niet uitgevoerd worden omdat het retentiecriterium (boogwerking) niet meer voldoet.
 - o Signalering: Visueel zichtbare vervorming tijdens camera-inspectie, dusdanig dat de spuitkop niet meer in de koker past.
 - o Mitigerende maatregel: Koker afsluiten door te vullen met cement-bentoniet.
- Filterperforaties kunnen niet voldoende gereinigd worden en zijn daardoor minder doorlatend, of blijven verstopt (gerelateerd aan werkproces stap 4, paragraaf 13.4).
 - o Signalering: Tijdens het afpompen geen helder water of afwijkend afpompdebiet ten opzichte van andere kokers.
 - o Mitigerende maatregel: Extra reinigungsstap uitvoeren door de perforaties van de koker nog een keer schoon te spuiten (werkproces stap 4b herhalen).
- Afwijkingen van het filterzand in kokers (gerelateerd aan werkproces stap 5, paragraaf 13.5).
 - o Signalering: Kokers zijn te veel of te weinig gevuld met filterzand.
 - o Mitigerende maatregel: Bijvullen of verwijderen van filterzand tot 10 cm onder bovenkant profiel.
- Profiel raakt beschadigd tijdens installatie of daarna: Koker oneffen of afgebroken aan bovenkant waardoor afsluiting met deksel niet mogelijk is (gerelateerd aan werkproces stap 6, paragraaf 13.6).
 - o Signalering: Kokerrand heeft oneffenheden van 2 mm (of meer).
 - o Mitigerende maatregel: Bovenkant van profiel afzagen en kokerrand vlak maken.

Alle waargenomen afwijkingen en uitgevoerde mitigerende maatregelen moeten worden geregistreerd in het opleverdossier (paragraaf 14.3).

15.2 Omgevingsbeïnvloeding

Tijdens de uitvoering van het filterscherm kunnen er invloeden op de omgeving zijn. Dit betreft:

- Verdichting en deformatie van de ondergrond door trillend installeren van de profielen. Hierdoor kunnen zettingen optreden. In de maakbaarheidsproeven Salmsteke is geen significante invloed vastgesteld waardoor dit uitvoeringsrisico niet beschouwd hoeft te worden. De profielen worden slechts voor een kort deel in gevoelige grondlagen (zand) geïnstalleerd waardoor de kans op hinder verwaarloosbaar is.
- Deformatie door het trekken van een profiel. In de maakbaarheidsproeven Salmsteke is geen significante invloed vastgesteld waardoor dit uitvoeringsrisico niet beschouwd hoeft te worden.

- Deformatie dijklichaam door ontgraven van de werksleuf. De vervorming, dit betreft de zakking van de kruin, als gevolg van de uitvoering moet beschouwd worden. Hiervoor gelden de vigerende richtlijnen.
- Stabiliteitsverlies dijklichaam door ontgraven van de werksleuf of door het trillend installeren van de profielen. De uitvoeringsstabiliteit moet aangetoond worden voor de maatgevende dwarsdoorsnedes langs het tracé. Hiervoor gelden de vigerende richtlijnen.
- Geluidshinder. Hiervoor wordt verwezen naar de vigerende richtlijnen (Stichting CURNET, 2012). Er zijn geen aanvullingen, afwijkingen of bijzonderheden bij de aanleg van een kunststof filterscherm ten opzichte van andere langsconstructies.
- Trillingen in de omgeving die kunnen leiden tot directe schade in nabij het werk gelegen bebouwing. De analyse van trillingen vindt plaats op basis van SBR-A (SBRCURnet, 2017). Voor de uitwerking wordt verwezen naar het vigerende monitoringsplan voor deeltraject Salmsteke (Boon, 2023). Hierin zijn de relevante gebouwen ingedeeld in bouwwerkcategorieën (SBR-A, Tabellen 10.1 t/m 10.3) en zijn de signaleringswaarden voor toegestane trillingen vermeld.

15.3 Aansluiting op andere constructies

Om beperkingen langs het tracé met betrekking tot de installatie van het kunststof filterscherm te overkomen kan gebruik worden gemaakt van andere (constructieve) maatregelen tegen piping. Binnen deeltraject Salmsteke wordt ter plaatse van de opritten geen kunststof filterscherm toegepast, maar een heave-scherm van stalen damwanden. De kunststof profielen dienen vervolgens aangesloten te worden op deze heave-schermen om een doorgaande barrière tegen piping te realiseren. Aansluitingen op andere (constructieve) maatregelen tegen piping dan deze heave-schermen zijn hier niet beschouwd.

Voor de aansluiting van het kunststof filterscherm op de stalen heave-schermen moeten aanvullende maatregelen in de uitvoering worden genomen. Er zijn verschillende alternatieven voor de uitvoering van de aansluiting mogelijk:

- Speciale slotverbinding staal-kunststof: Het buitenste profiel van de stalen damwand wordt van een slotverbinding voorzien waarop de kunststof profielen kunnen aansluiten.
- Jetgrout kolom: Beide schermen worden los van elkaar geïnstalleerd en de tussenliggende ruimte wordt daarna opgevuld met een jetgrout kolom en hiermee waterdicht afgesloten.
- Bentoniet kolom: Eerst wordt een bentoniet kolom aangelegd waar vervolgens beide schermen in komen te staan en zodoende waterdicht op elkaar aansluiten.

Op locatie Salmsteke wordt de optie van een speciale slotverbinding tussen staal en kunststof toegepast. Hierbij zijn de volgende aspecten tijdens de uitvoering van belang:

- Uitvoering van de aansluiting met speciale slotverbinding die op de stalen profielen wordt aangebracht waarop de kunststof profielen vervolgens kunnen aansluiten.
- Werkwijze uitvoering: Eerst worden de stalen profielen aangebracht, daarna sluiten de kunststof profielen hierop aan.
- De overgang (staffeling in diepte) en overlap (staffeling in lengte) tussen beide schermtypes is besproken in hoofdstuk 9.

Deel D

Gebruiksfase

16 Beheer en onderhoud

Na installatie wordt het kunststof filterscherm in gebruik genomen als maatregel tegen piping. Gedurende de gebruiksfase dient het functioneren van het kunststof filterscherm door middel van monitoring te worden gecontroleerd. Aan de hand van de monitoringsdata kan worden bepaald of het kunststof filterscherm naar behoren functioneert of dat herstel, vervanging dan wel inspectie nodig is. De monitoringsdata wordt gespiegeld aan de nulmetingen die zijn uitgevoerd direct na installatie. Daarnaast dient het filterscherm bij toekomstige toetsronden of bij ingrepen in de omgeving te worden beoordeeld. Hierbij dient nagegaan te worden of het filterscherm nog steeds voldoet aan de veiligheidseisen ten aanzien van de waterveiligheid.

Al het voorgenoemde is voor deeltraject Salmsteke vastgelegd in het beheer- en onderhoudsplan (De Gee & Waagmeester, 2023). Dit plan geeft op basis van de faalpadanalyse voor de meest kritische faalmechanismes welke beheerst kunnen worden in de gebruiksfase de monitoringsstrategie om deze kritische mechanismes gedurende de levensduur te monitoren. Op basis van de monitoring bevindt het kunststof filterscherm zich in een bepaald scenario en afhankelijk van het scenario worden eventuele beheersmaatregelen voorgeschreven.

17 Aanbevelingen voor vervolgonwikkelingen

Bij de totstandkoming van de 1.0 versie van de ontwerp-, beoordelings- en onderhoudsrichtlijn voor het kunststof filterscherm zijn keuzes gemaakt in de afbakening van het innovatie-onderzoek. Hierdoor heeft het onderzoek zich uitsluitend gericht op de toepassing van het kunststof filterscherm bij deeltraject Salmsteke en de daarvoor benodigde onderzoeksinspanning. Uit het verrichte onderzoek volgen aanbevelingen voor vervolgonwikkelingen. Deze aanbevelingen zijn toegespitst op enerzijds het uitbreiden dan wel aanscherpen van de theorie en anderzijds het uitbreiden van de toepassingsmogelijkheden van het kunststof filterscherm. De in dit hoofdstuk genoemde aanbevelingen dienen te worden beschouwd bij de eventuele totstandkoming van de generieke richtlijn voor het kunststof filterscherm.

Voorliggend document wordt na realisatie van het kunststof filterscherm bij deeltraject Salmsteke geüpdatet naar versie 2.0 waarin de ervaringen uit het ontwerp- en uitvoeringsproces alsmede het ontwerp bij deeltraject Salmsteke als voorbeeldcasus zijn opgenomen. Uit de opgedane ervaring volgen mogelijk nog aanvullende aanbevelingen waardoor onderstaande lijsten nog kunnen worden aangepast.

De volgende aanbevelingen worden gedaan ten aanzien van de uitbreiding dan wel aanscherping van de theorie:

- Op het moment van schrijven van voorliggende richtlijn zijn meerdere ontwikkelingen gaande op het gebied van heave achter een (filter)scherm en de bijbehorende modellerings- en berekeningswijze. In voorliggende richtlijn zijn de op dat moment geldende laatste inzichten op dit onderwerp verwerkt. Bij nieuwe (algemeen geaccepteerde) inzichten op dit onderwerp wordt aanbevolen de richtlijn hierop te actualiseren.
- De langetermijneffecten van kruip onder druk op het mechanisch gedrag van het gerecyclede PVC zijn niet door middel proeven onderzocht. Bij de afleiding van de limietspanningen voor de langetermijnsituatie is daarom een kruipfactor bij druk gehanteerd afkomstig uit de literatuur die daarna veiligheidshalve is vermenigvuldigd met een factor 1,5 (L.J. van der Meer, 2023). Aanvullend onderzoek naar het kruipgedrag van het gerecyclede PVC is dan ook aanbevolen om de kruipfactor onder druk en hiermee de limietspanningen beter te kunnen bepalen. Voor deeltraject Salmsteke is het aspect van het langetermijngedrag ondervangen in de monitoring.
- De limietspanningen zijn vastgesteld aan de hand van op drukproeven geijkte modellering. Bij de drukproeven en de modellering is geen rekening gehouden met de positieve bijdrage van beddingseffecten van het filterzand in de kokers en het in-situ zand rondom de kokers op de pieksterkte van het geperforeerde deel van het filterscherm. Daarnaast zijn de limietspanningen voor de hoogwatersituatie veiligheidshalve gelijkgesteld aan een percentage van de pieksterkte tot waar bij belasten geen vervormingen van de perforaties optreden. De vervormingen die de perforaties ondervinden (met name het breder worden) bij belasten vanaf de limietspanning tot aan de pieksterkte zijn echter dusdanig beperkt (L.J. van der Meer, 2023) dat naar verwachting ook bij deze belastingniveaus aan het retentiecriterium van het filterzand op de perforaties kan worden voldaan. Hiermee blijft de filterwerking intact. Aanbevolen wordt nader onderzoek ter verrichten naar zowel de beddingseffecten op de pieksterkte als het in de limietspanningen wel of niet in rekening mogen brengen van de volledige sterkte van het geperforeerde deel van het filterscherm.
- De wrijvingseigenschappen van het kunststof filterscherm konden tijdens de trekproeven niet worden vastgesteld. Inzicht in de schachtwrijving (bij druk) is echter relevant voor de uitbreiding van de toepassingsmogelijkheden van het filterscherm alsook voor het begrip ten aanzien van draagkracht en krachtsoverdracht vanuit de grond. Aanbevolen wordt dit nader te onderzoeken.

Het wordt aanbevolen het volgende te onderzoeken ten aanzien van de uitbreiding van de toepassingsmogelijkheden van het kunststof filterscherm:

- De mogelijkheden voor het kunnen installeren van kunststof profielen met een lengte groter dan 8 m.
- De maakbaarheid van geperforeerde kunststof profielen met een perforatiebreedte kleiner dan 0,4 mm.
- De toepasbaarheid in ondergronden met een stevige deklaag, puin en/of wegfundering zoals bij opritten.
- De werking van het filterscherm in zanden met andere (minder uniforme) korrelverdelingen dan bij deeltraject Salmsteke.
- Optimalisatie van het werkproces (bijv. het reinigingsproces en/of het waterverbruik tijdens spoelen/reinigen), waardoor de installatie sneller en economisch voordeliger wordt.
- De mogelijkheden voor het toepassen van het kunststof filterscherm in situaties met zowel een opgave voor piping als een (beperkte) opgave voor macrostabiliteit.
- Het ontwikkelen van de boortechniek als omgevingsvriendelijke installatiemethode.

Tot slot wordt aanbevolen om tijdens de gebruiksfase van het kunststof filterscherm een schouw van deeltraject Salmsteke uit te voeren nadat een hoogwatersituatie is opgetreden.

Referenties

Bij het opstellen van deze ontwerp-, beoordelings- en onderhoudsrichtlijn voor het kunststof filterscherm zijn de volgende bronnen geraadpleegd:

- Bijnagte, J. (2023). *Filtertheorie en het Prolock filterscherm (P15540003-RAP-TMA-01550)*. Sterke Lekdijk, HDSR.
- Boon, C. (2023). *Monitoringsplan (P15540003-PLA-TMA-00170)*. Sterke Lekdijk, HDSR.
- Brekelmans, B. (2020). *PvA/PMP Planuitwerkingsfase Salmsteke (P15540003-PLA-PBE-00009)*. Sterke Lekdijk, HDSR.
- British Stainless Steel Association (2022). *Specifying finishes for stainless steel flat products (sheet and plate) – British Stainless Steel Association*.
- Calle, E. (1998). *Probabilistische gevoeligheidsanalyse heave – Fase 5 – Eindrapportage*. Delft: Grondmechanica Delft.
- De Gee, L. & Waagmeester, N. (2023). *Beheer- en onderhoudsplan gebruiksfase innovatieve pipingvoorziening Salmsteke (P15540003-PLA-TMA-01092)*. Sterke Lekdijk, HDSR.
- De Innovatieversneller (2022). *HWBP-DIV Gebruikersplatform Piping - HWBP-Piping-Deltares*.
- Douglas, P. (1974). *Filter design criteria and their application*.
- Everts, B. (2021). *Draaiboek 1ste veldproef Prolock (P15540003-PLA-TMA-00409)*. Sterke Lekdijk, HDSR.
- Giroud, J. (1982). *Filter criteria for Geotextiles, Second International Conference on Geotextiles*. Las Vegas.
- Giroud, J. (1996). *Geofilters 96 (pp. 565-680)*. Montreal.
- Giroud, J. (2003). *Filter criteria (pp. 221-259)*. Jubilee Volume, 75th anniversary of K. Terzaghi's 'Erdbaumechanik'.
- Giroud, J. (2010). *Development of criteria for geotextile and granular filters (pp. 45-64)*. Proceedings of the 9th International Conference on Geosynthetics. Guaruaia, Brazil.
- Giroud, J. (2022). *Persoonlijke communicatie*.
- HWBP (2018). *Handboek Dijkenbouw. Uitvoering, versterking en nieuwbouw*.
- Jefferies, M. & Shuttle, D. (2020). *Critical State Soil Mechanics: Notes, Vancouver Geotechnical Society Workshop*.
- Kentrop, D. (2021). *Ontwerpnota bekledingen (P15540003-ONN-TMA-00467)*. Sterke Lekdijk, HDSR.
- Koelewijn, A. (2021). *Ontwerp grofzandbarrière pilot Gameren (11200952-070-GEO-0002, versie 2.0)*. Delft: Deltares.
- Kuiper, F. & Van der Meer, I. (2023a). *Analyserapport cleaningproeven (P15540003-RAP-TMA-01482)*. Sterke Lekdijk, HDSR.
- Kuiper, F. & Van der Meer, I. (2023b). *Factual report veldproef 2 - cleaning (P15540003-RAP-TMA-01479)*. Sterke Lekdijk, HDSR.
- Lekenseemble (2022). *Ontwerpaanpak verticale schermen in kering*.
- Lendering, K. (2018). *Advancing Methods For Evaluating Flood Risk Reduction Measures*. TU Delft: Dissertation.
- Lendering, K., Jonkman, S. & Kok, M. (2014). *Effectiveness and reliability of emergency measures for flood prevention*. Stowa, TU Delft.
- Lunne, T. & Christoffersen, H. (1983). *Interpretation of cone penetrometer data of offshore sands*. Proceedings 15th annual offshore technology conference. Houston, Texas, USA: Offshore Technology Conference.

- Maatkamp, T. (2021). *Sterke Lekdijk – Afweging installatietechniek Prolock B (P15540003-RAP-TMA-00714)*. Sterke Lekdijk, HDSR.
- Maatkamp, T., Veenbergen, V., Overbosch, N. & Engels, S. (2021). *Doorontwikkeling werkingsprincipe en installatie (P15540003-RAP-TMA-00403)*. Sterke Lekdijk, HDSR.
- Muntohar, A. (2006). *Swelling rate of expansive clay soils*.
- Nederlandse Normalisatie-instituut (2005). *NEN-EN:12904 – Products used for treatment of water intended for human consumption – Silica sand and silica gravel*.
- Nederlandse Normalisatie-instituut (2017). *NEN 9997-1+C2 – Geotechnisch ontwerp van constructies – Deel 1: Algemene regels*.
- Noordergraaf, M. (2022). *Stalen damwand vs. Prolock – MKI- en CO2-berekening*.
- Palmeira, E. & Fannin, R. (2002). *Soil-geotextile compatibility in filtration (pp. 853-872)*. 7th International Conference on Geosynthetics 3, Nice.
- POV Macrostabieliteit (2020a). *Publicatie Eindige elementenmethode (PPE)*.
- POV Macrostabieliteit (2020b). *Publicatie Langsconstructies (PPL)*.
- POV Piping (2018). *Handreiking grondonderzoek voor Piping*.
- Profextru (2021). *Productblad Prolock Sigma*. Hardenberg: Profextru.
- Rijkswaterstaat (2012). *Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen*.
- Rijkswaterstaat (2021). *Schematiseringshandleiding piping bij kunstwerk*.
- Rohe, A. (2021a). *Draaiboek Mediumschaalproef (P15540003-RAP-TMA-00407)*. Sterke Lekdijk, HDSR.
- Rohe, A. (2021b). *Factual report mediumschaalproef (P15540003-RAP-TMA-00408)*. Sterke Lekdijk, HDSR.
- Rohe, A. (2022). *Analyse mediumschaalproef (P15540003-RAP-TMA-00690)*. Sterke Lekdijk, HDSR.
- Rohe, A. (2023). *Draaiboek 2e veldproef Prolock (P15540003-RAP-TMA-00411)*. Sterke Lekdijk, HDSR.
- Rohe, A., Van der Geer, S. (2023). *Analyserapport 2e veldproef Prolock (P15540003-RAP-TMA-00716)*. Sterke Lekdijk, HDSR.
- Rosenbrand, E., Wopereis, L., Wiersma, A.P., Kanning, W., Bezuijen, A., Blinde, J. & Van Beek, V. (2022). *Kennis voor Keringen 2021: Achtergrondrapport Voorlanden*.
- SBRCURnet (2017). *SBR Trillingsrichtlijn A: Schade aan bouwwerken: 2017*. Delft.
- Stichting CURNET (2012). *CUR-publicatie 166 (6^e druk) Damwanconstructies*. Gouda: Stichting CURNET.
- TAW (1985). *Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken deel 1 – bovenrivierengebied*.
- TAW (2004). *Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken (TR-26, DWW-2004-057)*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen.
- Terzaghi, K. (1922). *Der Grundbruch an Stauwerken und seine Verhütung ('Soil failure in dams and its prevention', pp. 445-449)*. Die Wasserkraft 12(26).
- Van Arkel, B. (2022). *Factual report 1e veldproef Prolock (P15540003-RAP-TMA-00410)*. Sterke Lekdijk, HDSR.
- Van Arkel, B. (2023). *Draaiboek 2de trekproef Prolock (P15540003-RAP-TMA-01496)*. Sterke Lekdijk, HDSR.
- Van Arkel, B. & Veenbergen, V. (2022). *Back analyses rapport 1ste veldproef (P15540003-RAP-TMA-00715)*. Sterke Lekdijk, HDSR.
- Van Arkel, B., Rohe, A. & Van der Geer, S. (2022). *Factual report 2e veldproef Prolock (P15540003-RAP-TMA-00412)*. Sterke Lekdijk, HDSR.
- Van den Boer, E. (2023). *PF-C. Toetsen (ongewenst) vrijkomen van micro- en nanodeeltjes van Prolock Filterscherm – ALG-2 (P15540003-PLA-TMA-00719)*. Sterke Lekdijk, HDSR.

- Van der Geer, S. (2023). *Trekproef 2 Prolock profielen (P15540003-RAP-TMA-01492)*. Sterke Lekdijk, HDSR.
- Van der Meer, I. (2021a). *Draaiboek kleine schaalproef Prolock (P15540003-RAP-TMA-00405)*. Sterke Lekdijk, HDSR.
- Van der Meer, I. (2021b). *Factual report kleine schaalproeven (P15540003-RAP-TMA-00406)*. Sterke Lekdijk, HDSR.
- Van der Meer, I. (2022a). *Analyserapport kleine schaalproeven (P15540003-RAP-TMA-00689)*. Sterke Lekdijk, HDSR.
- Van der Meer, I. (2022b). *Draaiboek medium cleaningproef (P15540003-RAP-TMA-01480)*. Sterke Lekdijk, HDSR.
- Van der Meer, I. (2022c). *Draaiboek veldproef 2 – cleaning (P15540003-RAP-TMA-01481)*. Sterke Lekdijk, HDSR.
- Van der Meer, I. (2023). *Factual report medium cleaningproef (P15540003-RAP-TMA-01478)*. Sterke Lekdijk, HDSR.
- Van der Meer, L.J. (2023). *Achtergrondrapport limietspanning Prolock (P15540003-RAP-TMA-01508)*. Sterke Lekdijk, HDSR.
- Van Oosten, R. (2021). *Innovatiebesluit Salmsteke (P15540003-PLA-TMA-00335)*. Sterke Lekdijk, HDSR.
- Veenbergen, V. (2023). *Notitie innovatiebesluit toepassing Prolock in deelproject Salmsteke – 4e beslismoment (P15540003-MEM-TMA-01476)*. Sterke Lekdijk, HDSR.
- Veenbergen, V. & Van der Mieden, J. (2021). *Ontwikkelplan Prolock Filterscherm (P15540003-RAP-TMA-00404)*. Sterke Lekdijk, HDSR.
- Vessies, W. (2012). *Relative density differences of a sand fill*. Delft: TU Delft.
- Waterloo, M. & Verhagen, S. (2023). *Lekdijk Prolock Delta scherm - Risico op verstopping - water en biofilmcompositie (P15540003-RAP-TMA-01446)*. Acacia Water.
- WBI (2017). *Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017 - Bijlage III Sterkte en Veiligheid*. Ministerie van Infrastructuur en Milieu.
- Wittmann, L. (1980). *Filtrations- und Transportphänomene in porösen Medien*. Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe, Heft 68.
- World Stainless (2014). *Euro_Inox_LeanFormat_RoughnessM*.

Bijlage A FMECA-tabel

Codering	Deelmechanisme	Faalpad	Gewenst gedrag/bedreiging	Te adresseren in	Toelichting faalpad	Maatregelen				Kwalitatieve beschouwing faalkans bijdrage		
						Ontwerpfase	Installatiefase	Beheerfase	Onderbouwing maatregelen	Significant	Niet significant	Motivatie
1	Doorlooptheid	Gat in het filterscherm: onvoldoende sterkte capaciteit	Bedreiging	Ontwerp	Bij onvoldoende sterkte capaciteit van het profiel kan het profiel onder invloed van vervorming (door verschillende oorzaken) onder buiging breken zodoende kan een gat in het dichte filterscherm ontstaan. Dit gat dient voldoende groot te zijn en niet gedetecteerd te worden alvorens hoogwater optreedt om pipe ontwikkeling en daarmee doorlooptheid te krijgen. Hierbij moet rekening worden gehouden dat hieraan voorafgaand opbarsten / heave in het achterland plaats moet vinden alsmede pipegroei tot aan het filterscherm.	1. Plaxis berekening conform PPE/PPL en toetsing profiel in BGT en UGT			Uitgangspunt in de ontwerpregel is een toetsing op basis van snedekrachten, zowel in BGT (openingsgrootte) als in UGT (breken). Door een veiligheidsfactor tussen belasting en capaciteit toe te passen wordt dit risico beheerst.		X	Het filterscherm wordt ontworpen aan de hand van de PPE/PPL-methodiek voor langconstructies in waterkeringen, waarbij gebruik wordt gemaakt van specifieke informatie voor kunststof filterschermen van Prolock profielen. Zo wordt naast het gehanteerde veiligheidsniveau ook een gereduceerde sterkte gehanteerd (zie achtergrond rapport P15540003-RAP-TMA-01508). Het snedekracht ontwerp van het filterscherm heeft een minimale betrouwbaarheid van $P_{f,0.05} = 1,48 \cdot 10^{-6}$ ($\beta = 4,67$). In document P15540003-RAP-TMA-01508 is ook het beproeven van de constructieve sterkte van de kunststof profielen vastgelegd. Hieruit blijkt dat het geperforeerde gedeelte in het geval van een te hoge belasting eerder zal bezwijken dan de dichte delen. Hierdoor wordt de kans op een gat in het dichte deel van het filterscherm nog kleiner. Zodoende is dit faalpad niet significant.
2	Doorlooptheid	Gat in het filterscherm: profiel uit het slot gelopen	Bedreiging	Uitvoering	Tijdens de uitvoering kan een profiel uit het slot lopen. Hierdoor kan er mogelijk een opening ontstaan in het dichte deel van het filterscherm. Door een voldoende grote opening kan de pipe mogelijk doorgroeien. Dit is enkel mogelijk als het 'uit het slot lopen' niet is gedetecteerd of hersteld voor hoog water. Hierbij moet rekening worden gehouden dat hieraan voorafgaand opbarsten / heave in het achterland plaats moet vinden alsmede pipegroei tot aan het filterscherm.		1. Slotverklidders 2. Installatie-protocol met correctief / mitigerende maatregel zoals een groutkolom indien uit het slot gelopen		Door slotverklidders toe te passen wordt uit het slot lopen inzichtelijk gemaakt en kan samen met een correctieve / mitigerende maatregel (beide in het installatieprotocol) het risico beheerst worden.	X		Gegeven het feit dat in de maakbaarheidsproeven van de 119 profielen slechts 1 uit het slot is gelopen (document P15540003-RAP-TMA-00716) en er een detectieve en correctieve maatregel in de uitvoering beschikbaar is, is de kans klein dat dit faalpad optreedt. De kans dat het faalpad als het optreedt tot een overstroming leidt is wel relatief groot (ten opzichte van andere faalpaden). Daardoor heeft het faalpad mogelijk wel een significante bijdrage aan de overstromingskans. Deze bijdrage dient bepaald te worden op basis van de ontwerprijtlijn (P15540003-TMA-RAP-00416, paragraaf 2.6.3).
4	Doorlooptheid	Gat in het filterscherm: schade aan profiel beheer dichte deel	Bedreiging	Beheer	Tijdens de beheerfase kan een profiel beschadigd raken door bijvoorbeeld grondroerende activiteiten. Hierdoor kan er mogelijk een opening ontstaan in het dichte deel van het filterscherm. Wanneer de opening zich in de piping gevoelige laag bevindt en deze voldoende groot is, kan de pipe mogelijk doorgroeien. Dit is enkel mogelijk als de opening in het dichte deel niet is gedetecteerd of hersteld voor hoog water. Hierbij moet rekening worden gehouden dat hieraan voorafgaand opbarsten / heave in het achterland plaats moet vinden alsmede pipegroei tot het filterscherm.	1. Tracé in beheerstrook		1. 'No work' zone in beheerstrook en handhaving hierop.	Verkleining / minimalisatie kans op optreden van schade door externen		X	Kans op schade veroorzaakt door externen zonder dat dit gedetecteerd en hersteld wordt, wordt gegeven de maatregelen (tracé in beheerstrook en hier geldend een no work zone) voldoende klein geacht. Dit faalpad is daarom niet significant.
5	Doorlooptheid	Gat in het filterscherm: degradatie profiel	Bedreiging	Beheer	Tijdens de beheerfase kan degradatie van de kunststof profielen optreden. Hierdoor kan er mogelijk een opening ontstaan in het dichte deel van het filterscherm. Door een voldoende grote opening kan de pipe mogelijk doorgroeien. Dit is enkel mogelijk als de opening in het dichte deel niet is gedetecteerd of hersteld voor hoog water. Hierbij moet rekening worden gehouden dat hieraan voorafgaand opbarsten / heave in het achterland plaats moet vinden alsmede pipegroei tot het filterscherm.	1. Lange termijn effecten in materiaal factoren sterkte berekening		1. Dummy profielen ter beproefing effecten ondergrond op materiaal. Trekken en inspecteren op vastgestelde tijdsinterval			X	In P15540003-RAP-TMA-00719 is vastgelegd dat er geen aanleiding tot een (groot) risico op degradatie van het kunststof profiel is. Om het restrisico op degradatie te monitoren, worden vijf dummy profielen ingebracht bij Salmsteke. Deze worden na een vastgestelde periode weer uit de grond gehaald en beproefd. Deze zijn onderdeel van het beheer- en onderhoudsplan (document P15540003-PLA-TMA-01092). Met deze maatregel wordt dit faalpad als niet significant beschouwd.
6	Doorlooptheid	Filter functioneert niet: onvoldoende constructieve sterkte	Bedreiging	Ontwerp	Bij onvoldoende sterkte capaciteit van het kunststof profiel kan het profiel onder invloed van vervorming (door verschillende oorzaken) onder buiging breken of open gaan staan. Mogelijk kan hierdoor het filterzand uit de filterbuis spoelen. De kans dat het filterzand niet meer goed als filter functioneert neemt hierdoor toe. Hetzelfde geldt voor de boogwerking van van in-situ zand op de kokerwand. In dit faalpad moet rekening worden gehouden dat hieraan voorafgaand opbarsten / heave in het achterland plaats moet vinden alsmede pipegroei tot aan het filterscherm.	1. Plaxis berekening conform PPE/PPL en toetsing profiel in de BGT en UGT			Uitgangspunt in de ontwerpregel is een toetsing op basis van snedekrachten, zowel in BGT (openingsgrootte) als in UGT (breken). Door een veiligheidsfactor tussen belasting en capaciteit toe te passen wordt dit risico geminimaliseerd.		X	De beschreven keten van onderlinge onafhankelijke gebeurtenissen die moeten optreden om tot falen te leiden, laat zien dat er veel robuustheid in dit faalpad zit. De kans op het daadwerkelijk bezwijken van het geperforeerde deel of het 'openstaan' van de perforaties door vervorming is klein door ontwerpveiligheid toe te passen op zowel de ontwerpbelasting als de capaciteit. Het filterscherm wordt ontworpen aan de hand van de PPE/PPL-methodiek voor langconstructies in waterkeringen, waarbij gebruik wordt gemaakt van specifieke informatie voor kunststof filterschermen met Prolock profielen. Het snedekracht ontwerp van het filterscherm heeft een minimale betrouwbaarheid van $P_{f,0.05} = 1,48 \cdot 10^{-6}$ ($\beta = 4,67$). In document P15540003-RAP-TMA-01508 is het beproeven van de constructieve sterkte van de kunststof profielen en de aan te houden ontwerpveiligheid vastgelegd. Hieruit blijkt dat het geperforeerde gedeelte in het geval van een te hoge belasting eerder zal bezwijken dan de dichte delen. Indien het geperforeerde deel van het kunststof profiel bezwijkt (en de perforaties 'opstaan') zijn twee scenario's mogelijk: 1. Bezwijken perforaties aan rivierzijde, wat leidt tot verlies boogwerking (rivierzijde). Dit heeft alleen effect op de knoop 'onvoldoende boogwerking in-situ zand op kokerwand' in de foutenboom. Het filterzand is nog steeds 'opgesloten' in de koker (aan de landzijde) en kan daardoor niet uitspoelen. Het filterzand voorziet nog steeds in filterwerking. 2. Bezwijken perforaties aan (achter)landzijde, wat leidt tot een risico op uitspoelen doordat filterzand niet wordt tegen gehouden door kokerwand en dikte van het granulaire filter beperkt is. Daarentegen zal het filterzand minder snel uitspoelen door de relatief grote korrel diameter. In deze situatie is nog steeds (in de meeste gevallen) boogwerking aan rivierzijde van in-situ zand op kokerwand aanwezig, wat zorgt voor retentie. Voor beide scenario's geldt dat eerst pipegroei tot filterscherm moet optreden (opbarsten en heave achterland, plus terugschrijdende erosie tot filterscherm). Ook geldt voor dit faalpad dat de kans op constructief falen het grootst is bij een dikke deklaag, vanwege het feit dat negatieve kleeft de dominante belasting is. Deze locatie is juist minder risicovol voor pipegroei tot filterscherm. Daarmee wordt geconcludeerd dat dit faalpad geen significante bijdrage levert aan de overstromingskans.
7	Doorlooptheid	Filter functioneert niet: ontmenging filterzand	Bedreiging	Uitvoering	Tijdens installatie ontmengt het filterzand zodanig dat het filterzand i.r.t. het in-situ zand te grof is en niet meer aan de filterregels voldoet. Doordat geen boogwerking van het in-situ zand op de kokerwand ontstaat is het filter niet in staat om een pipe tegen te houden. Opgemerkt wordt dat het filterzand zelf niet uit de koker kan spoelen (geometrisch gesloten). Het in-situ zand spoelt in dusdanige hoeveelheid door het filterzand dat een pipe door het filter kan ontstaan. Hierbij moet het in-situ zand zijn interne stabiliteit verliezen. Hierbij moet rekening worden gehouden dat hieraan voorafgaand opbarsten / heave in het achterland plaats moet vinden alsmede pipegroei tot aan het filterscherm.	1. Standaard (uniform) filterzand conform NEN-EN 12904:2005			Deze norm garandeert de kwaliteit van standaard filtermaterialen. Door gebruik te maken van uniform filterzand wordt de kans op ontmenging geminimaliseerd.		X	Een uniform (gestandaardiseerd) gegraadend filterzand ($C_u < 2$) voorkomt ontmenging. Deze conclusie is reeds bevestigd in de maakbaarheidsproeven (document P15540003-RAP-TMA-00716), waarbij ontmenging als gevolg van storten niet is waargenomen. Naast een onwaarschijnlijk causale gebeurtenis moeten nog enkele vervolgebeurtenissen met een kleine kans optreden, voordat dit faalpad tot een overstroming kan leiden. Dit faalpad levert daarom geen significante bijdrage.
8	Doorlooptheid	Filter functioneert niet: Te grof filterzand	Bedreiging	Uitvoering	Tijdens installatie wordt te grof filterzand aangebracht i.r.t. het in-situ zand. Als vervolgens ook onvoldoende boogwerking van het in-situ zand op de kokerwand optreedt, is het filter niet in staat om een pipe tegen te houden. Opgemerkt wordt dat het filterzand zelf niet uit de koker kan spoelen (geometrisch gesloten). Het in-situ zand moet in dusdanige hoeveelheid door het filter heen spoelen dat een pipe door het filter kan ontstaan. Hierbij moet het in-situ zand zijn interne stabiliteit verliezen. Hierbij moet rekening worden gehouden dat hieraan voorafgaand opbarsten / heave in het achterland plaats moet vinden alsmede pipegroei tot aan het filterscherm.		1. Installatie protocol inclusief vastlegging (geboorte)gegevens in document		Bijhouden van filterzand dat geïnstalleerd wordt en check achteraf. Hierdoor wordt de kans van deze gebeurtenis geminimaliseerd.		X	Het risico van het toepassen van verkeerd type filterzand wordt (grotendeels) ondervangen door gebruik te maken van heldere werkprotocollen (ontwerprichtlijn P15540003-TMA-RAP-00416, deel C). De boogwerking van het in-situ zand op de kokerwand werkt als aanvullende robuustheid wanneer het filterzand onverhoopt toch te grof zou zijn. Uit schaalproeven (document P15540003-RAP-TMA-00689) blijkt dat bij te grof filterzand, in-situ zand door het filter heen 'druppelt' en er geen progressief bezwijken optreedt. De kans op het optreden van een doorgaande pipe is daarmee klein. In de ontwerp(filter)regels zit daarnaast nog enige robuustheid ten aanzien van het retentie criterium. De kans dat het faalpad daarmee tot een overstroming leidt is klein. Dit faalpad is daardoor niet significant.

Codering	Deelmechanisme	Faalpad	Gewenst gedrag/bedreiging	Te adresseren in	Toelichting faalpad	Maatregelen			Significant		Kwalitatieve beschouwing faalkans bijdrage	
						Ontwerpfase	Installatiefase	Beheerfase	Onderbouwing maatregelen	Significant		Niet significant
9	Doorloopbaarheid	Filter functioneert niet: in-situ zand te fijn i.r.t. filter	Gewenst gedrag (primaire faalpad)	Ontwerp	Door natuurlijke spreiding is het in-situ zand te fijn i.r.t. het filter. Doordat vervolgens onvoldoende boogwerking van het in-situ zand op de kokerwand (perforaties dan wel filterzand) ontstaat is het filter niet in staat om een pipe tegen te houden. Opgemerkt wordt dat het filterzand zelf niet uit de koker kan spoelen (geometrisch gesloten). Het in-situ zand moet in dusdanige hoeveelheid door het filter heen spoelen dat een pipe door het filter kan ontstaan. Hierbij moet het in-situ zand zijn interne stabiliteit verliezen. Hierbij moet rekening worden gehouden dat hieraan voorafgaand opbarsten / heave in het achterland plaats moet vinden alsmede pipegroei tot aan het filterscherm.	1. Robuust ontwerpuitgangspunt m.b.t. filterregels: Geometrisch gesloten filterregels t.a.v. filterzand. 2. Ontwerpen filterzand op basis van 5% ondergrens waarde uit een groep korrelverdelingen 3. Voldoende grondonderzoek om spreiding in kaart te brengen.	1. Afpompen van iedere koker voor aanvullen met filterzand; bij te fijn in-situ zand zal geen boogwerking op de perforatie ontstaan en blijft het water troebel. Filterzand kan indien nodig dan aangepast worden.		Er is voldoende veiligheid aanwezig om spreiding in in-situ zand dat vooraf te verwachten valt te ondervangen. Daarnaast wordt gebruik gemaakt van geometrisch gesloten filterregels, dit is conservatief.		X	Met voldoende grondonderzoek wordt de kans op fijner zand dan verwacht verkleind. Het filterzand wordt ontworpen op basis van de statistische spreiding aangetroffen in het grondonderzoek. Uit de schaalproeven (document P15540003-RAP-TMA-00678) blijkt dat bij te grof filterzand i.r.t. het in-situ zand het filter heen 'druppelt' en er geen progressief bezwijken optreedt. De kans op het optreden van een doorgaande pipe is daarmee klein. De kans dat het faalpad daarmee tot een overstroming leidt is daarom klein en heeft daardoor geen significante bijdrage aan de overstromingskans.
10	Doorloopbaarheid	Filter functioneert niet: nazakken filterzand	Bedreiging	Beheer	Door verdichting van filterzand, treedt zakking van filterzand op, indien filterzand zakt onder b.k. perforaties kan waterstroming boven filterzand plaatsvinden. Het uitzakken onder de perforaties wordt niet gedetecteerd en hersteld voor hoogwater. Een pipe kan door het filterscherm heengroeien als er onvoldoende boogwerking van het in-situ zand op de kokerwand aanwezig is. Tevens moet rekening worden gehouden dat hieraan voorafgaand opbarsten / heave in het achterland plaats moet vinden alsmede pipegroei tot aan het filterscherm.		1. Kokers volledig vullen met filterzand. 2. <i>Bijhouden hoeveelheid filterzand dat in kokers is gestort.</i>		Door koker volledig te vullen en registreren als check kan het filterzand niet onder hoogte van de perforatie uitzakken.		X	Door het volledig vullen van de kokers is het niet mogelijk dat de zakking groter is dan de lengte van het blinde gedeelte boven de perforaties. Hiermee kan het filterzand niet onder de hoogte van het geperforeerde gedeelte uitzakken. Deze werkwijze is beschreven in de ontwerprijtlijn (P15540003-TMA-RAP-00416, deel C). Te samen met het onafhankelijk optreden van andere knopen in het faalpad is dit faalpad niet significant.
11	Doorloopbaarheid	Filter functioneert niet: te weinig filterzand aangebracht	Bedreiging	Uitvoering	Het filterzand is dusdanig summier aangebracht dat de koker tot onder de perforaties is gevuld. Dit wordt niet gedetecteerd en hersteld voor hoogwater. Een pipe kan door het filterscherm heengroeien als er onvoldoende boogwerking van het in-situ zand op de kokerwand aanwezig is. Hierbij moet rekening worden gehouden dat hieraan voorafgaand opbarsten / heave in het achterland plaats moet vinden alsmede pipegroei tot aan het filterscherm.		1. Kokers volledig vullen met filterzand. 2. <i>Bijhouden hoeveelheid filterzand dat in kokers is gestort.</i>		Door koker volledig te vullen kan dit niet optreden.		X	Door het volledig vullen van de kokers op basis van uitvoeringshandreiking in de ontwerprijtlijn (P15540003-TMA-RAP-00416, deel C) is de kans klein dat er te weinig filterzand wordt aangebracht. Te samen met het onafhankelijk optreden van andere knopen in het faalpad is dit faalpad niet significant.
12	Onderloopbaarheid	Filter functioneert niet: Mechanische verstopping	Bedreiging	Beheer	Door (langdurige) inspoeling van in-situ zand raakt het granulaire filter verstopt. De verstopping wordt niet gedetecteerd voordat hoogwater optreedt. De verstopping zorgt voor een dusdanige afname van de doorlatendheid dat heave achter het filterscherm kan ontstaan. Vervolgens kan de pipe doorgroeien tot het voorland. Hierbij moet rekening worden gehouden dat hieraan voorafgaand opbarsten / heave in het achterland plaats moet vinden alsmede pipegroei tot het filterscherm.	1. Toetsing op interne stabiliteit van in-situ zand om mechanische verstopping te voorkomen. 2. <i>In het ontwerp wordt in bepaalde scenario's rekening houden met een gereduceerde doorlatendheid van het filter.</i>	1. Ontwikkeling van filter (afzuigen van fijn materiaal) en bepalen referentie debiet 2. <i>Reinigingstool als correctieve maatregel</i>	1. Monitoring doorlatendheid filterscherm middels pompproeven 2. <i>Reinigingstool als correctieve maatregel</i>	Met de rekenregel wordt de kans op mechanische verstopping geminimaliseerd. Met een ontwerp verificatie wordt inzicht gekregen in het verstoppingsscenario: enerzijds om grenswaarde voor monitoring vast te leggen, anderzijds om de faalkans te bepalen. Met het uitvoeringsprotocol wordt de kans op mechanische verstopping verder gereduceerd en wordt de 0-situatie t.a.v. doorlatendheid inzichtelijk gemaakt. Met monitoring kan risico van optreden op meest kritieke punten in kaart worden gebracht en beheerst worden door de beschikbaarheid van de reinigingstool.		X	In P15540003-RAP-TMA-00414 wordt beschreven dat mechanische verstopping door toetsing op interne stabiliteit (van het in-situ zand) wordt voorkomen. In het ontwerp dient een voldoende kleine kans op heave achter het filterscherm te worden aangetoond (inclusief reductie van de doorlatendheid, zie faalpad 13). Tijdens het installatieproces wordt het filter ontwikkeld en daarmee het fijne materiaal afgezogen. Hierbij wordt tevens een referentiedebiet bepaald wat een maat geeft voor de doorlatendheid van iedere koker. Met monitoring op kritische locaties wordt het risico verder beperkt. Bij het detecteren van een verstopping is een herstelmaatregel beschikbaar. Het optreden van dit faalpad tot falen van de waterkering is niet waarschijnlijk en daarmee is dit faalpad niet significant. Impliciet wordt de faalkans meegenomen in faalpad 13.
13	Onderloopbaarheid	Filter functioneert niet: Chemische en/of bacteriologische verstopping	Bedreiging	Beheer	Door bacteriologische en chemische oorzaak raakt het filter(scherm) verstopt. De verstopping wordt niet gedetecteerd voordat hoogwater optreedt. De verstopping zorgt voor een dusdanige afname van de doorlatendheid dat heave achter het filterscherm kan ontstaan. Vervolgens kan de pipe doorgroeien tot het voorland. Hierbij moet rekening worden gehouden dat hieraan voorafgaand opbarsten / heave in het achterland plaats moet vinden alsmede pipegroei tot het filterscherm.	1. Het filter wordt altijd geheel gevuld met filterzand om diffusie van zuurstof tegen te gaan. 2. Het filter wordt aan de bovenzijde afgesloten (dop). 3. <i>In het ontwerp wordt in bepaalde scenario's rekening houden met een gereduceerde doorlatendheid van het filter.</i>	1. Spoelen van filter met schoon water om ingebrachte zuurstof te minimaliseren 2. Ontwikkeling van filter om natuurlijk (aneerob) grondwater in filter te brengen.	1. <i>Monitoring van anaerobe condities in filter</i> 2. Monitoring doorlatendheid filterscherm 3. <i>Reinigingstool als correctieve maatregel</i>	In het ontwerp wordt door de koker geheel te vullen en af te sluiten het risico dat zuurstof diffundeert naar de diepte van het geperforeerde deel geminimaliseerd. Met het uitvoeringsprotocol wordt de kans op optreden van het risico verder verkleind. Met monitoring wordt risico van optreden op meest kritieke punten in de gaten gehouden. Wanneer een verstopping gedetecteerd wordt is de reinigingstool beschikbaar als beheersmaatregel.	X		Uit onderzoek van AcaciaWater (document P15540003-RAP-TMA-01146) blijkt dat wanneer zowel in het ontwerp als in het installatieprotocol de beschreven maatregelen worden genomen de kans op bacteriologische / chemische verstopping (gedurende de levensduur) verwaarloosbaar is (1/1000 jaar) en als deze optreedt dan is deze waarschijnlijk lokaal beperkt over de tracé lengte. Tijdens het installatieproces wordt door de filterontwikkeling een referentie debiet verkregen. Met monitoring van waterspanningen op kritische locaties en een locatie waar pompproeven kunnen worden uitgevoerd (vergelijking met referentie debiet uit filterontwikkeling) wordt het risico verder gereduceerd. Daarnaast kan middels een simpele monitoringsactiviteit, via monsternamen checken van anaerobe condities op de kritische locaties, het risico jaren lang (onderhoudsvrij) in de gaten worden gehouden. Bij het detecteren van een verstopping zijn er verschillende herstelmaatregelen beschikbaar (regenereren filter, reinigingstool). Meer informatie over de exacte monitoring is gegeven in het beheer- en onderhoudsplan (document P15540003-PLA-TMA-01092). In het ontwerp wordt tevens rekening gehouden met een verstoppingsscenario waarmee inzicht wordt gegeven in het effect van een gereduceerde doorlatendheid op het veiligheidsniveau. De kans dat het faalpad daarmee tot een overstroming leidt lijkt daarom klein. Mogelijk heeft het faalpad wel een significante bijdrage aan de overstromingskans. Dit dient bepaald te worden op basis van de ontwerprijtlijn (P15540003-TMA-RAP-00416, paragraaf 2.6.2)
14	Onderloopbaarheid	Filter functioneert niet: verstopping filter door versmeerde perforaties	Bedreiging	Uitvoering	Door het tijdens de installatie versmeerd raken van de perforaties neemt de doorlatendheid van het filter zodanig af dat het filter onvoldoende doorlatend is ten opzichte van het in-situ zand. Dit kan alleen optreden als het reinigen van de perforaties (na het op diepte aanbrengen van de profielen) faalt. De verstopping wordt niet gedetecteerd voordat hoogwater optreedt dat leidt tot heave achter het filterscherm. De verstopping zorgt voor een dusdanige afname van de doorlatendheid dat heave achter het filterscherm kan ontstaan. Voorafgaand hieraan moet wel opbarsten / heave in het achterland plaats vinden alsmede pipegroei tot het filterscherm.	1. Reductie van doorlatendheid met 50% ten opzichte van het in-situ zand om o.a. rekening te houden met enige blijvende verstopping / vervuiling van de perforaties.	1. Reinigingstool voor schoon maken van perforaties na installatie. 2. Tijdens filterontwikkeling debiet registreren en bij afwijkende waarden eventueel herstelmaatregelen treffen		Met de ontwerpregel wordt de onzekerheid in de slaging van het reinigingsproces meegenomen. Voor storten van het filterzand wordt de doorlatendheid van het filter gecontroleerd met de registratie tijdens de filterontwikkeling. Met de reinigingstool kan worden bijgestuurd.		X	In het ontwerp wordt rekening gehouden met een veilige reductie van de doorlatendheid, oftewel aanvullende veiligheid, op basis van proefresultaten (document P15540003-RAP-TMA-01482). Doordat in de uitvoeringsfase de kans op een reductie van de doorlatendheid beheerst wordt (door schoon te maken en waar nodig bij te sturen) is de kans dat dit faalpad tot dijkdoorbraak onwaarschijnlijk en is dit faalpad niet significant.
15	Onderloopbaarheid	Filter functioneert niet: afname doorlatendheid door grondopspanning	Bedreiging	Uitvoering	Door toepassen van een grondverdringende installatietechniek ontstaat opspanning, c.q. verdichting, van in-situ zand. De doorlatendheid in de zone rondom het filterscherm neemt daardoor dusdanig af dat er een preferent stroompad onder het filterscherm door ontstaat. Dit leidt tot een faalpad wanneer ook heave achter het filterscherm optreedt. Vervolgens zal de pipe doorgroeien tot het voorland. Voorafgaand hieraan moet wel opbarsten / heave in het achterland plaats vinden alsmede pipegroei tot het filterscherm.	1. Reductie van doorlatendheid met 50% ten opzichte van het in-situ zand om o.a. rekening te houden met enige blijvende verstopping / vervuiling van de perforaties.			In het ontwerp wordt rekening gehouden met een gereduceerde doorlatendheid van het in-situ zand rondom het filter (in geohydrologisch model).		X	Uit de analyse van de resultaten van de maakbaarheidsproeven blijkt dat de invloed van de verdichting rondom het filterscherm leidt tot een afname van de doorlatendheid van het in-situ materiaal tot circa 50% van de initiële waarde. In het ontwerp (locatie en dimensionering) wordt hiermee rekening gehouden. Uit verkennende berekeningen blijkt dat de invloed op het stromingsbeeld door verdichting rondom het filterscherm beperkt is (document P15540003-RAP-TMA-00403). Doordat er geen heave achter het filterscherm optreedt is het faalpad niet significant.

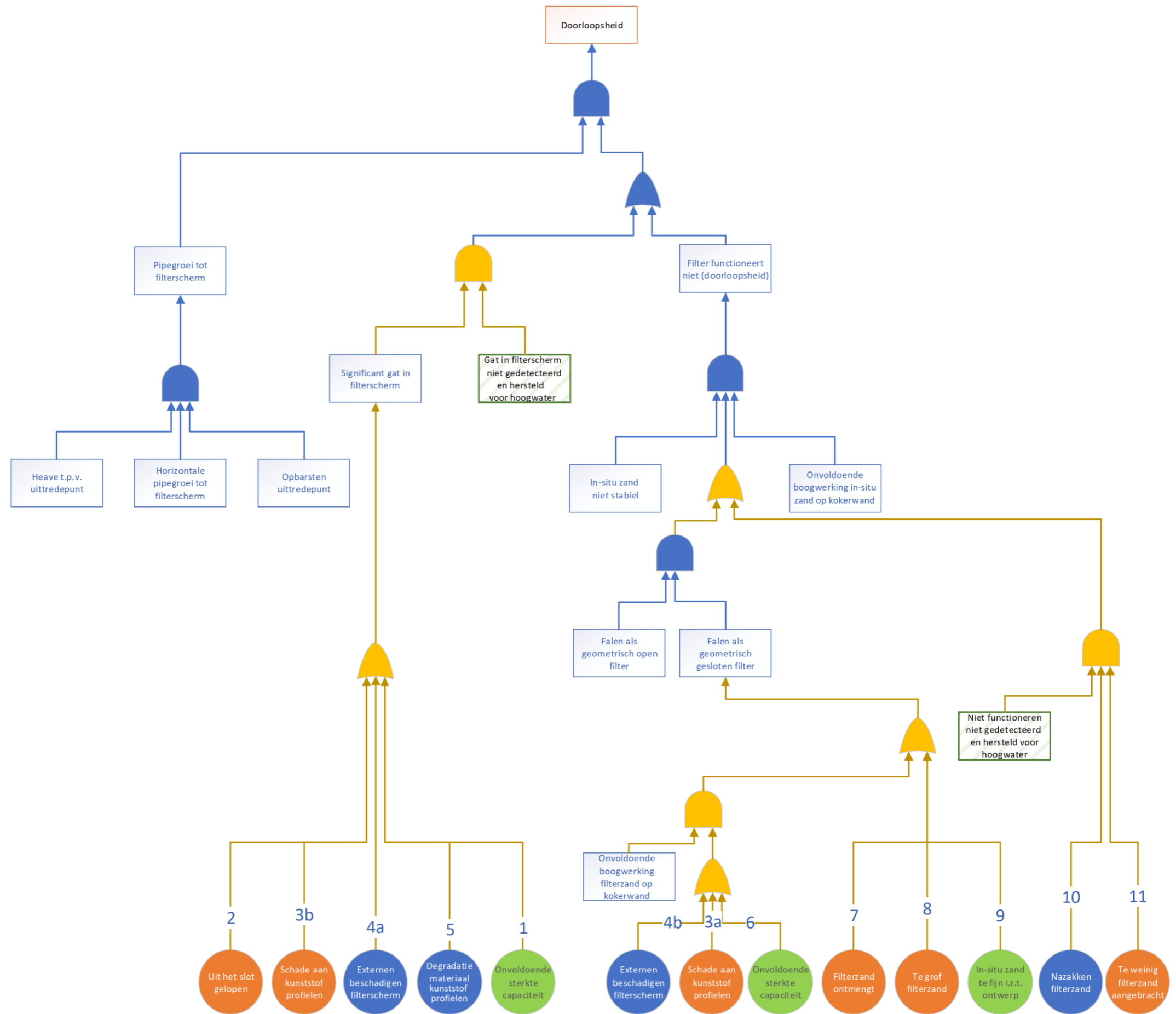
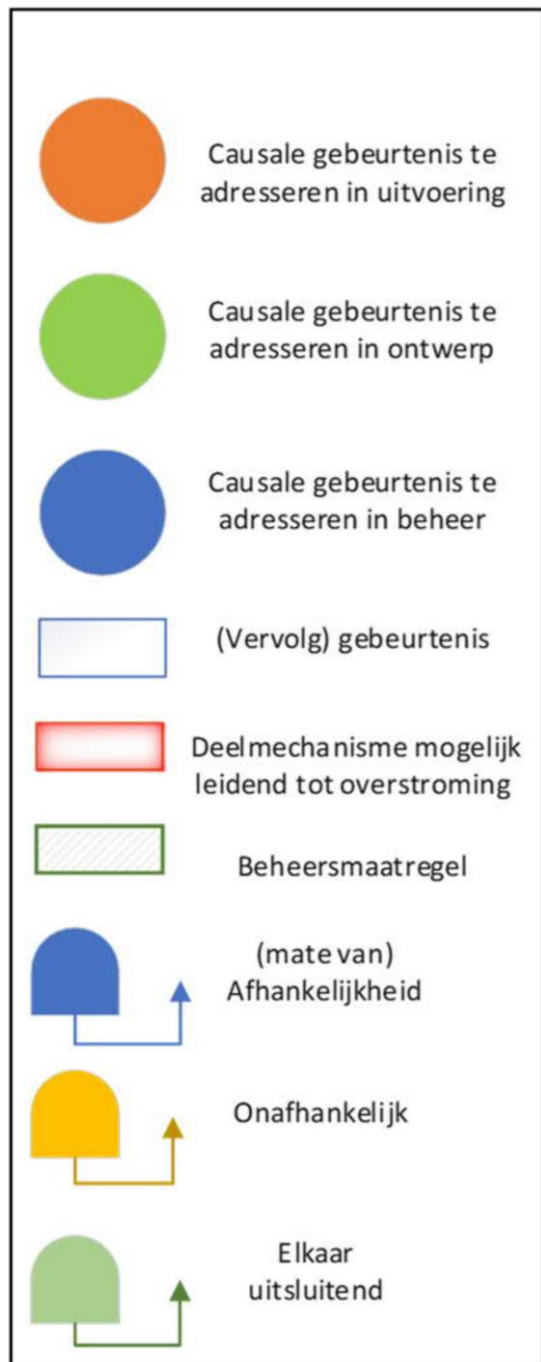
Codering	Deelmechanisme	Faalpad	Gewenst gedrag/ bedreiging	Te adresseren in	Toelichting faalpad	Maatregelen				Kwalitatieve beschouwing faalkans bijdrage		
						Ontwerpfase	Installatiefase	Beheerfase	Onderbouwing maatregelen	Significant	Niet significant	Motivatie
16	Onderlooptheid	Preferent stroompad onder filter: Toename doorlatendheid door grondontspanning	Bedreiging	Uitvoering	Door toepassen van een grondverwijderende installatiemethode ontstaat een zone rondom het filterscherm waar de doorlatendheid (significant) toeneemt. Door deze toename ontstaat een preferente lekgeweg met pipegroei onder het filter door. Voorafgaand hieraan moet wel opbarsten / heave in het achterland plaats vinden alsmede pipegroei tot het filterscherm.						X	Geen relevant faalpad omdat de toe te passen installatiemethode grondverdringend is.
17	Onderlooptheid	Preferent stroompad onder filter: in-situ zand doorlatender dan verwacht	Gewenst gedrag	Ontwerp	Het in-situ zand is (veel) meer doorlatend dan vooraf verwacht. Het doorlatendheidscontrast tussen het stroompad door het filterscherm en onder het filterscherm door is dusdanig dat het stroompad onder het filterscherm preferent is. Voorafgaand hieraan moet wel opbarsten / heave in het achterland plaats vinden alsmede pipegroei tot het filterscherm.	1. Check op doorlatendheid filterconstructie versus in-situ zand. Voor het in-situ zand wordt een representatieve waarde van de doorlatendheid gehanteerd. 2. Ontwerpen op heave			Door in het ontwerp (geohydrologisch model) rekening te houden met de verhouding tussen het in-situ zand en de te verwachten doorlatendheid van het filterzand wordt de kans op en het voorkomen van heave en daarmee onderlooptheid inzichtelijk gemaakt.		X	In de ontwerprijlijn (P15540003-RAP-TMA-00416, Bijlage C) is de invloed van verschillende in-situ doorlatendheden bij een standaard configuratie van het filterscherm beschouwd. Deze worden in het ontwerp herhaald met de gegeven methode voor een configuratie en gebiedspecifieke analyse. De lengte van profielen wordt dusdanig gekozen in het ontwerp dat er geen risico op heave achter het filterscherm is. Doordat de maximaal optredende heave-gradiënt een ontwerpuitgangspunt is, wordt deze achter het filterscherm niet overschreden. De bijdrage aan de faalkans is daarmee niet significant.
18	Onderlooptheid	Filterscherm niet diep genoeg: dikke of grillige deklaag	Bedreiging	Ontwerp	Door variatie in de ondergrond is (lokaal) een dikkere deklaag aanwezig. Hierdoor steekt een gedeelte van het geperforeerde deel in de deklaag ofwel in het meest negatieve geval het gehele geperforeerde deel. Dit wordt niet gedetecteerd in de uitvoering. Heave achter het filterscherm moet optreden voor doorgroei van de pipe. In het slechtste geval alleen over het onderste blinde deel. In alle andere gevallen zal het filter nog gedeeltelijk werken. Voorafgaand hieraan moet wel opbarsten / heave in het achterland plaats vinden alsmede pipegroei tot het filterscherm.	1. Voldoende grondonderzoek 2. Diepste puntniveau doortrekken tot volgende onderzoekspunt.			Voorafgaand aan installatie kans verkleinen door voldoende onderzoeksgegevens. Hiermee wordt gebiedsvariabiliteit in kaart gebracht. Veilige aanname voor bepaling filterdiepte. In geval van grootte variabiliteit: verificatie van ontwerp door registratie van inbrenggegevens. Bijsturen bij afwijkingen. (NB. Niet nodig bij Salmsteke.)		X	Als voldoende grondonderzoek wordt uitgevoerd conform de ontwerprijlijn (P15540003-RAP-TMA-00416, deel B) is de dikte van de deklaag en de variatie met voldoende mate van zekerheid vast te stellen. Daarbij is de kans op optreden van piping het grootst bij de dunste deklaag. Voor bepaling van het puntniveau wordt veiligheidshalve het diepst ontwerpniveau aangehouden tot het volgende onderzoekspunt, rekening houdend met vakindeling. Door de grote mate van zekerheid ten aanzien van het vaststellen van de piping gevoelige laag, de kans dat piping optreedt bij de dunste deklaag en de (onafhankelijke) schakels in het faalpad die moeten optreden is de kans op falen van de waterkering door dit faalpad niet significant.
19	Onderlooptheid	Filterscherm niet diep genoeg: niet in juiste laag	Bedreiging	Ontwerp	Het filterscherm bevindt zich niet in de juiste piping gevoelige laag. Er moet wel opbarsten / heave in het achterland plaats vinden alsmede pipegroei tot het filterscherm voordat de pipe gaat met beperkte of zelfs geen heaveweerstand onder het filterscherm door gaat.	1. Voldoende grondonderzoek 2. Diepste puntniveau doortrekken tot volgende onderzoekspunt.			Voorafgaand aan installatie kans verkleinen door voldoende onderzoeksgegevens. Veilige aanname voor bepaling filterdiepte.		X	Als voldoende grondonderzoek wordt uitgevoerd conform de ontwerprijlijn (P15540003-RAP-TMA-00416, deel B) is de piping gevoelige laag met dit onderzoek met grote mate van zekerheid vast te stellen (mede op basis van de korrelverdelingen). Voor bepaling van het puntniveau wordt veiligheidshalve het diepst ontwerpniveau aangehouden tot het volgende onderzoekspunt, rekening houdend met vakindeling. Door de grote mate van zekerheid ten aanzien van het vaststellen van de piping gevoelige laag en de (onafhankelijke) schakels in het faalpad die moeten optreden is de kans op falen van de waterkering door dit faalpad niet significant.
20	Onderlooptheid	Filterscherm niet diep genoeg: niet op diepte gekomen	Bedreiging	Uitvoering	Het filterscherm is tijdens de installatie niet op de ontwerpdiepte aangebracht. Hierdoor steekt een gedeelte van het geperforeerde deel in de deklaag ofwel in het meest negatieve geval het gehele geperforeerde deel. Dit is tijdens de installatie niet gedetecteerd en de mitigatie maatregel faalt. Heave achter het filterscherm moet optreden voor doorgroei van de pipe. In het slechtste geval alleen over het onderste blinde deel. In alle andere gevallen zal het filter nog gedeeltelijk werken. Er moet wel opbarsten / heave in het achterland plaats vinden alsmede pipegroei tot het filterscherm, opdat dit faalpad kan leiden tot doorgroei van de pipe onder de waterkering.	1. Ontwerpregel maximale profiellengte: 8 m	1. Uitvoerings-protocol 2. Trekken en opnieuw installeren 3. Voorboren 4. Kleine tracé wijziging in geval van aanwezigheid obstakel in ondergrond 4. (jet)groutkolom plaatsen om "gat" dicht te zetten		Risico beperken dat profielen niet op diepte komen. Uit de maakbaarheidsproeven in het veld blijkt dat profielen tot 8 meter zonder problemen inbrengbaar zijn. Registratie of profiel op diepte komt en of een maatregel genomen in uitvoeringsprotocol moet worden. Om zodoende de afwijking te constateren en te verhelpen		X	Door beperking van maximaal installeerbare lengte op basis van gebiedsspecifieke maakbaarheidsproef is het risico geminimaliseerd (document P15540003-RAP-TMA-00716). Alle profielen zijn op diepte gekomen. In het geval dat het profiel niet op diepte komt kan een correctieve maatregel worden genomen. Eventueel kan met voorboren een obstakel in de ondergrond worden verwijderd ofwel de kans dat op diepte wordt gekomen vergroot. Over een groot gedeelte van het tracé geldt dat wanneer de einddiepte niet wordt bereikt nog steeds filterwerking aanwezig is. Enerzijds doordat het tracé wordt ontworpen op basis van het diepst gelegen punt van het bovenkant van het zand. Anderzijds is nog steeds filterwerking aanwezig bij afwijkingen < 1m. Ook is in de meeste gevallen nog enige heave veiligheid aanwezig. Door onafhankelijke schakels is het faalpad met in achtneming van voorgestelde maatregelen niet significant.
21	Voorlooptheid	Filterscherm functioneert niet: mechanische verstopping	Bedreiging	Beheer	Door verstopping van het filter, met als oorzaak langdurige inspoeling van fijn materiaal, neemt de doorlatendheid dusdanig af dat opstuwning aan de voorzijde van het filterscherm ontstaat. Wanneer dit niet tijdig gedetecteerd en hersteld wordt dan kan dit leiden tot opbarsten bovenstrooms van het filterscherm. Er dient dan bovenstrooms van het filter nog wel heave over de deklaag plaats te vinden voordat de pipe kan groeien tot het intredepunt. Wanneer ook detectie en opkisten falen kan voorlooptheid optreden.	1. In ontwerp rekening houden met volledig ondoorlatend filterscherm t.b.v. toetsing op voorlooptheid. 2. Toetsing op interne stabiliteit van in-situ zand om mechanische verstopping te voorkomen. 3. In het ontwerp wordt in bepaalde scenario's rekening houden met een gereduceerde doorlatendheid van het filter.	1. Ontwikkeling van filter (afzuigen van fijn materiaal) en bepalen referentie debiet	1. Detectie verstopping o.b.v. monitoring en indien nodig dient de verstopping hersteld te worden. 2. Opkisten van zandmevoerende wellen bovenstrooms van filterscherm.	Vooraf in ontwerp rekening houden met locatie van het filterscherm om kans op opbarsten voor filterscherm te verkleinen (zie ontwerpmaatregelen faalpad 25) . Kans op optreden verstopping is minimaal met toetsing op interne stabiliteit in-situ zand. Daarnaast wordt het filter ontwikkeld waardoor fijne delen al worden afgezogen. Tevens wordt de doorlatendheid van het filterscherm gemonitord op de meest kritische locatie. Voor dijkdoorbraak kan nog worden ingegrepen door opkisten van de wel.		X	In achtergrond document filterregels wordt beschreven dat mechanische verstopping door toetsing op interne stabiliteit (van het in-situ zand) wordt voorkomen. Bij het ontwerp/de locatiebepaling dient een voldoende kleine kans van opbarsten/opdrijven bovenstrooms van het filterscherm aangegeven te worden (zie ontwerpmaatregelen van faalpad 25). Hierbij wordt veiligheidshalve al uitgegaan van een verstopt filter. Tijdens het installatieproces wordt het filter ontwikkeld en daarmee het fijne materiaal afgezogen. Hierbij wordt tevens een referentie debiet bepaald wat een maat geeft voor de doorlatendheid van iedere koker. Met monitoring op kritische locaties wordt het risico verder beperkt. Bij het detecteren van een verstopping is een herstelmaatregel beschikbaar. Het optreden van dit faalpad tot falen van de waterkering is niet waarschijnlijk en daarmee is dit faalpad niet significant. Impliciet wordt de faalkans meegenomen in faalpad 22.
22	Voorlooptheid	Filterscherm functioneert niet: bacteriologische / chemische verstopping	Bedreiging	Beheer	Door verstopping van het filter, met als oorzaak chemische / bacteriologische, neemt de doorlatendheid dusdanig af dat opstuwning aan de voorzijde van het filterscherm ontstaat. Wanneer dit niet tijdig gedetecteerd wordt en hersteld wordt dan kan dit leiden tot opbarsten bovenstrooms van het filterscherm. Er dient dan bovenstrooms van het filter nog wel heave over de deklaag plaats te vinden voordat de pipe kan groeien tot het intredepunt. Wanneer ook detectie en opkisten falen kan voorlooptheid optreden.	1. Het filter wordt altijd geheel gevuld met filterzand om diffusie van zuurstof tegen te gaan. 2. Het filter wordt aan de bovenzijde afgesloten (dop). 3. In ontwerp rekening houden met volledig ondoorlatend filterscherm t.b.v. toetsing op voorlooptheid.	1. Spoelen van filter met schoon water om ingebrachte zuurstof te minimaliseren 2. Ontwikkeling van filter om natuurlijk (aneeroob) grondwater in filter te brengen.	1. Detectie verstopping o.b.v. monitoring en indien nodig dient de verstopping hersteld te worden. 2. Opkisten van zandmevoerende wellen bovenstrooms van filterscherm.	In het ontwerp wordt door de koker geheel te vullen en af te sluiten het risico dat zuurstof diffundeert naar de diepte van het geperforeerde deel geminimaliseerd. Met het uitvoeringsprotocol wordt de kans op optreden van het risico verder verkleind. Met monitoring wordt risico van optreden op meest kritieke punten in de gaten gehouden. Wanneer een verstopping gedetecteerd wordt is de reinigingsstool beschikbaar als beheersmaatregel (in principe niet nodig doordat in het ontwerp al rekening wordt gehouden met een gereduceerde doorlatendheid (ondoerlatend scherm). Voor dijkdoorbraak kan nog worden ingegrepen door opkisten van de wel.	X	Uit onderzoek van Acacia water (document P15540003-RAP-TMA-01146) blijkt dat wanneer zowel in het ontwerp als in het installatieprotocol de beschreven maatregelen worden genomen de kans op bacteriologische / chemische verstopping (gedurende de levensduur) verwaarloosbaar is (1/1000 jaar) en als deze optreedt dan is deze waarschijnlijk lokaal beperkt over de tracé lengte. Tijdens het installatieproces wordt door de filterontwikkeling een referentie debiet verkregen. Met monitoring van waterspanningen op kritische locaties en een locatie waar pompproeven kunnen worden uitgevoerd (vergelijking met referentie debiet uit filterontwikkeling) wordt het risico verder gereduceerd. Daarnaast kan middels een simpele monitoringsactiviteit, via monsternamen checken van anaerobe condities op de kritische locaties, het risico jaren lang (onderhoudsvrij) gecontroleerd worden. Bij het detecteren van een verstopping zijn er verschillende herstelmaatregelen beschikbaar (regenereren filter, reinigingsstool). Meer informatie over de exacte monitoring is gegeven in het beheer- en onderhoudsplan (document P15540003-PLA-TMA-01092). In het ontwerp wordt tevens al rekening gehouden met een verstoppingsscenario. De kans dat het faalpad daarmee tot een overstroming leidt lijkt daarom klein. Mogelijk heeft het faalpad wel een significante bijdrage aan de overstromingskans. Dit dient bepaald te worden op basis van de ontwerprijlijn (P15540003-TMA-RAP-00416, paragraaf 2.6.3)	

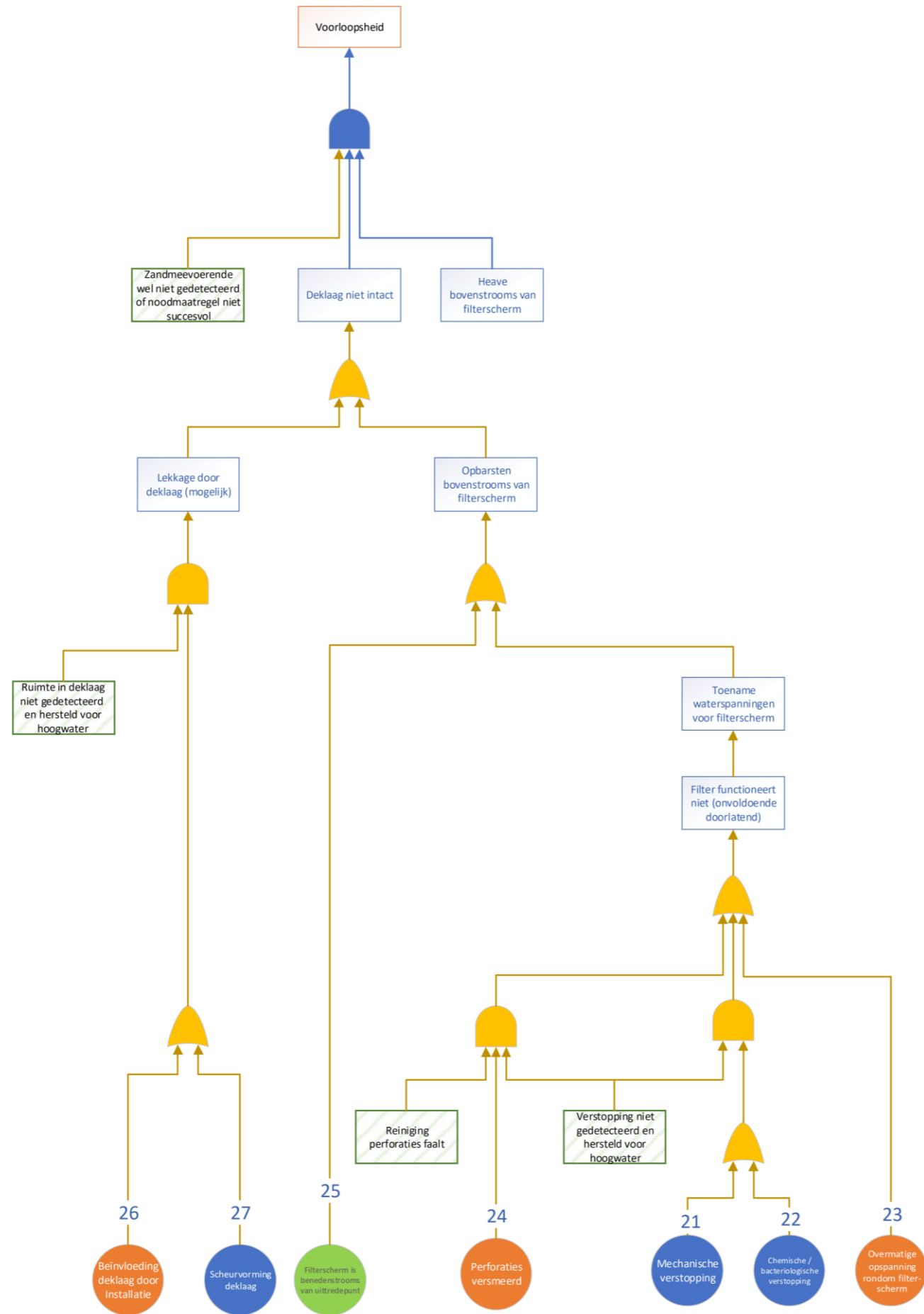
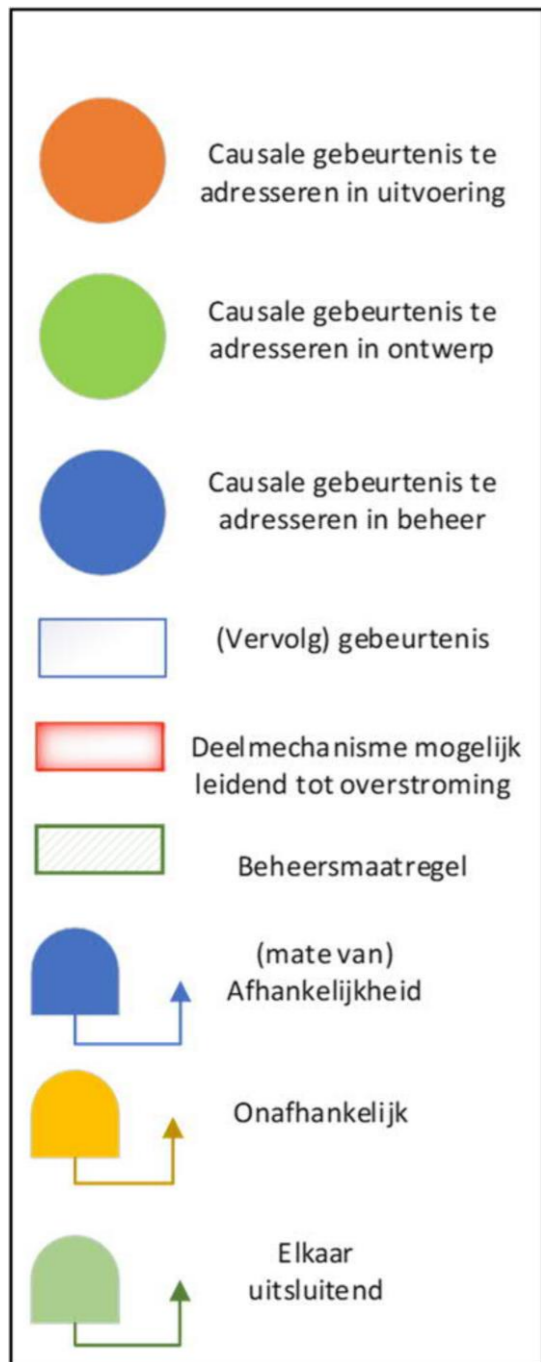
Codering	Deelmechanisme	Faalpad	Gewenst gedrag/ bedreiging	Te adresseren in	Toelichting faalpad	Maatregelen			Significant	Niet significant	Kwalitatieve beschouwing faalkans bijdrage	
						Ontwerpfase	Installatiefase	Beheerfase				
23	Voorloopsheid	Filterscherm functioneert niet: toename waterspanningen voor filterscherm door grondverdringing	Bedreiging	Uitvoering	Door toepassen van een grondverdringende installatietechniek ontstaat opspanning, c.q. verdichting, en neemt de doorlatendheid dusdanig af dat opstuwung aan de voorzijde van het filterscherm ontstaat. Dit kan leiden tot opbarsten bovenstrooms van het filterscherm tijdens hoogwater. Er dient dan bovenstrooms van het filter nog wel heave over de deklaag plaats te vinden voordat de pipe kan groeien tot het intredepunt. Wanneer ook detectie en opkisten falen kan voorloopsheid optreden.	1. Rekening houden met afname doorlatendheid rondom scherm (50% van initiele doorlatendheid).		1. Opkisten van zandmevoerende wellen bovenstrooms van filterscherm.	Vooraf in ontwerp rekening houden met locatie van het filterscherm om kans op opbarsten voor filterscherm te verkleinen (zie ontwerpmaatregelen faalpad 25), door rekening te houden met afname van doorlatendheid door grondverdringend inbrengen kan de resulterende opstuwung meegenomen worden. Met het opkisten is een maatregel beschikbaar om bezwijken eventueel te voorkomen.		X	Uit de analyse van de resultaten van de maakbaarheidsproeven blijkt dat de invloed van de verdichting rondom het filterscherm leidt tot een afname van de doorlatendheid van het in-situ zand tot circa 50% van de initiele waarde. In het ontwerp (locatie en dimensionering) wordt hiermee rekening gehouden. Uit verkennde berekeningen blijkt dat de invloed op het stromingsbeeld door verdichting rondom het filterscherm beperkt is (document P15540003-RAP-TMA-00403). Door toepassen van ontwerpmaatregelen van faalpad 25 is de kans op opbarsten voor het scherm klein. Indien er toch een wel optreedt voor het filterscherm kan worden ingegrepen door deze op te kisten. Hierdoor is het optreden van dit faalpad tot dijkdoorbraak onwaarschijnlijk en is dit faalpad niet significant.
24	Voorloopsheid	Filterscherm functioneert niet: toename waterspanningen voor filterscherm door versmeerde perforaties	Bedreiging	Uitvoering	Door het versmeerd raken van de perforaties tijdens de installatie neemt de doorlatendheid dusdanig af dat opstuwung aan de voorzijde van het scherm ontstaat. Wanneer de reiniging na het installeren faalt en dit niet tijdig gedetecteerd en hersteld wordt dan kan dit leiden tot opbarsten bovenstrooms van het filterscherm tijdens hoogwater. Er dient dan bovenstrooms van het filter nog wel heave over de deklaag plaats te vinden voordat de pipe kan groeien tot het intredepunt. Wanneer ook detectie en opkisten falen kan voorloopsheid optreden.	1. Reductie van doorlatendheid met 50% ten opzichte van het in-situ zand om rekening te houden met enige blijvende verstopping / vervuiling van de perforaties.	1. Reinigingstool voor schoonmaken van perforaties na installatie. 2. Tijdens filterontwikkeling debiet registreren en bij afwijkende waardes eventueel herstelmaatregelen treffen.	1. Opkisten wel bovenstrooms van filterscherm	Met de reinigingstool wordt de kans op verstopping door versmeren gereduceerd. Dit wordt gecontroleerd met de debietregistratie tijdens de filterontwikkeling. Bij afwijkingen kan worden bijgestuurd. Door het meenemen van enige mate van doorlatendheidsreductie wordt de onzekerheid in de slaging van een volledige reiniging meegenomen. Met het opkisten is een maatregel beschikbaar om bezwijken eventueel te voorkomen.		X	In het ontwerp wordt rekening gehouden met een veilige reductie van de doorlatendheid, oftewel aanvullende veiligheid, op basis van maakbaarheidsproeven (document P15540003-RAP-TMA-01482). Doordat in de uitvoeringsfase de kans op een reductie van de doorlatendheid beheerst wordt (door schoon te maken en waar nodig bij te sturen) is de kans op opbarsten voor het scherm door versmering van de perforaties onwaarschijnlijk. Deze kans wordt verder beperkt door toepassen van ontwerpmaatregelen van faalpad 25 is de kans op opbarsten voor het filterscherm klein. Indien er toch een wel optreedt voor het scherm kan worden ingegrepen door deze op te kisten. Hierdoor is het optreden van dit faalpad tot dijkdoorbraak onwaarschijnlijk en is dit faalpad niet significant.
25	Voorloopsheid	Filterscherm benedenstrooms van opbarstpunt: ondergrond variatie	Gewenst gedrag	Ontwerp	Door lokale variatie in de ondergrond (deklaagdikte/gewicht) zou het maatgevende opbarstpunt voor het filterscherm kunnen liggen. Na opbarsten en heave van/over de deklaag voor het filterscherm kan horizontale pipegroei tot het intredepunt optreden. Wanneer detectie en opkisten van de wel niet succesvol is, kan de pipe doorgroeien naar het intredepunt.	1. Ontwerpregel toepassen: kans op opdrijven voor het filterscherm, gegeven opdrijven bij (maatgevend) uittredepunt = voldoende kleine bijdrage aan faalkans. 2. Ontwerpregel toepassen: kans op opdrijven voor het filterscherm significant kleiner is dan de kans op opdrijven achter het filterscherm. 3. Ontwerp baseren op voldoende grondonderzoek.		1. Opkisten wel bovenstrooms van filterscherm	In ontwerp wordt rekening gehouden met locatie van het filterscherm om de kans op opbarsten voor het scherm te verkleinen, hierbij dient voldoende grondonderzoek beschikbaar te zijn. Met het opkisten is een maatregel beschikbaar om bezwijken te voorkomen.		X	Door voldoende grondonderzoek wordt de te verwachten variatie (oorzaak) van deklaagdikte en -gewicht inzichtelijk gemaakt. Door vervolgens in het ontwerp en de locatiebepaling de ontwerpregels 1 en 2 toe te passen, kan het risico dusdanig beheerst worden dat dit faalpad geen significante bijdrage levert aan de overstromingskans. Als voorloopsheid toch optreedt kan een beheersmaatregel (wel opkisten) worden genomen.
26	Voorloopsheid	Lekkage door deklaag: installatie effecten	Bedreiging	Uitvoering	Door installatie effecten is de deklaag dusdanig nadelig beïnvloed dat er lekkage door de deklaag en deels aangebrachte kleikist voor het filterscherm optreedt. Er dient dan bovenstrooms van het filter nog wel heave over de deklaag plaats te vinden voordat de pipe kan groeien tot het intredepunt. Wanneer ook detectie en opkisten falen kan voorloopsheid optreden.		1. De werksleuf wordt opgevuld met een kleikist met voldoende breedte rondom het filterscherm.	1. Opkisten wel bovenstrooms van filterscherm	Door een kleikist rondom de bovenkant het filterscherm aan te brengen worden de eventuele installatie effecten en daarmee de kans van optreden geminimaliseerd. Met het opkisten is een maatregel beschikbaar om bezwijken te voorkomen.		X	Uit maakbaarheidsproeven (document P15540003-RAP-TMA-00716) blijkt dat de beïnvloeding van de deklaag (toename van doorlatendheid) door het trillend installeren nihil is. Door in het werkproces rondom het filterscherm aan te vullen met een kleikist wordt de kans van optreden voldoende klein geacht. Daarnaast is een beheersmaatregel beschikbaar in het faalpad. Daarmee wordt geconcludeerd dat dit faalpad niet significant is.
27	Voorloopsheid	Lekkage door deklaag: scheurvorming deklaag	Bedreiging	Beheer	In de gebruiksfase kunnen door bijvoorbeeld droogte dusdanige scheurvorming in de deklaag opgetreden dat de integriteit nadelig is beïnvloed en er lekkage door de deklaag (en kleikist) voor het filterscherm optreedt. Dit kan alleen optreden als de scheurvorming niet gedetecteerd wordt. Er dient dan bovenstrooms van het filter nog wel heave over de deklaag plaats te vinden voordat de pipe kan groeien tot het intredepunt. Wanneer ook detectie en opkisten falen kan voorloopsheid optreden.			1. Protocol wat te doen als reflectie (droogte) scheuren rondom filterscherm optreden 2. Inspectie van (droogte)scheuren inclusief dichten van eventuele scheuren. 3. Opkisten wel bovenstrooms van filterscherm	Voorafgaand aan hoogwater en tijdens droogte dient geïnspecteerd te worden op scheuren voor het filterscherm. Vervolgens kan een eventuele lekkage deklaag worden hersteld, om het risico op voorloopsheid te beheersen. Met het opkisten is een maatregel beschikbaar om bezwijken te voorkomen.		X	De kans op aanwezigheid van (diepe) scheurvorming tijdens hoogwater is beperkt. De kans hierop wordt verder verkleind door alvorens hoogwater en tijdens droogte hierop te inspecteren en indien nodig herstelmaatregelen te treffen. Vervolgens dient ook nog heave voor het filterscherm op te treden. Er is een maatregel beschikbaar om falen van de waterkering alsnog te voorkomen. Het risico op dit faalpad is daarom beperkt en de bijdrage aan de overstromingskans niet significant.
28	Bovenloopsheid	Bovenkant filterscher open: afsluiting bovenkant beschadigd in gebruiksfase	Bedreiging	Beheer	In de gebruiksfase wordt in de beheerstrook van het waterschap werkzaamheden uitgevoerd die er voor zorgen dat de afdichting op het filterscherm faalt. Dit wordt niet gedetecteerd en hersteld voor hoogwater. Door toename van de waterdruk (bij hoogwater) faalt de afsluiting van de bovenkant (dop) en krijgt het filterscherm een drainage functie. Het filterzand moet uitspoelen (heave) om vervolgens tot bovenloopsheid te leiden. Daarbij moet ook het in-situ zand het filter inspoelen, oftewel onvoldoende boogwerking op de perforaties. Het ontstaan van de zandmevoerende wel wordt daarnaast niet gedetecteerd of de noodmaatregelen zijn niet succesvol.	1. Locatie van filterscherm in beheerstrook		1. 'No work' zone in beheerstrook en handhaving hierop.	Door plaatsing van het filterscherm in de (no work) beheerstrook wordt de kans op beschadiging verkleind.		X	Geen significant faalpad. Er zijn verschillende maatregelen beschikbaar in de ontwerp, installatie en beheersfase om het risico op bezwijken van de afsluiting te beperken. Bij bezwijken van de afsluiting, gaat het systeem als drainage werken, en zijn de vervolgmechanisme onwaarschijnlijk. Doordat in dat geval reductie van stijghoogte optreedt in de zandlaag (door werking als waterontspanner) is het verhang niet voldoende groot om te zorgen voor het verticaal uitspoelen van je filterzand. Daarnaast zijn er nog een paar schakels, robuustheid, aanwezig alvorens deze faalpaden kunnen leiden tot bezwijken van de waterkering.
29	Bovenloopsheid	Bovenkant filterscherm open: afsluiting bovenkant niet goed aangebracht	Bedreiging	Uitvoering	In de installatiefase is de afsluiting van de bovenkant (dop) niet goed aangebracht waardoor de afdichting van het filterscherm faalt. Door toename van de waterdruk (bij hoogwater) faalt de dop en krijgt het filterscherm een drainage functie. Het filterzand moet uitspoelen (heave) om vervolgens tot bovenloopsheid te leiden. Daarbij moet ook het in-situ zand het filter inspoelen, oftewel onvoldoende boogwerking op de perforaties. Het ontstaan van de zandmevoerende wel wordt daarnaast niet gedetecteerd of de noodmaatregelen zijn niet succesvol.		1. Werkprotocol voor aanbrengen afsluiting bovenkant 2. Vastlegging (geboorte)gegevens zoals check op afsluiting bovenkant	1. Opkisten wel in beheerstrook	Door tijdens de uitvoering een controle uit te voeren wordt de kans op verkeerd aanbrengen van de afsluiting verkleind.		X	Met het gestandaardiseerde werkprotocol en de vastlegging (met waar nodig bijsturing) van de gegevens wordt de bijdrage aan de overstromingskans als niet significant beschouwd.
30	Bovenloopsheid	Bovenkant filterscherm open: afsluiting bovenkant onvoldoende sterk	Bedreiging	Ontwerp	De belasting (tijdens hoogwater) op de afsluiting van de bovenkant (dop) van het filterscherm is groter dan de sterkte, waardoor de afsluiting van het filterscherm faalt. Het filterscherm krijgt een drainage functie. Het filterzand moet uitspoelen (heave) om vervolgens tot bovenloopsheid te leiden. Daarbij moet ook het in-situ zand het filter inspoelen, oftewel onvoldoende boogwerking op de perforaties. Het ontstaan van de zandmevoerende wel wordt daarnaast niet gedetecteerd of de noodmaatregelen zijn niet succesvol.	1. Voldoende sterktecapaciteit tegen waterdruk van afsluiting (en verbinding)		1. Werkprotocol voor aanbrengen afsluiting bovenkant 2. Vastlegging (geboorte)gegevens zoals check op afsluiting bovenkant	Door voldoende veilig te ontwerpen wordt de kans op bezwijken van de afsluiting verkleind.		X	De afsluiting van de bovenkant (dop) is gecertificeerd op een belasting van 50 kPa (5 meter waterkolom). De lassen hebben een sterkte van minimaal 400 kPa druk in de koker (40 meter waterkolom). In de ontwerprijtlijn (P15540003-RAP-TMA-00416, deel B) wordt hierop getoetst, zodat de optredende belasting bij hoogwater kleiner is dan de sterkte. Dit faalpad heeft levert daardoor geen significante bijdrage aan de overstromingskans.

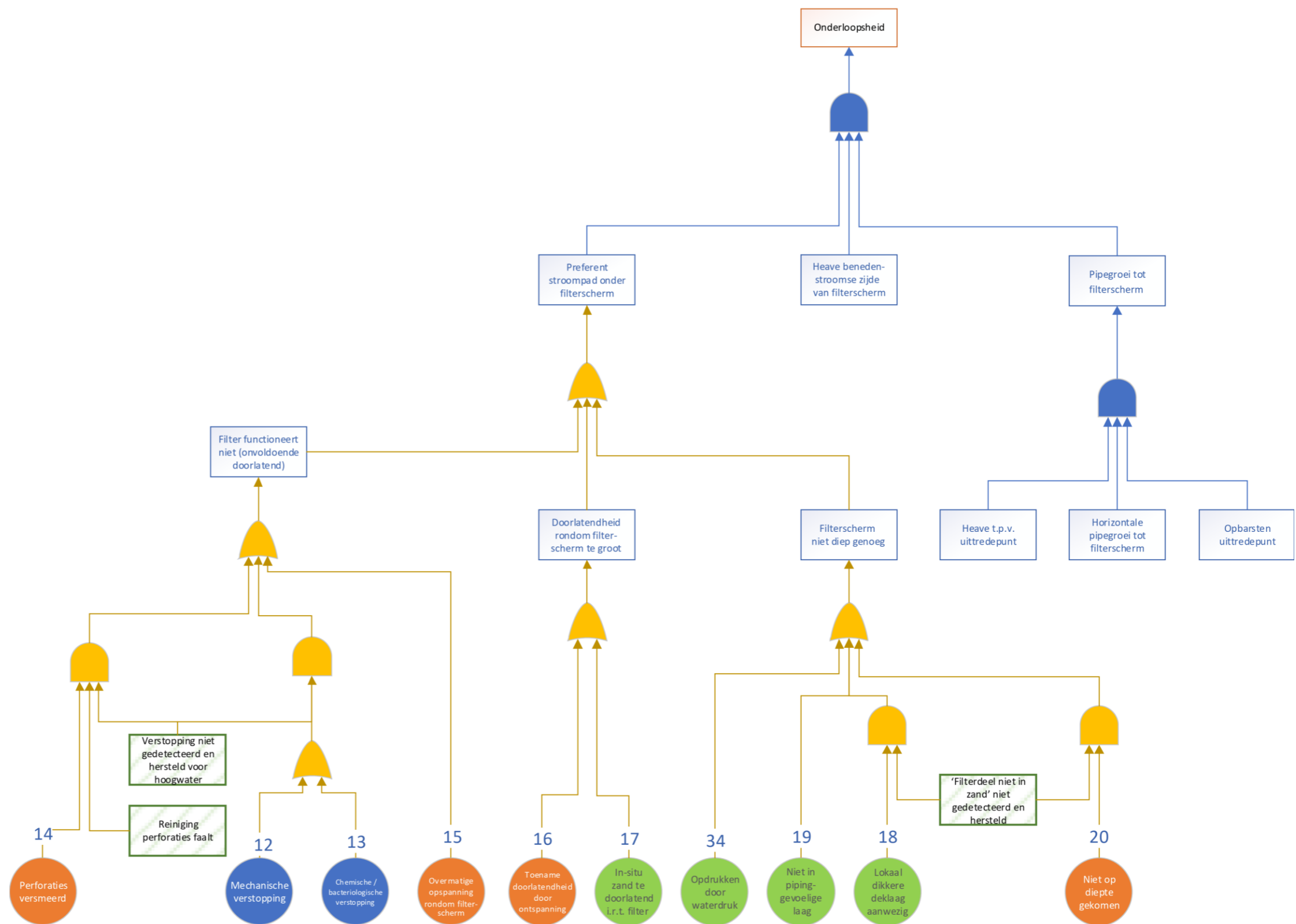
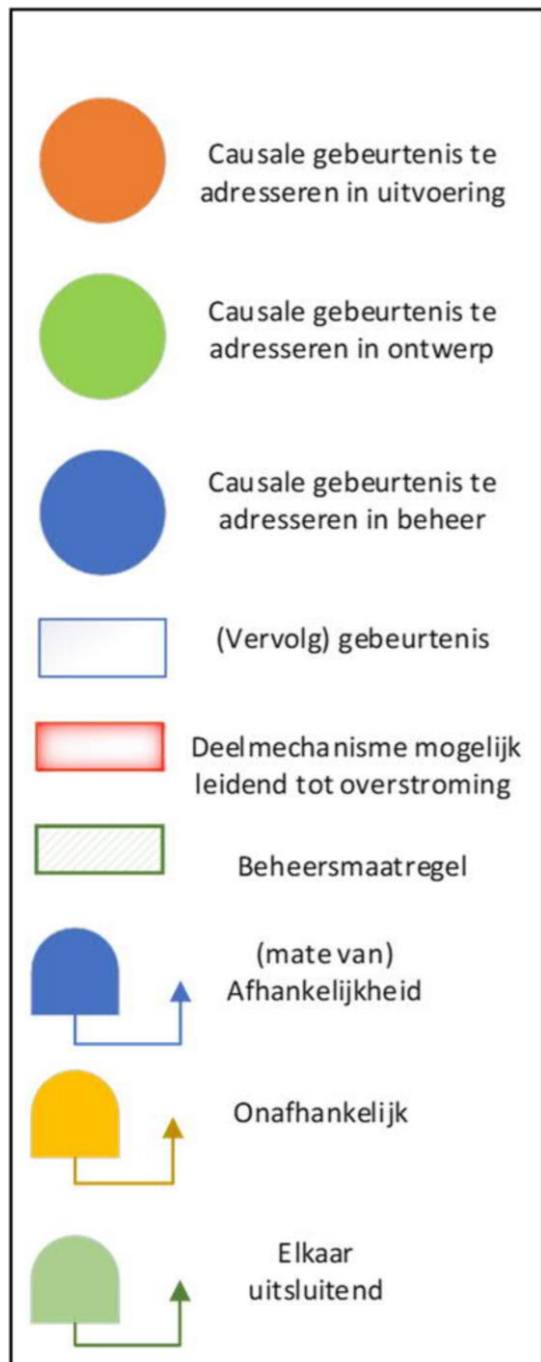
Codering	Deelmechanisme	Faalpad	Gewenst gedrag/ bedreiging	Te adresseren in	Toelichting faalpad	Maatregelen			Kwalitatieve beschouwing faalkans bijdrage			
						Ontwerpfase	Installatiefase	Beheerfase	Onderbouwing maatregelen	Significant	Niet significant	Motivat
31	Achterloopsheid	Pipegroei langs filterscherm: kwelweglengte tekort	Gewenst gedrag	Ontwerp	De lengte van het filterscherm is dusdanig kort doorgezet dat er een preferente weg om het filterscherm heen is (in langsrichting). Hiervoor dient wel eerst opbarsten en heave (in het achterland) en pipegroei tot het filterscherm op te treden.	1. Filterscherm over voldoende lengte doorzetten met ontwerpregel vergelijkbaar voor heaveschermen			Door voldoende veilig te ontwerpen wordt de kans op optreden geminimaliseerd.		X	Bijdrage aan de overstromingskans van dit faalpad kan voldoende klein gemaakte worden door in het ontwerp de benodigde lengte tegen achterloopsheid mee te nemen.
32	Achterloopsheid	Pipegroei langs filterscherm: aansluiting op (bestaande) pipingmaatregel onvoldoende	Bedreiging	Ontwerp	De aansluiting op een reeds aanwezige pipingmaatregel is onvoldoende, waardoor terugschrijdende erosie tussen het filterscherm en de bestaande maatregel niet wordt voorkomen. Hiervoor dient wel eerst opbarsten en heave (in het achterland) en pipegroei tot het filterscherm op te treden.	1. Aansluitingen ontwerpen conform OBOR	1. <i>inzetten van een (jet)groutkolom om aansluitingen te realiseren</i> 2. <i>overgang in een (cement)bentonietkolo m plaats</i>		Door voldoende veilig te ontwerpen wordt de kans op optreden geminimaliseerd.		X	Binnen STE zijn geen aansluitingen op reeds bestaande pipingmaatregelen benodigd. Alleen dient de aansluiting op de heaveschermen (bij de opritten) voldoende veilig te worden ontworpen conform ontwerprichtlijn (P15540003-RAP-TMA-00416, hoofdstuk 9). Faalpad is niet significant.
33	Macrostabieliteit binnenwaarts	Reductie macrostabieliteit binnenwaarts: afname stabiliteit door opstuwing	Gewenst gedrag	Ontwerp	Door aanwezigheid van het filterscherm in het dijklichaam wordt de waterspanning in het dijklichaam verhoogd. Dit leidt vervolgens tot een afname van de sterkte en daarmee stabiliteit van het grondlichaam.	1. Toetsing conform PPE / PPL t.a.v. stabiliteit incl. toename waterspanning volgens uitstromingsberekening.			Beheersen van risico d.m.v. ontwerpcheck.		X	Faalpad is niet waarschijnlijk. In de ontwerprichtlijn (P15540003-RAP-TMA-00416, deel B) wordt de toetsing van de stabiliteit voorgeschreven. Aangehouden wordt dat onder WBN condities de aanwezigheid van het filterscherm geen significante invloed heeft op de veiligheid ten aanzien van stabiliteit.
34	Onderloopsheid	Filterscherm niet diep genoeg: opdrukken door waterdruk	Gewenst gedrag	Ontwerp	Het filterscherm wordt aan de bovenzijde voorzien van een waterdichte afsluiting. Door de (diepte)ligging van het filterscherm zal onder WBN condities een opwaartse waterdruk tegen de onderzijde van deze afsluiting staan. Wanneer de opwaartse waterdruk groter is dan de grondmechanische (trek) capaciteit kan het filterscherm worden opgedrukt. Het opdrukken van het filterscherm kan er mogelijk voor zorgen dat het geperforeerde deel zich niet meer in de piping gevoelige laag bevindt. In dat geval heeft het filterscherm slechts een beperkte (tot geen) heave weerstand om vrije doorgang van een pipe onder het scherm door te voorkomen. Hiervoor dient wel eerst opbarsten, heave en pipegroei tot scherm op te treden.						X	Uit de maakbaarheidsproeven blijkt dat bij trekken van de filterschermen een kracht van 30 tot 80 kN nodig was om het profiel uit de grond te trekken, waarbij grondverwijderend vorgeboord was om de wrijving te reduceren (P15540003-RAP-TMA-01492). De opwaartse waterdruk zorgt voor een omhoog gerichte kracht van ca. 1 kN (tweemaal max. 0,5 bar op de deksel bij ca. 10.000 mm ² per koker). Oftewel de veiligheid tussen de tegenwerkende grondwrijving en de opwaartse kracht is heel groot. Het is onwaarschijnlijk dat het filterscherm opgedrukt zal worden.
35	Bovenloopsheid	Lekkage door deklaag: installatie effecten	Bedreiging	Uitvoering	Door installatie effecten is de deklaag (en kleikist) dusdanig nadelig beïnvloed dat er ruimte rondom (verhoogde doorlatendheid) rondom het filterscherm is ontstaan. Over de lengte van het filterscherm in de deklaag is heave weerstand aanwezig. Wanneer dit optreedt kan de pipe mogelijk boven het filterscherm doorgroeien.	1. Afwerking tenminste 60 cm en maximaal 100 cm onder maaiveld	1. Er wordt gewerkt in een werksleuf, welke wordt afgewerkt met een kleikist rondom het filterscherm	1. Opkisten wel	Door de ontwerpregel steekt het bovenste gedeelte van het filterscherm altijd in de deklaag. Door de werk af te werken met een kleikist ontstaat een goede aansluiting tussen deklaag en filterscherm.		X	In het geval ruimte rondom het filterscherm ontstaat, ondanks toepassen van een kleikist rondom het profiel, zal dit eerder leiden tot voorloopsheid dan bovenloopsheid. De dekking boven het filterscherm is beperkt, waardoor de kans groter is dat de deklaag net voor het filterscherm opbarst dan dat er een kanaal richting het achterland ontstaat. Voor onderbouwing van het vergelijkbare faalpad dat leidt tot voorloopsheid zie faalpad 26.
36	Bovenloopsheid	Lekkage door deklaag: scheurvorming deklaag	Bedreiging	Beheer	In de gebruiksfase kan, door bijvoorbeeld droogte, ruimte ontstaan tussen de deklaag (kleikist) en filterscherm. De ontstane ruimte wordt niet gedetecteerd. Over de lengte van het filterscherm in de deklaag is heave weerstand aanwezig. Wanneer dit optreedt kan de pipe mogelijk boven het filterscherm doorgroeien.	1. Afwerking tenminste 60 cm en maximaal 100 cm onder maaiveld	1. Er wordt gewerkt in een werksleuf, welke wordt afgewerkt met een kleikist rondom het filterscherm	1. Opkisten wel	Door de ontwerpregel steekt het bovenste gedeelte van het filterscherm altijd in de deklaag. Door de werksleuf af te werken met een kleikist ontstaat een goede aansluiting tussen deklaag en filterscherm.		X	In het geval ruimte rondom het filterscherm ontstaat, ondanks toepassen van een kleikist rondom het profiel, zal dit eerder leiden tot voorloopsheid dan bovenloopsheid. De dekking boven het filterscherm is beperkt, waardoor de kans groter is dat de deklaag net voor het filterscherm opbarst dan dat er een kanaal richting het achterland ontstaat. Voor onderbouwing van het vergelijkbare faalpad dat leidt tot voorloopsheid zie faalpad 27.
37	Macrostabieliteit binnenwaarts	Filterscherm functioneert niet: mechanische verstopping	Bedreiging	Beheer	Door verstopping van het filter, met als oorzaak langdurige inspoeling van fijn materiaal, neemt de doorlatendheid dusdanig af dat opstuwing aan de voorzijde van het filterscherm ontstaat. Wanneer dit niet tijdig gedetecteerd en hersteld wordt dan kan dit leiden tot een afname van de stabiliteit (STBI) van de waterkering	1. Reductie van doorlatendheid van het filterscherm tot 0 m/d. 2. Stabiliteit bepalen zonder aanwezigheid van filterscherm 3. Toetsing op interne stabiliteit van in-situ zand om mechanische verstopping te voorkomen.	1. Ontwikkeling van filter (afzuigen van fijn materiaal) en bepalen referentie debiet	1. Monitoring doorlatendheid filterscherm 2. <i>Reinigingstool als correctieve maatregel</i>	Er wordt in de toetsing van de stabiliteit rekening gehouden met een (zeer) veilige aanname: doorlatendheid filterscherm = 0 m/d en deze is niet aanwezig in doorsnede toets. Bij afwijkingen in doorlatendheid op basis van monitoring kan worden bijgesteld		X	In het ontwerp wordt rekening gehouden met een reductie van de doorlatendheid van het filterscherm tot 0 m/d. Dit geeft een bovengrens van de opstuwing. In de uitvoeringsfase wordt de kans op een reductie van de doorlatendheid beheerst (door filterontwikkeling en waar nodig bij te sturen). In het ontwerp wordt de stabiliteit van de waterkering (zonder constructieve element) inclusief maximale opstuwing (filterscherm is 100% verstopt) getoetst. Hierdoor is het optreden van dit faalpad tot dijkdoorbraak onwaarschijnlijk en is dit faalpad niet significant.
38	Macrostabieliteit binnenwaarts	Filterscherm functioneert niet: bacteriologische / chemische verstopping	Bedreiging	Beheer	Door verstopping van het filter, met als oorzaak chemische / bacteriologische verstopping, neemt de doorlatendheid dusdanig af dat opstuwing aan de voorzijde van het filterscherm ontstaat. Wanneer dit niet tijdig gedetecteerd wordt en hersteld wordt dan kan dit leiden tot een afname van stabiliteit (STBI)	1. Reductie van doorlatendheid van het filterscherm tot 0 m/d. 2. Stabiliteit bepalen zonder aanwezigheid van filterscherm 3. Het filter wordt altijd geheel gevuld met filterzand om diffusie van zuurstof tegen te gaan. 4. Het filter wordt aan de bovenzijde afgesloten (dop).	1. Spoelen van kokers met schoon water om ingebrachte zuurstof te minimaliseren 2. Ontwikkeling van filter om natuurlijk (anearoo) grondwater in filter te brengen.	1. Monitoring van anearobe condities in filter 2. Monitoring doorlatendheid filterscherm 3. <i>Reinigingstool als correctieve maatregel</i>	Er wordt in de toetsing van de stabiliteit rekening gehouden met een (zeer) veilige aanname: doorlatendheid filterscherm = 0 m/d en deze is niet aanwezig in doorsnede toets. Bij afwijkingen in monitoringsdata kan worden bijgesteld.		X	In het ontwerp wordt rekening gehouden met een reductie van de scherm doorlatendheid tot 0m/d. Dit geeft een bovengrens van de opstuwing. In de uitvoeringsfase wordt de kans op een reductie van de doorlatendheid beheerst (door filterontwikkeling en waar nodig bij te sturen). In het ontwerp wordt de stabiliteit van de waterkering (zonder constructieve element) inclusief maximale opstuwing (scherm = 100% verstopt) getoetst. Hierdoor is het optreden van dit faalpad tot dijkdoorbraak onwaarschijnlijk en is dit faalpad niet significant.
39	Macrostabieliteit binnenwaarts	Filterscherm functioneert niet: toename waterspanningen voor filterscherm door versmeerde perforaties	Bedreiging	Uitvoering	Door het versmeerd raken van de perforaties tijdens de installatie neemt de doorlatendheid dusdanig af dat opstuwing aan de voorzijde van het filterscherm ontstaat. Wanneer de reiniging na het installeren faalt en dit niet tijdig gedetecteerd en hersteld wordt dan kan dit leiden tot een afname van stabiliteit (STBI) van de waterkering.	1. Reductie van doorlatendheid van het filterscherm tot 0 m/d. 2. Stabiliteit bepalen zonder aanwezigheid van filterscherm	1. Reinigingstool voor schoonmaken van perforaties na installatie. 2. Tijdens filterontwikkeling debiet registreren en bij afwijkende waarden eventueel herstelmaatregelen treffen.		Met de reinigingstool wordt de kans op verstopping door versmeren gereduceerd. Dit wordt gecontroleerd met de debietregistratie tijdens de filterontwikkeling. Bij afwijkingen kan worden bijgesteld. Er wordt in de toetsing van de stabiliteit rekening gehouden met een (zeer) veilige aanname: doorlatendheid filterscherm = 0 m/d en deze is niet aanwezig in doorsnede toets.		X	In het ontwerp wordt rekening gehouden met een reductie van de doorlatendheid van het filterscherm tot 0 m/d. Dit geeft een bovengrens van de opstuwing. In de uitvoeringsfase wordt de kans op een reductie van de doorlatendheid beheerst (door te reinigen en waar nodig bij te sturen). In het ontwerp wordt de stabiliteit van de waterkering (zonder constructieve element) inclusief maximale opstuwing (filterscherm is 100% verstopt) getoetst. Hierdoor is het optreden van dit faalpad tot dijkdoorbraak onwaarschijnlijk en is dit faalpad niet significant.
40	Macrostabieliteit binnenwaarts	Filterscherm functioneert niet: toename waterspanningen voor filterscherm door grondverdringing	Bedreiging	Uitvoering	Door toepassen van een grondverdringende installatietechniek ontstaat opspanning, c.q. verdichting, en neemt de doorlatendheid dusdanig af dat opstuwing aan de voorzijde van het filterscherm ontstaat. Dit kan leiden tot een afname van stabiliteit (STBI) van de waterkering	1. Reductie van doorlatendheid van het filterscherm tot 0 m/d. 2. Stabiliteit bepalen zonder aanwezigheid van filterscherm	1. Tijdens filterontwikkeling debiet registreren en bij afwijkende waarden eventueel herstelmaatregelen treffen.		Er wordt in de toetsing van de stabiliteit rekening gehouden met een (zeer) veilige aanname: doorlatendheid filterscherm = 0m/d en deze is niet aanwezig in doorsnede toets.		X	In het ontwerp wordt rekening gehouden met een reductie van de doorlatendheid van het filterscherm tot 0 m/d. Dit geeft een bovengrens van de opstuwing. In het ontwerp wordt de stabiliteit van de waterkering (zonder constructieve element) inclusief maximale opstuwing (filterscherm is 100% verstopt) getoetst. Hierdoor is het optreden van dit faalpad tot dijkdoorbraak onwaarschijnlijk en is dit faalpad niet significant.

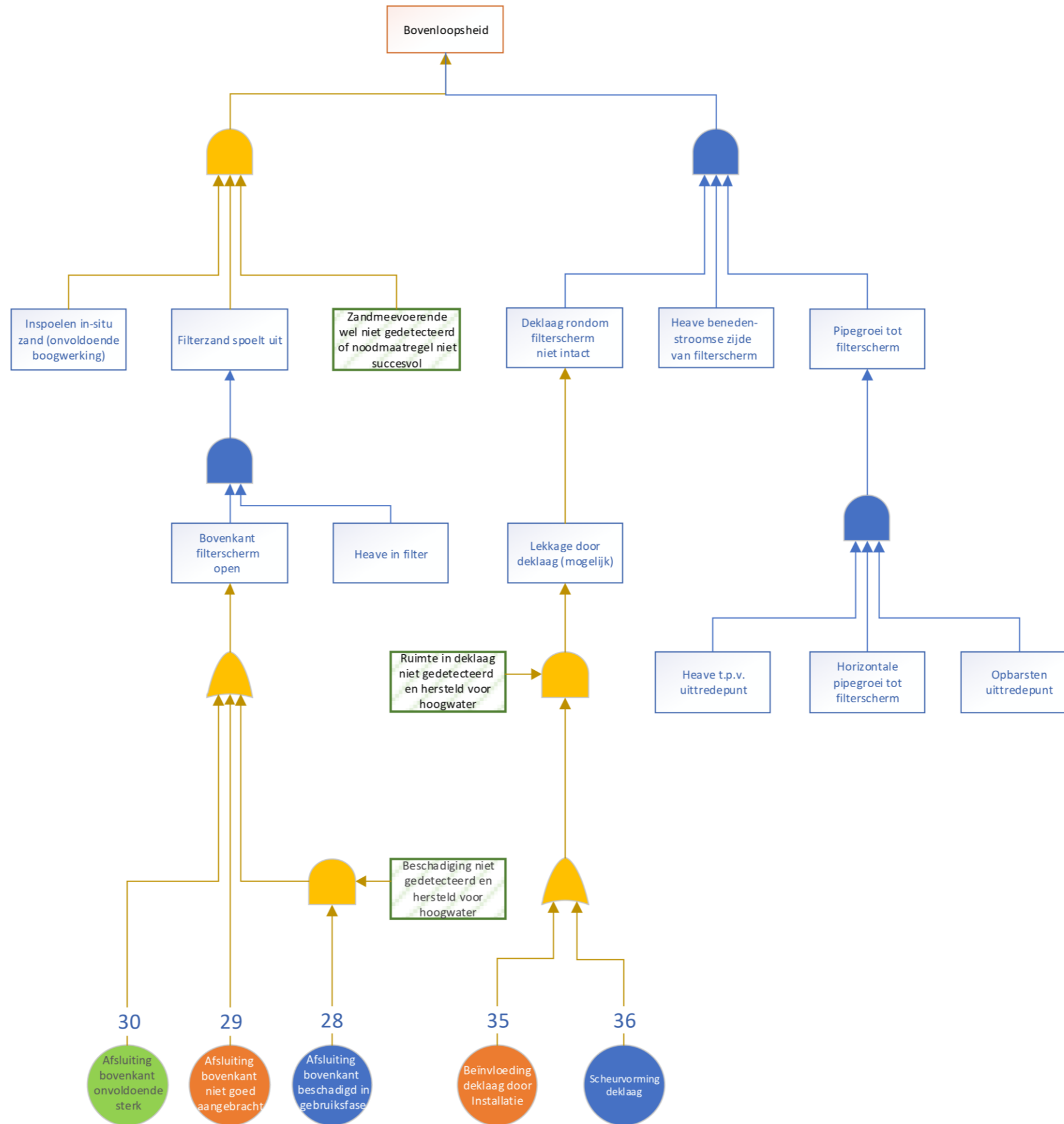
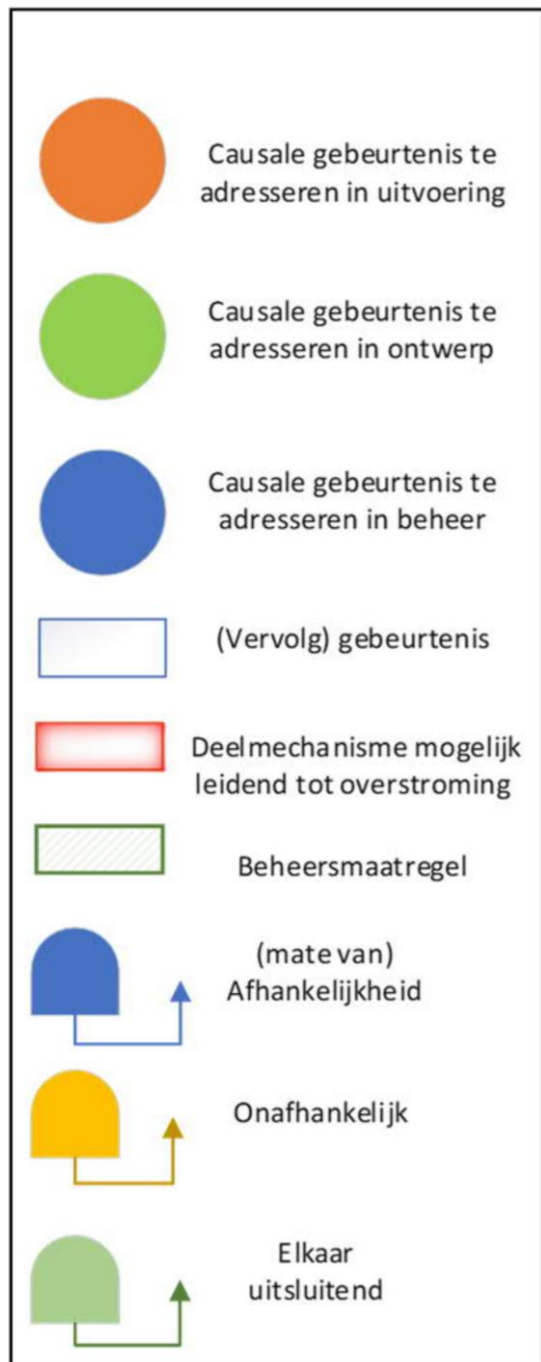
Codering	Deelmechanisme	Faalpad	Gewenst gedrag/ bedreiging	Te adresseren in	Toelichting faalpad	Maatregelen				Kwalitatieve beschouwing faalkans bijdrage		
						Ontwerpfase	Installatiefase	Beheerfase	Onderbouwing maatregelen	Significant	Niet significant	Motivatie
41	Bovenlooptheid	Bovenkant filterscherm open: beschadiging door gatengraverij	Bedreiging	Beheer	Dierlijke gatengraverij in de deklaag heeft gaten veroorzaakt in het filterscherm. Hierbij kan onderscheid worden gemaakt tussen gaten in de flens (vlakke tussengedeelte tussen kokers), in de kokers zelf of in de afsluiting van de bovenkant (dop). Alleen gaten in afsluiting of in de koker zijn relevant. Dit wordt niet gedetecteerd en hersteld voor hoogwater. Door toename van de waterdruk (bij hoogwater) krijgt het filterscherm een drainage functie. Het filterzand moet uitspoelen (heave) om vervolgens tot bovenlooptheid te leiden. Daarbij moet ook het in-situ zand het filter inspoelen, oftewel onvoldoende boogwerking op de perforaties. Het ontstaan van de zandmeevoerende wel wordt daarnaast niet gedetecteerd of de noodmaatregelen zijn niet succesvol.	1. Afwerking zo diep mogelijk onder maaiveld		1. Schouw op gatengraverij en indien aangetroffen herstel 2. Opkisten wel ter plaatse van filterscherm	Des te dieper het filterscherm wordt aangebracht, des te moeilijker is het bereikbaar voor dieren. Bij aangetroffen gaten moet het filterscherm worden vrijgegraven en geïnspecteerd op beschadigingen. Met opkisten is een maatregel beschikbaar om de kans op bezwijken bij hoogwater te reduceren.		X	Gaten in de flens in de kleiige deklaag leiden niet tot bezwijken. De kans dat gaten ontstaan door dieren is bovendien gering, enerzijds door de dikte van het materiaal en het feit dat er geen natuurlijke materialen inzitten (visolie, lijnolie e.d.) maakt dat het kunststof geen aantrekkende functie heeft.
3a	Doorlooptheid	Gat in het filterscherm: schade aan profiel uitvoering dichte deel	Bedreiging	Uitvoering	Tijdens de uitvoering kan een kunststof profiel beschadigd raken o.a. door een object in de ondergrond. Hierdoor kan er mogelijk een opening ontstaan in het dichte (of geperforeerde) deel van het filterscherm. Door een voldoende grote opening in het dichte deel (in de pipinggevoelige laag) kan de pipe mogelijk doorgroeien. Dit is enkel mogelijk als de opening in het dichte deel niet is gedetecteerd of hersteld voor hoog water. Hierbij moet rekening worden gehouden dat hieraan voorafgaand opbarsten / heave in het achterland plaats moet vinden alsmede pipegroei tot aan het filterscherm.						X	Er is tijdens de maakbaarheidsproeven geen significante schade aan de dichte delen van de geïnstalleerde profielen geconstateerd is (P15540003-RAP-TMA-001492). Ingeschat wordt dat bij een zorgvuldige uitvoering de kans op dusdanige grote beschadiging, die doorgaande pipegroei mogelijk maakt, klein is. De kans dat dit faalpad zal leiden tot een overstroming wordt daarom niet significant geacht.
3b	Doorlooptheid	Gat in het filterscherm: schade aan profiel uitvoering geperforeerde deel	Bedreiging	Uitvoering	In aanvulling op toelichting faalpad 3a: de geperforeerde delen bevinden zich aan beide zijden van een koker. In het geval een enkele zijde beschadigd raakt wordt de retentie door de kokerwand mogelijk bedreigt. Echter is er dan nog steeds het filterzand aanwezig dat de volledige functie heeft om doorlooptheid te voorkomen. Bij schade aan beide geperforeerde zijden is nog steeds de functie van het filterzand intact (tenzij deze niet gestort kan worden).		1. Camera-inspectie om schades aan perforaties te detecteren. 2. In een doorgaande werkgang na inbrengen elementen het ontwikkelen en afvullen met filterzand uitvoeren 3. <i>Opvullen beschadigde koker met ondoorlatend materiaal in geval van schade</i>	Als een koker met schade wordt opgevuld met een ondoorlatend materiaal, kan er geen water meer doorstromen en zal de pipe de naast gelegen koker(s) opzoeken.		X	Er is tijdens de maakbaarheidsproeven aan vier geïnstalleerde profielen kleine beschadiging geconstateerd is (document P15540003-RAP-TMA-00716 en P15540003-RAP-TMA-01492). Uit document P15540003-RAP-TMA-00716 blijkt ook dat wanneer na installatie lang gewacht wordt (>1 maand) met het vullen van de koker met filterzand er enige vervorming van het profiel bij de perforaties kan optreden t.g.v. de omliggende gronddruk. Ingeschat wordt dat bij een zorgvuldige uitvoering de kans op dusdanige grote, niet waargenomen beschadigingen, die doorgaande pipegroei mogelijk maakt, klein is. De kans dat dit faalpad zal leiden tot een overstroming wordt daarom niet significant geacht.	
4b	Doorlooptheid	Gat in het filterscherm: schade aan profiel beheer geperforeerde deel	Bedreiging	Beheer	In aanvulling op toelichting faalpad 4a: de geperforeerde delen bevinden zich aan beide zijden van een koker. In het geval een enkele zijde beschadigd raakt wordt de retentie door de kokerwand mogelijk bedreigt. Echter is er dan nog steeds het filterzand aanwezig dat de volledige functie heeft om doorlooptheid te voorkomen. Bij schade aan beide geperforeerde zijden is nog steeds de functie van het filterzand intact (tenzij deze niet gestort kan worden).	1. Tracé in beheerstrook		1. 'No work' zone in beheerstrook en handhaving hierop.	Verkleining / minimalisatie kans op optreden van schade door externen.		X	Kans op schade veroorzaakt door externen zonder dat dit gedetecteerd en hersteld wordt, is gegeven de maatregelen (tracé in beheerstrook en hier geldend een no work zone) voldoende klein geacht. Daarnaast wordt de filterwerking alleen in enkele gevallen bedreigd. Dit faalpad is daarom niet significant.

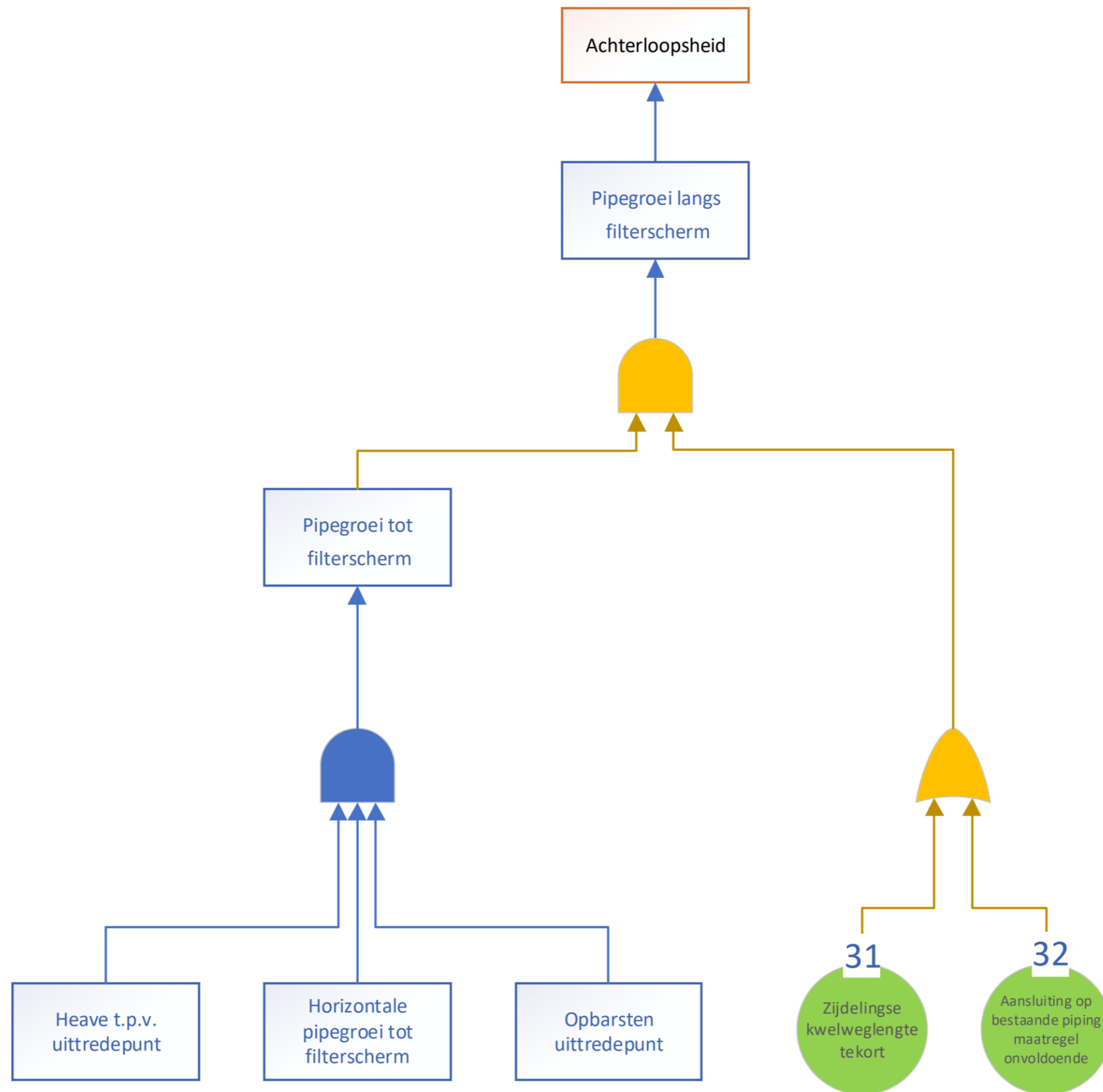
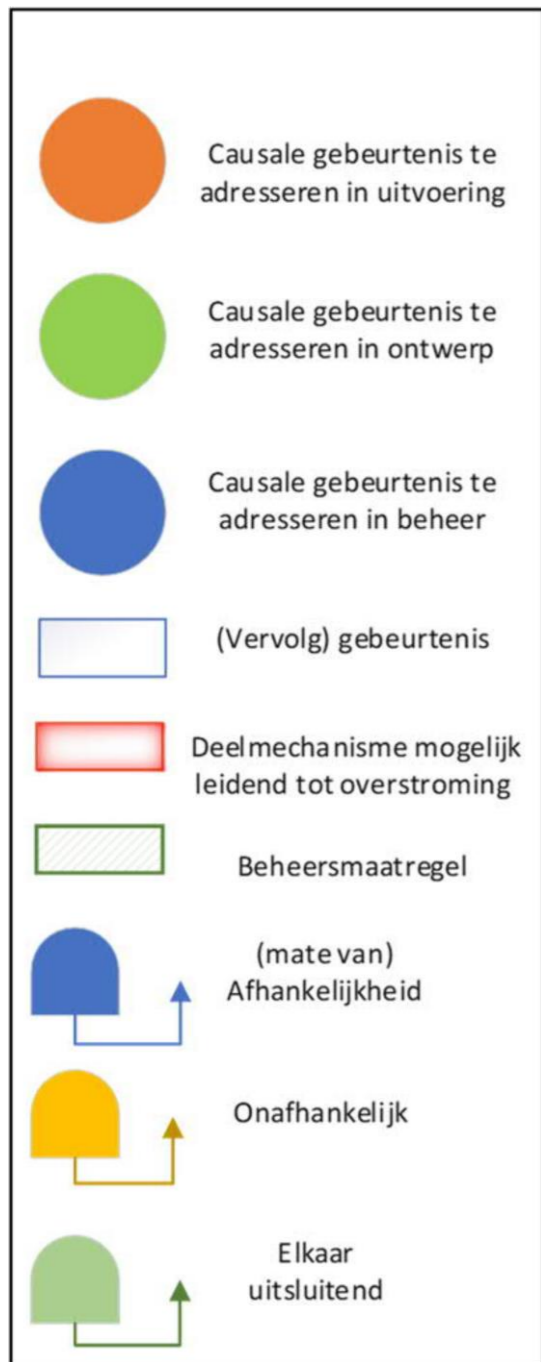
Bijlage B Fouten- en gebeurtenissenboom

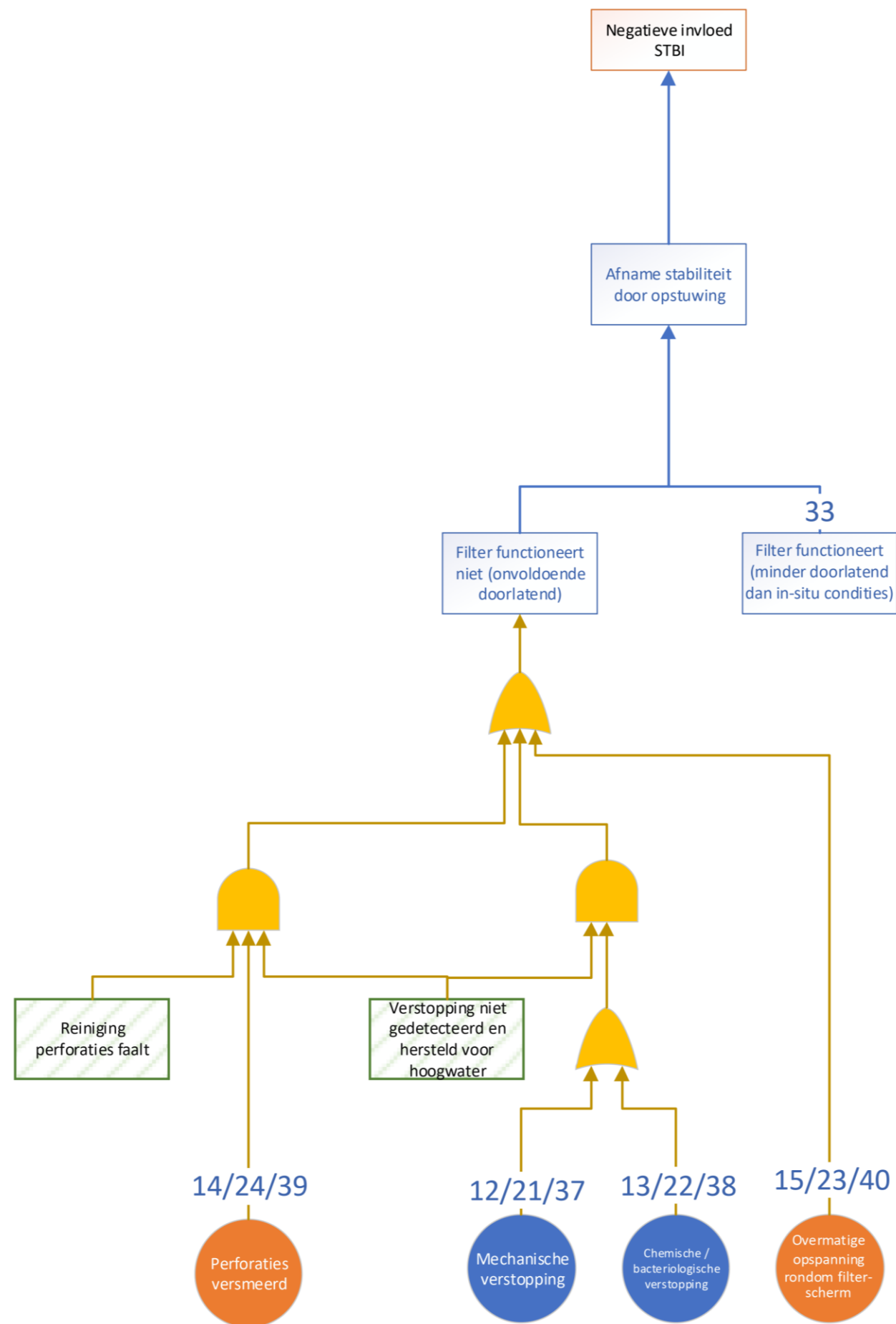
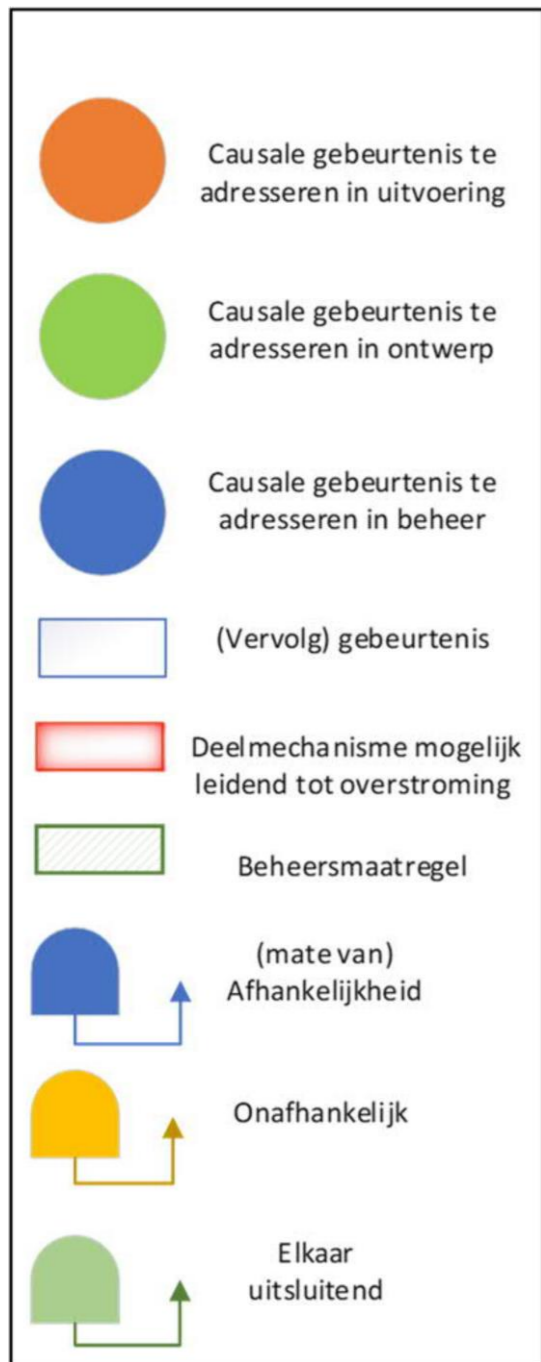


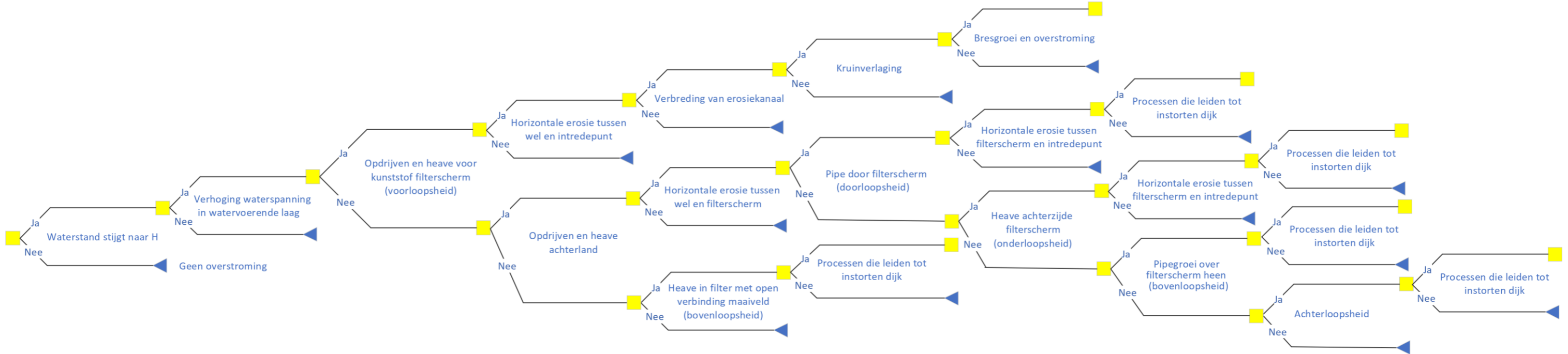












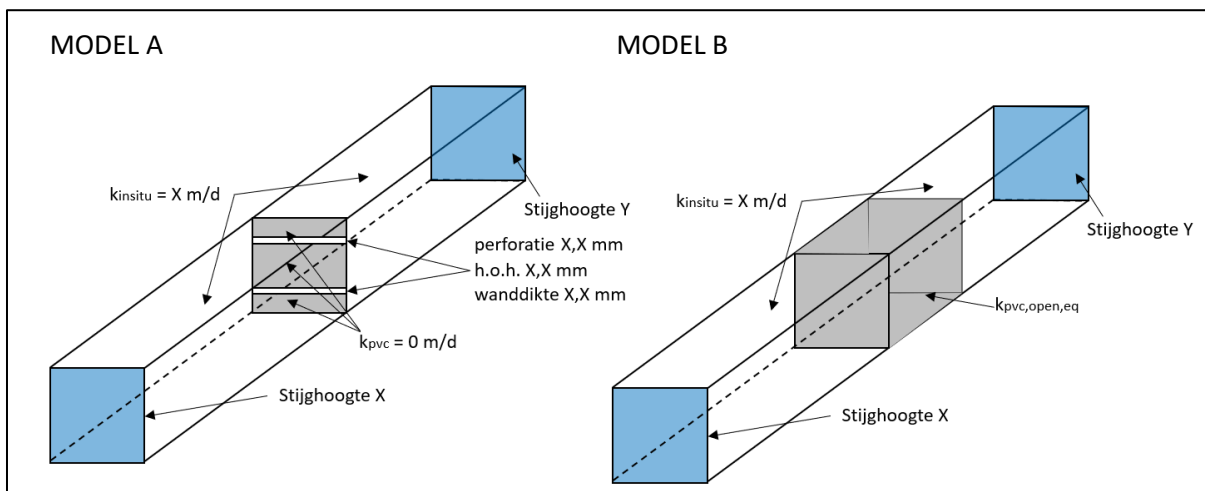
Bijlage C Equivalente doorlatendheid

Een belangrijk onderdeel om het effect van het kunststof filterscherm op de geohydrologische omstandigheden te bepalen is de doorlatendheid van het geperforeerde deel van het scherm. In de bepaling van de doorlatendheid wordt rekening gehouden met de weerstand van de perforaties, de contractie van stroombanen naar de kokers en het doorstromen van filterzand. Onderstaand zijn de stappen beschreven waarmee de doorlatendheid van het geperforeerde deel wordt bepaald.

1. Bepalen van de doorlatendheid van een enkele perforatie met een bepaalde hart-op-hart afstand

De schematisering die past bij deze stap is weergegeven in figuur C-1. In deze stap wordt $k_{pvc,open,eq}$ bepaald. Dat is de equivalente doorlatendheid van de geperforeerde oppervlakken van de koker. Hiervoor zijn twee modellen benodigd:

- **Model A:** op basis van daadwerkelijke situatie (perforatiebreedte en hart-op-hart afstand);
- **Model B:** met equivalente doorlatendheid, $k_{pvc,open,eq}$, over gebied waar model A de stijghoogtelijnen beïnvloed.



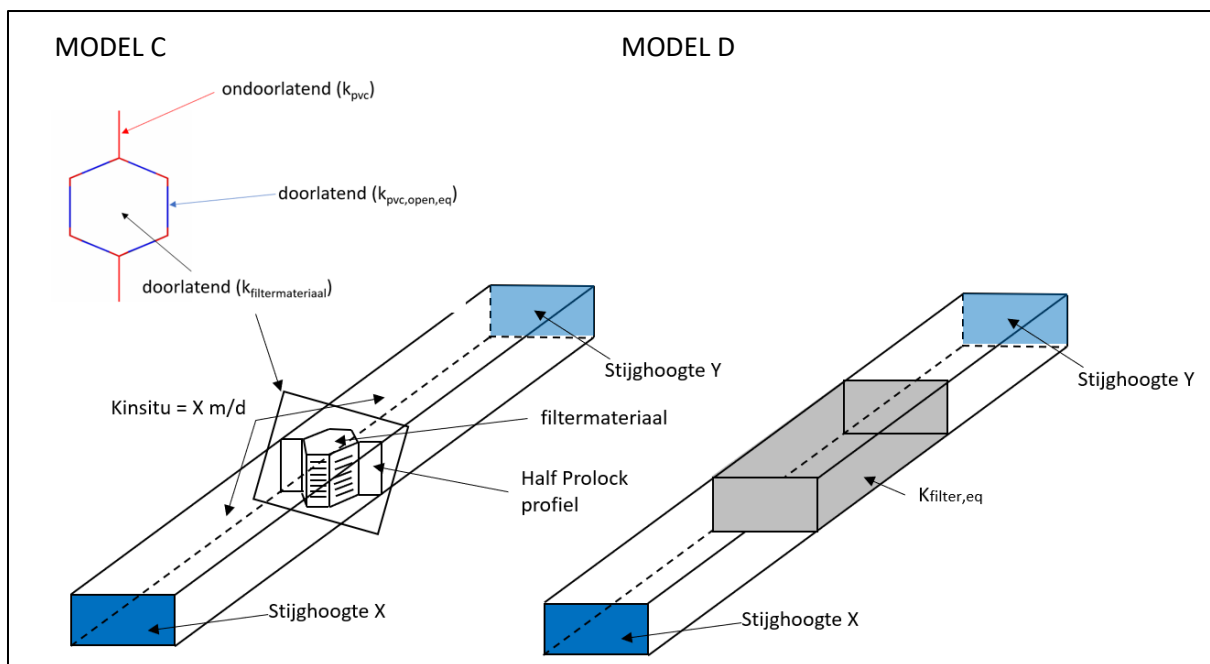
Figuur C-1. Bepaling equivalente doorlatendheid $k_{pvc,open,eq}$ op perforatieniveau (model B) op basis van werkelijk model (model A).

In de berekening mag worden uitgegaan van een fictief stijghoogteverloop (linker en rechter modelgrens), waarbij er wel een verhang moet zijn ($\phi_x > \phi_y$). De waarden van de stijghoogte hebben geen invloed op de resultaten. Een veilige aanname voor het bepalen van de equivalente doorlatendheid van de perforaties is dat er wordt uitgegaan van perforaties volledig gevuld met in-situ zand. De dimensies van het rekenmodel en bijbehorend rekeninterval moeten bij de situatie passen. Dit houdt in dat er voldoende rekenpunten (elementen) aanwezig zijn in de perforatiegrootte voor een betrouwbaar resultaat. De grenzen van het model dienen minimaal 2x buiten het invloedsgebied van de perforaties te liggen.

2. Bepalen van stromingsbeeld van het geperforeerde deel van een enkel kokerprofiel

De schematisering die past bij deze stap is weergegeven in figuur C-2. Voor de geperforeerde oppervlakken wordt de $k_{pvc,open,eq}$, zoals bepaald in voorgaande stap, gebruikt. Ook in deze stap wordt gebruik gemaakt van twee modellen om zodoende de $k_{filter,eq,m}$ te bepalen:

- **Model C:** met de (halve) profiel geometrie, waarbij de open zijden een doorlatendheid gelijk hebben aan $k_{pvc,open,eq}$;
- **Model D:** met equivalente doorlatendheid, $k_{filter,eq,m}$, over gebied waar model C de stijghoogtelijnen beïnvloedt.



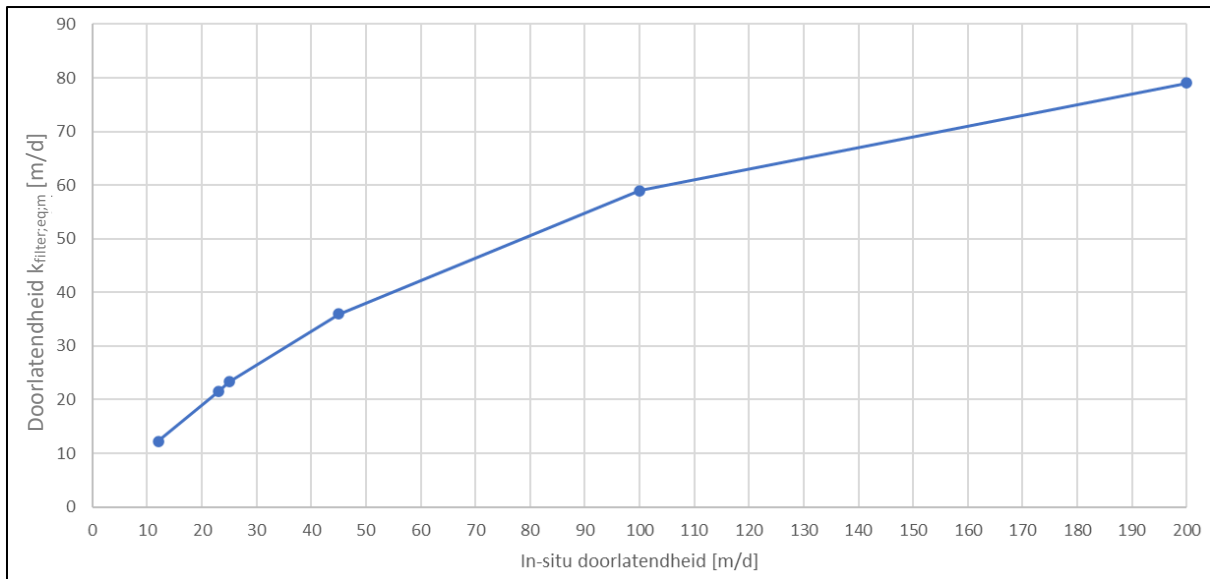
Figuur C-2. Bepaling equivalente doorlatendheid $k_{filter,eq,m}$ voor geperforeerde deel van het kunststof filterscherm (model D) op basis van 'werkelijke' configuratie geperforeerde deel kunststof filterscherm met $k_{filtermateriaal}$, $k_{pvc,open,eq}$ en k_{pvc} (model C).

Ook hier geldt dat de dimensies van het rekenmodel en het bijbehorend rekeninterval bij de situatie moeten passen. Aandachtspunt voor deze specifieke situatie is een juiste afstemming tussen wanddikte en afstand tussen twee rekenpunten in het model. Uit onderzoek (Rohe, 2022) blijkt dat de invloed van de koker vanuit het hart van de koker reikt tot ongeveer 0,2 m voor en achter het profiel (model C).

Een voorbeeldberekening waar de bovenstaand beschreven stappen zijn uitgewerkt is gegeven in (Maatkamp et al., 2021).

In figuur C-3 is voor de configuratie met perforatiegrootte van 0,5 mm en hart-op-hart afstand 5 mm, de doorlatendheid, $k_{filter,eq,m}$, exclusief installatie-effecten voor verschillende in-situ zanden gegeven (kengetallen). Let op dat bij hoge waarden van in-situ doorlatendheid het (geohydrologische) gedrag van de filterconstructie kan veranderen door de relatieve afname van doorlatendheid van het filter ten opzichte van het in-situ zand. Dit kan inzichtelijk worden gemaakt door het uitvoeren van de geohydrologische modellering (paragraaf 8.1.2).

De hierboven beschreven modelleringwijze om de doorlatendheid van het geperforeerde deel van het filterscherm te bepalen is middels mediumschaalproeven gevalideerd (Rohe, 2022). Hieruit volgt dat bovenstaande modellering tot een realistische waarde van de doorlatendheid leidt die in de mediumschaalproeven aangetoond is.



Figuur C-3. Kentallen filter doorlatendheid, $k_{filter,eq,m}$, ten opzichte van doorlatendheid in-situ materiaal exclusief installatie-effecten voor perforatiebreedte 0,5 mm en h.o.h.-afstand 5 mm.

Bijlage D Interfacesterkte reductiefactor

D.1 Definitie van R_{inter}

De schuifsterktereductiefactor R_{inter} is een parameter die de sterkte van de interface bepaalt op basis van de ingevoerde sterkte- en stijfheidsparameters van de grond. Vergelijkingen (D-1) en (D-2) gelden voor gedraineerde schuifsterkteparameters:

$$\tan(\delta) = R_{inter} \tan(\varphi') \quad (D-1)$$

$$a_{scherm} = R_{inter} c' \quad (D-2)$$

waarbij:

δ	-	Wandwrijvingshoek	[°]
φ'	-	Hoek van interne wrijving van de grond	[°]
a_{scherm}	-	Adhesie	[kN/m ²]
c'	-	Cohesie van de grond	[kN/m ²]
R_{inter}	-	Schuifsterktereductiefactor	[-]

D.2 Bepaling R_{inter} waarde

In tegenstelling tot stalen schermen is in Nederland weinig ervaring met het toepassen van kunststoffen schermen in de grond. Als gevolg hiervan zijn geen standaardwaarden of ervaringsgetallen voor R_{inter} bekend voor kunststoffen schermen.

Een methode om de waarde van R_{inter} te kwantificeren is door de verhouding tussen de wandwrijvingshoek en de hoek van interne wrijving van de grond te bepalen. In NEN 9997-1+C2 (Eurocode 7) staat aangegeven dat de te hanteren factor tussen de wandwrijvingshoek en de hoek van interne wrijving van de grond afhangt van de ruwheid van de wand in relatie tot de korrelmiddellijn d_{50} van de grond. De relatie tussen de wandruwheid en de korrelmiddellijn d_{50} vanuit de norm is opgenomen in tabel D-1.

Tabel D-1. Relatie tussen de wandruwheid, de korrelmiddellijn en de wandwrijvingshoek voor klei, leem, zand, grind (Nederlandse Normalisatie-instituut, 2017).

Relatieve ruwheidsbenaming van het wandoppervlak	Nadere definitie van de ruwheid van de wand	Wandwrijvingshoek (δ) [°]	
		Recht glijvlak	Gekromd glijvlak
Getand	$> 10 d_{50}$	$0,67 \varphi'_k$	$\leq \varphi'_k$
Ruw	$0,5 d_{50} - 10 d_{50}$	$0,67 \varphi'_k$	$\leq \varphi'_k - 2,5$ met een maximum van 27,5
Half ruw	$0,1 d_{50} - 0,5 d_{50}$	$0,33 \varphi'_k$	$0,5 \varphi'_k$
Glad	$< 0,1 d_{50}$	0	0

De ruwheid van de wand wordt veelal gedefinieerd met de R_a -waarde. De R_a -waarde vertegenwoordigt het gemiddelde van de pieken en dalen die met een ruwheidsmeter binnen een bepaalde steekproeflengte wordt gemeten. Hoe groter de R_a -waarde, hoe groter de afwijkingen zijn ten opzichte van de gemiddelde lijn en hoe ruwer de wand is. Andersom geldt dat hoe kleiner de R_a -waarde is, hoe kleiner de afwijkingen zijn ten opzichte van de gemiddelde lijn en hoe gladder de wand is.

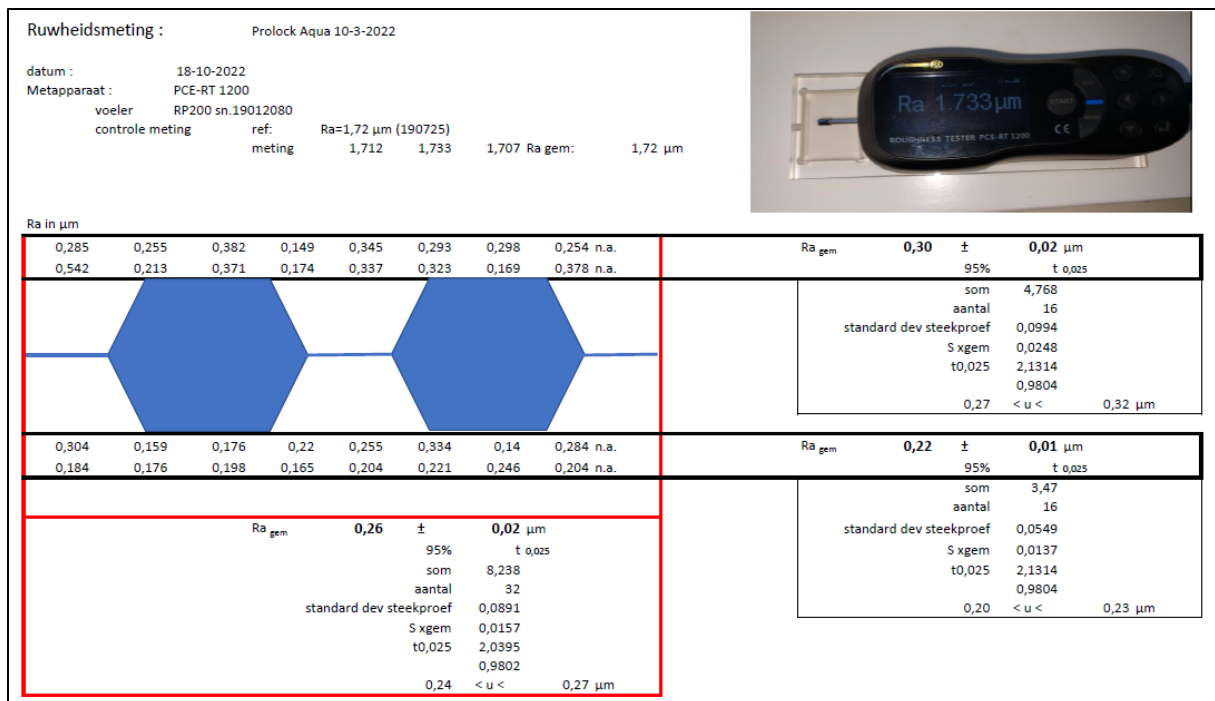
Met metingen van de R_a -waarde van het kunststof filterscherm kan met de definities uit de NEN 9997-1+C2 de factor tussen de wandwrijvingshoek en de hoek van interne wrijving van de grond

worden bepaald. Verondersteld wordt dat deze factor gelijk is aan R_{inter} en hiermee dus geldt voor alle sterkte- en stijfheidsparameters.

D.3 Beschikbare metingen

D.3.1 Wandruweidmetingen filterscherm

Profextru heeft wandruweidmetingen van een kunststof profiel (type Prolock) uitgevoerd. De wandruweidmetingen zijn in figuur D-1 opgenomen. De wandruweidparameter R_a is gemeten tussen ca. 0,14 μm en 0,55 μm met een gemiddelde van 0,30 μm aan de voorkant van het profiel en 0,22 μm aan de achterkant van het profiel. Op basis van ervaring van Profextru is geadviseerd uit te gaan van een R_a gelijk aan 0,30 μm .



Figuur D-1. Meetresultaten van de wandruweid van een kunststof profiel (type Prolock).

D.3.2 Korrelgrootteverdelingen Salmsteke

Binnen deeltraject Salmsteke zijn zeefproeven uitgevoerd op zandmonsters genomen direct onder de deklaag en tot op enkele meters hieronder. De zanden hebben korrelmiddellijnen d_{50} tussen ca. 100 en 400 μm .

Voor de kleilagen zijn geen korrelgrootteverdelingen bepaald. Afhankelijk van de samenstelling van de klei kunnen verschillende waarden voor d_{50} worden gevonden. Gebaseerd op de literatuur is de laagst aangetroffen d_{50} ca. 0,5 μm en hoort bij bentoniet (zweklei) (Muntohar, 2006). De bovengrens van de kleifractie ligt conform geotechnische definities op 2 μm , dus als de d_{50} boven de 2 μm ligt mag de grondsoort geen klei meer worden genoemd.

D.3.3 Maakbaarheidsproeven Salmsteke

Binnen deeltraject Salmsteke zijn maakbaarheidsproeven uitgevoerd waarbij kunststof profielen uit de grond zijn getrokken, maar ook in de grond zijn gedrukt, met vastlegging van de benodigde krachten. Hieruit zijn de volgende indicatieve conclusies getrokken:

- Schachtwrijvingsfactor α_s voor kunststof profielen in klei, $\alpha_{s;klei}$, gemeten via de push-down van de boorstelling bedraagt circa 0,0014.
- Bij de trekproef is de deklaag afgegraven, waardoor alle gemeten weerstand volledig uit de zandlaag komt. Met een statische trekkracht van 80 kN kwam een enkel profiel niet los. Op basis van een terugberekening vanuit de sonderingen kan dan slechts een minimale waarde voor $\alpha_{t;zand}$ worden afgeleid: $\alpha_{t;zand} > 0,002$.

Voor stalen profielen geldt conform de vigerende normen $\alpha_{t;zand} = 0,007$ en voor klei (< 2 MPa) $\alpha_{t;klei} < 0,02$. Een harde conclusie of en zo ja, hoeveel lager α_s en α_t zijn voor kunststof profielen in vergelijking met stalen profielen kan niet worden getrokken.

D.3.4 Wandruwheid stalen damwanden

In Nederland worden veelal warmgewalste damwandprofielen toegepast voor grond- dan wel waterkerende constructies. Nadat voorgenoemde damwandprofielen zijn geproduceerd, worden deze aan een oppervlaktebehandeling blootgesteld om de gewenste ruwheid te bereiken.

Warmgewalste damwandprofielen ondervinden meestal oppervlaktebehandeling 1D uit EN 10088-2. Dit levert een ruw, niet reflecterend oppervlak op. Op basis van praktijkervaring van producenten en aannemers worden hiermee meestal oppervlaktes met waarden van R_a tussen 3,5 en 7,5 μm gerealiseerd (British Stainless Steel Association, 2022; World Stainless, 2014). Warmgewalste stalen damwandprofielen hebben hiermee dus grofweg een factor 10 tot 25 ruwer wandoppervlak dan kunststof profielen (type Prolock Delta).

D.4 R_{inter} -waarde

D.4.1 Afleiding R_{inter} waarde voor kunststof profielen

Op basis van de beschikbare metingen en de relatie vanuit de NEN 9997-1+C2 zijn de volgende factoren bepaald tussen de wandwrijvingshoek en de hoek van interne wrijving van de grond:

- Voor kleilagen ligt R_a , uitgaande van de aangehouden bandbreedte van de d_{50} van 0,5 μm tot 2 μm , grofweg een factor 0,15 tot 0,60 af van de d_{50} van klei. Kijkende naar de definities vanuit de norm impliceert dit dat de kunststof profielen strikt genomen als een half ruwe dan wel ruwe wand moet worden geschematiseerd in kleilagen. Gezien het grootste deel van de bandbreedte 0,15 tot 0,60 in de klasse half ruw ligt, wordt een half ruwe wand als meest waarschijnlijk verondersteld. Uitgaande van kromme glijvlakken betekent dit dat voor kunststof profielen in klei een R_{inter} gelijk aan 0,5 aangehouden moet worden.
- Voor zand zou bij kunststof profielen op basis van de norm een wandwrijvingshoek gelijk aan 0° moeten worden gehanteerd ($R_a < 0,1d_{50}$). Dit komt echter niet overeen met waarnemingen tijdens de maakbaarheidsproeven Salmsteke. Om aan te sluiten bij de gangbare waarden uit de norm zou bij gekromde glijvlakken voor een half ruw oppervlak (één ruwheidsklasse hoger dan glad) R_{inter} gelijk aan 0,5 moeten worden aangehouden. Omdat de gemeten wandruwheid met 0,30 μm significant kleiner is dan $0,1d_{50}$ wordt echter een R_{inter} gelijk aan 0,33 aangehouden.
- Voor veen kan in lijn met NEN 9997-1+C2 een wandwrijvingshoek gelijk aan 0° worden aangehouden. Dit betekent dat R_{inter} gelijk is aan 0.

D.4.2 Vergelijking R_{inter} -waarde voor kunststof profielen met stalen damwandprofielen

Aan de hand van de in deze notitie getoonde waarden voor R_a voor staal en kunststof kan een vergelijking tussen de bijbehorende R_{inter} -waarden worden gemaakt. In tabel D-2 zijn de te hanteren waarden voor R_{inter} voor stalen en kunststof profielen weergegeven. Voor staal wordt in de praktijk de wandwrijvingshoek in zand en klei gelijkgesteld aan 2/3 van de wrijvingshoek van de

grond en in veen gelijk aan 0. Voor veen wordt bij staal een wandwrijvingshoek gelijk aan 0° aangehouden.

Uit tabel D-2 is op te maken dat voor profielen van warmgewalst staal hogere waarden voor R_{inter} worden gehanteerd dan voor kunststof profielen (type Prolock). Dit betekent dat bij stalen profielen een hogere krachtsoverdracht van de grond naar het profiel plaatsvindt dan bij kunststof profielen. Dit kan alleen maar als staal een ruwer wandoppervlak heeft dan kunststof, zoals in deze bijlage ook is aangetoond.

Tabel D-2. Vergelijking R_{inter} -waarden van staal en kunststof (type Prolock).

Materiaal	R_{inter} [-] voor grondsoort		
	Klei	Veen	Zand
Warmgewalst staal	2/3	0	2/3
Kunststof (type Prolock)	1/2	0	1/3

Bijlage E Achterloopsheid

E.1 Inleiding

Het kunststof filterscherm wordt toegepast binnen een beschouwde dijkstrekking met een opgave voor piping. Om achterloopsheid tegen te gaan, dient het kunststof filterscherm ook over een bepaalde afstand aan weerszijden van deze dijkstrekking te worden doorgezet. De voor achterloopsheid benodigde extra strekking met het kunststof filterscherm dient te worden vastgesteld aan de hand van het horizontale kwelweglengtetekort. Het horizontale kwelweglengtetekort verschilt tussen het start- en eindpunt van de beschouwde dijkstrekking. Hierom dient de benodigde extra strekking met scherm voor beide uiteinden afzonderlijk te worden gekwantificeerd.

E.2 Bepaling van de extra strekking voor achterloopsheid

Het horizontale kwelweglengtetekort, L_{tekort} , wordt met vergelijking (E-3) berekend uit de aanwezige horizontale kwelweglengte, $L_{aanwezig}$, en de benodigde horizontale kwelweglengte, $L_{vereist}$. De aanwezige kwelweglengte, $L_{aanwezig}$, betreft de kortste horizontale afstand in de huidige situatie tussen het in- en uittredepunt. De benodigde horizontale kwelweglengte, $L_{vereist}$, wordt aanbevolen met de rekenregel van Sellmeijer en/of Bligh te kwantificeren voor zuiver één-richting kwelwegen en kwelwegen in meerdere horizontale richtingen. Voor de keuze over de te hanteren rekenregel kan het schema voor achterloopsheid uit BOI handleiding Piping bij Kunstwerken worden geraadpleegd. Het verschil tussen de benodigde en aanwezige kwelweglengte is het horizontale kwelweglengtetekort, L_{tekort} . Voor de achtergrond op de rekenregels van Bligh en Sellmeijer wordt verwezen naar de Schematiseringshandleiding Piping bij Kunstwerk (Rijkswaterstaat, 2021).

Met het doorzetten van het kunststof filterscherm wordt de aanwezige horizontale kwelweglengte verlengd. Hierbij mag worden uitgegaan van horizontale kwelwegen die loodrecht op en parallel aan het filterscherm lopen. Dit is in figuur E-1 schematisch weergegeven met blauwe peilen. Schuine kwelwegen hoeven bij het kunststof filterscherm niet te worden beschouwd, omdat het filterscherm doorlatend is en de grondwaterstroming niet tot nauwelijks beïnvloedt. De benodigde extra strekking met scherm, L_{extra} , is met dit uitgangspunt volgens vergelijking (E-4) gelijk aan de helft van het horizontale kwelweglengtetekort op basis van de beschouwde dijkstrekking met een opgave voor piping.

$$L_{tekort} = L_{vereist} - L_{aanwezig} \quad (E-3)$$

$$L_{extra} = L_{tekort} / 2 \quad (E-4)$$

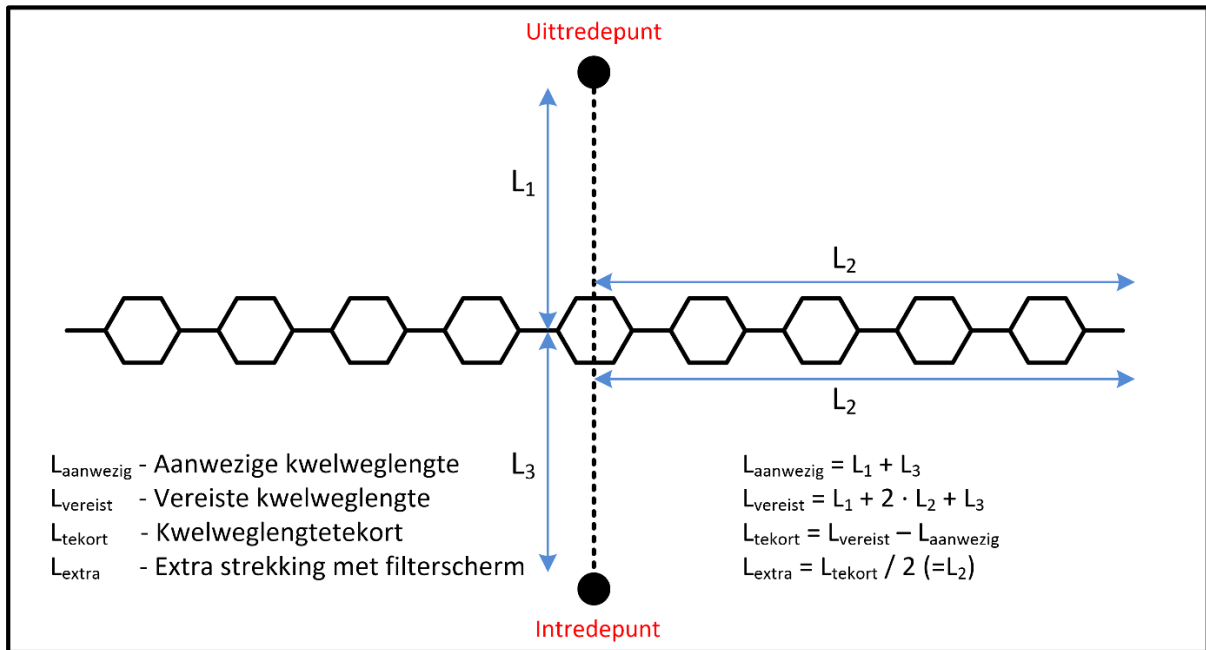
waarbij:

L_{tekort}	-	Horizontaal kwelweglengtetekort	[m]
$L_{vereist}$	-	Benodigde horizontale kwelweglengte	[m]
$L_{aanwezig}$	-	Aanwezige horizontale kwelweglengte	[m]
L_{extra}	-	Benodigde extra strekking met een kunststof filterscherm	[m]

E.3 Uitzonderingen

Het is toegestaan beargumenteerd af te wijken van het toepassen van het kunststof filterscherm in aangrenzende dijkstrekkingen over de voor achterloopsheid benodigde extra afstand. Het ontbreken van een opgave voor piping in de aangrenzende dijkstrekkingen of het aansluiten op andere

pipingconstructies zijn voorbeelden van argumenten waarbij het kunststof filterscherm in aangrenzende dijkstrekkings niet of over een kleinere afstand dan berekend wordt toegepast.⁹



Figuur E.1. Benodigde doorzetafstand van het kunststof filterscherm om achterloopsheid te voorkomen.

⁹ Bij deeltraject Salmsteke is de deklaag in de aangrenzende dijkstrekkings aanzienlijk dikker, waardoor piping binnen deze strekkingen uitgesloten is. Het optreden van achterloopsheid is hiermee ook niet mogelijk, waardoor bij deeltraject Salmsteke kan worden volstaan met geen tot een beperkte doorzetafstand. Daarnaast is het niet overal mogelijk om de voor de aangrenzende dijkstrekkings benodigde profiellengtes te produceren dan wel te installeren.