Deltares

Roadmap onderzoek beoordeling kunstwerken op piping

Kennis voor keringen: Piping in relatie tot geohydrologie

Roadmap onderzoek beoordeling kunstwerken op piping
Kennis voor keringen: Piping in relatie tot geohydrologie

Auteur(s)
Hans van Meerten

Roadmap onderzoek beoordeling kunstwerken op piping
Kennis voor keringen: Piping in relatie tot geohydrologie

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Niek Verdijck
Referenties	Kennis voor Keringen
Trefwoorden	Waterkeringen, Kunstwerken, Onderloopsheid, Piping, Grondwaterstroming

Documentgegevens	
Versie	1.0
Datum	23-12-2024
Projectnummer	11210365-002
Document ID	11210365-002-ZWS-0002
Pagina's	81
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)		
	Hans van Meerten	

Samenvatting

Door Deltares is onder SITO Kennis voor Keringen onderzoek gedaan naar de aanpak van de beoordeling van kunstwerken onder BOI. Dat betreft ook het faalmechanisme piping.
De aanleiding is dat beoordelaars hebben aangegeven dat zij onvoldoende handvatten hebben om geohydrologische omstandigheden in relatie tot het faalmechanisme piping mee te nemen. In eerste instantie is volgens de opdracht in 2022 en 2023 gewerkt aan een beschrijving van een beoordelingskader voor piping bij kunstwerken waarin geohydrologische condities worden meegewogen. Het doel was om op basis van literatuuronderzoek en afstemming met experts in een klankbordgroep een voorbeeldenboek voor beoordelaars op te stellen. Hierbij werd uitgegaan van de actuele kennis en de geldende regelgeving. Hoewel de uitwisseling van kennis met de klankbordgroep veel richting gaf aan het onderzoek, kwamen er slechts enkele voorbeelden uit de praktijk aan het licht.
Mede vanwege voortschrijdende inzichten in andere onderzoeksgroepen op het gebied van piping heeft Rijkswaterstaat eind 2023 de vraagstelling aangepast. In plaats van een voorbeeldenboek is gevraagd om een roadmap op te stellen voor de ontwikkeling van instrumentarium voor de beoordeling van piping en grondwaterstroming in het komende decennium waarmee bestaande kennishiaten worden ingevuld. Opgemerkt wordt dat piping een onderdeel is van het faalpad onder- en achterloopsheid. De term piping is een synoniem voor de faalmechanismen die in BOI-documentatie voor kunstwerken zijn vermeld.

De visie van Deltares op benodigd toekomstig onderzoek is uitgewerkt in gevraagde roadmap voor de ontwikkeling van instrumentarium ten behoeve van de beoordeling van onderloopsheid en piping bij kunstwerken met inachtneming van geohydrologische aspecten.
Bij ons vooronderzoek voor de roadmap is uitgegaan van de huidige beoordelingssystematiek. In dit rapport is eerst de huidige stand van de kennis beschreven en nagegaan welke kennishiaten daarin aanwezig zijn. Vervolgens is de gewenste ontwikkeling om kennishiaten weg te nemen afgestemd met beoordelaars uit het werkveld zodat een opzet van de roadmap is gemaakt die bij de beoordelingspraktijk past. Beoordelaars pleiten voor een benadering van grof naar fijn. Begrip van de faalmechanismen en ontwikkeling van kennis over die mechanismen is echter noodzakelijk. Wij bevelen aan om vanuit het kennisgebied van kunstwerken deel te nemen aan onderzoeksgroepen in het kennisgebied voor waterkeringen om te kunnen profiteren van daar geplande activiteiten voor de ontwikkeling van instrumentarium ter beoordeling van piping en heave, bijvoorbeeld voor heaveschermen.
Maar de introductie in komende decade van nieuwe gedetailleerde berekeningsmethoden mag in de praktijk van beoordeling niet tot een moeilijk werkbare situatie leiden. Bij toekomstig onderzoek dient de aandacht vooral uit te gaan naar de ontwikkeling van probabilistische en geohydrologische methoden voor de beschouwing van onderloopsheid bij kunstwerken.
Wij raden aan om een probabilistisch instrumentarium voor kunstwerken te onderzoeken en te testen op praktijkcases in overleg met beoordelaars en deskundigen van waterschappen.
Voor de nieuwe beoordelingsmethodiek onder BOI met opstelling van het Verhaal van de Kering heeft de klankbordgroep van dit onderzoek voor de roadmap aanbevolen om aan de geohydrologische beschrijving meer aandacht te besteden. Daarvoor is allereerst eenvoudig inzetbaar instrumentarium nodig dat kan worden gebaseerd op reeds bekende geohydrologische analysemethoden. Voor navolgende beoordelingsfasen met nadere bepaling van maatgevende kwelwegen bij kunstwerken adviseren wij om de geohydrologische berekeningsmethoden uit te breiden naar ruimtelijke modellen die passen bij de geometrie en condities die gelden voor kunstwerken. Huidige ontwikkelingen op het gebied van geohydrologische modellering (EEM, Kratos, TIM) bieden daartoe de mogelijkheden.
Een voorwaarde is dat de kennisontwikkeling gericht moet zijn op een instrumentarium dat inzetbaar is in de beoordelingsmethodiek in verschillende fasen, werkend van grof naar fijn.

Inhoud

	Samenvatting	**4**
1	**Inleiding**	**7**
1.1	Beoordeling van piping bij kunstwerken met kennis van grondwaterstroming	7
1.2	Vraagstelling	9
1.3	Resultaat van de studie in 2023 voor een voorbeeldenboek	9
1.4	Aanbevelingen van vakgenoten voor het uit te voeren onderzoek	10
1.5	Toelichting bij de wijziging van voorbeeldenboek naar verbetering van instrumentarium	10
2	**Beoordeling faalmechanisme piping kunstwerken**	**12**
2.1	Definities en typen kunstwerken	12
2.2	Aandachtspunten bij de beschrijving van faalpaden	13
3	**Actueel kader van beoordeling van kunstwerken op piping**	**17**
3.1	Voorkomen van Piping in Nederland	17
3.2	Beoordeling van piping voor waterkeringen	17
3.2.1	Beoordeling van piping voor kunstwerken	17
3.3	Eenvoudige beoordeling met beslisregels	18
3.3.1	Algemene aanpak volgens handleidingen	18
3.3.2	Verhaal van de kering: Gevoeligheid voor belangrijkste faalmechanismen	21
3.3.3	Bepalen relevantie beoordeling met generieke beslisregels	23
3.4	Gedetailleerde beoordeling van kunstwerken op piping	27
3.4.1	Benodigde informatie voor eenvoudige beoordeling kunstwerken met geohydrologie	27
3.4.2	Algemene aanpak van de gedetailleerde beoordeling volgens handleidingen	30
3.4.3	Uitwerking van de nadere of gedetailleerde beoordeling inclusief geohydrologie	34
3.4.3.1	Afleiding van belasting door hoogwater en respons in de grondwaterstand en waterspanning	34
3.4.3.2	Bepaling van de schematisatie van de bodemopbouw	35
3.4.3.3	Beoordeling van eventueel aanwezig filter aan uitstroomzijde	36
3.4.3.4	Uitwerking van de geohydrologische situatie voor de gedetailleerde beoordeling	37
3.4.3.5	Controle opdrijven of opbarsten	41
3.4.3.6	Controle piping met heave in het uittredepunt	42
3.4.3.7	Controle van pipingrisico met de regel van Lane:	42
3.4.3.8	Eenvoudige toets van de kwelweglengte met de regel van Bligh:	44
3.4.3.9	Effect van een gelaagd bodemprofiel op een berekening volgens Lane	44
3.4.3.10	Effect van anistropie op een berekening volgens Lane	44
3.4.3.11	Spleetvoorkomen onder een kunstwerk met fundering op palen:	44
3.4.3.12	Heave controle scherm:	45
3.4.3.13	Piping berekening volgens Sellmeijer [16]:	47
3.4.3.14	Kritiek verval en beoordeling onderloopsheid (opbarsten, piping, heave)	48
3.5	Aangescherpte beoordeling van kunstwerken op piping	49
3.5.1	Algemene aanpak bij aangescherpte beoordeling	49
3.5.1.1	Uitwerken van het dominante faalpad en vervolgprocessen	49

3.5.1.2 Verfijnde analyse naar het initieel mechanisme 50
3.5.1.3 Probabilistische analyse 51
3.5.2 Mogelijkheden voor aangescherpte (specifieke) beoordeling t.a.v. geohydrologie 53
3.5.2.1 Inzet van aanvullend grond- en grondwateronderzoek 53
3.5.2.2 Inzet van grondwatermodellen 54
3.5.2.3 Grondwatermodellering voor een omgeving zonder complicerende randvoorwaarden 55
3.5.2.4 Grondwatermodellering voor een omgeving met complicerende randvoorwaarden 55
3.5.3 Plausibiliteitscontrole 56
3.5.4 Afronding: assembleren van uitkomst voor alle faalmechanismen 57
3.5.5 Beoordeling en aanbevelingen vanwege handelingsperspectief 57

3.6 Conclusie over de inzet van grondwatermodellering bij beoordeling van kunstwerken op onderloopsheid en piping 58

3.7 Opmerkingen over de inzet van probabilistische analyse bij de beoordeling van kunstwerken op onderloopsheid en piping 59

3.8 Ervaringen uit de praktijk 60

4 Roadmap voor onderzoek naar piping (en grondwaterstroming) bij kunstwerken 62

4.1 Vraagstelling 62

4.2 Aanbevelingen uit de rode draden waterkerende kunstwerken 62

4.3 Opzet van onderzoek voor kennisverbetering over piping en heave 63

4.4 Fundamenteel onderzoek naar heave en piping voor kunstwerken 67

4.5 Selectie van specifiek onderzoek voor onderloopsheid van kunstwerken 68

5 Aanbevelingen roadmap ter verbetering van beoordeling van kunstwerken op onderloopsheid inclusief geohydrologie 69

5.1 Conclusies na de inventarisatie naar de actuele beoordelingssystematiek 69

5.2 Confrontatie van kennishiaten met lopende onderzoeken 70

5.3 Opzet van de roadmap onderzoek onderloopsheid, piping en geohydrologie 70
5.3.1 Samenvatting van kennishiaten 70
5.3.2 Urgentie en impact van uit te voeren onderzoek 72
5.3.3 Beoordelingscriteria 76

5.4 Conclusie over de uitvoering van de roadmap piping kunstwerken 77

6 Literatuur 79

1 Inleiding

1.1 Beoordeling van piping bij kunstwerken met kennis van grondwaterstroming

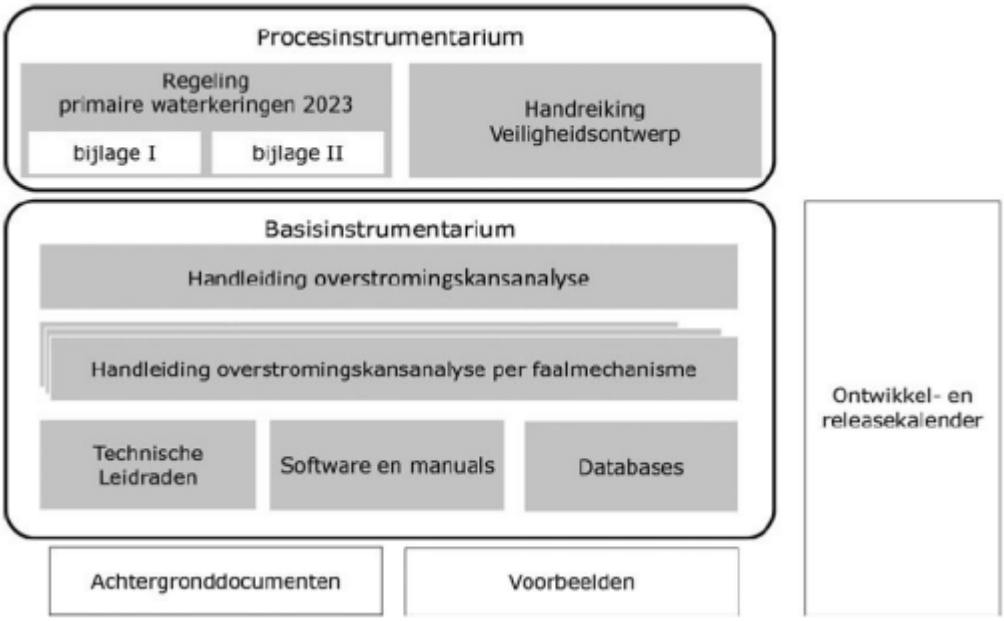
In 2023 en 2024 is een vervolg gegeven aan de studie naar de beoordeling van kunstwerken in waterkeringen t.a.v. het mechanisme piping. Daarbij is nagegaan op welke manier de geohydrologische aspecten correct meegenomen kunnen worden in de vigerende beoordelingssystematiek met bepaling van de overstromingskans voor het mechanisme piping bij kunstwerken.

Onder kunstwerken in waterkeringen worden zogenaamde puntconstructies verstaan zoals sluizen, gemalen, coupures en dergelijke.

Het belang van de studie is als volgt aan te geven.
Bij het beoordelen van waterkerende kunstwerken is het niet eenvoudig om ten aanzien van het faalmechanisme piping een goed oordeel te leveren, zeker indien geohydrologische aspecten een relevante rol kunnen hebben. Beoordelaars willen weten hoe de grondwaterstroming op een juiste wijze in hun beschouwing kan worden meegenomen. Door beoordelaars wordt een betere onderbouwing gewenst, gebaseerd op een sterkere connectie tussen geohydrologie en piping of geotechniek, zodat zij inzichten omtrent de grondwaterstroming rondom een kunstwerk in hun oordeel kunnen meenemen.

Er bestaan diverse handleidingen over piping. In de literatuuropgave bij dit verslag zijn de belangrijkste documenten aangegeven. De actuele beschrijving van de aanpak ter bepaling van de overstromingskans van een waterkerend kunstwerk in een dijktraject is te vinden in de handleiding overstromingskansanalyse kunstwerken volgens het beoordelings- en ontwerpinstrumentarium (BOI) [21].

Volgens de moderne procedure in het procesinstrumentarium (Figuur 1.1) staat het verhaal van de kering (in dit geval het kunstwerk) centraal. In het verhaal wordt gebruik gemaakt van faalpadanalyses waarbij ook de samenhang met het omliggende systeem wordt beschouwd. In het basisinstrumentarium zijn handleidingen, technische leidraden, software-applicaties en databases van hydraulische belastingen en de scenario’s voor de schematisatie van de ondergrond (SOS) opgenomen die kunnen worden gebruikt om de overstromingskans te bepalen.



Figuur 1.1 Opzetstructuur en documenten BOI 2023 [21, p.9].

Piping hangt in belangrijke mate af van de grondwaterstroming onder een kering of kunstwerk. Tijdens vooronderzoek in 2022 is echter gebleken dat ondanks de veelheid aan handleidingen over piping bij de beoordelaars behoefte bestaat aan meer duidelijkheid over een generieke opzet van de beoordeling van kunstwerken in waterkeringen op het faalmechanisme piping met in achtneming van de lokale geohydrologische omstandigheden zodat de beoordelaar een kunstwerk op basis van de juiste informatie kan classificeren op waterveiligheid.

De beoordelaars vroegen om een voorbeeldenboek met cases van geohydrologische systeemanalyse waaruit zou blijken wat de meerwaarde is van aanvullende geohydrologische screening van kunstwerken.
Het opstellen van een voorbeeldenboek past in principe in de opzet van documenten volgens de systematiek die gehanteerd is in de schematiseringshandleidingen volgens WBI [16] en bij de nieuwe handleidingen overstromingskansanalyse volgens BOI ([20] en [21]). In de laatste documenten is aangegeven dat het beschikbare instrumentarium door gebruikers lastig en theoretisch wordt gevonden en dat voorbeelden nodig kunnen zijn. Het doel van een voorbeeldenboek is om toelichting te geven op technische handleidingen. In voorliggend verslag is getracht om meer inzicht bij de beoordeling van kunstwerken te geven met het oog op geohydrologische aspecten.

Om het beoordelingsproces te ondersteunen heeft Deltares in opdracht van RWS WVL een rapportage opgesteld met een beschrijving van een mogelijke generieke opzet en daarbij in te zetten modellen [19].
Deltares deelde de daaruit resulterende bevindingen met een groep experts. Op 27 juni 2023 is een presentatie gegeven over de voortgang van het onderzoek in een webinar in het Kennis Kunde Platform van STOWA. Aan de sessie werd deelgenomen door een groot aantal belangstellenden. De sessie over Geohydrologie en piping is terug te zien via STOWA onder het thema geohydrologie en piping bij kunstwerken 20230627 of via de link https://youtu.be/ac3W2S28EXY .

Het werk van Deltares aan de opstelling van het voorbeeldenboek in het laatste deel van 2023 viel tegen omdat zich niet voldoende voorbeelden uit de praktijk aandienden. De studie is echter wel voortgezet door een beschrijving te maken van de methodiek van beoordeling op

piping. Eind 2023 is afgestemd met de klankbordgroep (Rob Delhez, Henk van Norel, Niek Verdijck) om na te gaan of de beschrijving voldoende praktisch was.
In die periode ontstond bij Rijkswaterstaat het inzicht dat er vanuit BOI een sterke behoefte is aan een plan voor de opzet van instrumentarium voor toekomstige beoordelingen over het onderwerp Piping bij Kunstwerken (onder beschouwing van geohydrologische condities). Dit plan dient volgens Rijkswaterstaat te worden vastgelegd in een roadmap voor het daartoe benodigde onderzoek. En dit onderzoek dient ook afgestemd te worden met andere onderzoeksgroepen, zoals voor piping bij waterkeringen, en adviesbureaus.

In voorliggend verslag is beschreven wat de huidige kennis is die ten grondslag ligt aan de beoordeling van kunstwerken op piping, wat de hiaten in de kennis zijn, en welke activiteiten in een roadmap voor toekomstig onderzoek gepland moeten worden.

1.2 Vraagstelling

In verband met de te verrichten studie zijn door Rijkswaterstaat de volgende hoofdvragen gesteld voor het onderzoek door Deltares:

- Zijn er vanwege de geohydrologische omstandigheden basissituaties te bedenken waarvoor aangegeven kan worden hoe en met welk model beoordeeld kan worden?
- Heeft een geohydrologisch model in elke voorbeeldsituatie een toegevoegde waarde voor de analyse?
- Wat is het rendement van toepassing van een geohydrologisch model, wat kan beoordelaar daar meer uithalen en hoe wordt dan gewerkt van grof naar fijn?
- Is er nog een aanvulling nodig of eventueel ook een andere aanpak mogelijk?

Voor de opstelling van de door Rijkswaterstaat gewenste roadmap voor onderzoek naar piping bij kunstwerken is de opdracht:

- Stel een roadmap op voor lange termijn onderzoek dat nodig is voor de ontwikkeling van instrumentarium voor piping bij kunstwerken mede in relatie tot geohydrologische randvoorwaarden in de looptijd van LBO-2 tot 2035.

De vraagstelling en de voorlopige resultaten van het onderzoek moeten worden besproken met een klankbordgroep van experts.

1.3 Resultaat van de studie in 2023 voor een voorbeeldenboek

Bij de beoordeling van waterkerende kunstwerken in dijken moeten de faalmechanismen piping (terugschrijdende erosie) en heave (hydraulische grondbreuk) worden beschouwd. Daaraan voorafgaand kan ook opbarsten optreden. Door piping ontstaan door een geconcentreerde uitstroming van water zandmeevoerende wellen en kanaaltjes onder een kering door. Bij heave treedt door verticale stroming achter een kunstwerk verlies van korrelspanning op in de ondergrond.

De vraag is wanneer piping en andere faalmechanismen relevant zijn en kunnen leiden tot onderloopsheid. Bij kunstwerken is namelijk een grote diversiteit aan aspecten aan de orde zoals: waterbouwkundige constructie, geotechnische situatie en de hydrologie/geohydrologie van de locatie en omgeving.
Niet alleen wat betreft geohydrologie zijn er veel onzekerheden maar ook in de toestand van constructies, bijvoorbeeld een grote onbekendheid t.a.v. de staat van kwelschermen. Dat maakt toetsing van kunstwerken voor beoordelaars lastig. Om die situatie te verbeteren is volgens Deltares onderzoekers een beter inzicht in grondwaterstroming rondom een kunstwerk gewenst bij beoordeling.

De overwegingen leverden de volgende deelvragen op:
- Hoe kan een beoordelaar een kunstwerk als veilig classificeren?
- Wat is hiervoor een goede generieke aanpak?
- Wanneer is een locatie specifieke of aangescherpte aanpak nodig en hoe moet dat?
- Hoe kan men de connectie tussen piping (geotechniek) en geohydrologie meenemen?
- Kunnen we m.b.v. metingen/monitoring beter beoordelen (meetprotocol)?

In 2022 heeft Deltares een voorstudie gedaan met het oog op:
- Bewustwording en inzicht omtrent relatie van geohydrologische aspecten met piping bij de beoordeling van kunstwerken.
- Nagaan met voorbeelden of screening van de situatie o.b.v. algemene info door een geohydroloog meerwaarde oplevert voor de beoordeling?

Het resultaat van de studie in 2022 was:
- Opvragen van enkele cases voor een voorbeeldenboek voor basissituaties.
- Screening van voorbeelden naar geohydrologische systeemanalyse door een geohydroloog.

De conclusie is dat er te weinig cases beschikbaar kwamen om een generieke aanpak op te baseren. Daarom is in 2023 in plaats van een voorbeeldenboek een rapport [19] samengesteld met een beschrijving van de mogelijke elementen in een generieke opzet van de beoordeling met een geohydrologische beschouwing van piping bij kunstwerken. Daarbij is de case keersluis Zierikzee als leidraad genomen.

1.4 Aanbevelingen van vakgenoten voor het uit te voeren onderzoek

Op 27 juni 2023 is een webinar in het kader van het STOWA Kennis Kunde Platform georganiseerd over de eerste uitkomsten van de studie. In de presentatie voor de webinar is uitgegaan van de notitie over state of art kennis van piping bij kunstwerken die door Deltares (John van Esch) is geschreven [19] en de procedure die bij beoordeling wordt gevolgd.
Tijdens de webinar zijn van deelnemende externen tips ontvangen voor de voortzetting van de studie. Zij ondersteunden de studie van harte.
De belangrijkste wens die door toehoorders werd uitgesproken, is om de beoordeling uit te laten gaan van een werkmethode van grof naar fijn. Op die manier moet het mogelijk zijn om in een vroeg stadium van beoordeling onderscheid te maken naar de urgentie waardoor locaties die in principe veilig zijn, niet nader behoeven te worden onderzocht.
Volgens gespreksleider (Maarten Overduin) is bovendien wenselijk dat per kunstwerk een faalkans kan worden aangegeven voor het faalpad piping. Dit zou uiteindelijk ook meer duidelijkheid geven ten aanzien van het handelingsperspectief.

Als aanbeveling bij voortzetting van de studie werd aangegeven dat een goede mix in de aanpak essentieel is, waarmee werd gedoeld op:
- Samenwerking met De Innovatieversneller (DIV) en Meanderende Maas.
- Afstemming tussen kennis en praktijk (waarnemingen).
- Aan bod laten komen van modellering en metingen.

1.5 Toelichting bij de wijziging van voorbeeldenboek naar verbetering van instrumentarium

In genoemde onderzoeksgroepen zoals DIV naar piping bij dijken en toepassing van heaveschermen is vastgesteld dat er redenen zijn om meer onderzoek te doen naar piping en heave:

- Door onderzoekers is gesignaleerd dat er onzekerheden zijn in het begrip van het fysisch proces en dat er versimpelingen in de beschrijving van de mechanismen zijn doorgevoerd bij de vertaling naar een model (bijvoorbeeld 2D in plaats van 3D stroming en piping).
- In de praktijk voor waterkeringen wordt de onzekerheid omtrent optredende fenomenen veelal opgelost door uit te gaan van schematisaties en keuze van veiligheden die mogelijk nogal robuust zijn (bijvoorbeeld in het model van Lane).
- Het is een feit dat de regels die zijn vervat in huidige modellen (bijvoorbeeld het Pipingmodel volgens Sellmeijer of het model voor heave) niet gekoppeld zijn. Gesignaleerd is dat er voor piping en heave een onduidelijk inbedding is in de overstromingskansanalyse, zeker voor kunstwerken.

Dit inzicht heeft Rijkswaterstaat bewogen om de vraagstelling omtrent onderzoek naar piping en geohydrologie bij kunstwerken te wijzigen.
Vanwege de wensen van Rijkswaterstaat is de studie in 2024 doorgezet met de formulering van een roadmap voor onderzoek naar piping bij kunstwerken ten behoeve van een goede opzet van de beoordelingsprocedure van kunstwerken in dijkringen op onderloopsheid, heave en piping, onder beschouwing van geohydrologische condities.
De roadmap moet worden opgesteld voor lange termijn ontwikkeling van instrumentarium voor piping bij kunstwerken i.r.t. geohydrologische randvoorwaarden binnen de looptijd van LBO-2 tot 2035.

2 Beoordeling faalmechanisme piping kunstwerken

2.1 Definities en typen kunstwerken

De definitie van een kunstwerk is volgens de Waterwet (2016):
“Een waterkerende constructie is een constructie die onderdeel uitmaakt van een waterkering en over een beperkte lengte de waterkerende functie van het grondlichaam geheel of gedeeltelijk overneemt, maar is aangelegd ten behoeve van een andere (utilitaire) functie die de waterkering kruist (zoals schutten en spuien). In verband met deze utilitaire functie zijn deze waterstaatkundige constructies meestal voorzien van één of meer beweegbare afsluitmiddelen.”

Volgens de TAW Leidraad Kunstwerken [39] zijn er 4 typen kunstwerken te onderscheiden bezien vanuit de waterkerende functie en de hieruit voortvloeiende eis:

- Type I: constructies die volledig zelfstandig de waterkerende functie moeten vervullen.
- Type II: constructies die in combinatie met een grondconstructie de waterkerende functie moeten vervullen.
- Type III: constructies die na falen van een andere constructie de waterkerende functie moeten vervullen.
- Type IV: constructies welke geen waterkerende functie hebben, maar bij falen de waterkering kunnen aantasten.
-

Tabel 2.1 Indeling van waterkerende kunstwerken in constructietypen
1) Bij aanwezigheid van keermiddelen of vervangende waterkeringen (damwanden, kanteldijken).

	constructietype			
Waterkerende kunstwerken	I	II	III	IV
- schutsluizen	♦			
- stroomsluizen (spui-, inlaat- en doorlaatsluizen)	♦			
- keersluizen	♦			
- hoogwater- en stormvloedkeringen	♦			
- coupures	♦	♦		
Bijzondere waterkerende constructies				
- specifiek beweegbare keringen (roteerbare, verschuifbare, oppompbare of mobiele keringen)	♦	♦		
- kistdammen en diepwanden	♦			
- cellen- en combiwanden	♦			
- keermuren, -wanden en kadewanden	♦			
- damwandschermen (stabiliteit-, erosie-, kwel-, en functiescheidende schermen)		♦		
- palenwanden		♦		
- keer- en dijkmuurtjes		♦		
- gewapende grondconstructies		♦		
Overige objecten (kokervormige constructies door de waterkering)				
- gemalen	♦	♦	♦ 1)	♦
- duikers			♦ 1)	♦
- pijpleidingen			♦ 1)	♦
- tunnels (zonder kanteldijken)			♦ 1)	♦

In [39, Bijlage B4] zijn per type constructie de eisen voor de stabiliteit en de sterkte van de constructie vermeld en de bijbehorende rekenwaarden.

Uit de mechanismebeschrijving van piping volgens de technische leidraden volgt:

- ***Piping*** *is de vorming van holle kanaaltjes in de ondergrond door terugschrijdende erosie van zand die ontstaat door stroming van grondwater onder waterkeringen of waterkerende constructies naar wellen in het achterland. Hoge buitenwaterstanden leiden tot toename van de stroming van grondwater onder kunstwerken, afhankelijk van de geohydrologische condities in de betreffende regio.*

Uit de Technische leidraad piping bij kunstwerk [18] volgt voor onderloopsheid en achterloopsheid (waarin piping een rol speelt):

- ***Onderloopsheid*** *betreft het ontstaan van holle ruimten onder een kunstwerk als gevolg van een geconcentreerde kwelstroom waarbij gronddeeltjes worden meegevoerd. Hierbij loopt de kwelstroom onder het kunstwerk door op het grensvlak van constructie en zand. Onder een kunstwerk zijn doorgaans kwelschermen aanwezig, waardoor de kwelstroom ook verticale componenten omvat. Dit hoeft echter niet altijd het geval te zijn. Denk aan lange duikers en leidingen waarbij geen kwelschermen aanwezig zijn. In de praktijk wordt onderloopsheid echter vaak 1 op 1 gekoppeld aan situaties met een (deels) verticale kwelweg.*
- *Onder* ***achterloopsheid*** *wordt verstaan de vorming van kanaaltjes of holle ruimten aan de zijkant van een kunstwerk als gevolg van het uitspoelen van grond. De maatgevende kwelweg is meestal zuiver horizontaal gericht (een kwelstroom langs het kunstwerk op het grensvlak van een cohesieve laag), maar kan ook verticale componenten bevatten (denk aan een uittrede onder een binnendijks scherm). In de praktijk wordt achterloopsheid echter vaak 1 op 1 gekoppeld aan situaties met een zuiver horizontale kwelweg.*

2.2 Aandachtspunten bij de beschrijving van faalpaden

Voorliggende rapportage betreft de beoordeling van het faalmechanisme piping bij kunstwerken, waarbij in het bijzonder aandacht wordt gegeven aan de invloed van grondwaterstroming op het ontstaan en de progressie van piping.

Uit de schematiseringshandleiding piping bij kunstwerk [17] en uit de handleiding overstromingskansanalyse kunstwerken [21] komen enkele aandachtspunten voor de beschrijving van faalpaden bij kunstwerken naar voren waar rekening mee gehouden moet worden:

- In de Nederlandse waterkeringen komen veel verschillende typen kunstwerken met verschillende functies voor, zoals: schutsluis, keersluis, uitwateringssluis, gemaal, coupure, inlaatsluis.
- Er wordt uitgegaan van kunstwerken met een doorstroomoppervlakte > 0,5 m2.
- Ieder kunstwerk wordt in het dijktraject als apart vak gedefinieerd.
- Samengestelde complexen van kunstwerken (bijvoorbeeld sluizencomplexen) worden ontleed, waarbij elk kunstwerk apart worden beoordeeld en alle onderdelen (bijvoorbeeld een gedeeld kwelscherm) in samenhang worden meegenomen.
- Falen van het kunstwerk treedt op indien zoveel water onder, door of over het geopende, bezweken of standzekere kunstwerk gaat dat dit in het geval van een kunstwerk in een primaire waterkering leidt tot substantiële schade en/of slachtoffers (overstromingsgevolgen) of voor kunstwerken in lagere orde keringen leidt tot significante schade door wateroverlast.
  Er zijn verschillende faalmechanismen die een rol spelen bij het falen van kunstwerken:
  - Falen door overslag en/of overloop.
  - Falen door instroming als gevolg van niet sluiten van het kunstwerk.
  - Falen door constructief bezwijken.
  - Falen door piping.

- Grote samengestelde kunstwerkcomplexen moeten worden onderworpen aan een aangescherpte beoordeling (voorheen toets op maat). Voor piping houdt dit in dat de kwelwegen van het kunstwerkcomplex als geheel moeten worden beschouwd en niet alleen de kwelwegen die slechts aan één van de kunstwerken in het complex zijn gerelateerd.

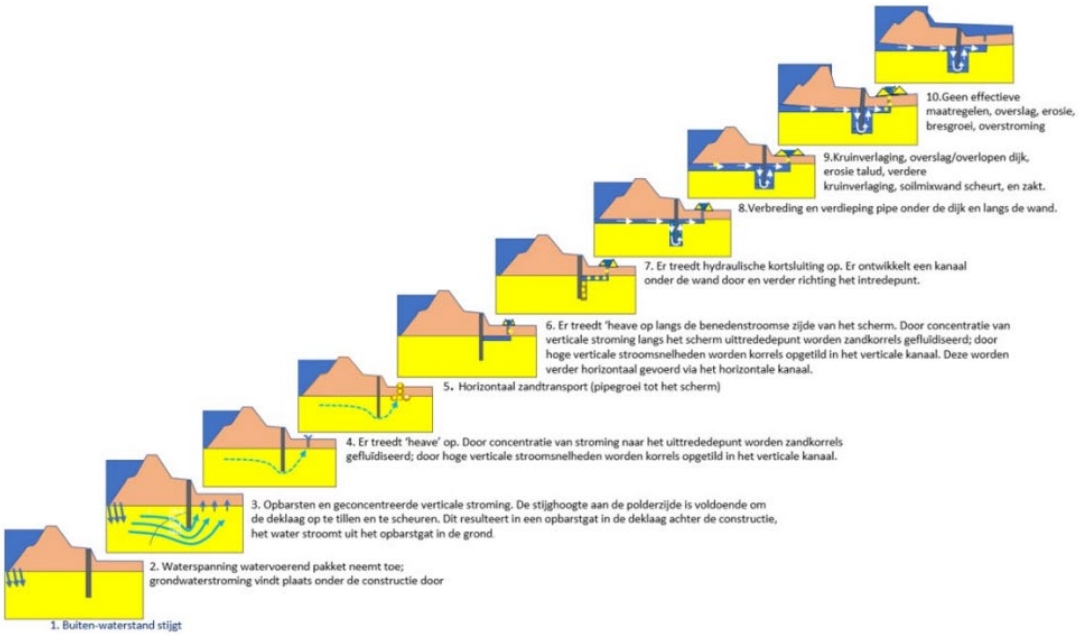
In het licht van onderhavige studie moet aan die aandachtspunten worden toegevoegd:

- De analyse dient plaats te vinden in samenhang met de beoordeling van de verschillende optredende deelmechanismen en in samenhang met de analyse van hydraulische randvoorwaarden, eigenschappen van de ondergrond en de grondwaterstroming.

Voordat op alle bij kunstwerken optredende mechanismen wordt ingegaan, is het nodig om over de definitie van onderloopsheid duidelijkheid te verschaffen.
In meerdere leidraden van dijken en heaveschermen wordt onderloopsheid gelijk gesteld aan piping. In het licht van waterveiligheid van kunstwerken is dat feitelijk onjuist. Bovendien bij kunstwerken wordt spleetvorming onder een kunstwerk ook wel onderloopsheid genoemd. Maar de oorzaak van spleetvorming hoeft niet piping te zijn. Spleetvorming kan ook als gevolg van zakking van de bodem en ondergrond onder een op palen gefundeerd kunstwerk ontstaan. Dit verschijnsel zal effect hebben op de pipingbeschouwing omdat door spleetvorming met een kortsluitstroming onder het kunstwerk rekening moet worden gehouden. Omdat in de bestaande beschrijvingen van piping in recente literatuur het fenomeen onderloopsheid als topgebeurtenis is vermeld, stellen wij voor om de definitie van onderloopsheid als zodanig aan te houden en om het voorkomen van holle ruimte door zakking onder kunstwerken als deelfaalmechanisme aan te duiden als “spleetvoorkomen”.

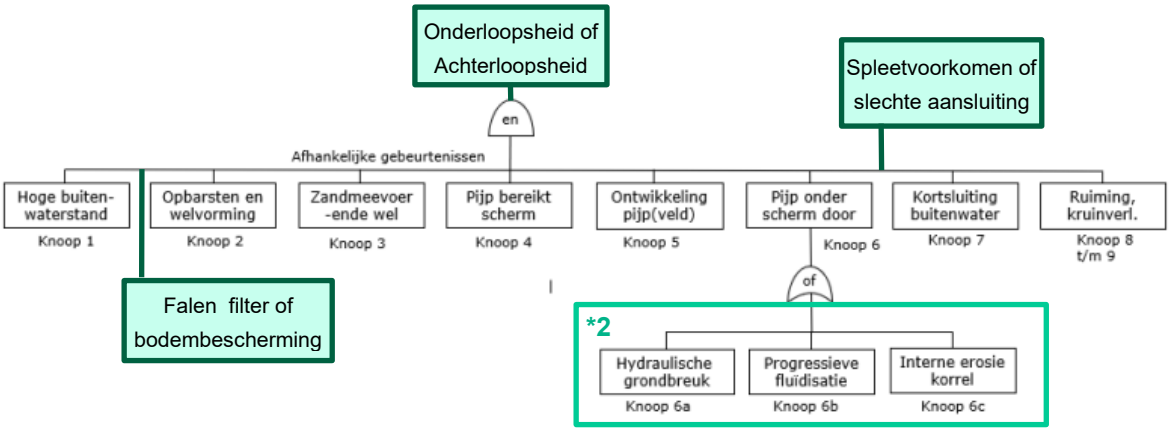
Piping leidt door erosie vanuit een zandmeevoerende wel tot een verbinding met hoog water. Bij kunstwerken is echter niet alleen sprake van de vorming van pipes maar treden er in samenhang diverse deelmechanismen op. Dat heeft niet alleen betrekking op de initiatie van piping door opbarsten en vorming van zandmeevoerende wellen maar heeft ook een relatie met de grondwaterstroming rond kwelschermen bij kunstwerken en de heave die achter kwelschermen kan optreden. Bovendien kan de waterveiligheid van een kunstwerk niet alleen door onderloopsheid worden bedreigd maar ook door achterloopsheid waarbij water om het kunstwerk heen stroomt (soms wordt dit ook wel aangeduid als langsloopsheid maar in dit document hanteren we de term achterloopsheid). Om dit risico te beheersen worden bij kunstwerken wel onder- en achterloopsheidschermen geplaatst.

Het gehele overzicht van in samenhang optredende mechanismen in het faalpad onderloopsheid is voor waterkeringen met heaveschermen aangegeven in de volgende figuur en bijbehorende foutenboom [28].



Figuur 2.1 Faalpad piping voor dijken met heaveschermen [publicatie [28] heaveschermen].

In dit faalpad voor heaveschermen ontbreken enkele mechanismen die voor kunstwerken wel moet worden beschouwd en in de volgende foutenboom zijn vermeld.



Figuur 2.2 Foutenboom onderloopsheid en piping voor dijken met heaveschermen [volgens publicatie [28] heaveschermen], aangevuld met deelmechanismen specifiek voor kunstwerken volgens voorliggende studie.

De knopen 6a en 6b hebben betrekking op het mechanisme heave achter een scherm. Deze ontstaat door een opwaartse kwelstroming met toename van waterspanningen waardoor korrelspanningen afnemen en kans op erosie van een zandlaag ontstaat. Er ontstaat dan drijfzand waardoor het draagvermogen afneemt en eventueel aanwezige bodembescherming en/of filterconstructie verzakt. Door verstoring van het horizontale evenwicht is het mogelijk dat het scherm horizontaal vervormt.

Anders dan bij dijken kunnen bij kunstwerken meer deelfaalmechanismen optreden. Volgens onze inventarisatie zijn dat 2 extra faalmechanismen:

- Mechanisme spleetvoorkomen: bij kunstwerken die op palen zijn gefundeerd kan een spleet onder de constructie voorkomen.

- Mechanisme falen bodembescherming: als een bodembescherming of filterconstructie is toegepast die faalt, kan dat ontgronding of erosie inleiden waarna begin van piping kan ontstaan.

Achterloopsheid is vergelijkbaar met het faalmechanisme onderloopsheid. Achterloopsheid treedt op bij een slechte aansluiting van het kunstwerk op de waterkering. In de watervoerende laag, in de aanvulgrond naast het kunstwerk of naast een scherm kan er piping en vervolgens kortsluitstroming naast het kunstwerk ontstaan. Dit proces kan worden getriggerd door een hogere stroomsnelheid van het grondwater omdat de kwelweg geconcentreerd rond het kunstwerk of langs een schermwand wordt gedwongen.

In [SBW 2009] wordt voor piping behalve terugschrijdende erosie van zanddeeltjes (zogenaamde sijperosie) bovendien interne erosie (suffosie) vermeld. Suffosie kan alleen optreden in zand met een sterk niet-uniforme korrelverdeling. In COW (1977) wordt gesteld dat er gevaar voor suffosie is als D60/D10>20. Indien D60/D10 tussen 10 en 20 ligt is er sprake van een overgangsgebied en bij een waarde kleiner dan 10 kan suffosie uitgesloten worden. In Zuid-Limburg kan suffosie een rol spelen omdat hier afwisselend zeer fijne en zeer grindige afzettingen voorkomen.

3 Actueel kader van beoordeling van kunstwerken op piping

3.1 Voorkomen van Piping in Nederland

Piping is een belangrijk faalmechanisme bij de beschouwing van het overstromingsrisico van waterkeringen in Nederland. Vooral langs de grote rivieren is welvorming en piping achter waterkeringen veelvuldig geconstateerd.

In figuur 2 is aangegeven waar welvorming langs waterkeringen in praktijk is waargenomen. Uit de figuur kan men afleiden dat piping veelal nabij de rivieren (Maas, Rijn, Lek, Waal, IJssel) heeft plaatsgevonden en in enkele gevallen in Zeeland. Vanwege het voorkomen van piping op de aangegeven locaties bestaat de mogelijkheid dat aldaar trajecten van waterkeringen en daarin voorkomende kunstwerken bij de beoordeling worden afgekeurd vanwege een te grote kans op het optreden van piping bij hoge waterstanden.

Figuur 3.1 Bekende locaties met piping.

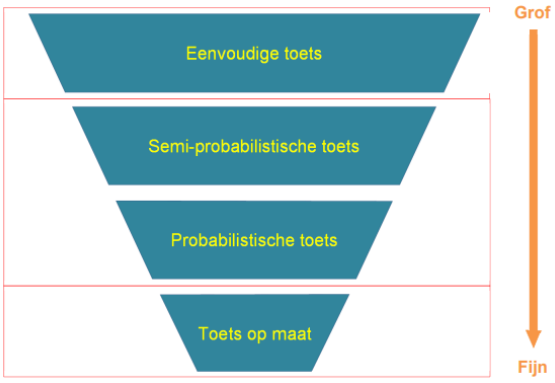
Er kan niet worden uitgesloten dat ook in kustgebieden met fijnzandige afzettingen piping kan ontstaan bij dijken en kunstwerken. Het feit dat dit dunnere zandige afzettingen afgewisseld met kleiige lagen en leemlenzen kan inhouden dat het risico op falen door piping minder groot is dan in het rivierengebied.

3.2 Beoordeling van piping voor waterkeringen

3.2.1 Beoordeling van piping voor kunstwerken

De beoordelingsprocedure zoals voorgeschreven in WBI 2017 Bijlage I Procedure voorzag in de aanpak van grof naar fijn in drie niveaus [17]:

- Eenvoudige beoordeling, met toetsregels.
- Nadere of gedetailleerde beoordeling, zo mogelijk (semi)-probabilistisch.
- Specifieke beoordeling (voorheen toets op maat).



Figuur 3.2 De diverse toetsen in de beoordelingsprocedure [17, p.12].

De methodiek is niet wezenlijk veranderd maar de in WBI gebruikte terminologie is in BOI aangepast van toetsen naar beoordelen. Volgens BOI moet bij de huidige aanpak eerst het verhaal van de kering worden gemaakt en dan kan met een eenvoudige beoordeling worden gestart waarbij de relevantie van het faalmechanisme voor het beschouwde traject of kunstwerk op basis van beslisregels wordt nagegaan, onder globale inschatting van de overstromingskans en aanscherping van de overstromingskans. Als de beoordeling wijst op een noodzakelijke verfijning worden geavanceerdere methoden en modellen aangewend.

In de praktijk wordt de beoordeling van kunstwerken momenteel uitgevoerd met vergelijking van kwelwegen met de norm als leidraad.
De beoordeling van kunstwerken op piping zou echter ook aan de moderne methode met beschouwing van overstromingskans voor de gehele dijkring moeten gebeuren.

De vraag die aan onderhavig onderzoek ten grondslag ligt, is, hoe de beoordeling op piping kan worden gedaan voor kunstwerken en op welke wijze geohydrologische condities bij de beoordeling op piping op een adequate manier kunnen worden meegenomen.

In ons rapport [19] dat binnen onderhavig onderzoek is uitgebracht, zijn de mogelijke tools aangegeven, die voor beoordeling met het oog op geohydrologie en piping kunnen worden toegepast.

In de webinar van medio 2023 zijn de overwegingen van onderzoekers en de methoden uit de rapportage [19] voorgelegd. Rekening houdend met de schematiseringshandleidingen, met moderne systematiek volgens BOI en de nuttige aanwijzingen uit de webinar zijn in de navolgende beschrijving van beoordelingsstappen de uit te voeren activiteiten en te verzamelen data aangegeven.

3.3 Eenvoudige beoordeling met beslisregels

3.3.1 Algemene aanpak volgens handleidingen

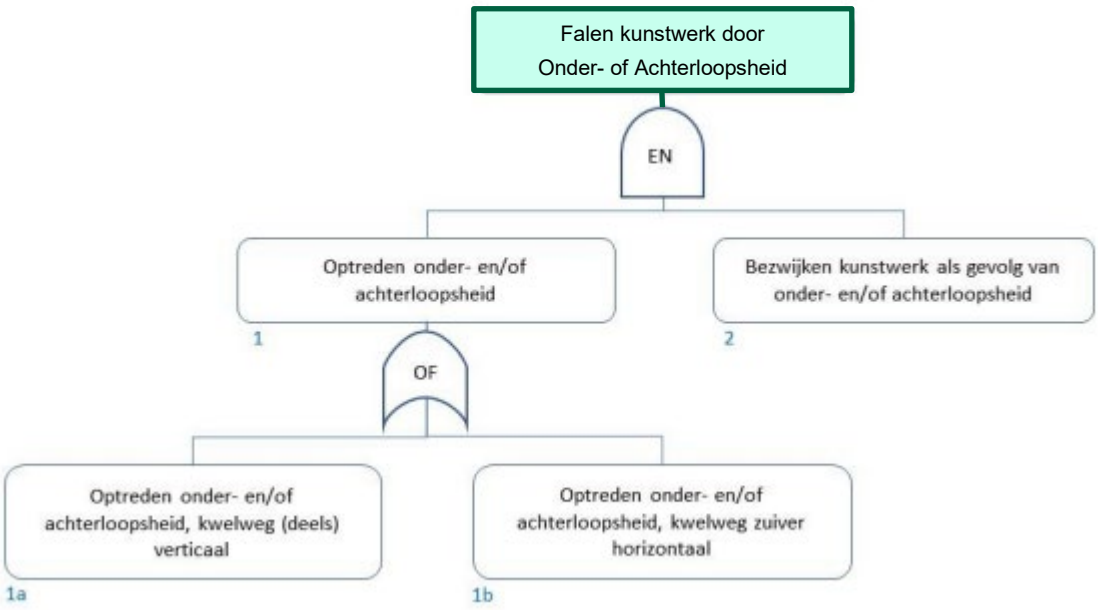
Volgens de vigerende BOI procedure moet eerst een beschrijving worden opgesteld met het verhaal van de kering waarin de mogelijke faalpaden voor betreffend object worden uitgewerkt. Met betrekking tot piping bij kunstwerken is volgens [21] vaak sprake van één faalpad bestaande uit meerdere gebeurtenissen die moeten optreden om tot falen te komen. Als de faalkansbijdrage van één gebeurtenis in het faalpad afdoende klein is, is verdere kwantificering van het faalpad niet nodig.

Falen als gevolg van piping bij kunstwerken treedt op volgens [21, p.28] als:

- Zich een hoogwater aandient en het kunstwerk (in ieder geval partieel) is gesloten:
  - EN (1) Er door een geconcentreerde kwelstroming als gevolg van een verval over het kunstwerk een zodanige uitspoeling van gronddeeltjes ontstaat
    (1a) onder het kunstwerk (onderloopsheid)
  - OF (1b) rondom het kunstwerk (achterloopsheid) met een doorgaand erosiekanaal (pipe).
  - EN (2) Het kunstwerk bezwijkt door deze pipevorming waardoor een bres in de waterkering ontstaat met substantiële schade en/of slachtoffers (overstroming) als gevolg.

De nummers geven de plaats van de gebeurtenis aan in de foutenboom in Figuur 3.3.

Het faalpad ziet er volgens [21] in een foutenboom als volgt uit:



Figuur 3.3 Foutenboom piping kunstwerk volgens [21], aangepast op terminologie voor kunstwerken.

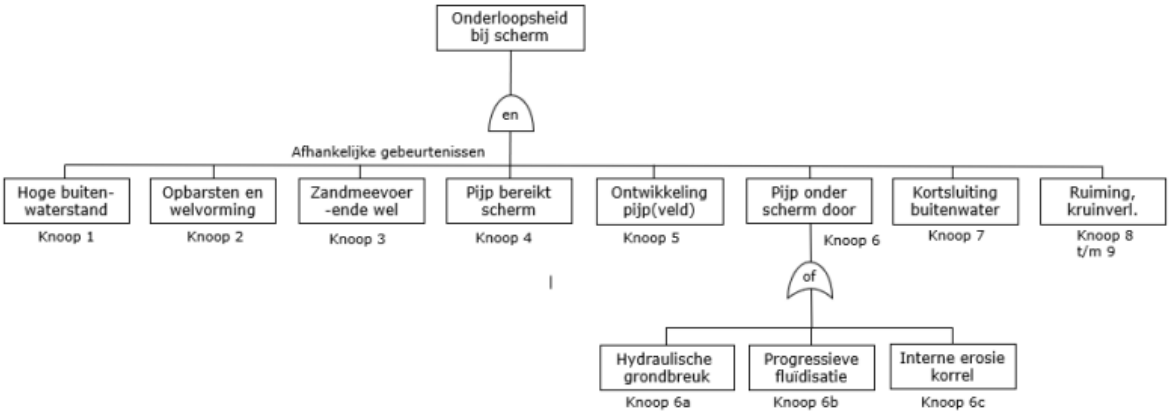
De gebeurtenissen die onder 1a en 1b liggen zijn deelmechanismen:

- Pipegroei, heave langs binnenscherm, pipegroei onder kw OF stroming door spleet onder kunstwerk, heave langs buitenscherm, pipegroei naar voorzijde, piperuimen.
- Daaronder bezwijken bodembescherming OF filter waarna erosie OF opbarsten EN heave in pipe.

In de foutenboom in [21, Figuur 5] worden de volgende deelfaalmechanismen onderscheiden:

1. Optreden faalpad kortsluiting onder of naast het kunstwerk.
2. Bezwijken kunstwerk als gevolg van kortsluiting onder of naast het kunstwerk.

De term “kortsluiting” als de verbinding met buitenwater en stroming van water die bij pipe doorgroei optreedt, is ook gebruikt in de foutenboom piping bij heaveschermen (



Figuur 2.2).

De condities die kunnen leiden tot meest waarschijnlijke kwelwegen en faalmechanismen zullen in het verhaal van de kering beschreven moeten worden. Om richting te geven zijn de volgende algemene beschrijvingen beschikbaar [21].

Ad 1. Optreden faalpad kortsluitstroming onder of naast het kunstwerk

Falen door piping vindt plaats als gronddeeltjes uitspoelen. De uitspoeling vindt plaats ten gevolge van een geconcentreerde grondwaterstroming, waardoor holle ruimten ontstaan onder (onderloopsheid) of naast (achterloopsheid) een kunstwerk. De stroming is het gevolg van een waterstandsverschil over het kunstwerk, die leidt tot overdruk van waterspanning aan benedenstroomse zijde. Als de afdekkende bodemlaag daar wordt opgedrukt of opbarst kan geconcentreerde uitstroming van grondwater ontstaan (wellen). Als de stroming groot genoeg is neemt deze gronddeeltjes mee en kan er een pipe gaan groeien. Het erosieproces hoeft niet altijd tot falen te leiden. Het proces kan tot stilstand komen als het waterstandsverschil niet groot genoeg is of niet lang genoeg aanhoudt om de erosie op gang te houden.

Als het proces niet stopt, ontstaat een proces van terugschrijdende erosie waarbij deze holle ruimten uitgroeien tot een doorgaand kanaal onder het kunstwerk. Het erosieproces gaat dan ongecontroleerd verder en de erosie van gronddeeltjes onder en/of naast het kunstwerk neemt sterk toe.

Indien er schermen onder het kunstwerk staan zou een pipe daar kunnen worden gestopt, tenzij de stroming zo sterk is dat er heave langs het scherm ontstaat. Bij een opwaartse kwelstroom zijn de waterspanningen groter dan hydrostatisch (er is dus wateroverspanning), wat leidt tot afname van de korrelspanningen. Een grenstoestand wordt bereikt wanneer de toename van de wateroverspanning ten gevolge van stromingsdruk met de diepte gelijk is aan de toename van de korrelspanning voor het geval dat de waterspanning hydrostatisch zou zijn. De toename van de wateroverspanning kan worden uitgedrukt in termen van de verticale gradiënt van de grondwaterpotentiaal. De gradiënt waarbij de grenstoestand optreedt wordt kritieke gradiënt genoemd.

Als heave van het scherm is opgetreden kan onder het kunstwerk pipegroei verder gaan. Dat kan uiteindelijk leiden tot pipes onder het kunstwerk.
Indien het kunstwerk op palen staat, bestaat de mogelijkheid dat onder het kunstwerk een spleet aanwezig is. In dat geval kan er opnieuw heave ontstaan bij het tweede scherm aan zijde hoogwater. Daarna moet eerst nog pipegroei optreden naar hoogwaterzijde voordat kortsluiting ontstaat.
Het verval over het kunstwerk waarbij in een stationaire situatie het pipingproces niet meer stopt, wordt het kritieke verval genoemd. Overschrijding van het kritieke verval wordt in de modellen doorgaans als faaldefinitie voor het optreden van onder- en/of achterloopsheid gehanteerd.

Om dit deelmechanisme te onderzoeken zijn beschrijvingen nodig van de hydraulische randvoorwaarden, van de bodemopbouw en van de geohydrologische condities ter plekke.

Ad 2. Bezwijken kunstwerk als gevolg van kortsluiting onder en/of naast het kunstwerk

Uiteindelijk kan de erosie onder en naast het kunstwerk zodanig groot worden dat het kunstwerk als geheel instabiel wordt en bezwijkt, met als gevolg een bres in de waterkering.

Voordat het kunstwerk als geheel bezwijkt na het overschrijden van het kritieke verval moet een aantal vervolgprocessen beslag krijgen.

Allereerst moet een doorgaande pipe worden gevormd onder of naast het kunstwerk. Zodra het kanaaltje, dat vanaf de benedenstroomse zijde stroomopwaarts is gegroeid, contact maakt met het water aan de bovenstroomse zijde van de dijk, treedt een ruimproces op waarbij steeds meer zand erodeert.
Zodra het ruimproces de bovenstroomse zijde heeft bereikt, resulteert dit in een forse toename van zandtransport en debiet. Hierdoor zal als gevolg van erosie van grond onder en langs het kunstwerk de algehele stabiliteit van het kunstwerk onvoldoende worden, waarna het kunstwerk of een deel daarvan kantelt of afschuift.
Bij kwelwegen naast het kunstwerk kan het voorkomen dat het kunstwerk wel blijft staan, maar de aansluitende dijk inzakt als gevolg van het erosieproces en uiteindelijk bezwijkt.

De beschrijving van dit deelmechanisme vergt een goede kennis van de lokale situatie. Door mensen uit de praktijk wordt aangegeven dat rond kunstwerken als gevolg van de bouw altijd sprake is van geroerde grond, zodat de beschikbare data dan wel nieuwe onderzoeksgegevens daar inzicht in moeten geven.

3.3.2 Verhaal van de kering: Gevoeligheid voor belangrijkste faalmechanismen

De uitwerking start met het opstellen van het verhaal van de kering. Deze aanpak is ook beschreven in [20, par. 5.1.4: Van verhaal naar overstromingskans] en bestaat voor de eenvoudige beoordeling uit de eerste 3 stappen in de daar beschreven aanpak per faalmechanisme:

- Een beschrijving maken van de faalpaden die aangeven welke gebeurtenissen na een initieel mechanisme nodig zijn voor een overstroming.
- De aspecten benoemen die vanuit ondergrond, waterkering en belasting bepalend zijn voor het optreden van een overstroming, in het geval van een specifieke gebeurtenis.
- Beslisregels selecteren waarmee kan worden onderbouwd wanneer een faalmechanisme niet bijdraagt aan de overstromingskans.

Dit is een gelaagd verhaal, waarin wordt nagegaan hoe een extreme situatie leidt tot de topgebeurtenis van falen, bezwijken of overstroming. Hierin moeten de verschillende condities die aan de orde zijn, worden beschreven. Het is van belang om na te gaan wat de hydraulische en hydrologische belastingen zijn en hoe die zich vertalen naar belasting op de kering of het kunstwerk. Daarbij wordt vastgesteld of verschillende condities en belastingen op elkaar in kunnen werken en tot welke vervolggebeurtenissen dat kan leiden. Het opstellen van een gebeurtenissenboom (nog zonder kansbeschouwing bij verschillende takken) met achtereenvolgende unieke gebeurtenissen is hiervoor een goede methode.

De aspecten die in de beschrijving worden meegenomen en bepalend zijn vanuit ondergrond, waterkering en belasting voor het faalmechanisme piping, betreffen deelmechanismen en indirecte mechanismen:

0. Hydraulische belasting?
   - Groot verhang over het kunstwerk, leidend tot sterke grondwaterstroming.
   - Lokale hydrologische situatie: Insnijden rivier, voorlandlengte, rivierbochten, polders, waterbeheersing.
1. Bodem opbarstgevoelig?
   - Dunne deklaag (< 1 à 2 meter).
   - Grondwaterstand > grenspotentiaal -> opbarstgevoelig.
   - Onzekerheid op de volumegewichten tgv tekort aan grondonderzoek.
2. Bodem gevoelig voor heave (hydraulische grondbreuk)?
   - Aanwezigheid van kwelschermen.
   - Waterdrukverdeling verticaal langs schermen.
   - Korrelverdeling in zandige lagen.
3. Bodem gevoelig voor piping (terugschrijdende erosie)?

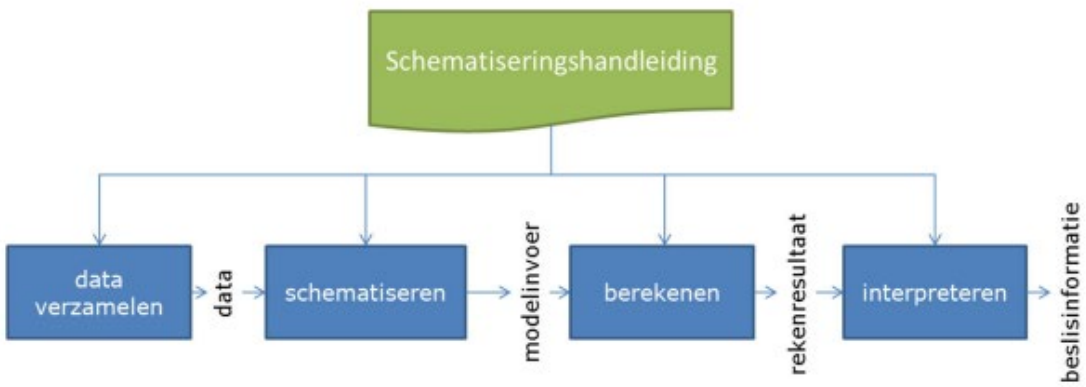
- Voorkomen van zandbanen in een waterremmende deklaag, watervoerende zandlaag onder en naast kunstwerk, doorlatendheid, laagdikte.
- Korrelverdeling toplaag zandpakket fijnzandig.
- Piping in de omgeving vastgesteld aan de hand van wellen.
- In de omgeving voorkomende doorgraving van de deklaag (eventueel zandig aangevuld), sloten of scheuren.
- Kunstwerk gefundeerd op palen, zakkende grond, bodemdaling binnenzijde.
- Aansluiting aan naastliggende waterkering, vervorming van maaiveld of scheurvorming in de grond langs de constructie.
- Staat van kwelschermen (in [4, par. 6.3.3.3] staan specificaties vermeld).

4. Ondergrond achterloopsheidgevoelig?
   - Plaatsing in kleidijk > nee
   - Plaatsing in zanddijk > ja
5. Kunnen vervolgmechanismen optreden die tot overstroming kunnen leiden?

De beschrijving van gebeurtenissen en faalmechanismen leidt tot kennis van het systeem. Het is verstandig om hierin de ervaringen van de beheerder mee te nemen, bijvoorbeeld ten aanzien van waarnemingen van de staat van de kering, gedrag bij hoogwater en voorkomende of in het verleden opgetreden schades. De interpretatie van de beschrijving kan worden gecontroleerd op basis van mogelijke gebeurtenissen. Indien bepaalde gebeurtenissen niet kunnen optreden of met een verwaarloosbare kans, is de beoordeling niet relevant. Het optreden van het faalmechanisme kan dan worden uitgesloten.

Volgend uit de beschrijving moet de schematisering beginnen met identificatie van mogelijke maatgevende kwelwegen. Visualisatie van het kunstwerk in 3D is dan een handig hulpmiddel.

Het uitvoeren van een beoordeling van primaire waterkeringen bestaat op hoofdlijnen uit vier delen (Figuur 3.4). In de schematiseringshandleiding [16] wordt de samenhang aangegeven tussen deze vier delen die in de blokken zijn aangegeven: verzamelen van benodigde data, methode van schematiseren, gebruik van beschikbare software en hoe de resultaten kunnen worden geïnterpreteerd.



Figuur 3.4 Activiteiten volgens toetssystematiek in de schematiseringshandleiding piping [16, p.10].

De activiteit schematiseren is gedefinieerd als het vertalen van de gegevens over de waterkering naar invoer voor de beoordelingsmethode (bijvoorbeeld een rekenmodel) waarmee de toets wordt uitgevoerd. De gegevens kunnen meetgegevens zijn uit het veld of het laboratorium, ontwerp- of revisietekeningen zijn, maar kunnen ook kennis en ervaring betreffen.

In het algemeen moet bij het schematiseren van het faalmechanisme onder- of achterloopsheid in het toetsspoor piping een aantal acties worden uitgevoerd om een of meer mogelijk maatgevende kwelwegen rondom het kunstwerk aan te duiden. Deze acties zijn:

1. Identificatie van mogelijk maatgevende kwelwegen.
2. Geotechnische en geohydrologische beschrijving en schematisering van de grondlagen onder en naast het kunstwerk.
3. Bepaling van maatgevende kwelwegen.
4. Schatting van verdeling grondwaterstanden bij maatgevend hoogwater.
5. Analyse van de uitkomsten.

Er wordt aanbevolen om bij de beoordeling te werken van grof naar fijn. Zodra wordt voldaan aan een basale eis omtrent het faalmechanisme behoeft geen nader onderzoek te volgen. Als vervolg wel nodig is wordt nagegaan of onzekerheden kunnen worden verkleind of conservatieve schattingen verscherpt en een beeld van de faalkans kan worden verkregen.

In deze fase wordt alleen uitgesloten of de constructie gevoelig is voor bepaalde faalmechanismen. Een goede beschrijving van de beoordeling van kwelwegen is gegeven in paragraaf 4.8 van [4], maar ook in 4.6 en 4.7 staan beschrijvingen van piping en heave.

De controle van de gevoeligheid van het kunstwerk voor diverse faalmechanismen vindt plaats op basis van beschikbare kennis, waarbij de volgende informatie wordt verzameld om te gebruiken bij de prioritering of urgentie. De urgentie is lager als sprake is van de volgende omstandigheden (in willekeurige volgorde):

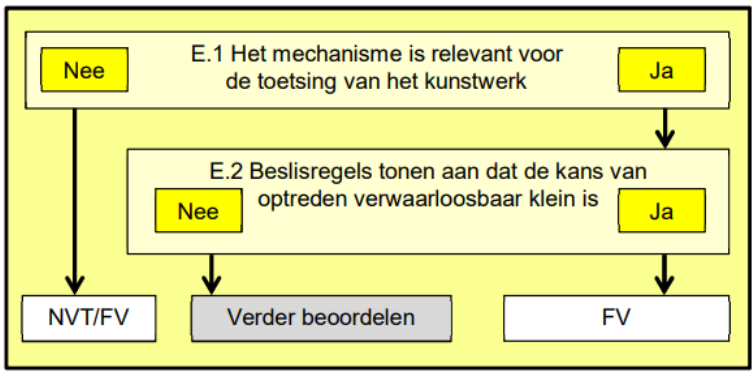
- Geen hoge hoogwaterstand.
- Geen groot waterstandsverschil buiten en binnen (klein verval over kunstwerk).
- Ligging buiten pipinggevoelig gebied.
- Diepe stijghoogten vanwege nabijgelegen diepe polders.
- Kunstwerk niet op palen gefundeerd.
- Kwelscherm aanwezig.
- Bodembescherming of filter in goede staat aanwezig aan de uittredezijde.
- De ondergrond in de omgeving van het kunstwerk is niet geroerd en de constructie is omsloten door een klei-/veenpakket met een dikte onder de grondwaterstand van minimaal 1 meter.
- Intredepunt niet vlakbij kunstwerk (lang voorland zonder sloten of nevengeulen).
- Geen dik watervoerend pakket direct onder kunstwerk.
- Lage stijghoogte in watervoerend pakket (voorkomt mogelijk heave).
- Kwelweglengte groter dan 10*ΔH.

Rekening houdend met deze factoren wordt de eenvoudige beoordeling gedaan aan de hand van beslisregels.
Als de beslisregels positief worden beantwoord, kan de toetsing van het betreffende kunstwerk worden beëindigd. Als er onzekerheid bestaat over voldoende functioneren van de constructie of over optreden van een faalmechanisme wordt de volgende stap in de beoordeling ingegaan.

3.3.3 Bepalen relevantie beoordeling met generieke beslisregels

De generieke beslisregels zijn bedoeld om op voorhand vast te stellen of beoordeling van een faalmechanisme relevant (substantieel bijdragend aan de overstromingskans) is of niet.

In de schematiseringshandleiding piping kunstwerk [17] is de eenvoudige toets beschreven. Ons voorstel is om deze werkwijze als eenvoudige beoordeling te handhaven:



Figuur 3.5 Schema eenvoudige toets piping kunstwerk (PKW) [17, p.13].

Stap E.1: Beslisregels in de relevantietoets

In deze stap gaat het om beslisregels waarmee wordt nagegaan of het faalmechanisme al of niet relevant is.

De eenvoudige beoordeling met beslisregels wordt gebaseerd op de identificatie van verschillende condities met informatie over de constructiedetails, bodemopbouw, verval over het kunstwerk en daarmee samenhangende grondwaterstroming.

Als aan één van de volgende beslisregels wordt voldaan dan kan op voorhand worden aangegeven dat het optreden van het faalmechanisme piping bij kunstwerk niet relevant is.

	Afweging	Beschrijving eenvoudige beoordeling relevantie mechanisme
1	**Beslisregel**	Aan uittredezijde van het kunstwerk is een **filter aanwezig** waarin uitstroming plaatsvindt. Indien dit filter voldoet aan de filterregels en de conditie goed is, dan is veiligheid met betrekking tot piping gewaarborgd.
	Onderbouwing	Een goed functionerend filter zorgt dat het water uittreedt in het filter en dat hierbij geen zanddeeltjes worden meegevoerd. Voor een overzicht van de 'filterregels', zie par. 5.4.3 en 8.6 van Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen [4]. Het filter moet op zowel locaties met betrekking tot onderloopsheid als ook achterloopsheid zijn aangebracht.
2	**Beslisregel**	De kruising is een **leiding met diameter kleiner dan 0,50 m**.
	Onderbouwing	Bij kleine leidingen is de dekking boven de pipe niet groot genoeg om een doorgaande pipe van substantiële afmetingen te laten ontstaan, omdat de pipe vanaf de zijkanten en bovenkant weer wordt dichtgedrukt. De maat van 0,50 meter is gekozen door deskundigen op dit vakgebied.
3	**Beslisregel**	Kunstwerk is een **hoog liggend gemaal of hevelleiding** met onderzijde leiding op niveau van de waterstand met een overschrijdingskans gelijk aan de ondergrens van de norm, of die hoger door de dijk gaat en de kwelweg de leiding volgt.
	Onderbouwing	In dit geval is op het hoogste punt van de leiding geen grondwaterstroming meer aanwezig omdat de aandrijvende kracht ontbreekt. Wel moet praktisch zeker zijn dat de kwelweg tussen in-

		en uittredepunt onder de leiding langs loopt en niet via een samenspel tussen leiding en cohesieve grondlagen een andere kwelweg mogelijk is. Dit is het geval als onderzijde leiding op het niveau ligt van de waterstand met een overschrijdingskans die gelijk is aan de ondergrens van de norm. Als gevolg van intrede– en stromingsweerstand is er namelijk altijd een bepaald verval nodig over de leiding om tot piping te leiden en dit vergt bij een dergelijke hoogteligging van de leiding een zeer extreme buitenwaterstand.

Verder kan men indien er al voldoende gegevens beschikbaar zijn aan beoordeling op de volgende manieren:

- Toets op tijdsafhankelijkheid (waarbij de duur de hoogwatergolf kort is in relatie tot de tijd die nodig is voor pipe ontwikkeling[1]).
- Toets op geometrische kenmerken (quotiënt L/ΔH groter dan de minimaal vereiste L/ΔH-waarden voor de betreffende deklaag dikte, volgens WBI 2017 Bijlage III sterkte en veiligheid. L is de afstand tussen intredepunt en uittredepunt).

Stap E.2: Beslisregels of de kans van optreden verwaarloosbaar klein is

In deze stap komen beslisregels aan de orde waarmee wordt bepaald of de kans op onderloopsheid of achterloopsheid kortsluitstroming na piping en heave als verwaarloosbaar klein kan worden aangemerkt.

Bij gebruik van een van deze beslisregels moet wel altijd worden geverifieerd of de bijdrage van het andere deelfaalmechanisme relevant is.

Alleen wanneer de kans op alle deelmechanismen zowel onderloopsheid als achterloopsheid op basis van onderstaande beslisregels als verwaarloosbaar klein kan worden aangemerkt, dan is de kans van optreden van kortsluitstroming verwaarloosbaar klein. Anders kan op grond van deze generieke beslisregels geen oordeel worden geveld en moet het faalmechanisme piping toch beschouwd worden in de analyse van relevante faalpaden.

	Afweging	Beschrijving eenvoudige beoordeling kans op mechanisme
4	**Beslisregel**	De kans op opbarsten en piping wordt verwaarloosbaar klein geacht als de constructie en eventuele kwelschermen rondom worden omsloten door een **slecht doorlatend klei-/veenpakket van minimaal 1 m dikte** (na zetting aan het eind van de beoordelingsperiode), opdrijven of opbarsten van deze laag kan worden uitgesloten door het eigen gewicht en het gewicht van de bovenliggende grond, en een goede aansluiting tussen grond en constructie bestaat.
	Onderbouwing	In dit geval kunnen er geen in- of uittredepunten voor piping ontstaan.
5	**Beslisregel**	De faalkans door onderloopsheid is verwaarloosbaar klein als de constructie (zeker als deze op palen is gefundeerd) is voorzien van **kwelschermen tot in een ondoorlatende laag**.
	Onderbouwing	In dit geval worden kwelwegen door het watervoerende pakket afgesloten en kan een kwelweg onder het kwelscherm door niet optreden.

[1] De vraag is nog wel in welk document is beschreven hoe de duur van ontstaan van een pipe kan worden afgeleid.

6	**Beslisregel**	De faalkans door onderloopsheid is verwaarloosbaar klein als één van de **kwelschermen een lengte heeft die groter is dan twee keer het verval over het kunstwerk** bij de waterstand met een overschrijdingskans die getalsmatig gelijk is aan de overstromingskansnorm (ondergrens).
	Onderbouwing	Als één van de kwelschermen een lengte heeft die groter is dan twee keer het verval over het kunstwerk bij deze waterstand, dan is het kritieke verhang over het benedenstroomse kwelscherm altijd kleiner dan 0,5. Hiermee wordt voldaan aan het heave-criterium uit het Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen [4]
6	**Beslisregel**	De faalkans door achterloopsheid is verwaarloosbaar klein als het **kunstwerk is opgenomen in een dijklichaam met een zandkern waarbij de microstabiliteit van het aansluitende grondlichaam geborgd is**. Tevens moeten de **achterloopsheidschermen minimaal met de lengte van het kwelscherm onder de constructie buiten het kunstwerk zijn doorgezet**.
	Onderbouwing	Als naast het kunstwerk sprake is van een dijk met een zandkern, dan ontbreekt een scheidende laag waaronder zich langs het kunstwerk een pipe kan vormen. Wel moet naast het kunstwerk een kwelscherm aanwezig zijn om de grondwaterstroming ook door het dijklichaam te dwingen. De praktische maat van de lengte van het kwelscherm onder de constructie kan bij diepe kwelschermen mogelijk onnodig groot worden; een lengte van enkele meters lijkt afdoende om ervoor te zorgen dat de kwelweg echt door het dijklichaam loopt. Aanbevolen wordt om hier als praktische maat de lengte van het kwelscherm onder de constructie voor te hanteren.
7	**Beslisregel**	Afzonderlijke deelfaalmechanismen onderloopsheid en achterloopsheid kunnen worden uitgesloten als **aan de binnendijkse zijde van het kunstwerk een goed werkende filterconstructie** is opgenomen om achterloopsheid tegen te gaan; het filter dient hierbij te voldoen aan de ‘filterregels’ en in goede conditie te zijn.
	Onderbouwing	Als aan (tenminste) één van vermelde beslisregels wordt voldaan, dan is de kans van optreden van piping verwaarloosbaar klein. Anders kan op grond van deze eenvoudige toets geen oordeel worden geveld.

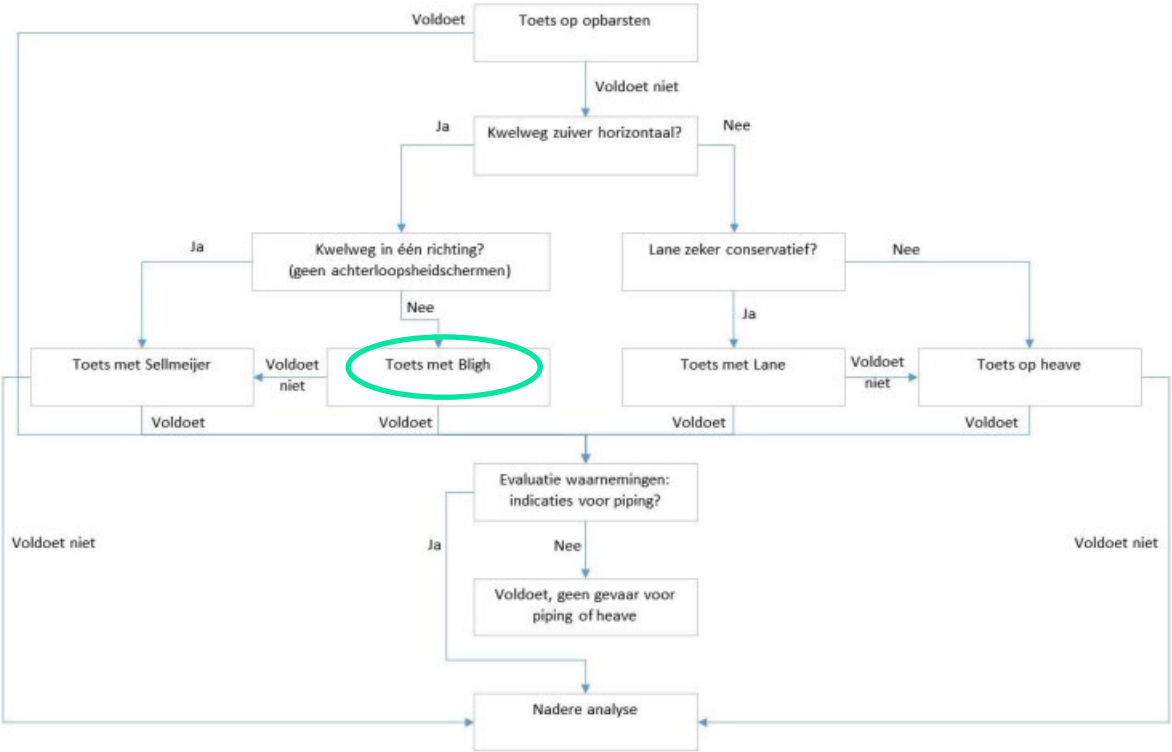
Indien weinig data beschikbaar zijn, zal de beoordelaar van grof naar fijn werken door in eerste instantie uit te gaan van de ongunstigste situatie, bijvoorbeeld met fijn zand onder het kunstwerk, of een kunstwerk op zand naast een kleidijk, of van ongunstige dijkdoorsneden en bodemopbouw in de omgeving, net wat het meest conservatief is. Indien dat niet tot een goedkeuring leidt, zal hij data over de verschillende condities gaan verzamelen om vervolgstappen te zetten in de beoordeling.

Desgewenst vindt een inschatting van het risico van piping plaats op basis van een eenvoudige methode waarmee de relevantie en kans worden gecheckt. De methode van Lane is daarvoor het meest geschikt. In dat geval wordt er in de eenvoudige beoordeling dus voor gekozen om van een 2D-situatie voor de grondwaterstroming (in een profiel in lengterichting van het kunstwerk) uit te gaan.

3.4 Gedetailleerde beoordeling van kunstwerken op piping

De gedetailleerde beoordeling is de vierde stap in de aanpak volgens [20, par. 5.1.4: Van verhaal naar overstromingskans] waarin is aangegeven dat met eenvoudige rekenmodellen een eerste analyse van de overstromingskans moet worden gemaakt.
De aanpak is weergegeven in het schema in [22, p.89] dat hierna is overgenomen (Figuur 3.6).

Eerst moet getoetst worden of opbarsten kan optreden. Vervolgens moeten mogelijke kwelwegen worden bepaald. Voor de bepaling welke kwelweg maatgevend is, moeten vaak berekeningen worden uitgevoerd. Dit betekent feitelijk dat het toetsschema in Figuur 7 voor verschillende mogelijke kwelwegen doorlopen moet worden. Opgemerkt moet worden dat er voor een kwelweg die geheel langs klei gaat geen geschikte beoordelingsmethode bestaat.



Figuur 3.6 Uitwerking blok Beoordeling uit stappenschema [21].

In figuur 7 is aangegeven dat in geval van horizontale stroming de methode van Bligh kan worden toegepast. Voor de rekenregel van Bligh werd altijd aangenomen dat deze conservatief is. Dat blijkt voor dijken echter niet het geval te zijn. Volgens onze informatie heeft ENW die methode om die reden als onbetrouwbaar aangemerkt [18, 25]. Voor horizontale kwelwegen mag alleen de methode van Sellmeijer worden gebruikt. In het rapport Zandmeevoerende wellen [5] uit 2012 wordt de rekenregel van Bligh niet meer vermeld. Echter in [18] wordt opgemerkt dat de aanbeveling uit [5] om het model van Bligh ook voor kunstwerken niet meer toe te passen, niet is overgenomen in het BOI2023. Volgens [5] betekent dit dat het model van Bligh voor ontwerp en beoordeling van kunstwerken nog steeds gebruikt kan worden voor horizontale kwelwegen als deze langs een achterloopsheidscherm gaan. Wij vragen ons echter af waarom in dat geval niet de formule van Sellmeijer wordt gebruikt.

3.4.1 Benodigde informatie voor eenvoudige beoordeling kunstwerken met geohydrologie

Volgens de BOI systematiek moet de beoordeling starten met systeembegrip door het verhaal van de kering te bestuderen. In de beschrijving moeten de hydrologische condities van

ondergrond en omgeving aan de orde komen waarin met name ook de geohydrologie wordt beschouwd.
Om de beschrijving van het verhaal van de kering te kunnen maken, moeten eerst data worden verzameld. Deze data kunnen in kaart worden gebracht (geschematiseerd).
De input voor de analyse bestaat uit:

- Peilbuismetingen (https://www.dinoloket.nl/).
- Boorbeschrijvingen (https://www.dinoloket.nl/ondergrondgegevens).
- Sondeergegevens (https://www.dinoloket.nl/ondergrondgegevens).
- Hydrogeologisch model (DINOloket: Regis II, Geotop, https://www.dinoloket.nl/ondergrondmodellen/kaart).
- Ondergrondschematisatie SOS (via D-Soil Model).
- Geschat maaiveldniveau (https://www.ahn.nl/ahn-viewer).
- Geschatte grondwaterstand (https://www.grondwatertools.nl/gwsinbeeld/).
- Waterstanden (Waterdata RWS https://waterinfo.rws.nl/#/publiek/waterhoogte).
- Aanmaken verwachte gemiddelde en maatgevende (MHW) waterstanden.

In de volgende tabel zijn de te verzamelen data vermeld verdeeld in 5 condities.

1. Geometrische condities
• Locatie en ligging van kunstwerk in dijktraject (kilometrering). • Type constructie. • Afmetingen constructie. • Funderingswijze constructie. Indien er palen onder de constructie aanwezig zijn dan moet worden uitgegaan van het ontstaan van een open ruimte (spleet) tussen onderkant constructie en ondergrond. Als gevolg hiervan dient de horizontale kwelweglengte onder de constructie te worden verwaarloosd. • Zo mogelijk: bouwwijze (open of gesloten bouwkuip, zie ook ondergrondcondities). • Aanwezigheid van kwelschermen tegen onderloopsheid, bovenstrooms en benedenstrooms, en achterloopsheidsschermen, locatie en dimensies (gebaseerd op constructiedata en niet op schattingen). • Indien de constructie is gefundeerd op palen en alleen bovenstrooms een onderloopsheidscherm aanwezig is, mag de horizontale lengte onder de constructie van het scherm tot aan het uittreepunt niet worden meegenomen. • Aanwezigheid drempel of nok. • Aanwezigheid dichte bodembescherming buitendijks en/of filterconstructie binnendijks, waterdichtheid cq. zanddichtheid (adhv ontwerpdocument). • Identificatie van mogelijk maatgevende kwelweg met kritieke punten (zie ook H7 in de schematiseringshandleiding piping kunstwerk [17]): - (denkbeeldig) intreepunt, dichtst bij dijk gelegen punt. ▪ Voorland, eventueel met sloten/greppels. ▪ Schaardijk. ▪ Bocht in rivier. ▪ Aanwezigheid van nevengeul. - kritieke uittreepunt ▪ binnenteen of binnendrempel. ▪ teensloten (NB ook kopsloten). - horizontale of verticale kwelwegen.
2. Constructieve condities
• Ouderdom constructie. • Conditie van schermwanden. • Conditie van bodembescherming. • Zanddichtheid van filterconstructie. • Opening onder constructievloer (op palen).

- Slechte aansluiting constructie met afsluitende laag in ondergrond.
- Overgangen tussen constructiedelen of naar omgeving en ondergrond.
- Inspecties en ervaring van de beheerder.

Er kan twijfel over de toestand van de kwelschermen bestaan als:
- De kwelschermen periodieke of permanent boven de grondwaterstand uitkomen.
- Kwel is geconstateerd tijdens hoogwater of andere belastingsomstandigheden.
- Een corrosief milieu aanwezig is bij stalen schermen; de aanwezigheid van zout water of veen kan corrosie veroorzaken (in de Handreiking Constructief Ontwerpen (TAW, 1994) zijn enkele richtlijnen hierover opgenomen).
- Negatieve kleef langs de schermen kan zijn opgetreden.
- De verwachte levensduur van de schermen is verstreken.
- De mogelijkheid bestaat dat corrosie door elektrische spanning is opgetreden.

3. Hydrologische condities en hydraulische randvoorwaarden

- Beschrijving van systeem waarin kunstwerk functioneert (ligging t.o.v. kust/boven- of benedenrivier/kanalen/meren, watersysteem, achterliggende boezem en polders)
- Groot verval buiten-binnen:
  - Buitenwaterstand (hydraulische randvoorwaarde uit Riskeer of de overschrijdingskanslijn van de buitenwaterstand afleiden uit Hydra-NL in beoordelingsmodus), extremen.
  - Binnenwaterstand (zeer laag bij onderhoud).
  - Getij.
  - Opzet door storm of andere oorzaak van waterspiegelrijzing.
  - Ligging vlakbij rivier of buitenwater:
    - Schaardijk.
    - Slibvoorkomen met intreeweerstand.
- Polders rond kunstwerk of in achterland met geldende peilen.
- Overstroming voorland of nevengeulen, erosie van stroomgeul bij hoogwater.

4. Ondergrondcondities

- Grondlagenschematisatie, laagtypen en laagdikten volgens algemeen toegankelijke databases of van het dijktraject (SOS alleen als schatting).
- Lokaal grondonderzoek bij kunstwerk, voorland en achterland op basis van beschikbare onderzoeksdata van de locatie.
- Data of schattingen van grondeigenschappen, volumegewicht van afdekkende lagen en korrelverdeling van zandlagen.
- Nagaan of het dijktraject gevoelig is voor piping.
- Grondopbouw direct naast de constructie (i.s.m. bouwwijze), in waterkering, in voor- en achterland.
- Algemene informatie over mogelijk voorkomende inhomogeniteit (geulafzettingen)
- Indien geen data van ondergrond moet men uitgaan van ongunstige condities:
  1. Zand direct onder het kunstwerk en een kleidijk aansluitend aan kunstwerk waarbij onderzijde kleidijk zelfde diepte heeft als onderzijde kunstwerk.
  2. Uitgaan van grondopbouw naast het kunstwerk.

5. Geohydrologische condities

- Lengte, dikte en weerstand van voorland.
- Dikte en weerstand deklaag achterland.
- Doorlatendheid, laagdikte zandlaag.
- Kwel of infiltratie aan binnenzijde.
- Waterstand verlagend effect van polders.
- Waterstand verlagend effect van onttrekkingen.
- Stroming beïnvloedend effect van heterogene of anisotrope grondlagen.
- Verrekening van slibvoorkomen in rivier naar afstand tot intredepunt.

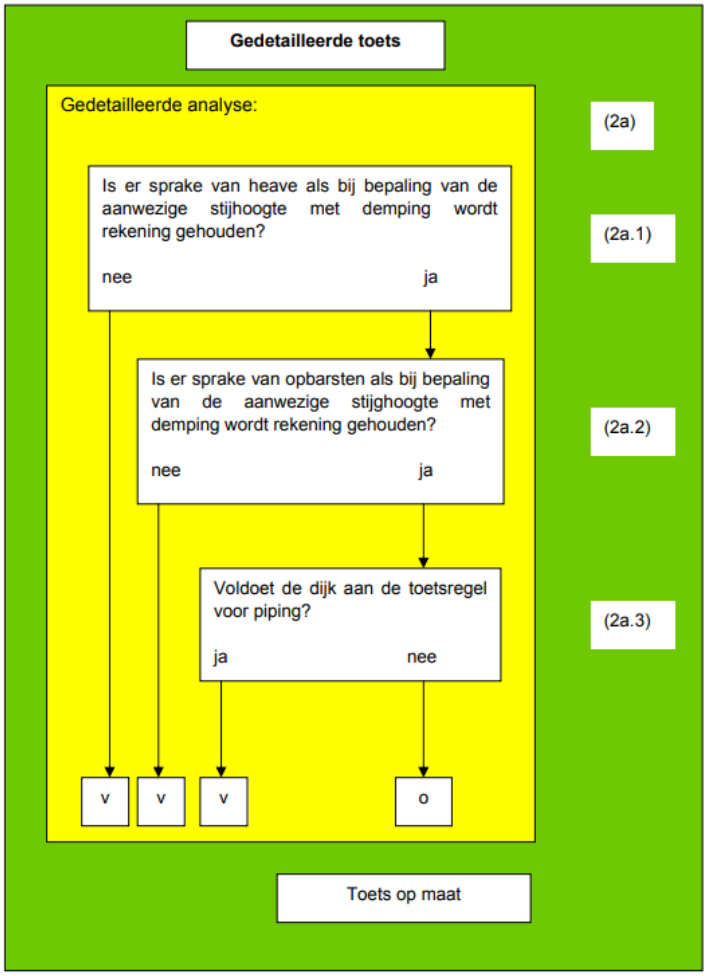
- Onzekerheid op de potentiaal tgv variatie naar andere laagschematisaties en parameterwaarden.
- Onzekerheid op de potentiaal tgv tekort aan grondwatermonitoring.
- Modelrandvoorwaarden op grens invloedsgebied.

Roadmap Bevinding 1
Volgens BOI moet het verhaal van de kering worden beschreven en grondwaterstroming speelt daar vooral bij beoordeling van onderloopsheid een belangrijke rol in. Door betrokkenen uit de praktijk van waterschappen (mondelinge communicatie klankbordgroep Henk van Norel) wordt gevraagd om meer aandacht te besteden aan de geohydrologische systeembeschrijving. Het benodigde instrumentarium en de daarbij behorende kennis moet worden afgestemd op de beoordelingsfase en de wensen van beoordelaars.

3.4.2 Algemene aanpak van de gedetailleerde beoordeling volgens handleidingen

De beoordeling voor grondwaterstijghoogte, opdrijven, opbarsten, heave bij het uitstroompunt, heave langs damwandschermen en piping kan stapsgewijs worden doorlopen volgens par 7.3 in het onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen [4], zie figuur 8.

Volgens het principe van werken van grof naar fijn wordt voor de gedetailleerde beoordeling eerst een ingangscontrole uitgevoerd. Daarbij wordt de beschrijving nagekeken die voor de eenvoudige beoordeling is gemaakt. Zo nodig wordt de beschrijving verfijnd als data kunnen worden achterhaald voor de invulling van toe te passen controles en berekeningen.
In eerste instantie worden de relevante faalmechanismen uitgeschreven, en op basis hiervan worden de dominante faalmechanismen bepaald. Als piping het dominante mechanisme is moeten daarvoor extra controles worden gedaan, zoals in Figuur 8 aangegeven.



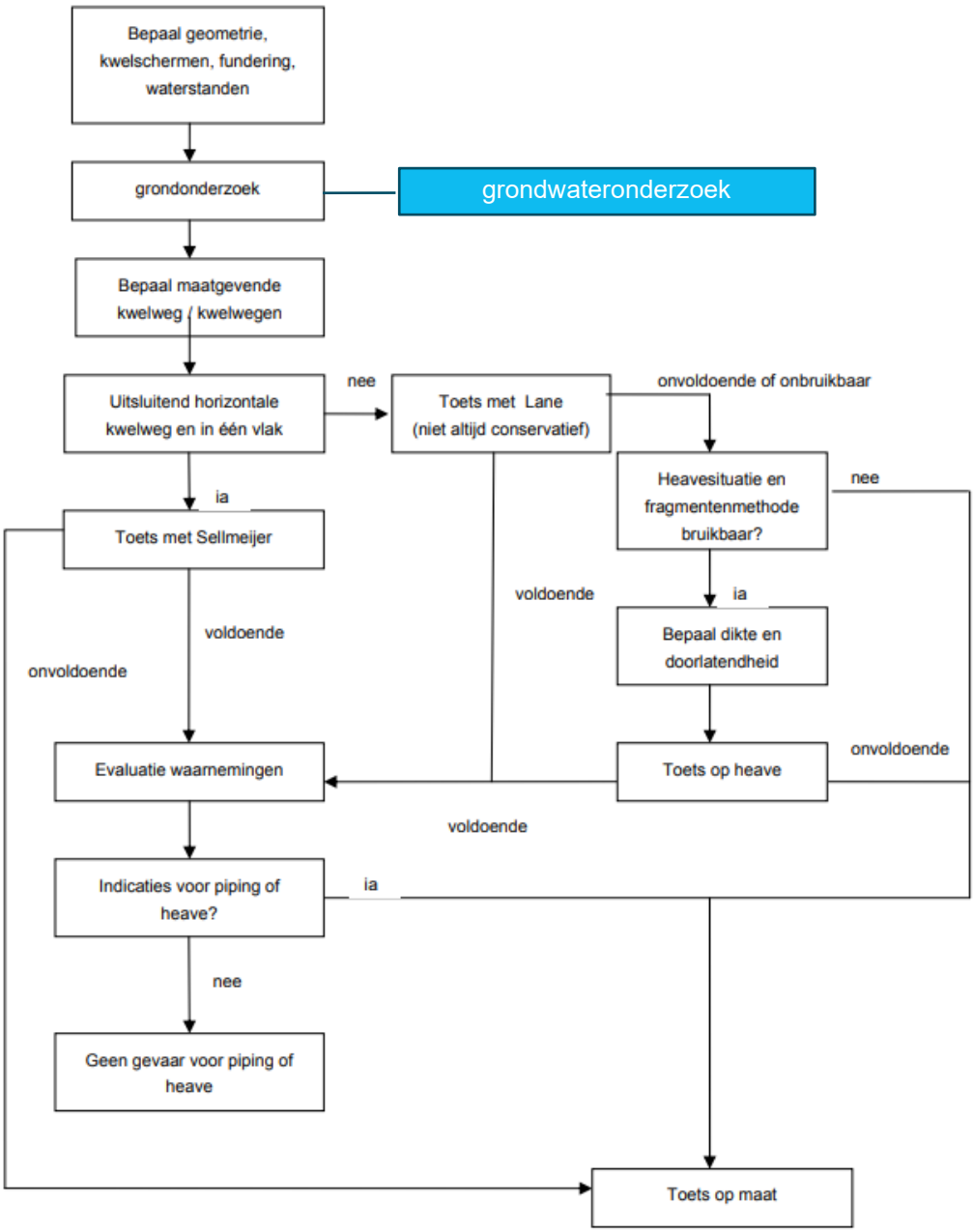
Figuur 3.7 Toetsschema gedetailleerde toets [4, p.119].

Er wordt gecontroleerd of voldoende informatie beschikbaar is om de modellen te gebruiken die voor de beoordeling voor het dominante faalpad met piping worden toegepast. De wens is om te komen tot meer inzicht in een geloofwaardige overstromingskans. Daartoe worden eventuele onzekerheden benoemd en wordt nagegaan hoe daarmee om te gaan.

Vervolgens zal een schematisatie van kunstwerk, ondergrond en grondwaterstroming worden gemaakt. De overwegingen bij het schematiseren moeten worden vastgelegd in de beschrijving.
Er kan een schatting worden gemaakt in welke mate onzekerheden bepalend zijn voor de uitkomst. Mogelijkheden voor het schematiseren zijn:

- Een voorlopige conservatieve aanname te doen.
- Scenario's op te stellen (bijvoorbeeld ten aanzien van varianten voor de bodemopbouw of vanwege wijzigingen in hydraulische condities).
- Een bandbreedte of kansverdeling aan te houden voor variaties in bodemopbouw of geohydrologische parameters die in een gevoeligheidsanalyse wordt meegenomen.

De beoordeling voor kritiek verval met eenvoudige berekeningen vindt plaats aan de hand van het volgende schema (dat terug te vinden is in H7 van de schematiseringshandleiding piping kunstwerk [17]). De vereenvoudigde versie van die schema's staat in [4] en is weergegeven in de volgende Figuur 3.7.

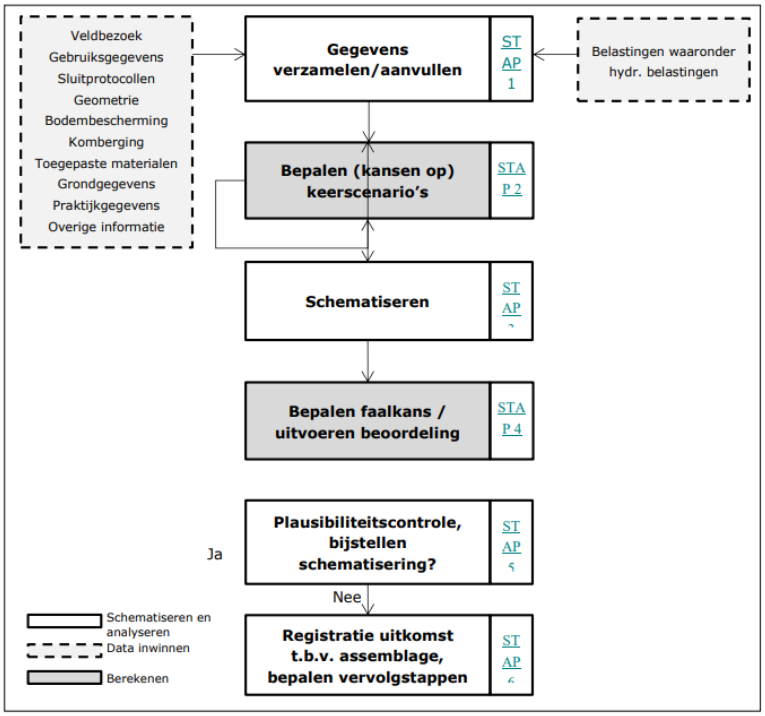


Figuur 3.8 Toetsschema gedetailleerde toets voor heave en piping bij kunstwerken [4, p.130].

De analyse begint met het schematiseren van de bodemopbouw in een ondergrondmodel en het opstellen van de verdeling van grondwaterstanden in de omgeving van het kunstwerk onder maatgevende omstandigheden.
De beoordeling bestaat uit:

- Controle op de opbarstveiligheid van de deklaag.
- Controle op heave in de deklaag (verticaal zandtransport door opgebarsten laag aan de hand van het maximaal optredende verhang t.o.v. kritieke verhang).
- Controle op heave langs het kwelscherm.
- Controle voldoende horizontale kwelweglengte.

Volgens de handleiding overstromingskansanalyse voor kunstwerken [21] is het schema voor de vervolgstappen in de beoordeling als volgt:



Figuur 3.9 Stappenschema beoordeling kunstwerk [21].

Voor het faalmechanisme piping kan een kritiek verval worden berekend en vervolgens vergeleken met het optredende verval bij normomstandigheden. Hiervoor is het wel nodig om de hydraulische belastingen te relateren aan de wettelijke veiligheidsnorm met betrekking tot overstroming, zoals die is vastgelegd in de Omgevingswet. In het kader van de gedetailleerde beoordeling kan dit voor een schematisatie worden gedaan met ongunstige waarden of voor verschillende mogelijke scenario's met mogelijke stochastische verdelingen van parameterwaarden.

De methode naar afronding van een oordeel inclusief probabilistische analyse is nog in ontwikkeling. In de schematiseringshandleiding werd nog voor kunstwerken aangegeven dat er geen (semi)probabilistische analyse kan plaatsvinden maar dat alleen een vaststelling van onzekerheden mogelijk is. Tijdens vooronderzoek in 2023 bereikte ons uit de praktijk ook de mening dat het afleiden van een faalkans ondoenlijk zou zijn.

Semi-probabilistische analyse zou echter naar de mening van Deltares momenteel met het beschikbare generieke instrumentarium (probabilistische toolkit PTK van Deltares) mogelijk moeten zijn. Met de PTK kan in ieder geval een gevoeligheidsanalyse voor de verschillende deelmechanismen worden uitgevoerd, alsook voor de onderliggende geohydrologische analyse. Dit lijkt ons voor de gedetailleerde beoordeling vooralsnog een voldoende stap.
Het zal wel een uitdaging zijn om de te hanteren waarden voor parameters in een semi-probabilistische analyse te kalibreren. In de Schematiseringshandleiding Piping [16] zijn in tabel 2.2 waarden voor de verdeling van parameterwaarden aangegeven t.b.v. semi-probabilistische toetsing bij piping onder dijken.

Roadmap Bevinding 2.
In het kader van de roadmap is het aan te bevelen om de toepassing van probabilistische methoden in beoordelingen te onderzoeken en na te gaan welke tools (eenvoudige modellen en de PTK) daarvoor bruikbaar zijn en betrouwbare resultaten opleveren.

Overwegingen met betrekking tot de inzet van een probabilistische analyse zijn opgenomen aan het eind van dit hoofdstuk.

Indien tijdens een beoordeling blijkt dat een gebrek aan gegevens bestaat om tot een goedkeuring ten opzichte van norm te komen, zou de beoordelaar om een praktisch handelingsperspectief (tijdelijke uitweg uit de beoordeling) te vinden aan het waterschap en/of Rijkswaterstaat alternatieven kunnen voorleggen, met een keuze uit de volgende 3 M's:

- M1. Monitoring inrichten, metingen doen en analyseren.
- M2. Model opzetten en analyseren.
- M3. Maatregel nemen om de ondeugdelijke toestand weg te nemen (weg ontwerpen van het tekort).

De keuze is afhankelijk van de situatie en de kosten van deze stappen. Ook de benodigde tijd om tot analyse of ontwerp te komen speelt een rol.

3.4.3 Uitwerking van de nadere of gedetailleerde beoordeling inclusief geohydrologie

Bij het schematiseren van piping (onder- en achterloopsheid) bij kunstwerken is het identificeren van mogelijk maatgevende kwelwegen onder en/of langs het kunstwerk de belangrijkste stap. Deze zijn behalve van de bodemopbouw met name afhankelijk van (geo)hydrologische condities. Het vaststellen van de geohydrologische condities wordt in de beschikbare handleidingen echter niet in het bijzonder vermeld.

Voor de beoordeling van onderloopsheid en piping wordt in de huidige rekenregels uitgegaan van benadering met tweedimensionale grondwaterstroming. In [37] is gesteld dat "analyses hebben uitgewezen dat de derde dimensie positief werkt in deze benadering en dat door verhoging van de weerstand (door het plaatsen van schermen) de potentiaalverdeling zich zo zal wijzigen dat grondwater meer naar de zijkant zal afstromen". In [37] wordt daarom gesteld dat de tweedimensionale schematisering een bovengrens voor de grondwaterstroming is.

Het kan echter voorkomen dat de hydrologische situatie door condities bij het kunstwerk (constructiewijze, heterogene bodemopbouw, aanvulgrond) of vanwege condities in de omgeving (rivierloop, polders, onttrekkingen) complex is. Geraadpleegde experts merken op dat deze complexiteit al vroeg in de beoordeling moet worden gesignaleerd (bij het opstellen van het verhaal van de kering).
De complexiteit zal bepalen wanneer en op welke manier de situatie modelmatig in kaart gebracht moet worden om voldoende inzicht te krijgen in de grondwaterstroming en mogelijke kwelwegen. In bijzondere gevallen kan het nodig zijn om de analyse met een driedimensionaal rekenmodel uit te voeren. Als dat aan de orde is, moet de beoordeling van het kunstwerk worden aangemerkt voor aanpak volgens een aangescherpte (specifieke) beoordeling.

Roadmap Bevinding 3.
Voor gedetailleerde beoordelingen wordt geohydrologische modelstudie door betrokkenen momenteel als een hindernis gezien. Het is nodig dat praktijkkennis en expertise op den duur dichter bij elkaar worden gebracht. Wij bevelen aan om dit aspect in de roadmap op te nemen.

3.4.3.1 Afleiding van belasting door hoogwater en respons in de grondwaterstand en waterspanning

In par.4.3.5 van [21] is de bepaling van belastinggevallen voor piping beschreven. Voor de bepaling van buitenwaterstand en binnenwaterstand onder hoogwateromstandigheden kunnen de hydraulische belastingen afgeleid worden uit Hydra-NL of Riskeer.

In de TR Waterspanningen bij Dijken [3, bijlage 3] is aangegeven hoe met de drukvoortplanting van hoogwater onder waterkeringen rekening moet worden gehouden. Uitgaande van deze

literatuur moet duidelijk zijn dat voorzichtigheid is geboden bij gebruik van geohydrologische modellen omdat deze niet alle grondmechanische aspecten meenemen. Dit betreft vooral het tijdsafhankelijk gedrag in de ontwikkeling van waterdruk, met name in waterremmende lagen en onder het voorland. De ontwikkeling van grondwaterdruk in voorland en onder kunstwerken kan eigenlijk alleen betrouwbaar worden afgeleid uit metingen van grondwaterstanden in meetraaien dwars op de waterkering.

Hierna zijn enkele opmerkingen vermeld over de aard van de randvoorwaarden die de grondwaterstroming bepalen:

- De toename en afname van de hoogwatersituatie wordt op elke locatie weergegeven met het waterstandsverloop. Deze bepaalt het niet-stationaire karakter van de belasting. Om de tijdsafhankelijkheid te beoordelen kan gebruik worden gemaakt van het programma Waterstandsverloop (https://iplo.nl/thema/water/applicaties-modellen/waterveiligheidsmodellen/waterstandsverlopen-tool/, zie ook [21] paragraaf 4.3.5.4).
- De tijdsafhankelijke ontwikkeling van het hoogwater moet worden vastgesteld omdat deze van invloed zijn op de ontwikkeling van de waterspanningen in de watervoerende en piping-gevoelige lagen onder en achter het kunstwerk. Trage stochasten (stijging rivierpeil, bovenrivieren) leveren veelal een lagere buitenwaterstand dan snelle stochasten (storm en getij voor benedenrivieren en kust, opwaaiing voor meren).

Op basis van het tijdsafhankelijk gedrag in de hydraulische randvoorwaarden geldt een indeling in 2 typen gebieden, met:

- Waterstanden met ‘lange’ duur, veroorzaakt door trage stochasten zoals afvoeren en meerpeilen, waarbij sprake is van quasi-stationaire grondwaterstroming.
- Waterstanden van ‘beperkte’ duur, veroorzaakt door snelle stochasten zoals wind (stormopzet), waarbij sprake is van niet-stationaire ofwel tijdsafhankelijke grondwaterstroming.

Als de hydraulische belasting zich langzaam ontwikkelt en een niet-stationaire grondwaterstroming wordt meegenomen, blijkt meestal (afhankelijk van de bergingsfactor in de ondergrond) een lagere waterspanning in de watervoerende laag dan wanneer uitgegaan wordt van stationaire stroming. Bij de beoordeling van objecten in het benedenrivierengebied, meren, estuaria en langs de kust bij hoogwateromstandigheden is het belangrijk om de niet-stationaire stroming mee te nemen. De beschrijving is ook te vinden in Paragraaf 5.7 van het Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen [4].

De respons van de waterspanningen op de buitenwaterstand bij hoogwater-omstandigheden wordt bij voorkeur afgeleid uit peilbuismetingen. Nabij het object moeten voldoende meetpunten zijn geïnstalleerd in doorlatende lagen onder en landinwaarts van het kunstwerk. Omdat peilbuismetingen bij lagere buitenwaterstanden geregistreerd worden dan tijdens maatgevende omstandigheden, moeten de meetresultaten worden geëxtrapoleerd naar de extreme waterstanden die de waterkeringen moeten kunnen weerstaan. Voor de analyse van deze metingen en een voorspelling van de respons zijn meerdere methoden voor de gedetailleerde toets per vak beschikbaar. Zie hiervoor o.a. het TR Waterspanningen bij Dijken [3].

Als van stationaire berekeningen van de grondwaterstroming wordt uitgegaan levert dat meestal een conservatieve benadering van het stijghoogtepatroon in de watervoerende laag onder waterkeringen en kunstwerken op. Dit is dan aan de veilige kant.

3.4.3.2 Bepaling van de schematisatie van de bodemopbouw

De analyse wordt gericht op de schematisatie van de bodemopbouw bij het kunstwerk:

- Indien zekerheid bestaat over bepaalde bodemopbouw of parameterwaarden kan de beoordelaar van een enkel scenario in de schematisatie uitgaan. Daarmee wordt de kansbeschouwing versimpeld.
- Indien van de locatie geen grondonderzoek beschikbaar is, wordt aanbevolen om nader grondonderzoek uit te voeren. In een eerste stap kan worden uitgegaan van ten minste drie sonderingen aan beide zijden van het kunstwerk: ter plaatse van kruin, buiten- en binnenteen. De tussenafstand tussen de sonderingen is bijvoorkeur niet groter dan 25 à 50 meter. De sonderingen reiken enkele meters dieper dan het diepste kwelscherm en ten minste 3 meter in een voorkomende watervoerende zandlaag.
- Indien de inventarisatie uit SOS en van lokale geologische en geohydrologische data geen eenduidige karakterisering geeft van de mogelijke bodemopbouw, moeten meerdere scenario's van schematisatie van de bodemopbouw worden beschouwd. Deze dient de beoordelaar te bepalen in overleg met een geologisch expert.
- De toepassing van de schematiseringsfactor past in een semi-probabilistische aanpak. Voor de locatie kan men een basisschematisatie kiezen, die inligt tussen de ongunstigste en gunstigste schematisatie van de bodemopbouw. Voor elke schematisatie wordt een kans van voorkomen geschat. Voor elk scenario wordt de faalkans berekend. Op basis van de kans van voorkomen en de berekende faalkans per scenario kan een schematiseringsfactor worden gevonden. Voor de systematiek en de keuze van de schematiseringsfactor wordt verwezen naar paragraaf 3.4 van TR Grondmechanisch Schematiseren bij Dijken [6]. De schematiseringsfactor wordt als extra veiligheid in rekening gebracht boven de vereiste veiligheid volgens norm voor het te beschouwen mechanisme.

3.4.3.3 Beoordeling van eventueel aanwezig filter aan uitstroomzijde

Een filterconstructie wordt bij kunstwerken toegepast om de uitspoeling van zand te aan (meestal) de binnendijkse zijde te voorkomen. Een filter kan bestaan uit een granulair filter, dat is opgebouwd volgens de filtercriteria (zie hieronder), of uit een verzwaard filterdoek. In een filterontwerp worden voorwaarden voor een goede werking van het filter gesteld: het moet zanddicht zijn en meer waterdoorlatend (grover) dan de ondergrond.

Indien aan uitstroomzijde een filter is geplaatst, controleert beoordelaar of het aanwezige filter voldoet aan de filterregels of zand levert. Het meest toegepast is het filtercriterium van Terzaghi:

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} < 4$$

Waarin:
- D_{15} = Korreldiameter van het grove filtermateriaal waarbij 15 gewichtsprocent van de deeltjes een kleinere diameter heeft.
- d_{85} = Korreldiameter van het fijne materiaal waarbij 85 gewichtsprocent van de deeltjes een kleinere diameter heeft.

Om opbarsten van het filter te voorkomen moet de doorlatendheid van het filter voldoende groot zijn ten opzichte van het fijne materiaal daaronder. Dit is het geval als volgens Terzaghi aan het volgende criterium wordt voldaan:

$$\frac{D_{15}}{d_{15}} > 4$$

Waarin:
- d_{15} = Korreldiameter van het fijne filtermateriaal waarbij 15 gewichtsprocent van de deeltjes een kleinere diameter heeft.

In de leidraad kunstwerken [2] zijn aanwijzingen opgenomen over de stabiliteit van steenbestortingen in relatie tot de sterkte van de stroming.
In de Rode draad Waterkerende Kunstwerken [p.16] wordt het falen van kunstwerken door het bezwijken van een bodembescherming of erosie bij het faalpad niet-sluiten kunstwerk opgenomen. Filterconstructies worden meegenomen in het faalpad piping. Een filter wordt veelal als een praktische maatregel beschouwd.

Roadmap Bevinding 4.
Voor beoordelaars blijkt het in de praktijk moeilijk te zijn om vast te stellen of de actuele werking van filters nog voldoet aan ontwerpcriteria. Beoordelaars ervaren dit als kennishiaat en bevelen aan om in de roadmap hier aandacht aan te geven.

3.4.3.4 Uitwerking van de geohydrologische situatie voor de gedetailleerde beoordeling

Voor de analyse bij de gedetailleerde beoordeling is de bepaling van het stijghoogtepatroon rond het kunstwerk nodig en daaruit volgt de afleiding van daarmee samenhangende kwelwegen. Daarvoor zijn verschillende mogelijkheden, die in de beschrijving hierna zijn vermeld.

De werkwijze is als volgt:
- Er wordt gestart met interpretatie van data over de opbouw van de ondergrond, allereerst met data uit de beschikbare databases (DINOloket en SOS).
- De beoordelaar of zijn adviseur beschrijft de lokale geohydrologische situatie. Daarbij wordt nagegaan wat de impact van het open water is in het gebied (infiltrerend of drainerend, insnijden in watervoerende laag, erosie) of een voorland aanwezig is met of zonder deklaag, polders in de omgeving van het kunstwerk, grondwateronttrekkingen en andere ingrepen in het gebied. Dit leidt tot een globale indruk van de mogelijke stroming en de stijghoogteverdeling van het grondwater in het gebied. Hieruit kan worden afgeleid of de geohydrologische situatie complex is of vereenvoudigd mag worden naar een tweedimensionale doorsnede. Ook de impact van het kunstwerk op de grondwaterstand wordt vastgelegd (door aanwezigheid van kwelschermen, filterconstructies of waterdichte voorzieningen in het kunstwerk en watergangen daarnaast).
- Vervolgens wordt nagegaan of nabij het kunstwerk lokale onderzoeksdata (van bodemopbouw en grondwaterstand) beschikbaar zijn. Dit is van belang omdat de grond rond het kunstwerk geroerd kan zijn wanneer het kunstwerk in een bouwput is aangelegd en aanvulgrond is toegepast. Bij voorkeur wordt uit meetreeksen afgeleid welke variatie van grondwaterstanden bij het kunstwerk voorkomen.

Bij uitvoering van de gedetailleerde beoordeling van het kunstwerk op onderloopsheid en piping begint de beoordelaar met eenvoudige beschouwingen van de maatgevende grondwaterstroming . Deze gaan bij de minst complexe beschouwing uit van een verdeling van grondwaterstanden volgens een stationaire beschouwing in 2D in een doorsnede over het kunstwerk. De analyses van het piping risico worden gebaseerd op het model van Lane. Dit is een conservatieve benadering.

De uit te voeren stappen volgens hiervoor vermelde aanpak zijn:
- Allereerst worden de hydraulische belastingen bepaald voor de locatie volgens de geldende wettelijke veiligheidsnorm met betrekking tot overstroming, zoals vastgelegd in de Omgevingswet. Deze kunnen bijvoorbeeld worden ontleend aan Riskeer.
- Dan worden beschikbare data over grondlagen en geohydrologische eigenschappen en randvoorwaarden, geordend zoals eerder vermeld bij eenvoudige beoordeling, met toevoeging van de volgende informatie:
  - Landelijk hydrologisch model (LHM), laagdikten en doorlatendheid.
  - Stijghoogten afgeleid uit data op de websites DINO/BRO of grondwatertools.

  - Regionaal geohydrologisch model, laagdikten en doorlatendheid.
  - Lokale informatie: beschikbare boringen met data van bodemopbouw, peilbuismetingen van de grondwaterstand.
  - Parameterwaarden (doorlatendheid, soortelijk gewicht) uit beschikbare labdata.
- De ligging van het intredepunt wordt afgeleid uit de lengte van het voorland, de omvang van de beheerzone, de samenstelling van en de inzijging door de deklaag in het voorland en/of de breedte van de dijkbasis volgens [3]. Daarbij moet rekening worden gehouden met eventuele heterogeniteit van het voorland in dikte en samenstelling van de toplaag en lokale aanwezigheid van sloten of geulen.

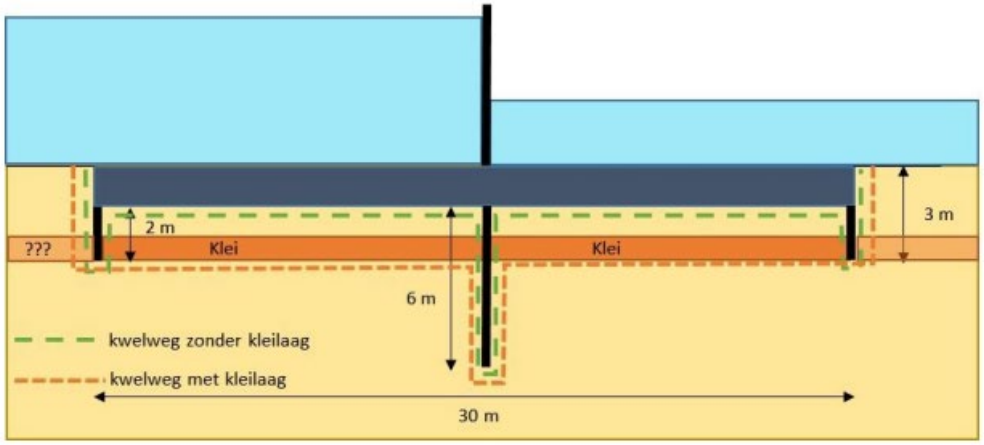
Allereerst wordt vastgesteld wat de waterstand aan binnenzijde van het kunstwerk kan zijn onder hoogwater omstandigheden en waarheen de stijghoogte verloopt: naar een kanaal of voorhaven, maalkom of sloot, een filter, opdrijfzone of pipe-uittrede, welk geval aan de orde kan zijn en het meest kritisch is.
Met behulp van de opgestelde schematisatie en geanalyseerde data maakt men een schatting van de kwelweg op basis van het ondergrondprofiel, inclusief eventuele kortsluitingen naar een kortere kwelweg.

Een eenvoudige schatting van het stijghoogteverloop tussen rivier en achterland onderdoor een dijk of kunstwerk (als er geen schermen zijn) kan worden opgesteld met een simpele analytische berekeningsmethode waarin een exponentieel verloop als in de formule van Mazure wordt toegepast:

$$\phi(x) = H_0 + H_w \exp(-x / \lambda_w)$$

Waarin:
$\phi(x)$ = Grondwaterstijghoogte op afstand x van het intredepunt.
H_0 = Stationaire waterstand op de rivier.
H_w = Verschil tussen rivierstand en polderpeil of amplitude van de hoogwatergolf.
λ_w = Spreidingslengte (gelijk aan de wortel uit het product van doorlaatvermogen van de zandlaag en totale gewogen weerstand van boven- en onderliggende kleilagen).

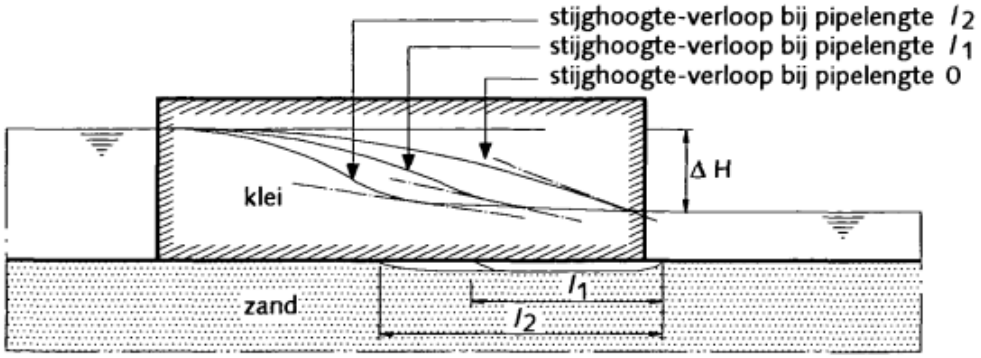
De spreidingslengte bepaalt de mate van demping in de stijghoogte vanaf het intredepunt naar achterland. Het stijghoogteverloop op afstand x vanaf het intredepunt is merkbaar tot een maximale afstand van x= 3 à 5*λ_w



Figuur 3.10 Mogelijke kwelwegen onder een kunstwerk [17].

Wanneer de hydraulische randvoorwaarden, opbarstcontrole en grondwaterstroming duidelijk zijn kan de beschouwing van piping worden uitgevoerd.

Indien de situatie piping-gevoelig is, dan zal het stijghoogteverloop over kortere afstand optreden, namelijk naar het begin van een pipe. De pipelengte kan men afleiden uit de kwelweglengte door uitvoering van een pipingberekening volgens Sellmeijer (zie hierna). Bij veranderende pipelengte moet de doorsnede worden gecorrigeerd en de grondwaterberekening herhaald. Wanneer de berekening van de grondwaterstroming volgens gebruikelijk instrumentarium in een lengteprofiel (2 dimensies) wordt gemaakt, is sprake van een simplificering en een benadering van de werkelijke grondwaterstroming.



Figuur 3.11 Verandering van potentiaal onder een kunstwerk van rivier naar achterland bij ontstaan van een pipe en bij doorgroeien [3].

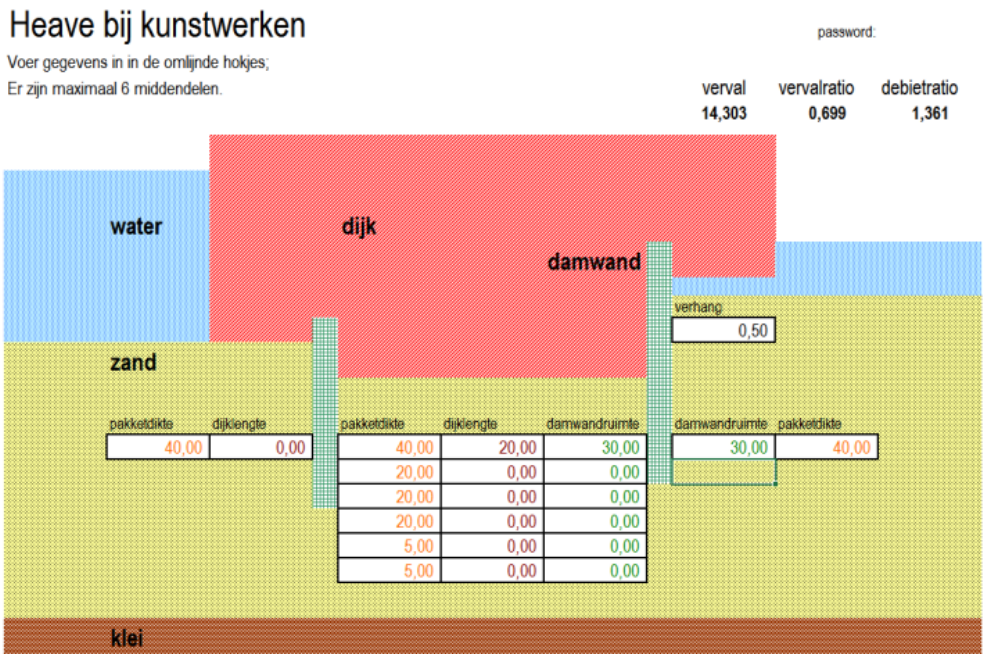
In [3] zijn meer analytische afleidingen te vinden voor het stijghoogteverloop over dijkprofielen of kunstwerken met voor- en achterland en verschillende parameterwaarden.

Vroeger werd ook vaak gebruik gemaakt van het analytische programma WATEX van Grondmechanica Delft om het tijdsafhankelijke stijghoogteverloop in het grondwater van rivier naar achterland te berekenen ten gevolge van optredend hoogwater. Het programma is nog wel te vinden op de site van Deltares.

Bij inrichting van het kunstwerk met kwelschermen is het mogelijk om het verloop van de stijghoogte te bepalen met de fragmentenmethode volgens Sellmeijer [1]. Dit is een analytische elementen methode waarmee een lokaal 2D-model van een verticale doorsnede wordt gemaakt. Ook al is de beschouwing in 2D, toch is deze interessant omdat in de methode op simpele wijze damwanden kunnen worden toegevoegd. Aldus kan een eenvoudige benadering worden gemaakt voor een eerste beoordeling van de stroming onder een kunstwerk door.

Het model in de fragmentenmethode gebruikt de volgende parameters:

- φ_0 = Stijghoogte op niveau onderzijde benedenstrooms kwelscherm.
- φ_p = Freatisch niveau ter plaatse van uittreepunt.
- h = Lengte benedenstrooms kwelscherm.



Figuur 3.12 Spreadsheet fragmentenmethode [1].

De beperkingen van de fragmenten methode zijn:

- Alleen in langsprofiel en niet toepasbaar voor situaties met een over 3 dimensies (ruimte en diepte) variërende grondwaterstroming.
- Maximaal 6 fragmenten.
- Isotrope doorlatendheid van de zandlaag.
- Niet geldig voor zeer ondiepe kwelschermen <0,1*D.
- Fragmentenmethode is een analytische methode, geprogrammeerd door Sellmeijer in een excel spreadsheet HeavingSheet (1996, [1.C], update 2011 nog bruikbaar is).

Een andere methode voor de bepaling van grondwaterstroming onder een kunstwerk met kwelschermen is door gebruik te maken van 2-dimensionale modellen. Dit kunnen eindige elementen-modellen zijn (Plaxis, Kratos, D-Geo Flow).

Door John van Esch (Deltares) is een opzet van een EEM berekeningsmethode (vooralsnog 2D) gerealiseerd om de invoer van een EEM-berekening te vereenvoudigen tot segmenten waarin het kunstwerk en omgeving kunnen worden ingedeeld, door hem segmentenmethode genoemd.

Op het moment van schrijven van dit rapport is bij Deltares ook een doctoraal studie gaande (Lisa van der Linde) om met het EEM-programma Kratos gekoppelde berekeningen te kunnen maken van grondwaterstroming en tijdsafhankelijke ontwikkeling van piping ten gevolge van stroming langs een kwelweg naar een enkele pipe.

Roadmap Bevinding 5
Door beoordelaars is eerder aangegeven (bevinding 3) dat het gebruik van geohydrologische modellen als specialistische inzet wordt beschouwd. Niet alle adviseurs hebben een geohydrologische achtergrond. Een tool als de fragmentenmethode was er in het verleden juist op gericht om met een analytisch model op eenvoudige wijze een vrij complexe berekening toegankelijk te maken voor een bredere groep adviseurs. De berekening met de fragmentenmethode heeft wel als beperking dat deze alleen 2D in een doorsnede toepasbaar is. Het is verstandig om na te gaan of deze tool opnieuw als EEM Segmentenmethode geïntroduceerd kan worden, misschien met gebruikmaking van moderne programmatuur.

3.4.3.5 Controle opdrijven of opbarsten

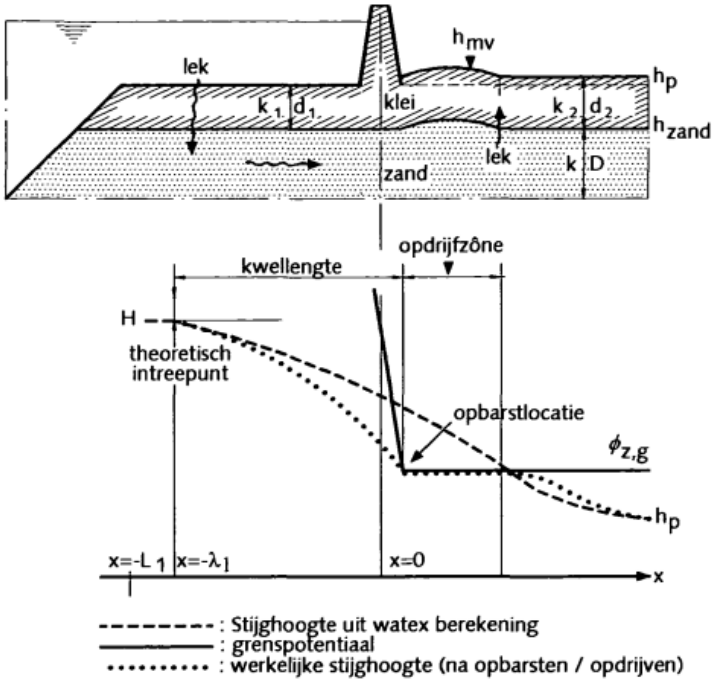
De uitwerking van de beoordeling van kunstwerken op onderloopsheid en piping vindt plaats met het beschikbare basisinstrumentarium (Opdrijven/opbarsten, heave-controle, piping met formule van Lane of Sellmeijer, heave langs scherm).
Voor de initiatie van het pipingproces in situaties waar een deklaag aanwezig is, is optreden van opbarsten een noodzakelijk eerste deelmechanisme. In de evenwichtssituatie geldt dat het gewicht van de laag boven evenwichtsniveau groter moet zijn dan de opwaartse waterdruk onder de laag:

$$\frac{d\left(\gamma_{nat}-\gamma_{w}\right)}{\gamma_{w}\left(\varphi_{z}-\varphi_{p}\right)} \geq \gamma_{bu}\gamma_{up}$$

Hierin is:
γ_{up} = Veiligheidsfactor voor het faalmechanisme opbarsten.
$\gamma_{b,u}$ = Schematiseringsfactor voor het faalmechanisme opbarsten.

Voor de veiligheidsfactor opbarsten wordt verwezen naar paragraaf 4.2 van de Handreiking Ontwerpen met Overstromingskansen versie 4 [20]. De veiligheidsfactor is afhankelijk van de gestelde betrouwbaarheidseis
Voor de schematiseringsfactor opbarsten wordt verwezen naar het Technisch Rapport Grondmechanisch Schematiseren van Dijken [6]. Daarin staat beschreven:

- Met de aanwezigheid van sloten in het achterland (met een minder dikke toplaag) en met heterogeniteit (dikte en samenstelling van de toplaag, geulafzettingen) moet in de beschouwing van opbarsten rekening worden gehouden.
- Indien opdrijven aan de orde is, bepaalt de stijghoogte bij opdrijven/opbarsten t.p.v. het uittredepunt het maximale verhang.
- Indien opbarsten aan de orde is, wordt in het model het uittredepunt verlegd en wordt de grondwaterberekening herhaald.



Figuur 3.13 Verdeling van de grondwaterpotentiaal onder een dijk of kunstwerk van rivier naar achterland, met en zonder opdrijven [9].

3.4.3.6 Controle piping met heave in het uittredepunt

Op het stijghoogteverval over de toplaag bij het uittredepunt wordt voor de stroming een reductie met een factor van 0,3 toegepast, waarin d de dikte van de deklaag is. Deze reductie vertegenwoordigt het stijghoogteverval over de deklaag als gevolg van wrijving door het verticale piping kanaal. De factor 0,3 is een veilige keuze.

Het criterium voor controle op horizontale piping luidt dan:

$$\Delta H_c/(\gamma_n * \gamma_{b,pip}) > (\Delta H - 0{,}3d)$$

In deze formulering is γ_n een veiligheidscoëfficiënt die afhankelijk is van het nagestreefde veiligheidsniveau en $\gamma_{b,pip}$ de schematiseringsfactor (zie de uitleg eerder). In de regel van Lane is de veiligheid reeds verwerkt.

3.4.3.7 Controle van pipingrisico met de regel van Lane:

Met de methode van Lane kan op piping worden getoetst als onder het kunstwerk ook schermen aanwezig zijn.

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

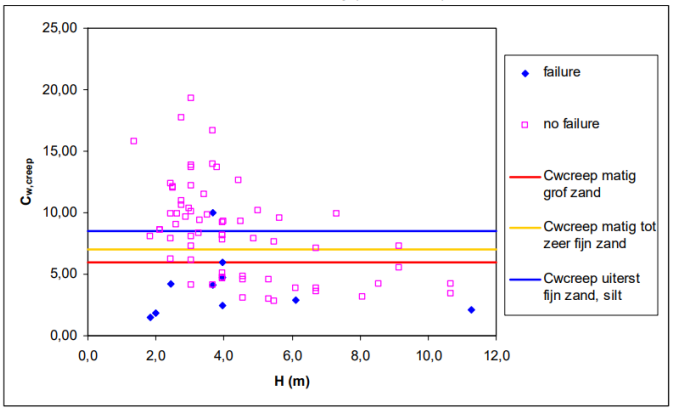
Waarin:
L_h = Horizontale kwelweglengte
L_v = Verticale kwelweglengte
$C_{w,creep}$ = Creep-factor Lane
h_{bu} = Buitenwaterstand
h_{bi} = Binnenwaterstand
$\Delta H = h_{bu} - h_{bi}$ = Verval over KW
ΔH_c = Kritiek verval over KW

De creep-factor C_{creep} (zie figuur 15) is een empirisch afgeleide materiaalconstante voor de ondergrond die de weerstand tegen uitspoeling weergeeft.

Grondsoort	Mediane korrel-diameter [µ m] 1)	C_{creep} (Bligh)	$C_{w,creep}$ (Lane)
Uiterst fijn zand, silt	< 105		8.5
Zeer fijn zand	105 – 150	18	
Zeer fijn zand (mica)		18	7
Matig fijn zand (kwarts)	150 – 210	15	7
Matig grof zand	210 – 300		6
Zeer/uiterst grof zand	300 – 2000	12	5
Fijn grind	2000 – 5600	9	4
Matig grof grind	5600 – 16000		3.5
Zeer grof grind	> 16000	4	3

1) indicaties conform NEN 5104 (September 1989)
Eventueel kan tussen de klassemiddens van de mediane korreldiameters worden geïnterpoleerd

Volgens [SBW 2009] is de keuze van waarden voor de factor door Lane niet duidelijk. De door Lane verrichte studie is statistisch van karakter. Door Lane zijn 70 cases geïnventariseerd voor dammen op de grondsoorten zand, fijn zand en silt, waarbij 10 dammen door piping zijn bezweken. In Figuur 3-14 is een overzicht gegeven van de gewogen kwelweglengte en het opgetreden verval over een dam waarbij onderscheid is gemaakt naar bezweken en niet-bezweken dammen. De bezweken dammen liggen wel in het grindige deel van de grafiek.



Figuur 3.14 Overzicht factoren volgens Lane voor Nederlandse grondsoorten en cases door Lane beschouwd

Op basis van het geringe aantal bezweken dammen en de vrij grote spreiding in de waarde van $C_{w,creep}$ bestaat er de mogelijkheid dat de door Lane gekozen kritieke waarden voor $C_{w,creep}$ niet voldoende veilig zijn. Bovendien is in de literatuur (SBW) opgemerkt dat zeker bij dunne kleihoudende deklagen de verticale route door de klei niet meegeteld mag worden, en dat de kwelweg alleen van intrede in tot uittredepunt uit de zandlaag gerekend.

Een vergelijking tussen heave berekeningen met de fragmentenmethode en het criterium van Lane heeft laten zien dat Lane in vrijwel alle gevallen conservatief is ten opzichte van het heave criterium, behalve in (zelden voorkomende) situaties dat het bovenstrooms liggende kwelscherm relatief diep ligt ten opzichte van de dikte van de watervoerende zandlaag (Calle, 1998).

Roadmap Bevinding 6
De methode van Lane is een eenvoudige aanpak maar heeft het nadeel dat deze op empirische grondslagen berust en dat alle aspecten in het faalpad in de methode verborgen zitten. Omdat onbekend is welke veiligheidsmarge in de formule aanwezig is, is dit een ongelukkig uitgangspunt voor probabilistische methoden ter bepaling van de overstromingskans.

3.4.3.8 Eenvoudige toets van de kwelweglengte met de regel van Bligh:

De methode van Bligh is de oudst bekende methode (1910). De berekening volgens Bligh is vergelijkbaar met die van Lane maar toepassing van de regel is alleen geschikt voor situaties met een horizontale kwelweg. Echter, in 2012 [4] is vastgesteld dat deze regel niet altijd een conservatiever oordeel over de benodigde kwelweglengte opleverde dan toepassing van de regel van Sellmeijer. Uit de praktijk zijn voor fijn zand bezwijkgevallen bekend bij kwellengtes kleiner dan 18H. Zoals eerder gesteld: door ENW [25] is in 2010 aangegeven dat de regel van Bligh onveilig is en niet langer mag worden toegepast bij de beoordeling van dijken. Echter voor kunstwerken wordt de methode nog wel toegelaten [23], bijvoorbeeld als achterloopsheid moet worden beoordeeld.

Roadmap Bevinding 7
Vanwege de betere fysische onderbouwing is de methode van Sellmeijer geschikter voor beoordeling van onder- en achterloopsheid dan de empirische methode van Bligh waarin de veiligheidsmarge niet helder is.

3.4.3.9 Effect van een gelaagd bodemprofiel op een berekening volgens Lane

Het komt voor dat de kwelweg door verschillende grondlagen heen loopt met een andere creep-factor. Er zijn verschillende manieren om hiermee om te gaan:

- Kies de creep-factor die hoort bij de laag waarin het uittreepunt zich bevindt.
- Houd de grootste creep-factor (dus de creep-factor voor de grondlaag met het fijnste zand) aan als creep-factor.
- Bereken per grondlaag de bijdrage aan het kritieke verval door per grondlaag de kwelweglengte en creep-factor vast te stellen en deze bijdragen te sommeren.

Hoewel over de aanpak geen aanwijzingen zijn gegeven in de publicatie van Lane kan men de verschillende berekeningen doen en de meest veilige uitkomst aanhouden. Waarschijnlijk is dat de laatst vermelde optie.

3.4.3.10 Effect van anistropie op een berekening volgens Lane

Bij de bepaling volgens Lane kan rekening worden gehouden met eventuele anisotropie van de aquifer. Hoewel bij uitwerking voor het geval van een homogene ondergrond een conservatief resultaat wordt gevonden, is het mogelijk om anisotropie in rekening te brengen. Anisotropie houdt in dat er sprake is van verschil in horizontale en verticale doorlatendheid in de watervoerende zandlaag.
In [37] staat een uitwerking vermeld, echter met een fout. De juiste aanpak is om alle verticale delen van de kwelweg te vermenigvuldigen met de wortel uit het quotiënt van de horizontale en verticale doorlatendheid (want anisotropie zorgt voor een fictieve verlenging van de kwelweg).

3.4.3.11 Spleetvoorkomen onder een kunstwerk met fundering op palen:

Als bijvoorbeeld een kunstwerk een fundering op palen heeft in een gebied waar bodemdaling van een slappe toplaag optreedt, dan kan een spleet onder het kunstwerk zijn ontstaan. Indien spleetvorming kan worden vermoed, dan mag de horizontale kwelweg onder het kunstwerk niet worden meegeteld in de pipingberekening. De waterspanning in de spleet is vrijwel constant over de lengte van de spleet.

Sellmeijer (zie [1B]) heeft met eerder vermelde fragmentenmethode voor grondwaterstromingsberekeningen een gevoeligheidsanalyse gerealiseerd waarbij extra fragmenten (zettings-, gat- en lekfragment) zijn gebruikt. Daaruit komt naar voren dat met name bij kunstwerken die lang zijn ten opzichte van de dikte van de watervoerende zandlaag een spleet tussen de ondergrond en de onderkant van de constructie een grote invloed heeft op het uittredeverhang.

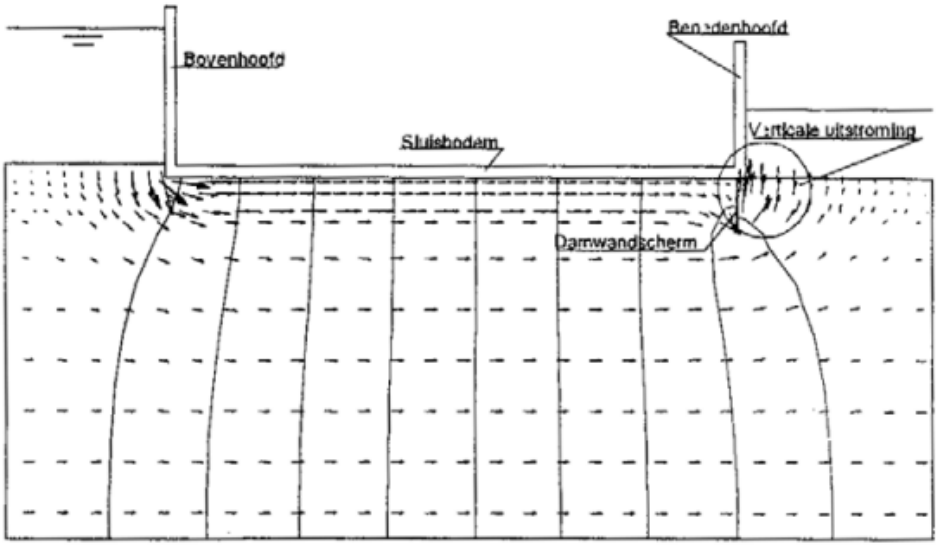
De vaststelling in de praktijk of spleetvorming aan de orde kan zijn is niet eenvoudig. Soms kan uit vergelijking van peilbuiswaarnemingen met het verwachte stijghoogtepatroon worden afgeleid dat er een anomalie in het stijghoogtepatroon voorkomt die wijst op afwijkingen in de constructie. Het is echter zelden dat er veel grondwatermonitoring rond een constructie aanwezig is. Daarnaast zullen de metingen vaak niet zo precies zijn dat de locatie van de afwijking kan worden aangewezen.

Roadmap Bevinding 8
Bij Deltares vindt onderzoek plaats naar geofysische detectiemethoden om spleetvorming en afwijkingen in constructies of schermwanden na te gaan. Het is aan te bevelen om het resultaat van dergelijk onderzoek te toetsen op praktijksituaties. Mogelijk vormt detectie een handelingsperspectief bij beoordelingen.

3.4.3.12 Heave controle scherm:

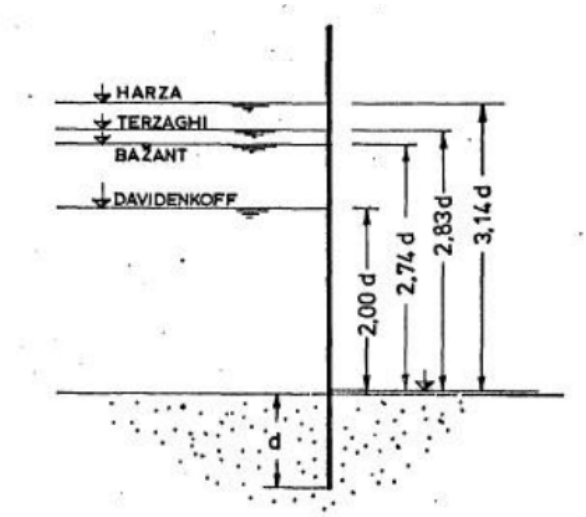
Indien een scherm aanwezig is, is een voorwaarde voor bezwijken door piping dat achter langs het kwelscherm een sterk waterdrukverval, verweking van de grond en zandtransport omhoog optreedt. De verweking van de zandlaag en verticaal zandtransport wordt heave genoemd. De verweking of fluïdisatie van het zandlichaam (ontstaan van drijfzand) achter een scherm wordt ook wel aangeduid als hydraulische grondbreuk.
Bij de beoordeling wordt het verticale verhang langs de schermwand bepaald. De gradiënt is afhankelijk van de geohydrologische situatie en de doorlatendheid van de bodem.
Het verhang i zal beoordelaar moeten afleiden uit een grondwaterberekening. Bij een bepaald kritiek verhang kan fluïdisatie van het zand ontstaan. Het verticale verhang langs een scherm onder het kunstwerk moet kleiner zijn dan het kritiek verhang.

$$i = \frac{\varphi_0 - \varphi_p}{h} \leq i_c$$



Figuur 3.15 Onderloopsheid sluis met heave achter benedenstrooms geplaatst damwandscherm [37].

Een beschouwing van het mechanisme vindt plaats volgens de methode van Terzaghi & Peck (1948) voor vrije uitstroom. De analyse kan ook worden gemaakt volgens de methode van Baumgart-Davidenkoff (1970, ook wel gemiddelde gradiënten-methode GGM genoemd).



Figuur 3.16 Kritiek verval voor hydraulische grondbreuk (heave) volgens Davidenkov (1956), Harza (1935), Terzaghi (1961) en Bazant (1953).

Daarbij wordt aangehouden:

$$i_c = \frac{(1-n)(\gamma_k - \gamma_w)}{\gamma_w}$$

Volgens het huidige beoordelings- en ontwerpinstrumentarium WBI en BOI wordt een veiligheidscoëfficient van 2 aangehouden (i_c < 0,5). In [SBW 2009] leidden diverse onderzoekers verschillende waarden af. De waarde van 2 stemt overeen met de analyse van Davidenkov. Die berekening wordt als tamelijk veilig beschouwd.
Hierbij wordt uitgegaan van een realistische inschatting van de ruimtelijke variabiliteit van de porositeit (met een variatiecoëfficiënt van 0,1). Er geldt dan voor de veiligheid:

$$SF = \frac{\sigma_v - u_0}{u_d - u_0}$$

Als de gronddruk kleiner of gelijk is aan de waterdruk, is sprake van hydraulische grondbreuk oftewel heave.

Bij de schematisatie van het grondlagenprofiel is het mogelijk om de gelaagdheid en anisotropie van de watervoerende laag mee te nemen in het geohydrologisch model. Het principe is beschreven in Bijlage A3 van Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen [4].
In rekening brengen van anisotropie zal leiden tot een scherpere beoordeling.

In [37] staat een aanbeveling vermeld voor de bepaling van het toelaatbare verticale verhang. Er mag een factor 0,5 worden aangehouden indien er sprake is van een homogene zandlaag achter de damwand. Als ter plaatse sprake is van grote inhomogeniteiten kan echter beter met een factor 0,3 worden gerekend. Voor die gevallen bestaat namelijk het gevaar dat het water via de zwakke plekken (met een plaatselijk voorkomende grote doorlatendheid) in deze grondlaag gaat afstromen; dan is sprake van zogenaamde preferente kanalen.

Roadmap Bevinding 9
Voor de afleiding van de waterdrukverdeling en heave achter een scherm in een kunstwerk wordt aanbevolen om een geohydrologisch model toe te passen, volgens eindige elementen of eindige differentie methode of een semi-analytische fragmentenmethode.
De huidige benadering van heave-analyse is meestal in een 2D-doorsnede. Voor kunstwerken is het verstandig om een beschrijving voor complexe situaties in 3D uit te werken.

3.4.3.13 Piping berekening volgens Sellmeijer [16]:

Voor analyse van het pipingrisico wordt het verval over de constructie vergeleken met het kritieke verval, dat bepaald wordt met de aangepaste regel van Sellmeijer (volgens geactualiseerde versie in WBI2017 [12]) :

$$\Delta H_c = L \cdot F_{resistance} \cdot F_{scale} \cdot F_{geometry}$$

$$F_{resistance} = \frac{\gamma_p'}{\gamma_w}\{\eta \tan(\theta)\}$$

$$F_{scale} = \frac{d_{70m}}{\sqrt[3]{\kappa L}}\left(\frac{d_{70}}{d_{70m}}\right)^{0,4}$$

$$F_{geometry} = F(G) = 0,91\left(\frac{D}{L}\right)^{\frac{0,28}{\left(\frac{D}{L}\right)^{2,8}-1}+0,04}$$

Hierin is:

L	Kwelweg (horizontaal gemeten) [m]
$F_{resistance}$	Weerstandsfactor, beschrijft het grensevenwicht van zandkorrels op de bodem van de pipe [-]
F_{scale}	Schaalfactor, reflecteert de verhouding tussen de processchaal van het mechanisme dat voor korreltransport zorgt en de processchaal van de grondwaterstroming die dit transportmechanisme aandrijft [-]
$F_{geometry}$	Geometriefactor, beschrijft de invloed van de vorm van de geometrie van de ondergrond op de grondwaterstroming [-]. De gepresenteerde formule is geldig voor een standaard configuratie met één homogene zandlaag onder het ondoorlatende kunstwerk. Bij een afwijkende geometrie moet de factor $F_{geometry}$ worden bepaald met de pipingmodule uit het grondwaterstromingsmodel MSeep.
γ'_p	(Schijnbaar) volumegewicht van de zandkorrels onder water [kN/m3] = γ_p - γ_w met γ_p = 26 kN/m3 en γ_w = volumegewicht van water [kN/m3]
θ	Rolweerstandshoek van de zandkorrels (θ=37) [°]
η	Coëfficiënt van White (η=0,25) [-]
κ	Intrinsieke doorlatendheid van de pipinggevoelige/bovenste zandlaag [m²] = κ = ν·k /g k = specifieke doorlatendheid van de pipinggevoelige/bovenste zandlaag [m/s] ν = kinematische viscositeit van water bij 10°C (ν = $1,33 \cdot 10^{-6}$ m^2/s } g = versnelling van de zwaartekracht (g = 9,81 m/s^2)
d_{70}	70-percentielwaarde van de korrelverdeling [m]
d_{70m}	Gemiddelde d_{70} van de in de kleine schaalproeven toegepaste zandsoorten, waarop deze formule is gefit ($2,08 \cdot 10^{-4}$) [m]
D	Dikte van het zandpakket [m]

De berekeningsmethode voor piping volgens Sellmeijer [16] is alleen toegelaten voor beschouwing van een horizontale kwelweg. Dit is dus een situatie zonder kwelschermen.
Voor de beschrijving van de regel van Sellmeijer wordt verwezen naar de schematiseringshandleiding piping [16]. Deze methode kan echter alleen worden toegepast op een horizontale kwelweg.
Ten behoeve van de berekening kan volgens het Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen [4], paragraaf 9.5.2.1 een eerder aangehouden d50 uit het model van Lane worden omgerekend naar de d70 met de volgende formule:

$d_{70} = d_{50} * 1,35$.

3.4.3.14 Kritiek verval en beoordeling onderloopsheid (opbarsten, piping, heave)

Voor het faalmechanisme piping wordt het kritiek verval berekend en vergeleken met het optredende verval bij normomstandigheden. In het kader van de gedetailleerde beoordeling kan dit voor een schematisatie worden gedaan met ongunstige waarden of voor verschillende mogelijke scenario's met mogelijke stochastische verdelingen van parameterwaarden.

Als uit de analyse blijkt dat sprake is van een randgeval ten opzichte van norm, kan worden overwogen om de gedetailleerde pipinganalyse van het kunstwerk verder uit te breiden. Dit kan als volgt worden uitgevoerd:

- Meer scenario's opstellen met variatie in ondergrondschematisatie (heterogeniteit, geulafzettingen etc.) inclusief schatting van kans van voorkomen.
- Controle van oude ontwerptekeningen, -data en -rapporten.
- Aanvullend grondonderzoek verrichten.
- Toevoegen van nadere informatie over waarnemingen (peilen, grondwaterstanden, uitspoeling) tijdens bijzondere situaties of hoogwater.
- Verbeteren van het grondwaterstromingsmodel op basis van waarnemingen.

In het rapport Onderzoek zandmeevoerende wellen [4, H7] is vermeld om in de gedetailleerde toets (grondwater)modellering mee te nemen. Volgens WBI en BOI zal dat echter binnen de toets op maat (nu aangescherpte beoordeling) moeten plaatsvinden op basis van toegespitste methoden. Wij stellen voor om dat voorstel op te volgen en de onderbouwing met geohydrologische modellen (geavanceerde analyse) te laten plaatsvinden in de aangescherpte beoordeling.

Roadmap Bevinding 10
Opgemerkt wordt dat alle beschikbare analysemethoden (Sellmeijer, Lane, Heave) zijn opgesteld voor een beschouwing van een doorsnede, dus in 2 dimensies met stationaire beschouwing van het effect van verval. De vereenvoudigingen zijn voor complexe situaties met meerdere randvoorwaarden op de grondwaterstroming een beperking. In werkelijkheid zal een 3-dimensionale situatie en tijdsafhankelijkheid aanwezig zijn. Om na te gaan welk effect op de veiligheid te verwachten is als 3D-situaties worden beschouwd, wordt aanbevolen om daar onderzoek naar te doen. De koppeling tussen afzonderlijke mechanismen en het tijdseffect (pipedoorgroei) zijn in de bestaande methoden bovendien niet uitgewerkt maar kunnen voor kunstwerken van belang zijn.

3.5 Aangescherpte beoordeling van kunstwerken op piping

3.5.1 Algemene aanpak bij aangescherpte beoordeling

Indien de gedetailleerde beoordeling wijst op een mogelijk substantiële bijdrage van het kunstwerk aan de overstromingskans van het dijktraject dan moet in principe de faalkans door aanscherping van de beoordeling nader worden bepaald (voorheen werd dit specifieke beoordeling of toets op maat genoemd). De aangescherpte beoordeling wordt uitgevoerd indien de verwachting is dat geavanceerde analyse tot een belangrijke andere afweging en oordeel kan leiden dan de gedetailleerde beoordeling die gebaseerd is op schematisaties en modellen met conservatieve aannamen. Goedkeuring in plaats van afkeuring van een object kan worden voorkomen omdat in de aangescherpte beoordeling wordt getracht om meer realistische schematisaties te beschouwen.
De huidige werkwijze onder BOI is dat **in het werkatelier** beoordeeld zal worden of het mogelijk en noodzakelijk is om het kunstwerk op faalmechanisme piping nader te analyseren voor het dominante faalpad.

Er zijn verschillende manieren om de bepaalde overstromingskans aan te scherpen voor de analyse van de dominante faalpaden. Dit wordt in de handleidingen overstromingskans per faalmechanisme [20-22] in meer detail beschreven.

Voor het faalmechanisme onderloopsheid en piping geldt dat de volgende gebeurtenissen plaatsvinden:

- Initiële mechanisme.
  - Opbarsten.
  - Erosie filterconstructie.
- Indirecte mechanismen:
  - Pipe initiatie.
  - Pipe progressie.
  - Heave langs achterste schermwand.
  - Kortsluitstroming door spleetvoorkomen (indien constructie op palen in zakkende grond).
  - Heave langs voorste schermwand.
- Vervolgproces 1:
  - Doorgroei pipe.
- Vervolgproces 2.
  - Doorbraak.

Op hoofdlijnen zijn er voor kunstwerken de volgende aanscherpingen mogelijk:

1. Uitwerken van vervolgprocessen.
2. Verfijnde uitwerking van het initieel mechanisme.
3. Probabilistische analyse.
4. Controle op plausibiliteit.

3.5.1.1 Uitwerken van het dominante faalpad en vervolgprocessen

Het is verstandig om eerst de bepaling van het dominante faalpad op basis van expert judgement te onderzoeken. Bij dat laatste zal een groep van experts worden ingeschakeld omdat bij de beoordeling van kunstwerken meerdere vakgebieden samenkomen (onder andere waterbouwkunde, geotechniek, geohydrologie, waterveiligheid, probabilistiek).
In de werkwijze van BOI wordt aangegeven dat toepassing van modellen nodig is om de conditionele kansen uit te werken. Deze aanpak is complex en zal niet anders dan door experts ter hand genomen moeten worden.

De gebeurtenissen in het faalpad worden opgenomen in een gebeurtenissenboom, als het faalpad overzichtelijk is. Indien verschillende processen met verschillende modellen moeten

worden gecombineerd, dan biedt gebruik van een foutenboom of integrale benadering meer voordeel.

Bij een faalpad met meerdere knopen zoals bij onderloopsheid en piping, is het van belang dat de belasting en duur op een realistische wijze worden meegenomen: een vervolgproces kan pas beginnen wanneer een eerdere knoop is gefaald, waardoor het belastingniveau en de belastingduur tijdens vervolgprocessen kunnen veranderen.

3.5.1.2 Verfijnde analyse naar het initieel mechanisme

De analyse van de initiële mechanismen in de dominante faalpaden kan nader worden aangescherpt. Daarvoor zijn drie hoofdlijnen mogelijk op te volgen:

- Beter uitwerken van de schematisering door het expliciet meenemen van onzekerheden waarvoor in de eerste analyses grove aannames zijn gehanteerd. Dit betreft bijvoorbeeld verbetering van aannames over het effect van het voorland op de hydraulische belasting of van aannames over bodemopbouw, sterkte-eigenschappen of de invloed van anisotropie op het faalgedrag. Er kunnen historische data over belastingen worden gebruikt om de onzekerheid over de sterkte te verminderen.
- Nauwkeuriger berekening door geavanceerde modellen toe te passen waarmee de fysica in meer detail kan worden geschematiseerd. Dit kan bijvoorbeeld worden gedaan door berekeningen uit te voeren met de eindige elementenmethode.
- Inzetten van geavanceerdere rekentechniek in combinatie met probabilistische methoden om onzekerheden beter en scherper mee te nemen, in plaats van een eenvoudige berekening met een semi-probabilistische methode. Helaas biedt het BOI daar op dit moment (in zowel handleiding als software) nog geen ondersteuning voor.

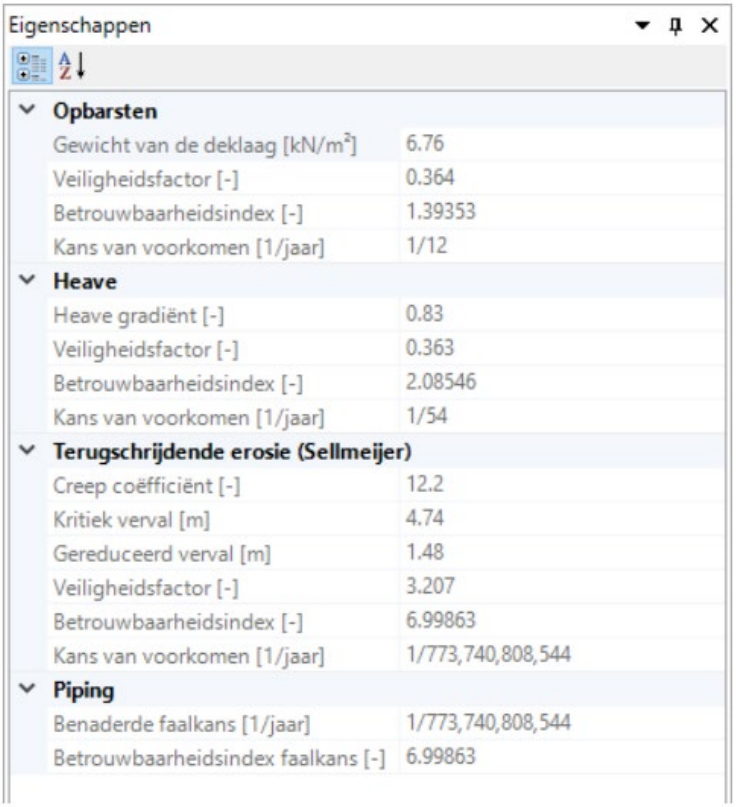
Mogelijkheden voor aanscherping zijn:

- Nogmaals de aangehouden belasting controleren:
  - De belasting door waterstanden wordt gekozen volgens de statistiek van data met Hydra-Ring of Riskeer. Zie daarvoor de gebruikershandleiding Riskeer – Faalmechanismen kunstwerken die te vinden is onder https://iplo.nl/thema/water/applicaties-modellen/waterveiligheidsmodellen/riskeer/.
- Nadere informatie verzamelen omtrent de constructie, indien noodzakelijk uitvoeren van lokale ontgraving en inspectie:
  - Aantasting kwelschermen door veroudering of verzakking.
  - Spleetvorming onder het kunstwerk door verzakking.
  - Ontgronding of verandering van de situatie t.o.v. ontwerp.
  - De toestand van filterconstructies (vervorming, verzanding).
  - Aanwezigheid van leidingen.
- Nadere informatie verzamelen over bewezen sterkte:
  - Als het kunstwerk al hoogwater of verval tijdens onderhoud heeft doorstaan zonder schade in de vorm van wellen of piping te ondervinden, dan is het kunstwerk mogelijk veiliger dan uit berekening zal blijken. Analyse van de waarnemingen kan uitwijzen wat daar de reden voor is.
- Aanvullend grondonderzoek:
  - Variaties in bodemopbouw, met beschouwing van heterogeniteit, anisotropie.
  - Bepaling van de korrelgrootte van zandlagen, fijne zandfractie [14].
- Geohydrologisch onderzoek:
  - Deze aanpak voor aanscherping is in de volgende paragraaf beschreven.
- Geavanceerde grondwatermodellen toepassen
  - Zie beschrijving geohydrologie in een volgende paragraaf.
- (Semi-)Probabilistische piping- en heave-analyse:
  - Zie hierover de volgende overwegingen.

3.5.1.3 Probabilistische analyse

Met betrekking tot toepassing van een probabilistische analyse wordt het volgende opgemerkt:

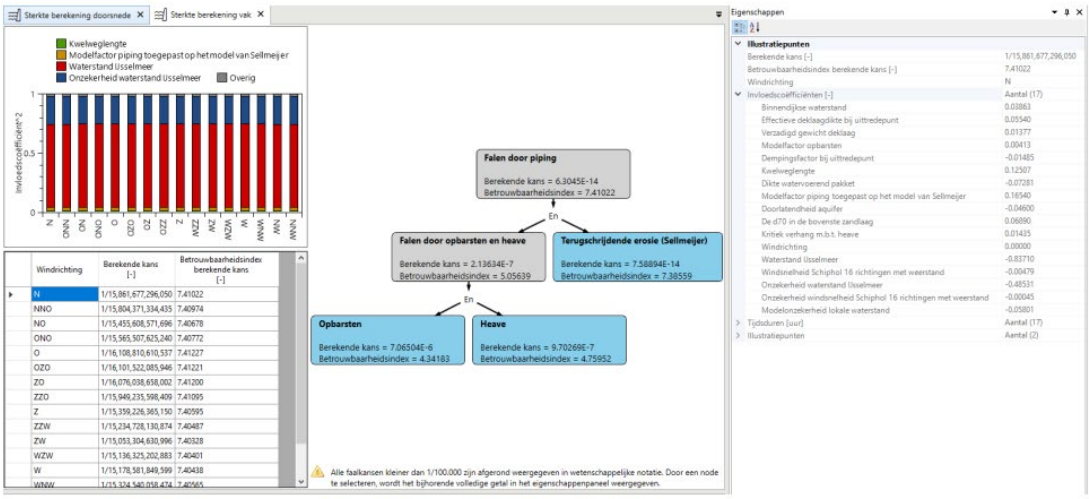
- In de huidige praktijk wordt voor het faalmechanisme piping een kritiek verval berekend dat wordt vergeleken met het optredende verval bij normomstandigheden (afstand tot norm). De hydraulische belastingen volgen uit de wettelijke veiligheidsnorm met betrekking tot overstroming, zoals vastgelegd in de Omgevingswet. Maar het verval hangt ook af van waterstanden aan landzijde die moeten worden afgeleid uit hydrologische informatie, oppervlaktewatermodellen en geohydrologische modellen.
- Bij analyse met het model van Sellmeijer voor een horizontale kwelweg kan gebruik worden gemaakt van Riskeer . In Riskeer en het rekenhart Hydra-Ring 20.1 is het model van Sellmeijer inclusief heave in het opbarstkanaal van de wel opgenomen voor semi-probabilistische en probabilistische berekening ten behoeve van de beoordeling van dijken (zie de gebruikershandleiding Riskeer [41, hoofdstuk 17] en handleiding Hydra-Ring 20.1 [40, paragraaf 5.2.2]). Naast het stochastisch ondergrondmodel worden parameters met kentallen voor een kansverdeling (gemiddelde en variatiecoëfficient) ingevoerd. Riskeer berekent semi-probabilistisch een benaderde faalkans en probabilistisch een faalkans [1/jaar].
  Om deze methode toe te passen op een kunstwerk moet volgens de handleiding Riskeer de berekening voor dijken handmatig worden aangepast voor kwelweglengten en dergelijke, maar geldt dan alleen voor een horizontale kwelweg.



Eigenschappen

Opbarsten	
Gewicht van de deklaag [kN/m²]	6.76
Veiligheidsfactor [-]	0.364
Betrouwbaarheidsindex [-]	1.39353
Kans van voorkomen [1/jaar]	1/12
Heave	
Heave gradiënt [-]	0.83
Veiligheidsfactor [-]	0.363
Betrouwbaarheidsindex [-]	2.08546
Kans van voorkomen [1/jaar]	1/54
Terugschrijdende erosie (Sellmeijer)	
Creep coëfficiënt [-]	12.2
Kritiek verval [m]	4.74
Gereduceerd verval [m]	1.48
Veiligheidsfactor [-]	3.207
Betrouwbaarheidsindex [-]	6.99863
Kans van voorkomen [1/jaar]	1/773,740,808,544
Piping	
Benaderde faalkans [1/jaar]	1/773,740,808,544
Betrouwbaarheidsindex faalkans [-]	6.99863

Figuur 3.17 Weergave rekenresultaten Piping (STPH) voor een semi-probabilistische berekening.



Figuur 3.18 Weergave rekenresultaten Piping(STPH) voor probabilistische berekening.

- Voor het faalmechanisme onderloopsheid bij kunstwerk zou volgens [21] geen faalkans kunnen worden bepaald. Met het huidige BOI-instrumentarium kan namelijk geen volledig probabilistische berekening voor onderloopsheid bij kunstwerken worden gemaakt omdat dit beschouwing van meerdere faalmechanismen dan alleen piping vereist, hetgeen met Riskeer niet wordt ondersteund. Riskeer beschouwt voor kunstwerken alleen de faalmechanismen Hoogte, Betrouwbaarheid sluiting en Sterkte en stabiliteit puntconstructies.
- Bij controle van heave langs schermen is het nu niet mogelijk om met Riskeer of Hydra-Ring een probabilistische berekening uit te voeren. In dat geval zullen andere programma's op maat moeten worden gemaakt voor een semi-probabilistische analyse (zoals met de Probabilistische Toolkit en/of gebruik van een Python script voor inzet van een model gebaseerd op bijvoorbeeld de eindige elementen methode).
- Semi-probabilistische analyse van onderloopsheid met Lane of analyse van heave is in principe wel mogelijk. Dat kan momenteel als volgt worden uitgevoerd:
  - Het stochastisch ondergrondmodel wordt opgesteld op basis van feitelijke gegevens, zoals sonderingen en boringen, en op basis van geologische kennis over de ontstaansgeschiedenis van een gebied (Zie Handleiding Lokaal Schematiseren [9] o.b.v. Hijma en Lam [8]). Voor de volledigheid wordt er op gewezen dat voor piping bij kunstwerken vanzelfsprekend geen lengte-effect in rekening wordt gebracht [16, p.58]
  - Kansverdelingen voor de parameters in de modellen voor het dominante faalmechanisme worden bepaald.
  - Hydra-Ring zou kunnen worden gebruikt om een probabilistische beoordeling uit te voeren gebaseerd op de rekenregel van Lane. Dat is een kunstgreep omdat met Hydra-Ring in het algemeen probabilistische berekeningen voor dijkringen worden uitgevoerd. De hydraulische belastingen in Hydra-Ring zijn gebaseerd op de TMR2006. Deze zullen afwijken van de hydraulische belastingen die zijn opgenomen in de huidige versie in Riskeer. De faalkans kan als volgt ingeschat worden:
    - Genereer de overschrijdingsfrequentielijn van de waterstand uit Riskeer ter plaatse van het beschouwde kunstwerk.
    - Genereer de overschrijdingsfrequentielijn van de waterstand uit Hydra-Ring ter plaatse van het beschouwde kunstwerk.
    - Bepaal het verschil tussen beide overschrijdingsfrequentielijnen.
    - Corrigeer de waterstand in Hydra-Ring met dit verschil en voer de probabilistische berekening voor piping binnen Hydra-Ring uit.

- In principe zou een uitwerking van de faalkans op basis van de rekenregel van Lane in een Python script met behulp van de probabilistische toolkit van Deltares mogelijk moeten zijn. Het is echter de vraag of een probabilistische beschouwing van een empirische rekenregel een betrouwbaar resultaat oplevert. Daarom wordt deze toetsing nu niet standaard aangeboden in het BOI. Een reden om de methode Lane wel aan te bieden voor kunstwerken is dat dit (tot op zeker hoogte) meer inzicht geeft in de 'afstand tot de norm', zodat dit in vergelijking met andere mechanismes integraler kan worden afgewogen.

Roadmap Bevinding 11
Vanwege de gesignaleerde kennishiaten is de betekenis van (semi)probabilistische methoden niet eenduidig aan te geven. Daarom bevelen wij aan om in de roadmap aandacht te besteden aan ontwikkeling van probabilistische methoden ten behoeve van de beoordeling van kunstwerken voor alle faalmechanismen binnen de faalpaden onderloopsheid en achterloopsheid. Toepassing op cases uit de praktijk wordt door geïnterviewden uit de waterschapswereld sterk aanbevolen.

3.5.2 Mogelijkheden voor aangescherpte (specifieke) beoordeling t.a.v. geohydrologie

3.5.2.1 Inzet van aanvullend grond- en grondwateronderzoek

Zoals eerder verduidelijkt is het noodzakelijk om de stroming van grondwater mee te nemen in de analyse van de verschillende processen die bij onderloopsheid aan de orde kunnen zijn. Met betrekking tot het aspect grondwater is het verstandig om niet alleen modelberekeningen te gebruiken maar ook aanvullend onderzoek en grondwatermetingen te doen. Daarover wordt in de verschillende handleidingen voor piping het volgende opgemerkt:

- Juist bij kunstwerken, waar sprake kan zijn van grote onzekerheden over de schematisering ten gevolge van de verstoring van de originele grondslag bij de aanleg van het kunstwerk, wordt onderzoek van grondlagen en grondwaterstanden sterk aanbevolen. In [42] is een protocol gegeven hoe de inrichting van een meetnet bij kunstwerken het beste vorm gegeven kan worden.
- Indien er weinig informatie uit grondonderzoek beschikbaar is en de laagopbouw mogelijkerwijs niet uniform is, kan de hulp van een geoloog worden gevraagd om de lokale situatie en de informatie uit de omgeving te duiden (bijvoorbeeld over de geologische typering van het gebied, het voorkomen van tussenzandlagen, geulafzettingen e.d.).
- Indien aanvullend grondonderzoek nodig blijkt te zijn, zal dat ten minste uit drie sonderingen aan beide zijden van het kunstwerk bestaan: ter plaatse van kruin, buiten- en binnenzijde tot enkele meters dieper dan het diepste kwelscherm en ten minste 3 meter in de watervoerende zandlaag.
- Grondboringen (in combinatie met de plaatsing van peilbuizen) met monstername worden uitgevoerd ter bepaling van volumegewicht van cohesieve lagen en korrelverdeling van de zandlaag.
- De hydrologische omgevingsfactoren (variatie van grondwaterstijghoogte in ruimte en tijd, polders, oppervlaktewater, grondwateronttrekkingen, etc.) dienen in een geohydrologische systeemanalyse te worden beschreven.
- Zo nodig doet men veldproeven of geofysische metingen ter bepaling van doorlatendheid en anisotropie.
- Met peilbuizen kan de respons van de stijghoogte in de watervoerende zandlagen op de buitenwaterstand worden geanalyseerd. Hiervoor zijn verschillende methoden beschikbaar (bijvoorbeeld te vinden in [3], [6]). Metingen worden vertaald naar hoogwateromstandigheden, met verhang onder het kunstwerk en stroming langs kwelschermen. De vertaling van metingen naar maatgevende omstandigheden vereist

specialistische kennis. In de normen of literatuur wordt de uitwerkingsmethode niet volledig voorgeschreven. Daarom dient de adviseur de geschiktheid van de voorgestane methode te onderbouwen.

- Bij veel kunstwerken is sprake van verticale uitstroming van grondwater achter het kunstwerk. Door gerichte installatie van monitoring en verzameling van meetdata kan de stijghoogteverdeling ter plaatse van het benedenstroomse kwelscherm worden verzameld. Door extrapolatie kan het verhang bij het kwelscherm onder maatgevende omstandigheden worden afgeleid. Het verticale verhang moet worden vergeleken met het heave-criterium van 0,5.
- Indien sprake is van horizontale uitstroming van grondwater achter het kunstwerk, dan ontbreekt een uitstroomcriterium. In dat geval moet een maatwerk analyse worden gemaakt met hulp van experts.
- Om de stroming van grondwater onder het kunstwerk te beoordelen wordt de funderingstoestand bekeken en nagegaan of er van afwijkingen in schermen of spleetvoorkomen sprake kan zijn. Er wordt onderzoek gedaan naar innovatieve detectiemethoden (geohydrologisch en geofysisch) maar vooralsnog zijn die methoden nog niet operationeel.

Tijdens het onderzoek voor de roadmap is gebleken dat bij veel kunstwerken niet of nauwelijks grondwatermetingen beschikbaar zijn.

Roadmap Bevinding 12
Over het algemeen zijn er weinig meetpunten voor grondwaterstanden nabij kunstwerken in dijkringen geplaatst. Bovendien zijn er nog geen operationele (innovatieve) methoden voor detectie van afwijkingen in kunstwerken. Monitoring moet meer aandacht krijgen, om metingen toe te kunnen passen in alle fasen in het beoordelingsproces, van Verhaal van de Kering tot en met Aangescherpte toetsen.

3.5.2.2 Inzet van grondwatermodellen

Over de inzet van geohydrologische modellen wordt het volgende opgemerkt.

Zoals eerder beschreven dient de keuze van modellen (quasi-stationair of tijdsafhankelijk) te passen bij de plaatselijke situatie en aldaar optredende verandering van waterstanden (over lange duur volgens een trage stochast dan wel in relatief korte duur met een snelle stochast).

Experts zullen beschikbare stijghoogtedata moeten beoordelen om te bepalen of het effect van tijdsafhankelijkheid moet worden meegenomen (omdat daar een scherpere analyse mee gedaan kan worden). Voor de verschillende omstandigheden geldt:

- Kustgebied, effect van stormcondities (kort en lang) en getij (springtij tot doodtij): tijdsafhankelijkheid van belang.
- Merengebied, windopzet bij storm met een korte belastingduur: tijdsafhankelijkheid van belang.
- Benedenrivierengebied, waterstand deels door rivierafvoer en deels door waterstand op zee met getij en stormopzet: tijdsafhankelijkheid van belang.
- Bovenrivierengebied, waar piping belangrijk is, nauwelijks effect van tijdsafhankelijkheid aan de orde is (omdat er één langdurig hoogwater optreedt van circa twee weken): er mag stationair worden gerekend.

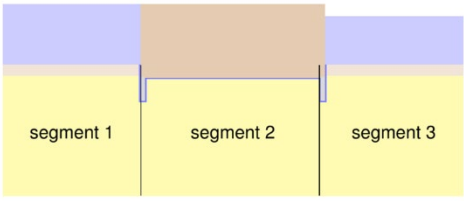
Driedimensionale of quasi-driedimensionale grondwaterstromingsmodellen zijn nodig als de laagopbouw en de stijghoogte gelijkmatig is rond het kunstwerk. In het eerste geval kan het nodig zijn om inzicht in de grondopbouw te verbeteren door lokaal grondonderzoek te doen. Als het stijghoogtepatroon lokaal afwijkt door variaties in hydrologische condities in voorland en achterland kan het verstandig zijn om meetpunten te plaatsen. Dit is aan de orde als de grondwaterstanden in meerdere richtingen (3D) variëren wanneer deze door

omgevingsfactoren worden beïnvloed, bijvoorbeeld als er diepe polders of onttrekkingen in de buurt voorkomen.

3.5.2.3 Grondwatermodellering voor een omgeving zonder complicerende randvoorwaarden

In dit geval kunnen de volgende modellen worden toegepast om de verdeling van grondwaterstanden rond het kunstwerk bij maatgevende omstandigheden in beeld te brengen:

- Grondwaterberekening 2D stationair:
  - Segmenten model Deltares.
    - Eindige elementen methode ter vervanging van fragmentenmethode.
    - Lokaal model 2D of 3D mogelijk.
    - Kunstwerken toepassingen.
    - Ontwikkelversie Deltares, van Esch [19].
    - Nog extra segmenten te ontwikkelen, bijvoorbeeld voor spleetvorming en filter.



  - Plaxis (https://www.bentley.com/software/plaxis-2d/#overview)
    - Eindige elementen methode.
    - Lokaal model 2D of 3D.
- Grondwaterberekening 3D stationair.
  - TimML (https://timml.readthedocs.io/en/latest/).
    - Analytische elementen methode (Bakker).
    - 3D in horizontale vlak met Dupuit lagenbenadering of volledig 3D i.v.m. anisotropie.
    - Lokaal model met isotrope eigenschappen.
  - Modflow/iMod (https://www.usgs.gov/software/modflow-6-usgs-modular-hydrologic-model en https://www.deltares.nl/software-en-data/producten/imod).
    - Eindige differentie methode 3D model.
    - Regionaal tot lokaal model ombouwen.
    - Geohydrologische toepassingen.

3.5.2.4 Grondwatermodellering voor een omgeving met complicerende randvoorwaarden

In dit geval zullen uitgebreidere modelstudies moeten worden verricht. Dit is aan de orde als er behalve rivier en vast peil in achterland ook andere invloeden bepalend zijn, zoals diepe polders, grondwateronttrekkingen, verstoringen in voorland en een complexe bodemopbouw met variërende gelaagdheid, geulafzettingen etc. In dat geval zal eerst het model onder dagelijkse omstandigheden moeten worden gekalibreerd op waarnemingen om na te gaan of de effecten van complicerende randvoorwaarden op de verdeling van de grondwaterstand met het model benaderd kan worden.

Vervolgens zal in het model de belasting moeten worden aangebracht met de maatgevende hoogwater situatie. Eventuele effecten van specifieke condities in het gebied zullen daarbij zo goed mogelijk moeten worden meegenomen. Dit betreft rivierbodem en erosie, onderlopend voorland en nevengeulen, stijging waterstand in achterland, berging in polders en andere lokale fenomenen.

De extra modelleeractiviteiten zijn dan:

- Analyse meetreeksen en getij (https://pastas.readthedocs.io/stable/):
  - Nagaan of maatgevende situatie hoogwater en getij-effect nader moet onderzocht.
- Grondwatermodel 3D.
  - Modflow/iMod (https://www.usgs.gov/software/modflow-6-usgs-modular-hydrologic-model en https://www.deltares.nl/software-en-data/producten/imod).
    - Eindige differentie methode.
    - Sub-Regionaal model.
    - 3D in horizontale vlak met Dupuit benadering of volledig 3D i.v.m. anisotropie.

- FeFlow (https://www.dhigroup.com/technologies/mikepoweredbydhi/feflow) of Kratos (https://oss.deltares.nl/web/embankment/-/first-steps-into-the-groundwater-flow-program-with-backward-erosion-module)
  - Eindige elementen methode.
  - Sub-Regionaal model.
  - 3D in horizontale vlak met Dupuit lagenbenadering of volledig 3D i.v.m. anisotropie.
  - In ontwikkeling.

Het rekenprogramma Kratos is nog in een ontwikkelingsstadium. Het wordt hier vermeld omdat deze tool momenteel in de stability suite van Deltares wordt ingebouwd (https://oss.deltares.nl/web/embankment/-/prototype-d-settlement).

Uit het stijghoogtepatroon wordt de maatgevende kwelweg afgeleid. Vervolgens vindt op basis van de uitgewerkte geohydrologische berekening voor deze kwelweg een piping-analyse plaats. De randvoorwaarden voor de piping-analyse worden uit de grondwaterberekening overgenomen. De pipingberekening wordt als volgt uitgevoerd:

- Voor het horizontale deel van de kwelweg volgens de methode van Sellmeijer waarbij het verval over de constructie kleiner moet zijn dan het kritieke verval:

$$\Delta H < \Delta H_c = F_r F_s F_g L$$

- Deze berekening kan worden uitgevoerd met het programma D-Geo-Flow.

Vervolgens kan een semi-probabilistische analyse worden uitgevoerd:

- Probabilistische toolkit:
  - Verdelingen voor parameterwaarden schatten. Boven- en ondergrensschattingen maken.
  - Bepalen met gevoeligheidsanalyse welke parameters belangrijkst zijn.
  - Nagaan op basis van ervaringen van experts van het Waterschap of metingen of er afhankelijkheden zijn. Voor kunstwerken betreft dat mogelijk de correlatie tussen waterstanden binnen en buiten. Hiervoor een correctie aanbrengen in de uitwerking.
  - Faalkansanalyse maken.

Roadmap Bevinding 13
Software voor bepaling van de grondwaterstroming voor een onder- of achterloopheidsanalyse van een kunstwerk met elementen zoals schermwanden, een spleet onder een constructie of een filter is momenteel niet standaard beschikbaar in DGeoFlow. Controle, meestal in complexe gevallen, wordt dan maatwerk met standaard eindige elementen programmatuur zoals FeFlow, Plaxis of Kratos. Mogelijk kan een nieuwe techniek met doorontwikkeling van de eindige elementen segmentenmethode in komende jaren uitkomst bieden voor eenvoudiger beoordelingsgevallen. Dan moet daar wel voldoende financiering voor gevonden worden.

3.5.3 Plausibiliteitscontrole

Als de uitkomsten van de berekeningen en de faalkansanalyses in de fase van aangescherpte beoordeling beschikbaar zijn, wordt een plausibiliteitscontrole gedaan. Bij plausibiliteit gaat het om het beoordelen of het resultaat aannemelijk is.
De plausibiliteitscontrole kan plaatsvinden aan de hand van de volgende generieke vragen [20]:

- Voldoet de berekende faalkans aan de verwachtingen voor het betreffende kunstwerk?
- Passen de uitkomsten van de modelberekeningen bij waarnemingen?
- Hoe vergelijkbaar zijn de uitkomsten met eerdere analyses?
- Kunnen de uitkomsten worden verklaard vanuit het verhaal van de kering?

Deze vragen worden gesteld ter verificatie of de berekende faalkans ook voorstelbaar is gelet op de situatie van het kunstwerk en de beschikbare ervaringen, bijvoorbeeld over welvorming in het gebied, zoals via de wellendatabase (zie https://www.wellocaties.app/) of ervaring van beheerders.

Als er verschillen zijn tussen uitkomst (of berekende faalkans) en verwachte faalkans volgens ervaring, is een duiding nodig en moet worden gecontroleerd of er fouten of afwijkingen in de analyse zitten. Dit kunnen afwijkingen in de modelinvoer zijn, of afwijkende kansverdelingen van parameters of zelfs nieuwe kennisontwikkeling en uitgangspunten.

Specifiek voor piping bij kunstwerken geldt dat het kan voorkomen dat praktijkwaarnemingen duiden op voldoende weerstand tegen piping, terwijl de rekenkundige beoordeling niet de uitkomst 'faalkansbijdrage verwaarloosbaar' oplevert. In dat geval wordt vanuit de praktijk aanbevolen om de waarnemingen, mits vertaald naar hoogwatercondities, voldoende betrouwbaar en goed gedocumenteerd, te laten prevaleren boven het oordeel dat op basis van modellen is verkregen. Het is van belang om in het kader van de duiding te verifiëren of de praktijkwaarneming onder daarbij geldende omstandigheden overeenkomt met of sterk afwijkt van berekeningsresultaten met dezelfde condities.

Aangescherpte analyse is slechts één van de mogelijke stappen die genomen kan worden als het kunstwerk niet voldoet aan de ondergrens (score Vv) in de gedetailleerde beoordeling. Soms kan het minder inspanning vergen om een verbetermaatregel te treffen dan om een aangescherpte beoordeling uit te voeren om het onderdeel alsnog positief te beoordelen. Zie daarvoor paragraaf 3.7.

Roadmap Bevinding 14
Het is aan te bevelen om in overleg met waterschappen kunstwerken te selecteren die in komende beoordelingen aan de orde komen en als praktijkcases kunnen dienen. Voor deze cases kunnen met bestaande en nieuwe technieken (geohydrologische modellen, doorrekening van faalmechanismen en probabilistische analyse) beoordelingen worden gemaakt en nagegaan of de nieuwe methoden tot andere (en hopelijk beter onderbouwde) resultaten leiden.

3.5.4 Afronding: assembleren van uitkomst voor alle faalmechanismen

De assemblage van kunstwerk naar dijktraject vindt plaats met:

- Ringtoets (eenvoudige of generieke/gedetailleerde beoordeling).
- Hydra-Ring/Riskeer (aangescherpte of specifieke beoordeling).

In Hydra-Ring/Riskeer kunnen ook de beoordelingsresultaten van alle faalmechanismen worden geadministreerd en geassembleerd tot een oordeel op dijktrajectniveau. Riskeer is dan ook het 'standaard' beoordelingsinstrument. Daarom is hier een aparte handleiding voor opgesteld, de gebruikershandleiding Riskeer – Faalmechanismen kunstwerken.

3.5.5 Beoordeling en aanbevelingen vanwege handelingsperspectief

Aanbevelingen die volgen uit de analyse van faalkans en overstromingskans zullen door adviseurs en waterschappen worden vertaald naar mogelijke handelingsperspectieven. Deze aanbevelingen moeten zowel na de gedetailleerde als de aangescherpte beoordeling worden opgesteld. Onzekerheden worden hierin afgewogen.

De aanbevelingen over handelingsperspectief kunnen in de volgende categorieën van acties worden ingedeeld:

1) Afwachten tot een volgende versterkingsronde en de situatie laten zoals deze is, in totaal rekening houdend met deze zwakke schakel in de dijkring, en in de tussentijd in overleg met opdrachtgever en/of werkatelier starten met:

- Aanvullend onderzoek van ontbrekende data.
- Monitoring van grondwaterstanden en analyse.
- Modellering van grondwaterstroming en analyse.
- Maatregelen uitwerken (wegontwerpen van zwakke elementen in de constructie).

2) Treffen van repressieve maatregelen (acties ad hoc nemen als hoogwater zich voordoet, tijdelijke maatregelen ter beveiliging). Dit type maatregelen wil de beheerder liever niet toepassen.
3) Treffen van preventieve maatregelen (pipingbermen, aanpak voorland, extra of verlengd kwelscherm, filter, ontlastbronnen).

3.6 Conclusie over de inzet van grondwatermodellering bij beoordeling van kunstwerken op onderloopsheid en piping

Vanwege het door RWS gestelde doel voor dit onderzoek om een roadmap te formuleren, wordt antwoord gegeven op de vraag in hoeverre het noodzakelijk is om grondwatermodellering in te zetten bij de beoordeling van kunstwerken op onderloopsheid en piping.

Uit voorafgaande beschrijving van de huidige uitvoeringspraktijk van de beoordeling van kunstwerken op onderloopsheid en piping blijkt het volgende:

In de eenvoudige toets wordt het verhaal van de kering opgesteld. Daarbij kan middels een systeembeschrijving van de lokale geohydrologische situatie bij de opmaat naar de eenvoudige beoordeling al snel duidelijk worden of het kunstwerk en de geohydrologische situatie complex zijn en of het relevant is om nadere informatie te verwerven. Er zijn vele soorten kunstwerken en de omstandigheden kunnen sterk verschillen. Een algemene regel is daarom niet te geven maar het verhaal van de kering biedt waarschijnlijk voldoende handvatten om na te gaan of grondwaterstroming een belangrijke factor is.

Als een nadere of gedetailleerde beoordeling met eenvoudige rekenregels (Lane, piping Sellmeijer, heave) relevant is, is in elk geval inzicht nodig in de verdeling van grondwaterdrukken onder het kunstwerk. Waarschijnlijk vereist dat minimaal een eenvoudige berekening van de grondwaterstroming in een langsdoorsnede haaks op de richting van de kering. Bij een groot verval over en opbouw van het kunstwerk uit verschillende onderdelen (schermen, filters) is gebruik van een 2D-model aan te raden, op basis van de analytische of eindige elementenmethode. Op dit moment is DGeoFlow voor dijken beschikbaar maar er zou voor kunstwerken een programma moeten worden gemaakt dat modulair kan worden ingevoerd, in samenhang met de onderdelen die in het onderhavige soort kunstwerk aan de orde zijn.

Indien het kunstwerk niet goedgekeurd wordt, de situatie zeer complex is met grondwaterstroming niet alleen in langsrichting of indien aanscherping vanwege bijzondere hydraulische randvoorwaarden (kort voorland, polders, kans op piping), moet het handelingsperspectief worden nagegaan. Indien er geen pragmatische uitweg of economisch haalbare maatregelen kunnen worden ingezet, is de opstelling van een 3D-grondwatermodel een optie, maar vooral ook het uitvoeren van extra grondwatermetingen en monitoring moeten zeer zeker worden overwogen.

Roadmap Bevinding 15
Vanuit de praktijk wordt aanbevolen om de methodiek van beoordeling van kunstwerken op onder/achterloopsheid inclusief piping met geohydrologische analyse en modellen uit te proberen op te selecteren cases. Dit kan voor betreffende kunstwerken die als pilot worden gekozen in alle fasen van de beoordeling van grof naar fijn worden getest.

3.7 Opmerkingen over de inzet van probabilistische analyse bij de beoordeling van kunstwerken op onderloopsheid en piping

De toepassing van een probabilistische analyse op de situatie van piping bij kunstwerken is wenselijk maar momenteel zeker nog niet uitontwikkeld. In voorliggend document is de huidige aanpak beschreven. Om in de toekomst met een combinatie van geohydrologische modellering, berekening van onderloopsheid en piping en probabilistiek om te gaan bij de beoordeling van kunstwerken zal met experts moeten worden besproken wat een passende manier is. In navolgende notities zijn enkele ontwikkelingen bijeen gebracht die recent hebben plaatsgevonden met betrekking tot de probabilistische analyse.

Volgens Bijlage III Sterkte en veiligheid van het WBI proces [15, paragraaf 2.1] is het niet mogelijk om in het toetsspoor piping bij kunstwerken in de gedetailleerde toets een semi-probabilistische analyse uit te voeren die een afstand tot de norm levert (groep 4). Het wordt als een belangrijke beperking gezien dat de methode Sellmeijer alleen voor horizontale kwelwegen kan worden gehanteerd en dat de methode Lane voor horizontale en verticale kwelwegen (langs kwelschermen) empirisch en zeer conservatief is. Er is geen probabilistische of semi-probabilistische berekening met veiligheidsfactoren (die voor WBI 2017 zijn afgeleid) beschikbaar. Zo kan dus géén faalkans worden berekend en niet worden vergeleken met de faalkanseis.
In dat geval kan tijdens het assembleren uitsluitend oordeel IIv (voldoet aan de belastingen bij de norm van het dijktraject) of Vv (voldoet niet aan de belastingen bij de norm van het dijktraject) worden toegekend. Hiervoor wordt een gedetailleerde toets uitgevoerd met de waterstand die hoort bij de norm van het dijktraject. De beheerder bepaalt welke norm wordt gehanteerd: signaleringswaarde (waterstand categorie A) of ondergrens (waterstand categorie B). Omdat van een enkele waterstand wordt uitgegaan, is volledige probabilistische berekening niet aan de orde.

In de brief van mei 2023 van Rijkswaterstaat aan Waterschap Limburg [24] is diezelfde aanpak vermeld die geldt volgens BOI [21, p.41, Stap (of hoofdroute) 4. Bepalen faalkans / uitvoeren beoordeling, zie paragraaf 4.7)]. Hierin wordt verwezen naar de gebruikershandleiding Riskeer – Faalmechanismen kunstwerken [37] waarin handvatten zijn gegeven voor de wijze van bepaling van de parameters voor de modellen.
In de Handleiding Overstromingskansanalyse – Kunstwerken uit 2023 [21, par.4.7 Piping bij kunstwerk] is opgemerkt dat - indien het faalmechanisme piping bij kunstwerk mogelijk een significante bijdrage levert aan de overstromingskans - de mogelijkheden moeten worden verkend om meer zekerheid te verkrijgen aangaande het oordeel.
Voor dit faalmechanisme wordt een kritiek verval berekend en vervolgens vergeleken met het optredende verval bij normomstandigheden. Hiervoor is het wel nodig de hydraulische belastingen te relateren aan de wettelijke veiligheidsnorm met betrekking tot overstroming, zoals die is vastgelegd in de Omgevingswet.
Ten behoeve van beoordelingen door Waterschap Limburg [24] werd nog een andere route aangegeven:

In de brief aan Waterschap Limburg [24] staat vermeld over Hoofdroute 4:

> *“In sommige gevallen is geen (semi-)probabilistisch model voor handen. In dat geval kan door middel van ‘expert judgement’ dan wel een niet-(semi-) probabilistische analyse bepaald worden of deze wel of niet dominant is. Wanneer dit niet het geval is wordt geen faalkans bepaald. Wanneer een dergelijk mechanisme wel dominant is moet met een nadere analyse een faalkans worden onderbouwd. Hiervoor is vaak specialistische kennis nodig. Bij de beoordeling kan een geschikte methode hiervoor in het werkatelier worden bepaald.”*
> *Indien het mechanisme Piping bij Kunstwerken PKW als dominant wordt beschouwd, kan er een nadere analyse worden uitgevoerd en eventueel een faalkans worden bepaald met behulp van de methoden die worden beschreven in de Handleiding Kunstwerken, hoofdstuk*

"Nadere analyse dominant faalpad" [21]. Enkele mogelijke methodes die daar worden beschreven zijn:

- *Peilbuismetingen.*
- *Geavanceerde grondwaterstromingsmodellen.*
- *Het principe van "bewezen sterkte".*
- *Probabilistische piping- of heave-analyse; zie Handleiding Overstromingskans-analyse –Kunstwerken [21], waarin is opgemerkt:*

Indien het oordeel gebaseerd is op het model van Lane dan moet de gebruiker zelf een probabilistisch model opzetten om een probabilistische beoordeling uit te voeren. Voor de statistiek van de buitenwaterstand kan hierbij gebruik worden gemaakt van Hydra-NL of Riskeer (Hydra-Ring). Voor de probabilistische modellering van de formules van Bligh en Lane kan gebruik worden gemaakt van de modellering zoals die destijds in PC-Ring1 is gebruikt. Via de IPLO-helpdesk is een tool beschikbaar waarmee een probabilistische berekening uitgevoerd kan worden.
Indien het oordeel is gebaseerd op het model van Sellmeijer dan kan gebruik worden gemaakt van Riskeer. In Riskeer is dit model namelijk probabilistisch opgenomen in het dijkenspoor. Er moet dan een dijkensom handmatig worden aangepast en worden omgeschreven naar een kunstwerkensom.
Bij het model van heave is het niet mogelijk om met PC-Ring of Riskeer een probabilistische berekening uit te voeren."

In recente literatuur zijn aanwijzingen te vinden over de aanpak van probabilistische analyse van de overstromingskans (zie [40, 42, -45]. Deze methoden zijn echter voor de beoordeling van kunstwerken nog niet ingeburgerd. De opzet van een handleiding met voorbeelden uit de praktijk ontbreekt.
Bovendien, gegeven de huidige staat van de kennis waarbij piping-berekeningen in een doorsnede in 2D worden uitgevoerd, lijkt ons het maken van een probabilistische beschouwing voor kunstwerken over modelberekeningen van onderloopsheid een aanpak die nog in de kinderschoenen staat. Er wordt dan wellicht/mogelijk op een niet correcte wijze een faalkans bepaald. Omdat bij een kunstwerk lokale piping kan optreden in een ruimtelijk verdeeld stromingsveld is een correcte beschrijving van het faalpad en de ontwikkeling van een passend grondwatermodel noodzakelijk.

Roadmap Bevinding 16
Vanwege de gesignaleerde kennishiaten in gebruik van (semi)probabilistische methoden bij de beoordeling van kunstwerken bevelen wij aan om in de roadmap aandacht te besteden aan de beschrijving van toepassingen van dergelijke methoden voor alle faalmechanismen binnen de faalpaden onderloopsheid en achterloopsheid, en voor alle fasen van beoordeling, werkend van grof naar fijn. Bij voorkeur gebeurt de vastlegging van kennis in overleg met mensen uit de praktijk en experts op het gebied van probabilistiek.

3.8 Ervaringen uit de praktijk

De wens vanuit de praktijk is om bij beoordelingen te werken van grof naar fijn. Om de procedure van beoordeling overzichtelijk te houden is het wenselijk om niet relevante of veilige objecten in een vroeg stadium al goed te keuren. In de gedetailleerde beoordeling wordt dan op kwelweglengte bij waterstand volgens norm beoordeeld.

Met behulp van het waterveiligheidsportaal zijn (door Greenrivers) de kunstwerken gerubriceerd die afgelopen toetsronde (LBO-1) op piping als 'onvoldoende' zijn beoordeeld. Onderstaande tabel is het overzicht van die kunstwerken. Het aantal kunstwerken dat naar voren komt die afgekeurd zijn op piping is beperkt. Hierin zijn niet de kunstwerken van de Limburgse dijkringen meegenomen. Bij de Limburgse dijkringen zijn er voor piping veel

onvoldoendes toegekend, maar de beschikbare informatie over achterliggende redenen is summier.
In het begin van de beoordeling waren er meer kunstwerken op piping afgekeurd, maar uit aanvullende analyse is gebleken dat veel kunstwerken toch voldoen (met name bij enkele kunstwerken van Zuiderzeeland).

Dijktraject	Kunstwerk	Type	Oordeel	Commentaar
15-2	Coupure Veerpoort	Coupure	Vv	
16-5	Asperense Lingesluis-noord	Uitwateringssluis	Vv	Achterloopsheid voldoet niet. Nader onderzoek
20-4	Oostbeer vesting Hellevoetsluis	Langsconstructie	Vv	
21-2	Gemaal Raepshille	Gemaal	Vv	
22-1	Gemaal Johannes Vis	Gemaal	Vv	Kwelschermen niet lang genoeg en conditie onbekend
24-1	Inlaat Genderen	Inlaatsluis	Vv	
26-3	Duiker Inlaat Galgedijk	Inlaatsluis	Vv	
32-4	Uitwateringssluis Walsoorden	Uitwateringssluis	Vv	Onbekendheid lengte schermen
50-1	Gemaal Helbergen	Gemaal	Vv	Met name constructieprobleem met betonnen damwanden
50-1	Spuisluis Helbergen	Uitwateringssluis	Vv	Met name constructieprobleem met betonnen damwanden
52-4	Sluis Evergeune	Uitwateringssluis	Vv	

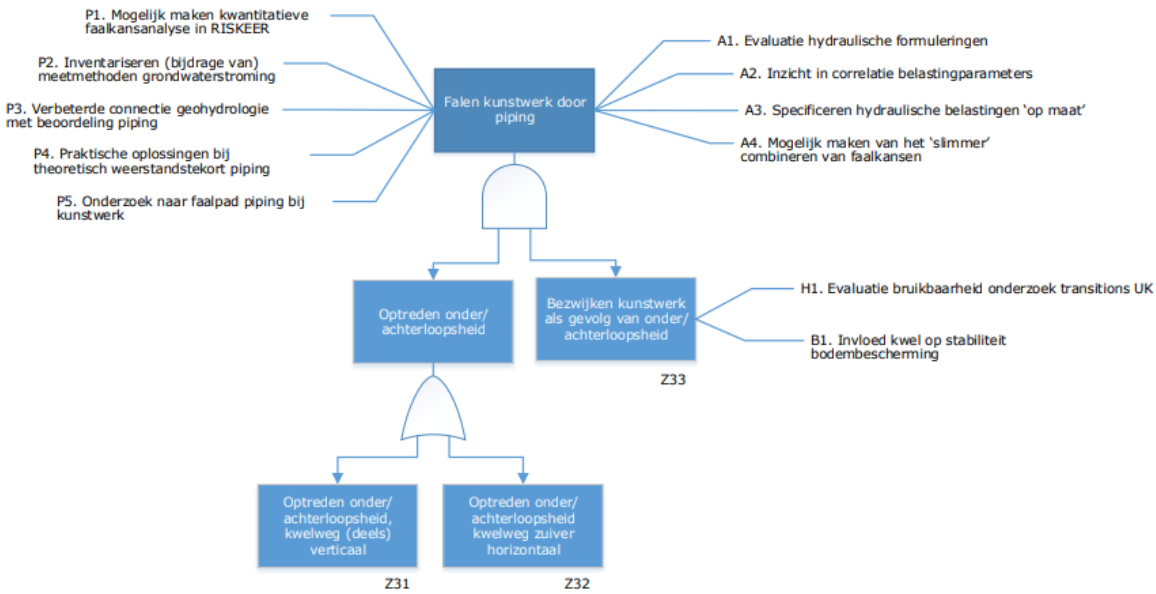
4 Roadmap voor onderzoek naar piping (en grondwaterstroming) bij kunstwerken

4.1 Vraagstelling

De vraag om een lange termijn onderzoeksplan voor piping en grondwaterstroming bij kunstwerken op te stellen is vanwege de problematiek en gesignaleerde kennishiaten breder ingestoken dan voor piping alleen. Daarbij gaat het om de mechanismen die vallen in het faalpad dat aangeduid wordt als onder- en achterloopsheid. Voor de beoordeling van een kunstwerk valt onder die mechanismen het gehele faalpad vanaf de ontwikkeling van maatgevende grondwaterstanden, opbarsten, falen van een bodembescherming of filter, piping, heave en spleetvorming tot en met de vervolgprocessen en de probabilistiek voor waterkerende kunstwerken door te kunnen lichten. Hierna wordt aangegeven naar welke onderwerpen in de toekomst onderzoek verricht moet worden om de beoordeling in het kader van LBO2 en later naar behoren uit te kunnen voeren.

4.2 Aanbevelingen uit de rode draden waterkerende kunstwerken

Al eerder zijn in de Rode Draad Waterkerende Kunstwerken [36] aanbevelingen opgesteld voor doorontwikkeling van kennis en kunde die direct of indirect te maken hebben met het faalmechanisme piping. Een overzicht van die aanbevelingen is verbeeld in de volgende figuur.



Figuur 7 Mogelijkheden op (door)ontwikkeling kennis en kunde bij piping kunstwerk

In de figuur uit de rode draden staan de mogelijke verbeteringen volgens die studie ten aanzien van piping vermeld. Kort samengevat betreft dat de volgende aandachtspunten (aangegeven met P1 t/m P5):

P1. Vanwege het feit dat de huidige rekenregels voor piping de toepassing van kansberekening niet volledig faciliteren, moet in RISKEER een kwantitatieve faalkansanalyse beschikbaar worden gemaakt voor piping (eigenlijk onderloopsheid) bij

een kunstwerk. Volgens het Adviesteam Dijkontwerp [memo 20220519_AD162-1-0.9_Rode Draad SK] moet het mogelijk zijn om alle modellen bij piping kunstwerk probabilistisch te gebruiken.

P2. Vanwege de onzekerheid in de bodemopbouw, de invloed van 3D grondwaterstroming, en de werking van kwelschermen is het aan te bevelen om de mogelijke meetmethoden voor grondwaterstroming onder en langs een kunstwerk te beschrijven.

P3. Door de bepaling van kwelwegen te onderbouwen met grondwatermodellen kan een nauwkeuriger inschatting van de faal- en overstromingskans ten gevolge van piping worden bevorderd. De inzet is om te inventariseren welke 'tools' of modellen er beschikbaar zijn en welke kennisleemten de inzet hiervan in de praktijk belemmeren. De koppeling is niet alleen van geohydrologie naar piping maar betreft ook die naar uitstroomcriteria.

P4. Er dient een handleiding te worden opgesteld voor een instrumentarium van praktische maatregelen (zoals bijvoorbeeld filterconstructies aan de teen) die kunnen worden beschouwd als handelingsperspectief wanneer bij beoordeling een tekort aan weerstand tegen piping bij een kunstwerk wordt bepaald.

P5. Ten behoeve van de beschrijving van de veiligheidsfilosofie is het nodig om te onderzoeken of het ontstaan van een pipe moet worden beoordeeld als falen van het kunstwerk en hoe het wellicht daarna optredende faalpad in de beoordeling kan worden meegenomen.

De aanbevelingen in de rode draden houden de volgende aanbevelingen in voor de roadmap:

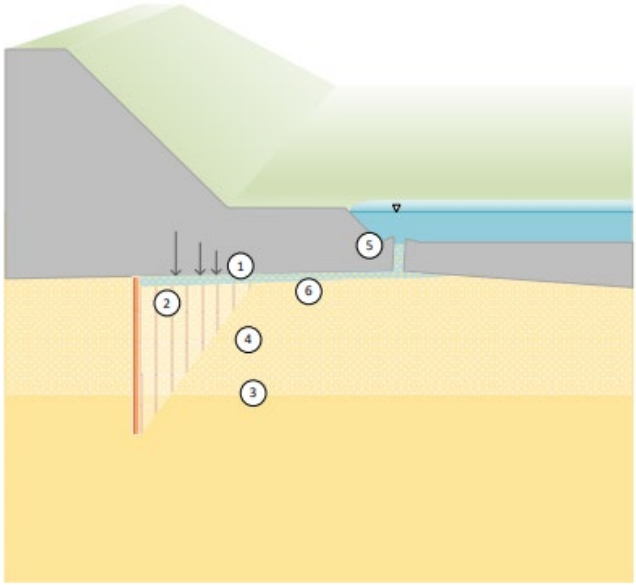
- In lijn met aanbevelingen P2 en P3 in de rode draden en de bevindingen A, E, I en M in voorliggend rapport wordt gesteld dat het wenselijk is om een instrumentarium te ontwikkelen waarmee de berekening van grondwaterstroming, stijghoogten en waterdrukken onder en rond kunstwerken wordt gefaciliteerd, waarop een analyse naar onderloopsheid (inclusief piping) kan worden gebaseerd. Mogelijk kan dat eerst met modellen in 2D maar op termijn is het wenselijk om de stroming in 3 dimensies te kunnen afleiden. In dat geval kan ook de maatgevende kwelweg naar een enkele pipe worden geanalyseerd die input levert voor de geotechnische faalmechanismen die hierna zijn vermeld.
- Volgens P3 moeten voor de analysemethode naar onderloopsheid alle deelmodellen binnen het faalpad kunnen worden toegepast, zoals opbarsten, heave in de wel, piping volgens Sellmeijer, heave langs schermwanden, stroming bij een filter.
- Volgens P1 moet het instrumentarium een probabilistische analyse mogelijk maken en volgens P5 voor het hele faalpad inclusief gevolgprocessen.
- Volgens P4 moet het instrumentarium zijn beschreven in een handleiding, die niet alleen ingaat op rekenmethoden, maar ook de link legt naar handelingsperspectief, de inzet van meetmethoden en maatregelen.

4.3 Opzet van onderzoek voor kennisverbetering over piping en heave

In de publicatie heaveschermen en in het bijbehorende plan van aanpak voor onderzoek ([28, 29] opgesteld door Albert Wiggers en Vera van Beek) is aangegeven dat er diverse redenen zijn om meer onderzoek te doen naar piping en heave. De aanbevelingen houden verband met onzekerheden bij de huidige versimpelingen van mechanismen in de beschrijving van het fysisch proces en de schematisatie naar een model (bijvoorbeeld 2D in plaats van 3D stroming en piping). Momenteel wordt gebrek aan kennis van het werkelijk model in de praktijk veelal opgelost door vereenvoudigde schematisatie en keuze van veiligheden voor waterkeringen die waarschijnlijk nogal robuust zijn (model van Lane). Echter, de rekenregels voor verschillende mechanismen die zijn vervat in huidige deelmodellen (Piping Sellmeijer 2D en heave) zijn niet gekoppeld of uitbreidbaar. Vanwege het kennistekort is voor piping en heave sprake van een onduidelijke inbedding in de overstromingskansanalyse. Het inzicht dat er momenteel nog

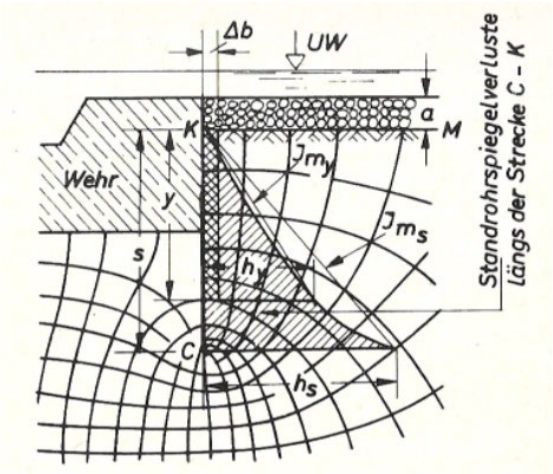
grote onzekerheden bestaan, heeft geleid tot het verzoek vanuit HWBP en RWS om onderzoeksprogramma's op te stellen. In het (concept) plan van aanpak voor het KIA Onderzoek Heave-schermen [29] zijn de kennishiaten beschreven voor de faalmechanismen heave en piping.

De situatie-aanduiding in Figuur 4.1 is ontleend aan vermeld KIA onderzoeksplan en deze figuur geeft heel duidelijk aan waar zich kennishiaten voordoen in de mechanismen.



Figuur 4.1 Kennisvragen bij heaveschermen die leiden tot onzekerheden in schematisering en modellering volgens KIA heaveschermen [29].

1. Het fysisch proces van heave en de gradiënt en stroming langs een scherm in aanwezigheid van een deklaag (al of niet met aanwezige pipes),
   De stroming naar pipes is geconcentreerd en 3D. Lokaal kunnen gradiënten groter zijn dan tot nu toe werd aangehouden in rekenregels voor een 2D situatie.
2. A. Hydraulische belasting aan de kop van een pipe en het tijdsafhankelijke effect in pipegroei.
   De stroming naar de pijp en de stroming bij kunstwerken is 3D en tijdsafhankelijk door de pipegroei. Dit vereist een betere connectie tussen grondmechanica, geohydrologie en piping.
   B. Stroming (al of niet naar een pipe) in een fluïderende zone,
   Achter een scherm is sprake van drukval afhankelijk van de grondwaterstroming (zie onderstaande figuur van Baumgart-Davidenkoff 1970). Het mechanisme van voortschrijdende fluïdisatie langs een heavescherm is nog niet goed beschreven. Het effect van aanwezigheid van bovenbelasting bij het beschouwen van hydraulische grondbreuk (heave) is nog niet geformuleerd.

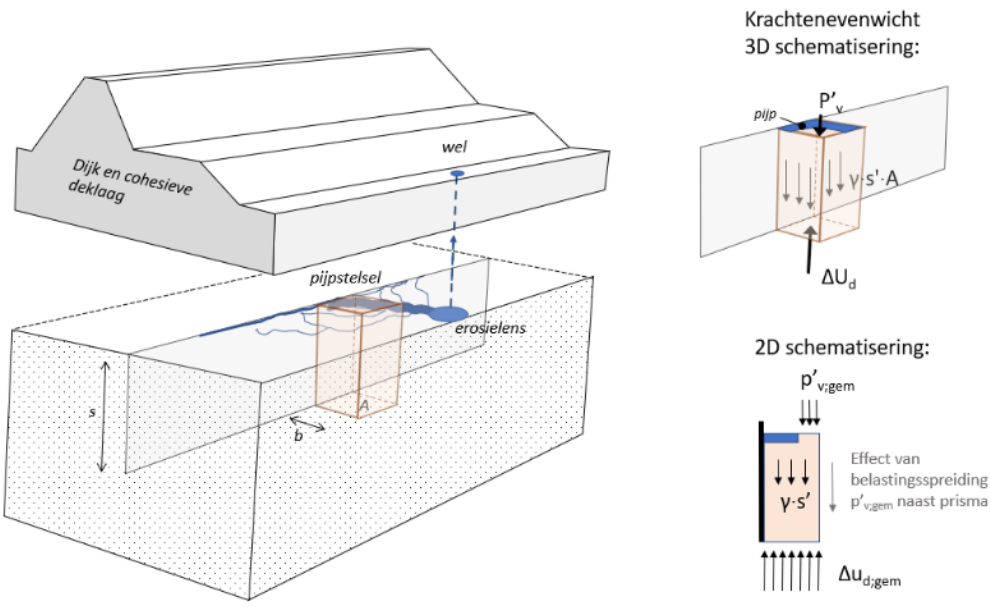


Figuur 4.2 Theoretische verdeling van grondwaterdruk achter kwelscherm.

3. Schematisering en het belang van inhomogeniteit en meerlaagsheid.
   Als gevolg van heterogeniteit kunnen fijne lagen sneller fluïderen en eroderen.
4. Effect van anisotropie en stoorlaagjes.
   Meerlaagsheid met voorkomen van stoorlaagjes en daarmee samenhangende anisotropie in de doorlatendheid hebben invloed op het fluïdiseren en op de drukval over het gefluïdiseerde pakket.
5. Drukval in het opbarstkanaal of de wel.
   De stroming hangt af van de diameter van het opbarstkanaal. De drukval in een verticaal opbarstkanaal is afhankelijk van de dichtheid van het optredende water-zand-mengsel. Om empirische redenen wordt een gradiënt van 0,3 aangehouden, maar de werkelijke gradiënt kan tussen 0 en 1 liggen en dat is afhankelijk van de stroming en eigenschappen van de suspensie van zand in water.
6. Drukval in de pipe (met verwijding van de pipe, effect van erosie en belasting).
   De drukval in de pipe is niet nul. Het is echter onbekend welke drukval nu echt optreedt. Daarbij moet ook worden beschouwd wat de wijdte van de pipe is. De stroming in de pipe zorgt voor schuifspanning op de wand en bodem van de pipe die leidt tot erosie.
   De progressie van de pipegroei tijdens terugschrijdende erosie is niet duidelijk. Er treedt een geconcentreerde stroming naar een pipe op. De sleepkracht door deze stroming zal zandkorrels uit de wand van de pipe eroderen. Dat verschijnsel is ook afhankelijk van de korrelspanning rond de pipe. De spanningstoestand varieert in het traject van de pipe afhankelijk van de bodemopbouw en het voorkomen van afdekkende lagen.

Aanvullingen van de kant van onderzoeker betreffen andere kennisleemten met betrekking tot het gehele faalpad onderloopsheid bij kunstwerken:

- De stromingssituatie onder een kunstwerk bij open uitstroming zoals aan de lage zijde van een kunstwerk en de situatie bij stroming onder een dijk naar de binnendijkse zijde verschillen. Bij een kunstwerk is de lage zijde bijvoorbeeld de bodem van een kanaal. Bij een dijk kan een berm aanwezig zijn of een maaiveld. Bij dijken ontwikkelt een pipe zich onder een afdekkende laag. De toestand bij een kunstwerk betreft een situatie zonder afdekking onder atmosferische druk en bij een dijk is mogelijk sprake van bovenbelasting door grondlagen. Dit zal de heave langs een scherm en de stroming van daaraf naar een pipe op enige diepte beïnvloeden. Achter een scherm onder een kunstwerk treedt heave mogelijk eerder op dan bij heaveschermen achter dijken.



Figuur 4.3 Krachtenevenwicht onder de berm van een dijk, denkbeeldig prisma in 3D, situatie met pijpstelsel onder een deklaag [29].

Algemeen geldt voor kunstwerken dat de stroming van grondwater langs en onder constructies richtinggevend is voor de bepaling van het dominante faalpad:

- Met toekomstige analysemethoden moet kunnen worden nagegaan welke betekenis de lokale grondwaterstroming rond kunstwerken heeft voor meer inzicht in de situatie. Modelleringsmethoden voor grondwaterstroming moeten makkelijker kunnen worden ingezet ter bepaling van het waterspanningsverloop in de fluiderende zone en langs pipes.
- Momenteel wordt het in de praktijk bijzonder complex gevonden om te bepalen hoe de bijdragen van de verschillende fenomenen in termen van faalkansen zijn om tot een nauwkeuriger inschatting van de gehele faal- en overstromingskans vanwege onderloopsheid te komen.
- Het is verstandig om na te gaan welke criteria in huidige analysemethodes eventueel nu nog ontbreken (bijvoorbeeld uitstroomcriteria, uitwerking van de veiligheidsfilosofie).
- Het is nodig om na te gaan welke meetmethoden (vanuit de geohydrologie) beschikbaar en mogelijk toepasbaar zijn om de stroming onder en langs een kunstwerk te monitoren en het stromingsmodel te ijken.

Ten aanzien van falen en bezwijken:

- Voor alle mogelijke constructies en diverse locaties van kunstwerken moet het hele faalpad onderloopsheid/piping worden nagelopen om te bepalen of met eenvoudige beslisregels falen in vroeg stadium (bij beoordelingsproces van grof naar fijn) kan worden uitgesloten.
- Daarnaast zijn voor verschillende typen kunstwerken verschillende faalpaden mogelijk. Het opstellen van een overzicht van gebeurtenissenbomen voor alle mogelijke kunstwerken is voor zover bekend nog niet uitgevoerd.
- Momenteel is het niet mogelijk om de faalkans van kunstwerken op onder- en achterloopsheid te kwantificeren terwijl het volgens BOI wel nodig is om faalmechanismen probabilistisch te kunnen bepalen. Alleen het Sellmeijer model kan momenteel in Riskeer worden toegepast Maar de Lane-formulering kon vroeger in PC-Ring worden ingezet. Maar de huidige rekenregels voor piping en heave bij kunstwerken hebben geen relatie met kansen. Het moet mogelijk worden gemaakt dat er in RISKEER

een kwantitatieve faalkansanalyse kan worden uitgevoerd voor combinaties van faalmechanismen in het fenomeen onder- en achterloopsheid bij kunstwerken voorkomen.
- We weten nog te weinig over de vervolgstappen na falen op een deelmechanisme om het gehele proces te kunnen kwantiferen. Momenteel wordt ervanuit gegaan dat de kans op vervolgprocessen altijd 1 is. Het is nodig om vast te stellen of het optreden van piping moet worden gezien als het falen van het kunstwerk of dat er nog veiligheid bestaat tegen bezwijken in verband met het faalpad na optreden van piping (heave, terugschrijdende erosie, ondermijning van het kunstwerk en bresvorming).
- Verder is meer inzicht nodig of het mogelijk is om praktische maatregelen te treffen binnen een handelingsperspectief als er een theoretisch tekort aan weerstand tegen piping bestaat of ontstaat. Een handleiding voor het treffen van praktische oplossingen kan een deel van het instrumentarium zijn.

4.4 Fundamenteel onderzoek naar heave en piping voor kunstwerken

Gegeven de complexe vormgeving en situering van een kunstwerk nabij oppervlaktewater en achterland waar peilverschillen aan de orde zijn, is het belangrijk om de 3D-effecten van stroming en pipevorming nader te bestuderen. De opstelling van een 3D-terreinmodel voor de beschrijving van het kunstwerk is niet genoeg. Om de lokale grondwaterstroming rond kunstwerken te beschrijven moet ook een lokaal conceptueel grondwatermodel worden opgesteld. Er wordt aangeraden om te onderzoeken met welk modelinstrumentarium (op basis van moderne analytische elementen (TIMml), eindige differentie modellen (ModFlow6, iMod) of eindige elementen modellen (3D Dgeoflow, FeFlow of Kratos)) in diverse fasen van beoordeling zowel de invloed van het regionale stromingspatroon op het kunstwerk als ook de gedetailleerde stromingspatronen onder constructies en rond schermwanden af te leiden zijn.

Vanuit fundamentele kennishiaten zijn juist bij stroming rond constructies en schermwanden onderzoeken naar pipevorming, pipegroei en erosieprocessen nodig, uit te voeren met en zonder bovenbelasting. Grotendeels zal dat werk in het onderzoek voor dijken al gaan plaatsvinden. Hieronder is een actueel overzicht gegeven van de grootste geplande onderzoeken voor piping:
- Kennis voor Keringen 2025: actualisatie Beslissingsraamwerk piping en modelontwikkeling KIA Piping op veldschaal.
- RWS Samenwerking met USACE: in 2025 onderzoek naar het effect van fijne fractie op piping.
- KIA Heaveschermen: onderzoek naar mechanisme en ontwerpmethode voor heaveschermen (zie HWBP, De InnovatieVersneller [28]).
- KIA Piping op veldschaal: Onderzoek naar schaal en 3D effecten en piping in Limburg (grof, gegradeerd zand).
- KIA GZB: Nader onderzoek grofzandbarriere met kleineus.
- Er is ook nog onderzoek gepland naar ProLock filters, maar dat ligt grotendeels buiten Deltares.

Het onderzoeksprogramma voor kunstwerken kan wat betreft heave extra inzetten op het verschijnsel van fluïdisatie achter plaatselijk aanwezige (niet-doorgaande) schermen en op achterloopsheid.

Voor kunstwerken en heave is de inzet van modelleringstechnieken nodig om de te verwachten waterdruk langs schermen lokaal te bepalen. Daarbij gaat het er om bij het genereren van het lokale stromingsbeeld de invloed van geohydrologische randvoorwaarden vanuit de omgeving te onderzoeken. De kromming van de stroomlijnen onder een scherm kan onderaan het scherm een sterkere gradiënt in de waterdruk verdeling inhouden. Dan is dat mogelijk een kritisch punt.

In het onderzoeksprogramma voor piping bij heaveschermen in waterkeringen is een enkel onderwerp enigszins onderbelicht gebleven, namelijk de mogelijkheid om met behulp van monitoring vroegtijdig toenemend verhang te signaleren. Dit is in het bijzonder van belang als meetmethode bij kunstwerken. In 2020 is hier door Deltares een meetprotocol voor opgesteld (11205235-004-KPP-VOW_Meetprotocol-piping-kunstwerken). Voor kunstwerken wordt aanbevolen om bij enkele cases op veldschaal, met meten en monitoren in praktijk na te gaan of grondwatermonitoring, eventueel gecombineerd met innovatieve geofysische onderzoekstechnieken, die volgens dat protocol wordt ingezet, tot een betere beoordeling leidt. Bij voorkeur zou een dergelijk onderzoek voor een goed beschreven testcase in combinatie plaatsvinden met modelvorming om na te gaan in hoeverre predicties overeenstemmen met praktijkmetingen.
Bij innovatieve geofysische onderzoekstechnieken zou ook gedacht moeten worden aan praktijkinspectiemethoden om de aanwezigheid van schermen of holle ruimten onder kunstwerken te testen. Gedacht kan worden aan innovatieve meetmethoden (met toepassing van thermische metingen, tracertests of andere geofysische of geohydrologische technieken).

Tenslotte zou ook aandacht uit moeten gaan naar de vertaling van onderzoeksresultaten in de bepaling van overstromingskansen. Volgens [DIV 2024-1] is voor het mechanisme heave nog geen set aan partiele factoren afgeleid omdat onduidelijk is welk aandeel model- en schematiserings-onzekerheden hebben in de totale onzekerheid. Voorlopig geldt nog een overall veiligheidsfactor SF>=2. In de toekomst zal de probabilistische analyse verbeterd moeten worden, geënt op nieuwe modellen voor 3D-piping gekoppeld aan heave achter schermen die zullen worden ontwikkeld.

4.5 Selectie van specifiek onderzoek voor onderloopsheid van kunstwerken

Er bestaat overlap in gewenst onderzoek naar onderloopsheid of piping voor dijken en dat voor kunstwerken. De benodigde inspanning voor onderzoek naar piping bij dijken en heaveschermen is reeds gepland. Daarmee rekening houdend kan een selectie worden gemaakt welke specifieke onderwerpen uit de hele set met kennishiaten moeten worden onderzocht met het oog op kunstwerken. Deze vraag is voorgelegd aan de klankbordgroep voor piping en grondwaterstroming bij kunstwerken.
De klankbordgroep heeft aanbevolen om de inspanning binnen het kader van onderzoek te beperken tot constructiedelen, stromingssituaties en faalkansbeschouwingen die in het bijzonder bij kunstwerken specifiek zijn. Aldus stelt de werkgroep voor om voor kunstwerken in komende jaren aandacht te schenken aan:

- De vorming van geconcentreerde pipes onder een betonnen vloer.
- Uitstroming bij filterconstructies.
- De stroming en erosie (pipevorming) rond achterloopsheidschermen.
- 3D stromingstoestanden rond betonconstructies.
- Faalkans en overstromingskans bij beschouwing van kunstwerken.

Bij expertgroepen op het gebied van dijkverbetering en geohydrologie zijn de ideeën getoetst. Voor de uitkomst wordt verwezen naar het volgende hoofdstuk. Van de gesprekken zijn verslagen beschikbaar. De resultaten zijn verwerkt in de opstelling van aanbevelingen voor de roadmap die in het volgende hoofdstuk zijn uitgewerkt.

5 Aanbevelingen roadmap ter verbetering van beoordeling van kunstwerken op onderloopsheid inclusief geohydrologie

5.1 Conclusies na de inventarisatie naar de actuele beoordelingssystematiek

Volgens BOI moet de beoordeling van kunstwerken op onderloopsheid en piping plaats vinden in 3 stappen, werkend van grof naar fijn. Grondwaterstroming kan in die stappen als volgt meegenomen worden:

1. **Eenvoudige beoordeling op basis van beslisregels**
   De eenvoudige beoordeling is gebaseerd op beslisregels over de kenmerken van het kunstwerk en het verval hierover volgens beschouwing van maatgevende waterpeilen. Deze informatie moet worden geordend in het verhaal van de kering. Voor kunstwerken die mogelijk kwetsbaar zijn ten aanzien van onderloopsheid en piping wordt ten zeerste aanbevolen om voorafgaand aan de beoordeling een beschrijving toe te voegen van de geohydrologische situatie om mogelijke kwelwegen te identificeren (en te visualiseren). De te doorlopen procedure werkt als een zeef waarmee aan het eind van de eerste stap van de beoordeling van een kunstwerk met grote waarschijnlijkheid blijkt of dit wel of niet gevoelig is voor piping. Kunstwerken die niet gevoelig zijn worden uit de procedure gefilterd, kunstwerken die dat wel zijn gaan door naar de volgende stap.
2. **Gedetailleerde beoordeling van kunstwerken op onderloopsheid/piping**
   De gedetailleerde beoordeling vindt plaats ten aanzien van falen op opbarsten, piping in horizontale richting volgens de methode van Sellmeijer, heave, piping in horizontale en verticale richting volgens de methode van Lane, inclusief beschouwing van geohydrologie. Eerst vindt een geohydrologische berekening plaats op basis van schematisatie naar een doorsnedemodel met (quasi)stationaire grondwaterstroming bij maatgevende omstandigheden volgens norm. Dit levert naar verwachting een conservatieve benadering op. In de beschouwing dient te worden beargumenteerd dat dat laatste een correcte vaststelling is. Of de benadering conservatief is kan worden bepaald op basis van een gevoeligheidsanalyse van de grondwaterstroming in het doorsnedemodel. De gevoeligheidsanalyse hoeft niet volledig te zijn maar kan een hoekpuntenanalyse zijn waarin alleen de combinaties van waarschijnlijk uiterste waarden voor de parameters worden gevarieerd. Ook de pipinganalyse (met faalmechanismen opbarsten, heave, piping) wordt volgens hoekpunten analyse uitgevoerd.
3. **Aangescherpte (specifieke) beoordeling inclusief geohydrologie**
   De aangescherpte beoordeling start met de controle van alle gegevens om na te gaan of de geohydrologische omstandigheden complex zijn. Dat betreft de schematisatie en parametrisatie, noodzaak tot gebruik van ruimtelijke geohydrologische modellen en niet-stationaire beschouwingen. Er wordt nagegaan of de situatie zodanig is dat door meenemen van complexe modellering een gunstiger beoordeling mogelijk is. Een toetsing van de faalkans met probabilistische methoden moet worden nagestreefd. Indien beoordeling niet tot een goedkeuring kan leiden moet worden bepaald welk handelingsperspectief aan de orde is. Dit kan zijn: de beoordeling aanhouden, toegespitst onderzoek verrichten om onzekerheden weg te nemen, maatregelen treffen om tekortkomingen weg te nemen.

Wij bevelen aan om de voorgestelde aanpak te verifiëren door de beoordelingsmethode voor piping inclusief geohydrologie op meerdere kunstwerken uit te proberen. Deze verificatie kan

worden vastgelegd op basis van voorbeelden uit de praktijk door te werken volgens het principe van “Living Lab”.

Naar probabilistische methoden ter bepaling van de faalkans ten aanzien van overstroming ter plekke van kunstwerken als gevolg van piping bij lokale geohydrologische condities zal in de toekomst meer onderzoek moeten plaatsvinden. Dat is nodig om een kennisbasis te creëren waarmee dit aspect in de praktijk van de beoordeling van kunstwerken hanteerbaar wordt.

5.2 Confrontatie van kennishiaten met lopende onderzoeken

Vanwege de opmerkingen over ontbrekende kennis voor een goede modellering van het optreden van fluïdisatie achter een scherm en de koppeling naar piping bovenin de zandlaag, hebben onderzoekers die betrokken zijn bij heaveschermen voor waterkeringen een onderzoeksvoorstel uitgewerkt. Op dat voorstel kan voor onderzoek naar falen op onderloopsheid, piping en heave bij kunstwerken worden aangesloten. Bij kunstwerken zal er minder noodzaak zijn om aandacht te besteden aan de aanwezigheid van belasting op de fluïderende grondmoot, wel is de 3 dimensionale stroming bij kunstwerken van belang en bij voorkeur wordt het gehele faalpad beschouwd, mogelijk ook de aanwezigheid van een filter. In relatie tot die onderzoeksonderwerpen zal inspanning moeten worden gestoken in de opzet van een goede modelaanpak waarmee de waterdrukverdeling achter wanden uitgewerkt kan worden in samenhang met geohydrologische modellen voor de omgeving van het kunstwerk.

Tijdens de ontwikkeling van instrumentarium moet gecommuniceerd/afgestemd worden met de gebruikers/beoordelaars vanuit overheid (RWS, Waterschappen) en consultancy om een breed draagvlak te creëren en nuttige, praktische feedback mee te nemen.

5.3 Opzet van de roadmap onderzoek onderloopsheid, piping en geohydrologie

5.3.1 Samenvatting van kennishiaten

In voorliggend rapport zijn in voorgaande hoofdstukken per onderwerp de kennishiaten beschreven via samenvattende tekstblokken met bevindingen. Voor een belangrijk deel komen de gesignaleerde kennishiaten overeen met de bevindingen die in eerdere rapporten voor kunstwerken (o.a. Rode draden Kunstwerken) en door pipingexperts (Van Beek, Wiggers) voor dijken en heaveschermen zijn afgeleid.

De gesignaleerde kennishiaten voor kunstwerken zijn in de volgende tabel benoemd met verwijzing naar het onderdeel in dit rapport waar de signalering is gedaan.

Tabel 5.1 Overzicht van bevindingen over kennishiaten m.b.t. onderloopsheid bij kunstwerken.

Bevinding in rapport	Bevindingen uit de roadmap studie die een relatie hebben met kennishiaten over onderloopsheid bij kunstwerken	Pagina verwijzing
1	Instrumentarium nodig voor geohydrologische systeem-beschrijving in eerste fase beoordeling Verhaal van de Kering	30
2	Nagaan hoe (Semi)Probabilistische tools in de praktijk makkelijker zijn te gebruiken	34
3	Inzet van geohydrologische modellen wordt als hindernis ervaren. Nagaan hoe praktijk en expertise dichter bij elkaar kunnen worden gebracht.	35
4	Beoordeling van filterconstructies bij kunstwerken wordt moeilijk gevonden omdat slecht inzicht kan worden verkregen over de actuele werking t.o.v. ontwerpcriteria.	37
5	Aanbeveling om geohydrologische fragmentenmethode te laten herleven in segmentenmethode op basis van nieuwe EEM programmatuur	41
6	Lane is een empirische methode waarvan niet helder is wat de veiligheidsmarge is ten aanzien van falen. Deze is daarom niet geschikt voor probabilistische analyse.	43
7	Bij de beoordeling van achterloopsheid liever onderbouwde methode van Sellmeijer dan empirische methode van Bligh	44
8	Toepassingsmogelijkheden van detectiemethoden om afwijkingen in kunstwerken vast te stellen in praktijk toetsen. Detectie kan handelingsperspectief zijn.	45
9	Er is geohydrologisch instrumentarium nodig om het ruimtelijk beeld van heave achter schermen te kunnen bepalen	47
10	Het is nodig om de rekenmethodes voor mechanismen in het gehele faalpad te kunnen koppelen en niet alleen stationair te kunnen beschouwen maar ook afhankelijk van de tijdsduur (pipedoorgroei) en niet alleen in 2D maar ook 3D	48
11	Voor beoordeling van kunstwerken moeten probabilistische methoden worden ontwikkeld en moeten ervaringen met praktijkcases met dat instrumentarium worden verzameld.	53
12	Er moet meer aandacht worden geschonken aan monitoring van grondwaterstanden bij kunstwerken en detectie ter bepaling van afwijkingen die effect hebben op de grondwaterstroming en het faalpad onderloopsheid	54
13	Er is een makkelijker te gebruiken geohydrologisch instrumentarium nodig waarmee bij de beschouwing van onderloopsheid de combinatie van elementen in kunstwerken in de berekening mee kan worden genomen.	56
14	In overleg tussen RWS en waterschappen moeten cases worden geselecteerd waarmee nagegaan kan worden of een verbetering mogelijk is bij beoordelen van onderloopsheid nieuwe technieken, geohydrologie en probabilistiek	57
15	Nieuwe geohydrologisch instrumentarium voor beoordeling onderloopsheid te toetsen met te selecteren cases	58
16	Beschrijvingen van beoordelingsmethoden door experts in (semi)probabilistische analyses voor alle mechanismen in het faalpad onder- en achterloopsheid (inclusief heave en piping)	60

In het plan van aanpak binnen DIV voor het KIA onderzoek aan heaveschermen bij dijken zijn logische onderzoeksstappen aangegeven, werkend van kleine naar grote schaal:

- Fase 1: Verkenning van vragen met kleinschalige experimenten.
- Fase 2: verdiepend experimenteel onderzoek.
- Fase 3: validatie op veldschaal.

Het lijkt ons verstandig om een dergelijke fasering in onderzoeksopzet aan te houden, zodat gaande de onderzoeken nog sturing gehouden kan worden, bijvoorbeeld als de complexiteit anders blijkt te zijn dan verwacht of wanneer zich nieuwe inzichten aandienen.

Fase 1 is sterk gericht op de fundamentele kant van de te onderzoeken verschijnselen. De onderzoeksonderwerpen zullen moeten worden geprioriteerd en naar benodigde tijdbesteding in een planning moeten worden gezet.

Fase 2 en 3 worden pas ingepland op het moment dat opschaling van het onderzoek op basis van uitkomsten uit fase 1 noodzakelijk wordt geacht.

De longlist met gesignaleerde kennishiaten voor kunstwerken is naar aanleiding van commentaar vanuit de klankbordgroep en beschouwing van reeds lopend onderzoek beperkt tot een shortlist die in de volgende tabel is benoemd.

Tabel 5.2 Rubricering van bevindingen naar een shortlist van kennishiaten.

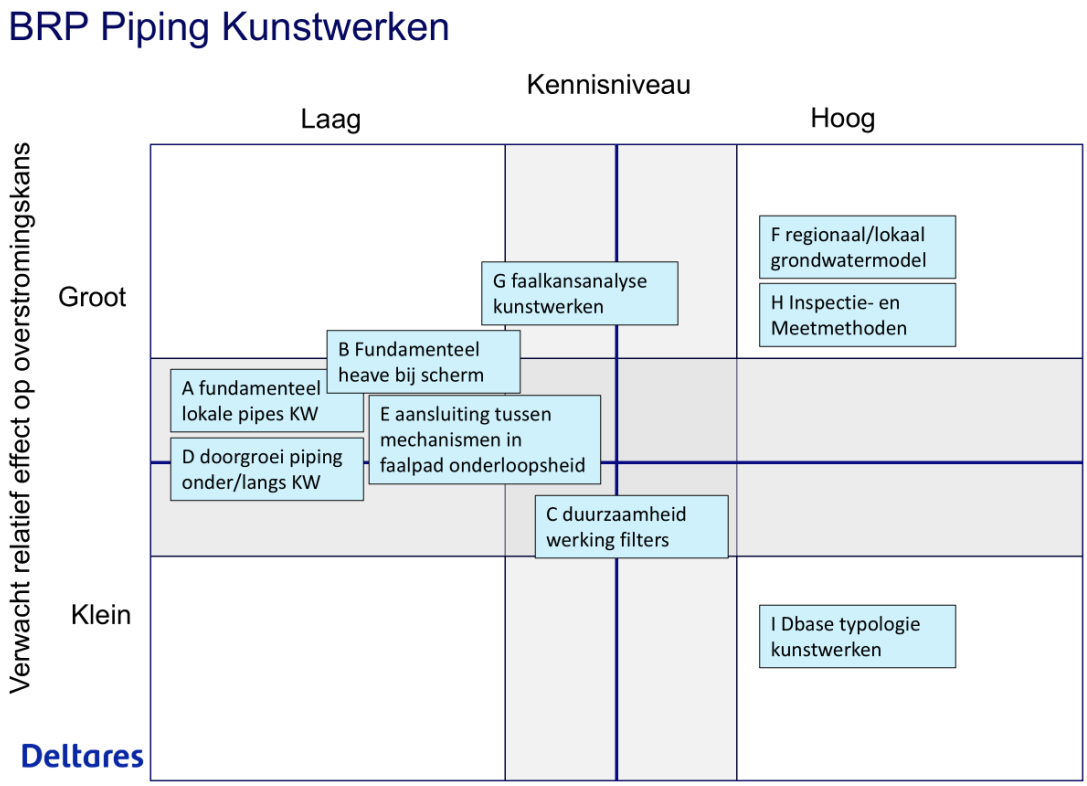
Kennishiaat	Bijpassende bevinding
A. Ontwikkeling van lokale pipes	10
B. Lokale heave-ontwikkeling achter schermen	10
C. Uitstroming achter filters	4
D. Pipe-ontwikkeling onder of langs constructiedelen, mede onder invloed van grondwaterstroming	7, 10
E. Aansluiting tussen deelfaalmechanismen in het totale faalpad onder/achterloopsheid	10
F. Toepassing van regionaal naar lokaal grondwatermodel als hulpmiddel bij beoordeling van onderloopsheid	1, 3, 5, 9, 10, 13
G. Beschrijving van een faalkansanalyse voor kunstwerken, grof naar fijn	2, 6, 11, 14, 15, 16
H. Kennisdeling over inspectie, meet- en detectiemethoden voor signalering van afwijkingen en lekkages bij kunstwerken	8, 12
I. Eenduidigheid van beoordelingssystematiek voor diverse soorten kunstwerken met verschillende typologie en constructie-onderdelen en mogelijke faalpaden met bijbehorende gebeurtenissenbomen.	14, 15

Omdat het praktisch niet mogelijk zal zijn om alle kennishiaten tot op de bodem uit te zoeken, moet er een prioritering worden gegeven om middelen en inspanningen effectief en doelgericht in te zetten. Die prioritering voor uit te voeren onderzoek kan afhankelijk worden gesteld van diverse aspecten: impact (meerwaarde voor beoordelingen), urgentie, doorlooptijd, benodigd budget slagingskans.

5.3.2 Urgentie en impact van uit te voeren onderzoek

Eerst is de impact van onderzoek in verband met kennishiaten in de beoordeling van kunstwerken op onderloopsheid/piping met de methode van het beslissingsondersteunend raamwerk piping (de BRP methode) nagegaan.

In de volgende figuur zijn de kennishiaten met lichtblauwe tekstblokken vermeld en geordend volgens BRP methode, gebaseerd op huidige kennisniveau van de materie (urgentie) en verwacht effect (impact) van onderzoek op de verbetering van de bepaling van de overstromingskans. Tevens zijn in de gele blokken de mogelijkheden aangegeven om kennisverbetering te behalen. Deze mogelijkheden spelen een rol in de beschouwing van de slagingskans van te formuleren onderzoeken.



Figuur 5.1 Beoordeling van kennishiaten volgens beslissingsondersteunend raamwerk piping naar kennisniveau en verwachte impact van kennisverbetering op reductie van overstromingskans.

Enkele opmerkingen bij gesignaleerde kennishiaten:

A en B: De beoordelaars en experts uit het werkveld menen dat een invulling van kennishiaten voor kunstwerken met fundamenteel onderzoek van deelmechanismen een te detaillistische aanpak is. Dit lijkt hen voor de praktijk niet de best passende manier om een verbetering van de beoordelingssystematiek in komende decade te bewerkstelligen. Betrokken experts willen een aanpak voor kunstwerken die in relatie staat tot de omgeving in het dijkvak. Wij bevelen aan om beide te doen in samenhang, zowel met gedetailleerde focus op het kunstwerk en mechanismen die daar spelen en de relatie in breder verband met de omgeving van het kunstwerk. Want op gedetailleerd niveau vindt in ander kader wel kennisontwikkeling plaats voor een scherpere bepaling van het pipingrisico van dijken en de onderbouwing van het heave fenomeen ten behoeve van de toepassing van schermen bij dijken. Kennisontwikkeling kan op de lange termijn wel degelijk van nut zijn voor de beoordeling van kunstwerken. Daarom wordt geadviseerd om ten behoeve van de kennisontwikkeling voor de beoordeling van kunstwerken op lange termijn de kennisontwikkeling in aanpalende kennisvelden te volgen door vanuit RWS deel te nemen aan die onderzoeksgroepen.

C: Volgens beoordelaars is moeilijk in de praktijk te herkennen of filterconstructies nog een goede werking hebben, bijvoorbeeld ten gevolge van veroudering, gebrekkig onderhoud of verstopping. Momenteel is niet duidelijk hoe dat in de beoordeling worden meegenomen.

D: Volgens beoordelaars is moeilijk in de praktijk te herkennen of onder of naast een constructie piping plaatsvindt. Vindt doorgroei makkelijker plaats onder of naast een betonnen vloer of wand?

E: Dit onderdeel betreft de beoordeling van gevolgen van initiatie tot en met bresvorming in het gehele faalpad.

F. Wellicht zal door toename van de rekenkracht van computers gedetailleerde modellering van kunstwerken in de toekomst voldoende mogelijk worden. Dan kan gekoppelde modellering van grondwaterstroming, opbarsten, piping en heave tot de mogelijkheden gaan behoren. Volgens de aanbevelingen van experts uit de klankbordgroep en de recente aanpak in BOI met het verhaal van de kering is het in het bijzonder aan te bevelen om op korte termijn een handleiding voor de geohydrologische systeemanalyse te verbeteren om in de praktijk meer inzicht te verkrijgen omtrent kritieke kwelwegen.

G: De beoordelaars en experts wensen vooral dat het onderzoek handvatten oplevert om de overstromingskans van het kunstwerk als zodanig te beoordelen in relatie tot de veiligheid van het dijkvak als geheel. Dat vereist echter wel een goede afweging van de faalkansen in het faalpad. Hulp van een expert op het gebied van probabilistiek is daarbij nodig.

H Voor de inzet van (innovatieve) inspectie en- en meetmethoden is een ontwikkeltraject nodig en moet vervolgens een handleiding worden geschreven om inzet te ondersteunen.

I Verschillende kunstwerken hebben een verschillend faalpad en vereisen mogelijk een andere opzet van de beoordeling. Inzicht in voorkomen in Nederland kan helpen om de urgentie te bepalen van kennisverbetering.

De aanbeveling voor de aanpak van onderzoek naar onderloopsheid en piping voor kunstwerken is uit de bevindingen afgeleid en uitgewerkt in de volgende tabel met mogelijke onderzoeksvoorstellen. In die tabel is met een kleurencode aangegeven onder welke noemer vermeld onderzoek kan plaatsvinden:

- Lichtgroen: aanpalend onderzoek dijken en heaveschermen.
- Geel: specifiek onderzoek faalkansbepaling voor kunstwerken (top down methodiek).
- Roze: specifiek onderzoek met beschrijving, kennisontwikkeling en proeven in praktijk voor kunstwerken.
- Blauw: specifiek geohydrologisch en geofysisch onderzoek voor kunstwerken.

Tabel 5.3 Verdeling in termijnen voor uitvoering van onderzoek voor kennisverbetering kennishiaten.

Hiaat	Beschrijving	Voorgesteld onderzoek Korte termijn	Voorgesteld onderzoek Middellange termijn	Voorgesteld onderzoek Lange termijn
A	Fundamentele studie naar ontwikkeling van lokale pipes	Deelnemen aan het onderzoek voor heaveschermen naar geconcentreerde stroming en pipegroei [1)] Resultaten ophalen uit dijken-onderzoek Reevediep naar opdrijf- en opbarstcriteria	Vertalen van onderzoek dijken en heaveschermen naar een methode onderloopsheid kunstwerken (Sellmeijer > Kratos heave 3D?)	Implementatie rekenmethode uit dijken en heaveschermen voor kunstwerken (Kratos piping heave 3D?)
B	Fundamentele studie naar ontwikkeling van heave fenomeen bij heaveschermen	Deelnemen aan het onderzoek voor heaveschermen [1)] (modelfactor veiligheid, effect details van pipegroei naar heave, onvolkomenheden in schermen, inhomogeniteiten, anisotropie van de ondergrond)	Toevoeging aan onderzoek t.b.v. dijken en heaveschermen: Uitvoering van labproeven specifiek kunstwerken Uitvoering van praktijkproeven specifiek voor kunstwerken	Implementatie rekenmethode uit dijken en heaveschermen voor kunstwerken (Kratos piping heave 3D?)
C	Filterconstructies en andere maatregelen [2)]	Literatuur onderzoek ontwerpcriteria inzet filters als beheersmaatregel voor kunstwerken	Praktijk onderzoek werking filters als beheersmaatregel	Handleiding inzet filters als beheersmaatregel
D	Doorgroei piping en heave onder en langs constructies	Meenemen in faalkansmethodiek, integrale top down aanpak met beschouwing relatie kunstwerk - dijkvak	Opzetten van instrumentarium t.b.v. beoordelingsmethode Zie ook G	Handleiding Zie ook G
E	Aansluiting tussen mechanismen in faalpad			
F	Ondersteuning beoordeling KW met grondwatermodel	Handleiding voor beschrijving bepaling kritieke kwelwegen in geohydrologisch systeem. Grondwaterdruk als belasting Handleiding systeembeschrijving geohydrologie in VVDK	Ontwikkeling van modelinstrumentarium o.b.v. EEM segmentenmethode (dedicated DGeoFlow of KRATOS) of AEM (TIMml)	Handleiding voor modelinstrumentarium o.b.v. EEM segmentenmethode (dedicated DGeoFlow of KRATOS) of AEM (TIMml)
		Verkenning mogelijk modelinstrumentarium, beschouwing 3D stroming rond kunstwerken, EEM en/of AEM	IJking aan praktijkvoorbeelden en proeven	Handleiding inzet model instrumentarium
G	Faalkansanalyse voor kunstwerken	Living lab LBO2: meewerken aan beoordeling kunstwerken waterschappen, adoptie enkele kunstwerken als cases Nagaan conservatisme bij eenvoudige beoordeling met huidig instrumentarium, effect werken grof > fijn	Opzetten van handleiding, beoordelingsmethode LBO2 voor kunstwerken Zie ook D/E	Update van de handleiding beoordelingsmethode LBO2 voor kunstwerken
H	Inspectie/Meet/Detectie methoden lekken en piping bij kunstwerken [2)]	Voortzetting van studie door geofysici. Opzet van een handleiding	Uitvoeren van testen voor specifieke cases.	Uitwerken handleiding Meetmethoden lekken en piping
IJ	Database beschrijving typologie kunstwerken	Inventarisatie kunstwerken. Opzet gebeurtenissenbomen Inzicht recente beoordelingen Bewezen sterkte??	Toepassing kennis in faalpad onderloopsheid kunstwerken	Update handleiding beoordelingsmethode LBO2 voor kunstwerken (zie G)

Opmerkingen bij tabel 5-3:

1) Door deel te nemen aan lopende of geplande onderzoeken in verband met piping en heave en bijpassende maatregelen bij dijken, kan worden nagegaan wat de potentie en de winst van dat onderzoek is voor kennisvergroting op het gebied van onderloopsheid bij kunstwerken. Ook kan worden nagegaan of er bepaalde aspecten zijn die nader onderzocht moeten worden met het oog op de kennisvragen bij kunstwerken.

2) RWS betwijfelt of het noodzakelijk is voor KVK/BOI om dit onderzoeksaspect op te pakken of dat deze kwestie beter in een ander onderzoekssegment past.

5.3.3 Beoordelingscriteria

De verbetervoorstellen worden aan de hand van vijf criteria beoordeeld: urgentie, benodigd budget, doorlooptijd, impact en slagingskans.

- Urgentie: de mate van directe noodzaak voor de uitvoering van onderzoek op basis van ernst van gebrek voor de praktijk en huidige stand van de kennis:
  1. Laag: Lage mate van directe noodzaak.
  2. Gemiddeld: Redelijke noodzaak, waar enige tijd kan worden genomen voor de planning.
  3. Hoog: Dringende noodzaak.
- Impact: verwacht effect van veranderingen en verbeteringen van de kennis voor de bepaling van de overstromingskans:
  1. Gering: Beperkte invloed op verbetering kansbepaling.
  2. Gemiddeld: Redelijke invloed met merkbare verbeteringen kansbepaling.
  3. Groot: Aanzienlijke invloed met significante verbeteringen kansbepaling.
- Benodigd budget: de financiële vereisten voor de uitvoering van onderzoek:
  1. Laag (<10k): Minimale financiële middelen zijn vereist.
  2. Gemiddeld (10 – 50k): Redelijke financiële middelen zijn nodig.
  3. Hoog (>50k): Substantiële financiële middelen zijn noodzakelijk.
- Doorlooptijd: Dit geeft aan hoe snel het onderzoek tot resultaten kan leiden.
  1. Korte termijn (0 – 3 jaar): Korte doorlooptijd met minimale vertraging.
  2. Gemiddeld (3 – 6 jaar): Gemiddelde doorlooplooptijd voor de voltooiing.
  3. Lange termijn (6 – 12 jaar): Lange doorlooptijd met mogelijk vertragingen.
- Slagingskans: de haalbaarheid van succesvolle opbrengst van het onderzoek:
  1. Laag: Geringe kans op een succesvolle ontwikkeling.
  2. Gemiddeld: Redelijke kans op succes, afhankelijk van diverse factoren.
  3. Hoog: Aanzienlijke kans op succes, gegeven de omstandigheden.

De beoordeling is in tabel gebracht door te scoren op de verschillende beoordelingscriteria volgens de waarden 1-3 per criterium. Het resultaat van de scoring geeft een prioriteit die bepaald is op basis van de formule:

Prioriteit = (urgentie*kennisbehoefte*impact*slagingskans) / (doorlooptijd*budget)

Vooralsnog is ervan af gezien om er een wegingsfactor in toe te passen. Deze weging kan eventueel door Rijkswaterstaat worden toegevoegd.

Tabel 5.4 Beoordeling voor prioritering van onderzoeksthema's op basis van criteria.

Kennis-Hiaat	Beschrijving	urgentie	kennis-behoefte	impact	slaagkans	budget	tijd	prioriteit
A	Fundamentele studie ontwikkeling lokale pipes	3	3	3	2	3	3	6
B	Fundamentele studie ontwikkeling heavefenomeen bij heaveschermen	3	3	3	2	3	3	6
C	Filterconstructies en andere maatregelen [2)]	2	2	2	3	1	2	12
D	Doorgroei piping en heave onder en langs constructies	3	3	3	2	3	2	9
E	Aansluiting tussen mechanismen in hele faalpad	3	3	3	2	2	2	13.5
F	Ondersteuning beoordeling KW met grondwatermodel	3	2	3	3	2	2	13.5
G	Faalkansanalyse voor kunstwerken	3	2	2	3	1	2	18
H	Inspectie/Meet/Detectie methoden lekken en piping bij kunstwerken [2)]	2	2	2	2	2	1	8
I/J	Database beschrijving typologie kunstwerken	1	1	1	3	1	1	3

5.4 Conclusie over de uitvoering van de roadmap piping kunstwerken

Op hoofdlijnen noteren wij de volgende conclusies voor de roadmap onderzoek piping/onderloopsheid kunstwerken:

- Als gesproken wordt over piping bij kunstwerken ontstaat spraakverwarring over de terminologie. Eigenlijk moet men spreken over het gehele faalpad van onder- en achterloopsheid bij kunstwerken, waar piping en heave en andere faalmechanismen deel van uitmaken, die bovendien onderhevig zijn aan hydraulische en geohydrologische factoren.
- Uit de analyse voor de roadmap komt naar voren dat de hoogste prioriteit heeft:
  - Onderzoek naar faalkansanalyse met (semi)probabilistische methoden in de beoordeling van kunstwerken op onder- en achterloopsheid (inclusief piping en geohydrologie).
  - Gevolgd door beschrijving van de aanpak voor aansluiting tussen faalmechanismen in het faalpad, met ijking aan cases en opzet van handleidingen.
  - doorontwikkeling van geohydrologische modelinstrumentarium, met ijking aan cases en opzet van handleidingen.
- Het benodigd onderzoek om gewenste ontwikkeling te doorlopen zal vanwege benodigd budget over meerdere jaren moeten worden gepland.
- Rijkswaterstaat heeft terughoudendheid bij het plannen van onderzoek naar verbetering van de beoordeling van de actuele staat van filterconstructies en monitoring/detectie van afwijkingen aan kunstwerken. Desalniettemin is dit aspect door beoordelaars naar voren gebracht als knelpunt. Nadere afstemming door RWS met beoordelaars wordt aanbevolen.
- De kosten voor fundamenteel onderzoek naar faalmechanismen (A pipe-ontwikkeling en B heave en C filterconstructies voor kunstwerken) zijn hoog. Een oplossing om hier toch voortgang op te boeken is als volgt. De financiële bijdrage aan fundamentele studies kan beperkt zijn wanneer door deelname aan bestaande onderzoeksgroepen voor waterkeringen als belanghebbende geprofiteerd wordt van kennisontwikkeling. Die ontleende kennis kan doorgegeven worden aan experts van RWS die bij kunstwerken betrokken zijn.

- Mogelijk kunnen voor C (filterconstructies voor kunstwerken) eerst relatief goedkoop literatuuronderzoek worden gedaan en later benodigde kennis omtrent het effect van de veroudering van filters worden verkregen door extra proeven met labtesten in bestaand pipingonderzoek voor dijken te programmeren volgens een geometrie die op kunstwerken is afgestemd.

6 Literatuur

[1] A. Probabilistische Gevoeligheidsanalyse Heaving Ontwerpregels. Fase 2 (Ontwikkeling speciale fragmenten), J.B. Sellmeijer, Grondmechanica Delft, CO370250/25, 1997
B. Probabilistische gevoeligheidsanalyse heave, Fase 5: Eindrapportage, E.O.F. Calle en J. Sellmeijer, Grondmechanica Delft, kenmerk 370250/54, Oktober 1998
C. Integratie ontwerpregels piping & heave, J.B. Sellmeijer, Grondmechanica Delft, kenmerk 365270/6, 1996

[2] Leidraad kunstwerken, TAW, RWS, Mei 2003 [opmerking: Hierin staat behalve methode Lane in voorbeelden B8 en B9 verder niets over piping, heave en onderloopsheid maar wordt verwezen naar [4]

[3] Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken, TAW, RWS, september 2004.

[4] Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen Ulrich Förster, Geeralt van den Ham, Ed Calle, Gerard Kruse, Deltares 1202123-003, Maart 2012

[5] Technisch rapport, Zandmeevoerende wellen, TAW, RWS, Maart 1999, update Maart 2012

[6] Technisch Rapport, Grondmechanisch Schematiseren bij Dijken, ENW, oktober 2012

[7] SBW Piping 6C, Invloed van demping van de belasting bij piping, Deltares rapport 1206013-002-GEO-0001. Delft. December 2012.

[8] Globale stochastische ondergrondschematisatie (WTI-SOS) voor de primaire waterkeringen. M.P. Hijma, K.S. Lam. Deltares rapport 1209432-000-GEO-0006. Delft, september 2015

[9] Handleiding lokaal schematiseren met WTI-SOS. G. Kruse, M. Hijma. Deltares rapport 1209432-004-GEO-0002, Delft, december 2015

[10] Memo, Vergelijking methoden bepaling tijdsafhankelijkheid stijghoogte, Deltares 1220088-003-GEO-0007, November 2015

[11] WTI-Onzekerheden Overzicht van belasting- en sterkteonzekerheden in het wettelijk beoordelingsinstrumentarium Versie 3. F. Diermanse. Deltares rapport 1220080-001-ZWS-0004. 132 pp. Delft. Aug 2016.

[12] Werkwijzer, Ontwerpen Waterkerende Kunstwerken, Ontwerpverificaties voor de hoogwatersituatie, RWS, november 2018

[13] Factsheet, D-Geo Flow, Toets op maat pipinganalyses, Deltares 11205758-037-GEO-0001, Mei 2020

[14] Rapport, KvK Piping 2018-2019: toepassing ontwikkelde kennis, Overzicht kennisontwikkeling KvK 2018-2019 voor beheerders en ontwerpers, Deltares 11205262-022-GEO0001, Juli 2020

[15] Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage III Sterkte en veiligheid, Min. I&M, Helpdesk Water, RWS WVL

[16] Schematiseringshandleiding piping, WBI 2017, RWS, Mei 2021

[17] Schematiseringshandleiding piping bij kunstwerk, WBI 2017, RWS, Mei 2021

[18] Technische leidraad Piping bij Kunstwerk, RWS, Feb 2023

[19] Geohydrologische beschouwing van piping bij kunstwerken, case keersluis Zierikzee, dr.ir. J. van Esch, Deltares, kenmerk 11208034-003-GEO-0001-v1.0-kunstwerken, februari 2023

[20] Handleiding Overstromingskansanalyse – Algemeen, BOI, RWS Informatie, Groene versie, juli 2023

[21] Handleiding Overstromingskansanalyse – Kunstwerken, BOI, RWS Informatie, Groene versie, juli 2023

[22] Handleiding Overstromingskansanalyse dijken/dammen deel 2 Piping, BOI, RWS Informatie, Groene versie, juli 2023

[23] Realistischere overstromingskansen door het meenemen van vervolgmechanismen, A. van der Meer & N.J. van Veen & W. Kanning, Geotechniek, september 2023

[24] Memo BOI Piping bij kunstwerken, Rijkswaterstaat aan Waterschap Limburg, Niek Verdijck, mei 2023
[25] Piping, Realiteit of Rekenfout?, J.K. Vrijling e.a., ENW, januari 2010
[26] [Lane 1934] E.W. Lane, Security from under-seepage masonry dams on earth foundations, Transactions Am.Soc.Civ.Eng., paper 1919, Proceedings september 1934

[27] [D-Geo Flow 2020] D-Geo Flow, User manual, Version: 1.1.1, February 2020
[28] [DIV 2024 1] Publicatie Heaveschermen, HWBP-De Innovatieversneller| Piping, mei 2024, V0.31
[29] [DIV 2024 2] Plan van Aanpak (concept) KIA Onderzoek Heaveschermen, 22 januari 2024, Versie 0.5: Concept
[30] [SBW 2009] SBW Piping Kunstwerken KW6, Aanbevelingen toetsmethode onder- en achterloopsheid bij (historische) kunstwerken, Geeralt van den Ham, Ed Calle, Deltares, 1200675-006-GEO-0001, december 2009
[31] [KpNK 2017] Kennisprogramma Natte Kunstwerken 2017, sterktedegradatie door onder- en achterloopsheid, Joost Breedeveld, Deltares rapport 11200741-012-HYE-0002, augustus 2020

Niet beschouwde literatuur:
[32] Inventarisatie CSO-Lievense
[33] Ontwikkelingen bij Stability-suite
[34] Kennisprogramma Natte Kunstwerken
[35] Ontwikkeling instrumentarium voor faalmechanisme sluiting kunstwerk (HKV)

Later toegevoegde (deels beschouwde) literatuur
[36] Rode draden voor kunstwerken memo 20220519_AD162-1- 0.9_Rode Draad SK
[37] Ontwerp van schutsluizen, zie Rijkswaterstaat Publicatie Platform https://open.rijkswaterstaat.nl/open-overheid/onderzoeksrapporten/@185991/ontwerp-schutsluizen/
[38] Handboek voor het ontwerpen van schutsluizen, Rijkswaterstaat Bouwdienst, 1 juni 2000, Hoofdstuk 10 Onder- en achterloopsheid
[39] Leidraad Kunstwerken, TAW, mei 2003, https://www.deltaexpertise.nl/images/f/ff/Leidraad_kunstwerken.pdf
[40] Hydra-Ring 20.1, Probabilistic toolbox for the BOI, Technical Reference Manual, Opgesteld door: Deltares kenmerk 11206818-015-GEO-0003, feb 2021
[41] Riskeer, Software voor de veiligheidsanalyse van primaire waterkeringen, Gebruikershandleiding, Beoordelings- en OntwerpInstrumentarium BOI, Opgesteld door Deltares, mei 2023
[42] Protocol peilbuismetingen ter bepaling van weerstand tegen piping kunstwerken, KPP-VOW Kunstwerken, versie 2.0, Joost Breedeveld e.a., Deltares kenmerk 1205235-004, 31 december 2020
[43] Faalpaden combineren rekening houdend met afhankelijkheden, Deltares kenmerk 11206817-005-GEO-0001, 6 juli 2022
[44] Handleiding veiligheidsontwerp, ontwerpen van primaire keringen met overstromingskansbenadering, BOI, 28 juni 2024
[45] Veiligheidsraamwerk innovatieve pipingmaatregelen, HWBP-De Innovatieversneller | Piping, 21 december 2023

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl