

Onderzoek beoordeling kunstwerken op piping en geohydrologie

Voorstel voor plan van aanpak



Onderzoek beoordeling kunstwerken op piping en geohydrologie
Voorstel voor plan van aanpak

Auteur(s)

Hans van Meerten

Onderzoek beoordeling kunstwerken op piping en geohydrologie

Voorstel voor plan van aanpak

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Niek Verdijck
Referenties	Projectplan SITO 2023 Versterking Onderzoek Waterveiligheid
Trefwoorden	Piping Kunstwerken, Geohydrologie

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	15-01-2024
Projectnummer	11209262-002
Document ID	11209262-002-ZWS-0002
Pagina's	60
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Hans van Meerten	

Samenvatting

In 2023 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.

Het resultaat van de uitgevoerde studie is dat de beoordeling van kunstwerken op piping onder het Beoordelings- en Ontwerp Instrumentarium (BOI) in 3 stappen kan plaatsvinden, werkend van grof naar fijn. Bij de beoordeling op piping moet de geohydrologische schematisatie in die stappen worden meegewogen.

Naar aanleiding van de studie komt Deltares tot het volgende voorstel:

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 eerste stap is bedoeld als zeef in de beoordelingsprocedure waarmee kunstwerken die met grote waarschijnlijkheid niet gevoelig zijn voor piping uitgefilterd worden.

2. **Gedetailleerde beoordeling van kunstwerken op piping**

De gedetailleerde beoordeling vindt plaats ten aanzien van falen op opbarsten, terugschrijdende erosie in horizontale richting volgens de methode van Sellmeijer, heave, terugschrijdende erosie in horizontale en verticale richting volgens de methode van Lane, inclusief beschouwing van geohydrologie. Voor kunstwerken die mogelijk kwetsbaar zijn ten aanzien van piping wordt voorafgaand aan pipingbeoordeling een beschrijving gemaakt van de geohydrologische situatie om mogelijke kwelwegen te identificeren. Een eenvoudige geohydrologische berekening vindt plaats op basis van schematisatie naar een doorsnedemodel en (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, terugschrijdende erosie) 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 het meenemen van complexe modellering een gunstigere beoordeling mogelijk is. Een toetsing van de faalkans met probabilistische methoden moet worden nagestreefd. Indien de 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 in een voorbeeldenboek zoals in de opzet volgens BOI is voorzien. Naar probabilistische methoden ter bepaling van de faalkans ten aanzien van overstroming ter plekke van kunstwerken als gevolg van piping, met inachtneming van geohydrologische omstandigheden, zal in de toekomst meer onderzoek moeten plaatsvinden om dit aspect in de beoordelingspraktijk op een goede manier mee te kunnen nemen.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
2	Vraagstelling	10
3	Voorlopige bevindingen vanuit het lopende onderzoek	11
3.1	Toelichting op vraagstelling en aanpak van de studie	11
4	Aanbevelingen na Webinar over voortzetting van de studie	12
5	Cases voor vervolgstudie	13
6	Voorstel vervolg voorbeeldenboek	14
7	Plan van aanpak	15
7.1	Werkzaamheden	15
7.2	Planning en kosten	16
A	Voorlopige opzet van het beoordelingskader	17
A.1	Definities	17
A.2	Kader van beoordeling kunstwerken op piping	18
A.3	Eenvoudige beoordeling met beslisregels	20
A.3.1	Algemene aanpak volgens handleidingen	20
A.3.2	Bepalen relevantie beoordeling met generieke beslisregels	21
A.3.3	Eenvoudige beoordeling voor kunstwerken inclusief geohydrologie	24
A.3.4	Verhaal van de kering: Gevoeligheid voor belangrijkste faalmechanismen	26
A.4	Gedetailleerde beoordeling van kunstwerken op piping	27
A.4.1	Algemene aanpak van de gedetailleerde beoordeling volgens handleidingen	28
A.4.2	Uitwerking gedetailleerde beoordeling inclusief geohydrologie	32
A.5	Aangescherpte (specifieke) beoordeling kunstwerken op piping	41
A.5.1	Algemene aanpak bij aangescherpte beoordeling	41
A.5.2	Aanbevelingen voor aangescherpte (specifieke) beoordeling inclusief geohydrologie	44
A.5.3	Plausibiliteitscontrole	47
A.5.4	Afronding: assembleren van uitkomst voor alle faalmechanismen	47
A.6	Beoordeling en aanbevelingen over handelingsperspectief	47
A.7	Opmerkingen m.b.t. de probabilistische analyse	48
A.8	Ervaringen uit de praktijk	50
A.9	Conclusies, voorstel voor beoordeling van kunstwerken op piping inclusief geohydrologie	50
A.10	Literatuuroverzicht	51

B	Verslag Webinar 27 juni 2023	53
B.1	Toelichting John van Esch op geohydrologische modellering	53
B.2	Toelichting Hans van Meerten op bespreking met experts	54
B.2.1	Basissituaties en geohydrologie	54
B.2.2	Bespreking met experts over modelmatige aanpak	55
B.2.3	Belang geohydrologie	55
B.2.4	Typen kunstwerken	55
B.2.5	Werken van grof naar fijn	56
B.2.6	Faalscenario's	56
B.2.7	Discussie	56
B.3	Aanbevelingen van deelnemers Webinar	57

1 Inleiding

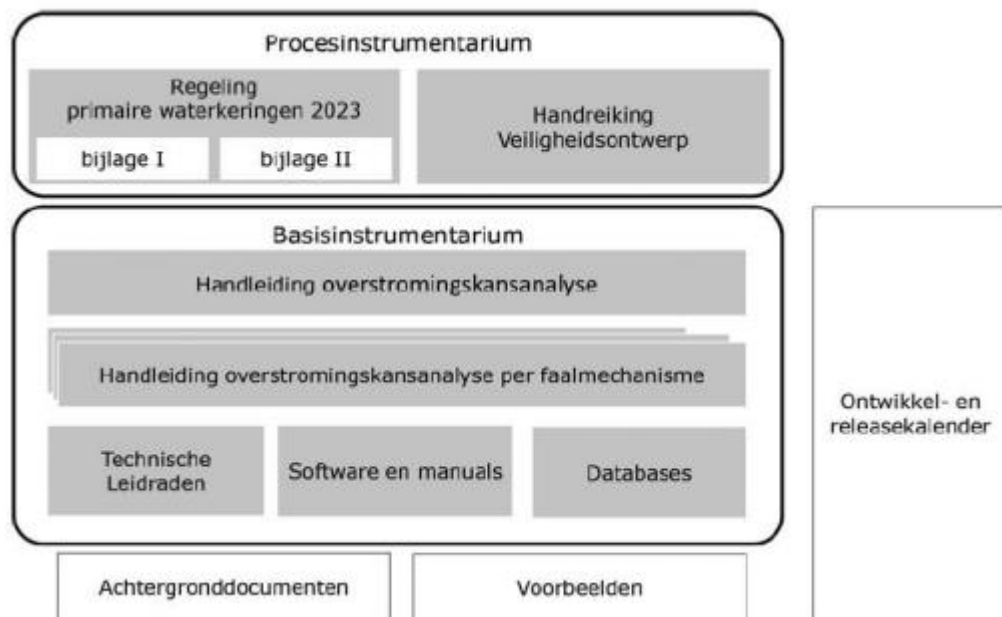
In 2023 is een vervolg gegeven aan de studie naar de beoordeling van kunstwerken in waterkeringen t.a.v. het mechanisme piping. Daarbij is nagegaan op welke manier de geohydrologische aspecten correct meegenomen kunnen worden in de vigerende beoordelingssystematiek met bepaling van de overstromingskans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

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 in bijlage bij dit plan 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 Opzet structuur 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 bij de beoordelaar behoefte bestaat aan meer duidelijkheid over een generieke opzet met in achtname van geohydrologie waarmee de beoordelaar een kunstwerk als veilig kan classificeren. De beoordelaars vroegen om een voorbeeldenboek met cases van geohydrologische systeemanalyse. In de voorbeelden moeten onderzoekers toelichten wat de meerwaarde is van aanvullende geohydrologische screening van kunstwerken.

Onder kunstwerken worden zogenaamde puntconstructies verstaan zoals sluisen, gemalen, coupures en dergelijke. Het gaat om kunstwerken die geen onderdeel zijn van een voorliggende kering.

Het opstellen van een voorbeeldenboek past in de opzet van documenten volgens de WBI-systematiek die gehanteerd is in de schematiseringshandleidingen [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. Het doel van een voorbeeldenboek in het vervolgonderzoek is om meer inzicht bij de beoordeling van kunstwerken te geven met het oog op geohydrologische aspecten.

Om dit proces te ondersteunen heeft Deltares in opdracht van RWS WVL een rapportage opgesteld met een beschrijving van een mogelijke generieke opzet [19].

Deltares deelde de resulterende bevindingen daaruit met een groep experts. Op 27 juni 2023 is een presentatie gegeven over de voortgang van het onderzoek in een webinar in het KennisKunde 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>.

2 Vraagstelling

In verband met de onderhavige vervolgstudie zijn hierna vermelde hoofdvragen voor het onderzoek door Deltares besproken met een groep van experts:

- 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?

3 Voorlopige bevindingen vanuit het lopende onderzoek

3.1 Toelichting op vraagstelling en aanpak van de studie

Met betrekking tot de beoordeling van waterkerende kunstwerken in dijken moeten de faalmechanismen piping (onderloopsheid door 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. Bij kunstwerken is namelijk een grote diversiteit aan aspecten aan de orde zoals: waterbouwkundige constructie, geotechnische toestand en de hydrologie/geohydrologie van de locatie en omgeving. Wat betreft constructies is er bijvoorbeeld een grote onbekendheid t.a.v. de staat van kwelchermen. Dat maakt toetsing van kunstwerken voor beoordelaars lastig. Daarom 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?

Resultaat van de studie in 2022 was:

- Opvragen van enkele cases voor een voorbeeldenboek voor basissituaties.
- Screening van voorbeelden naar geohydrologische systeemanalyse door 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.

Vanwege gebrek aan voldoende input uit de praktijk zal worden doorgegaan met opvragen van cases. Daarmee moet een goede invulling van de beoordelingsprocedure van kunstwerken in dijkringen op onderloopsheid, heave en piping worden afgeleid met het oog op geohydrologische condities.

4 Aanbevelingen na Webinar over voortzetting van de studie

Tijdens de presentatie op 27 juni 2023 voor de georganiseerde webinar van het STOWA Kennis Kunde Platform is uitgegaan van de notitie die door John van Esch is geschreven [19]. Bij de presentatie en gesprekken met externen zijn tips ontvangen voor de voortzetting van de studie, die van harte werd ondersteund.

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 bedoeld op:

- Samenwerking: met De Innovatieversneller (DIV) en Meanderende Maas.
- Afstemming tussen kennis en praktijk (waarnemingen).
- Aan bod laten komen van modellering en metingen.

Omdat de voorkeur uitgaat naar een goede mix tussen praktische benadering en modelgerichte aanpak is het noodzakelijk om te zoeken of er voorbeelden zijn waar dat is toegepast.

De intentie van het vervolg is om door te gaan met verzamelen van cases ten behoeve van een voorbeeldenboek, waarin specifiek de afstemming van piping beoordeling met inzicht in geohydrologische aspecten aan bod komt.

5 Cases voor vervolgstudie

Tijdens de webinar zijn suggesties gedaan door deelnemers waar cases/voorbeelden kunnen worden gevonden:

- Bas Berbee (Fugro): 9 á 10 cases kunstwerken WSHD benedenrivierengebied (ouderdom, verzakkingen).
- Arthur de Boom (RWS): Stuw Borgharen, Sluis Hengelo.
- William van Ruiten (WS Limburg), praktijkcases beschikbaar waar problemen en beginnend falen met piping waren in 2011 en 2021, ook overgangsconstructies en aansluitingen oud op nieuw.
- [Naam niet bekend] Waterschap Aa en Maas: Meanderende Maas.
- Albert Wiggers (RHDHV): WAM, faalpaden/veiligheidsraamwerk, aspecten van afwijkingen, toetsen aan faalkans, cases (kader?), handelingsperspectief.
- Sander Kapinga: eventueel extra benaderen, faalpaden, visie op probabilistische aanpak.

Met vermelde personen wordt contact gelegd om voorbeelden op te halen.

6 Voorstel vervolg voorbeeldenboek

In de gesprekken met genoemde personen zal nagegaan worden of zij voorbeelden kunnen aandragen voor de volgende verzameling van cases over piping bij kunstwerken:

- Typen constructies:
 - Diverse type kunstwerken, ook andere typen dan schutsluis.
 - Puntconstructie dan wel langsconstructie (voor langsconstructies bestaat momenteel nog geen toegespitste handleiding).
 - Locaties waar schermen/damwanden aanwezig zijn (dan waren deze kennelijk nodig en is beoordeling op heave geboden).
- Met nadruk worden cases gevraagd op de volgende locaties:
 - Waar grote waterstandverschillen voorkomen:
 - KWn tussen diepe polders en boezem.
 - Waar de geologie aanleiding geeft:
 - KWn in rivierengebied.
 - KWn in zandgebied zonder waterremmende toplaag.
 - Waar kunstwerken zijn afgekeurd op piping:
 - (waterveiligheidsportaal of systeem RWS).
 - Waar er meer data zijn:
 - Metingen en monitoring.
- Nagaan hoe een beoordeling onder BOI moet plaatsvinden, werkend van grof naar fijn, waarin geohydrologie wordt meegenomen?
- Hoe een beoordeling met het oog op geohydrologie en piping moet verlopen van verhaal naar faalpaden naar faalkans?
- Wat piping beoordeling van kunstwerken betekent voor handelingsperspectief?

7 Plan van aanpak

De beoordelingssystematiek voor kunstwerken met het oog op piping is complex. Controle van de opzet waarvoor een aanzet is gegeven in de bijlage, is nodig. Om de controle te doen zijn meerdere cases nodig. Als blijkt dat de beschreven opzet juist is of nog aangepast moet worden, zal een toelichting op de systematiek met voorbeelden worden opgesteld.

7.1 Werkzaamheden

De volgende werkzaamheden worden voorgesteld:

- Voorstel voorleggen aan begeleidingsgroep.
- Contact leggen en overleg met case experts:
 - Bas Berbee (Fugro).
 - Arthur de Boom (RWS).
 - William van Ruiten (WS Limburg).
 - Waterschap Aa en Maas: Meanderende Maas.
 - Albert Wiggers (RHDHV): WAM.
 - De Innovatieversneller (DIV).
 - Sander Kapinga: probabilistische analyse.
- Selectie 5 cases:
 - 1 case benedenrivierengebied.
 - 1 case RWS (Sluis Hengelo).
 - 1 case Limburg.
 - 1 case Meanderende Maas.
 - 1 case WAM.
- Analyse van cases en rapportage.
- Overleg tussen Deltares, case experts, begeleidingsgroep over:
 - Uitkomsten studie cases.
 - Faalpaden/veiligheidsraamwerk.
 - Aspecten van afwijkingen.
 - Toetsen aan faalkans.
 - Handelingsperspectief.
- Uitwerken van rapport.
- Voorleggen van analyse aan begeleidingsgroep.
- Advies over aanpak of vervolgstudie.

Later in 2024 zal de definitieve formulering van het beoordelingskader kunnen gebeuren, verificatie van het beoordelingsinstrumentarium, inclusief overleg met BOI etc.

7.2 Planning en kosten

Activiteit vervolgstudie Beoordeling kkw piping 2023/2024	Geoh.adv tijd in uur	Geoh.pb tijd in uur	Proj.man.geot. tijd in uur	Totaal tijd in uur
Opzet plan van aanpak	40			40
Bespreken voorstel vervolg	6	2	2	10
Contacten experts en selectie van cases	16	4		20
Analyse cases en rapportage	80	16	4	100
Overleg	6	2	2	10
Uitwerking voorbeeldenboek	80	16	4	100
Overleg begeleidingsgroep	8	8	4	20
Projectmanagement			20	20
PM definitieve formulering van het beoordelingskader				PM
PM verificatie van het beoordelingsinstrumentarium				PM
PM overleg met BOI				PM
Totaal				320

Bij een gemiddeld uurtarief van 200 euro zijn de kosten totaal € 64.000,--.

Een kwart van deze activiteiten kan plaatsvinden voor het budget dat in 2023 resteert.

Voor de afronding van de vervolgstudie zal voor 2024 een bedrag van € 48.000,-- moeten worden gereserveerd.

De kosten in 2024 voor definitieve formulering van het beoordelingskader, verificatie van het beoordelingsinstrumentarium, inclusief overleg met BOI zijn PM, totdat advies over de uitkomst van de vervolgstudie gereed is.

A Voorlopige opzet van het beoordelingskader

A.1 Definities

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.”

Voorliggende beschrijving 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 naar voren:

- Ieder kunstwerk wordt in het dijktraject als apart vak gedefinieerd.
- Samengestelde complexen van kunstwerken (bijvoorbeeld sluiscomplexen) worden ontleed, waarbij elk kunstwerk apart worden beoordeeld en alle onderdelen (bijvoorbeeld een gedeeld kwelscherm) in samenhang worden meegenomen.
- Typen kunstwerken zijn: schutsluis, keersluis, uitwateringssluis, gemaal, coupure, inlaatsluis.
- Falen van het kunstwerk treedt op indien zoveel water onder, door of over het geopende, bezwaken of stand zekere kunstwerk gaat dat dit leidt tot substantiële schade en/of slachtoffers (overstromingsgevolgen).
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.
- Er wordt uitgegaan van kunstwerken met een doorstroomoppervlakte $> 0,5 \text{ m}^2$.

A.2 Kader van beoordeling kunstwerken op piping

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.

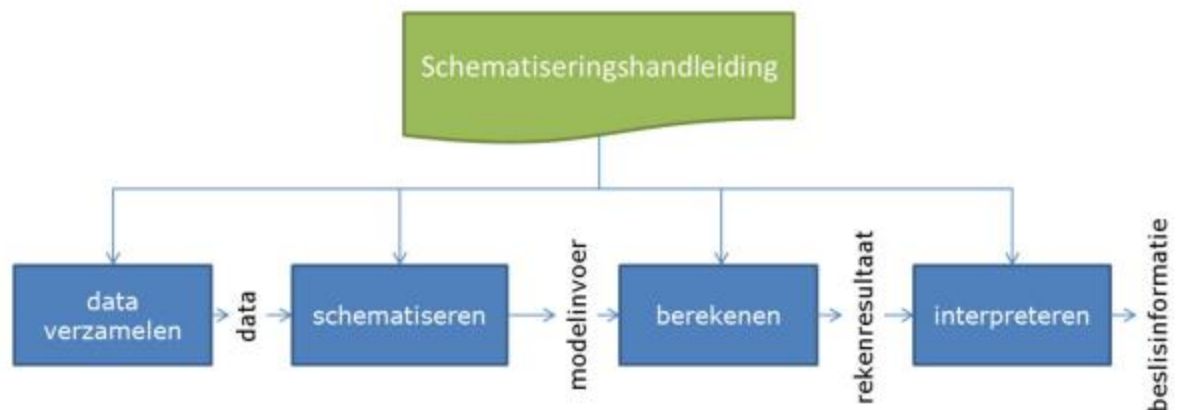
In Figuur A.1 is aangegeven waar welvorming langs waterkeringen in praktijk is waargenomen.

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 A.1 Bekende locaties met piping [4].

Het uitvoeren van een beoordeling van primaire waterkeringen bestaat op hoofdlijnen uit vier delen (Figuur A.2). 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 A.2 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 (meestal een rekenmodel al dan niet met software) 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:

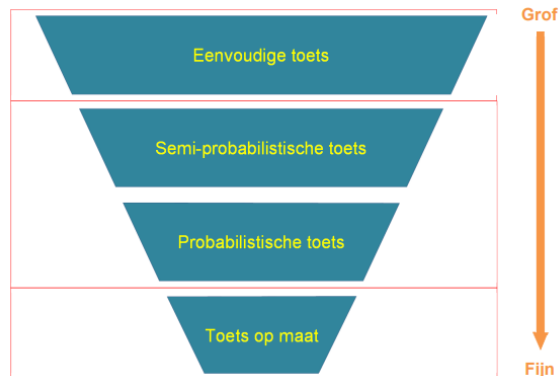
1. Identificatie van mogelijk maatgevende kwelwegen.
2. Geotechnische en geohydrologische schematisering van de ondergrondopbouw onder en naast het kunstwerk.

3. Bepaling van maatgevende kwelwegen.
4. Analyse van de uitkomsten.

Bij de beoordeling wordt aanbevolen om te werken van grof naar fijn. Zodra wordt voldaan aan een basale eis omtrent het faalmechanisme behoeft geen volgend nader onderzoek te worden gedaan. Als het wel nodig is worden vervolgstappen gedaan om onzekerheden te verkleinen of zo nodig conservatieve schattingen te verscherpen en een beeld van de faalkans te verkrijgen.

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

- Eenvoudige beoordeling met toetsregels.
- Gedetailleerde beoordeling (als het kan semi-probabilistisch of probabilistisch).
- Specifieke beoordeling met toets op maat.



Figuur A.3 De diverse toetsen in de beoordelingsprocedure [17, p. 12].

De in WBI gebruikte terminologie is in BOI aangepast naar een eenvoudige beoordeling naar relevantie van het faalmechanisme voor het beschouwde traject of kunstwerk met beslisregels, inschatting van de overstromingskans en aanscherping van de overstromingskans.

Als de beoordeling doorstroomt naar een noodzakelijke verfijning van de beoordeling worden steeds geavanceerdere methoden en modellen aangewend.

Volgens onze kennis van de praktijk vindt deze manier van beoordeling momenteel nog steeds zo plaats bij kunstwerken, waarbij vergelijking van kwelwegen met de norm de leidraad is.

De beoordeling van kunstwerken op piping zou echter ook aan de moderne methode met beschouwing van overstromingskans voor de gehele dijkkring moeten gebeuren.

De vraag die aan voorliggend onderzoek ten grondslag ligt, is, hoe de beoordeling op piping kan worden gedaan voor kunstwerken en hoe geohydrologie bij de beoordeling op piping op een adequate manier kan worden meegenomen in de toetsing.

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

Naar aanleiding van de uitkomsten van de webinar zijn hierna de stappen uitgewerkt volgens hetgeen in de rapportage [19] is vermeld. In de navolgende beschrijving zijn aanwijzingen over de uit te voeren activiteiten en te verzamelen data toegevoegd zodat wordt voldaan aan de werkwijze volgens de schematiseringshandleidingen en de BOI beoordelingsprocedure.

Volgens de vigerende procedure moet een beschrijving worden opgesteld met het verhaal van de kering waarin de mogelijke faalpaden voor het betreffende object worden uitgewerkt.

A.3 Eenvoudige beoordeling met beslisregels

A.3.1 Algemene aanpak volgens handleidingen

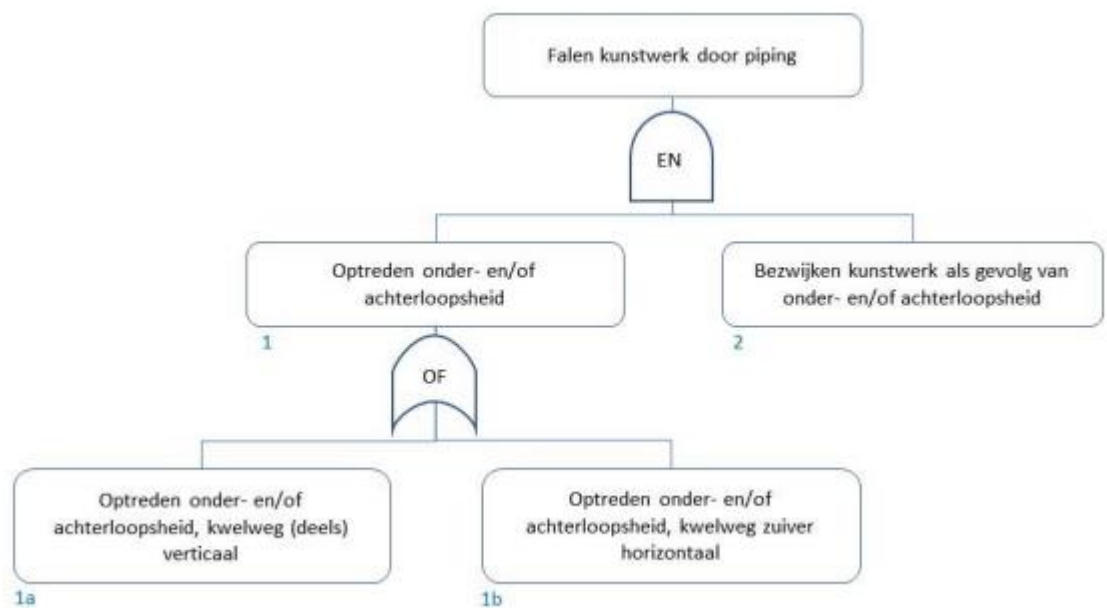
Met betrekking tot piping bij kunstwerken is volgens [21] vaak sprake van één faalpad bestaande uit meerdere gebeurtenissen die moeten optreden om tot falen te komen. Als de faalkansbijdrage van één gebeurtenis in het faalpad afdoende klein is, is verdere kwantificering van het faalpad niet nodig.

Falen als gevolg van piping bij kunstwerken treedt op 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 (1a) onder het kunstwerk ontstaat (onderloopsheid).
 - OF (1b) rondom het kunstwerk ontstaat (achterloopsheid) dat een doorgaand erosiekanaal (pipe) ontstaat.
 - 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 A.4.

Het faalpad ziet er in een foutenboom volgens [21, p.28] als volgt uit:



Figuur A.4 Foutenboom piping kunstwerk [21].

In de foutenboom in Figuur A.4 in [21] worden de volgende deelfaalmechanismen onderscheiden:

1. Optreden onder- en/of achterloopsheid.
2. Bezwijken kunstwerk als gevolg van onder- en/of achterloopsheid.

De deelmechanismen zullen in het verhaal van de kering beschreven moeten worden. Om richting te geven zijn de volgende algemene beschrijvingen beschikbaar [21].

Ad 1. Optreden onder- en/of achterloopsheid

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. Als de stroming groot genoeg is neemt deze gronddeeltjes mee.

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.

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. Bezijken kunstwerk als gevolg van onder- en/of achterloopsheid

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 vervolprocessen 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.

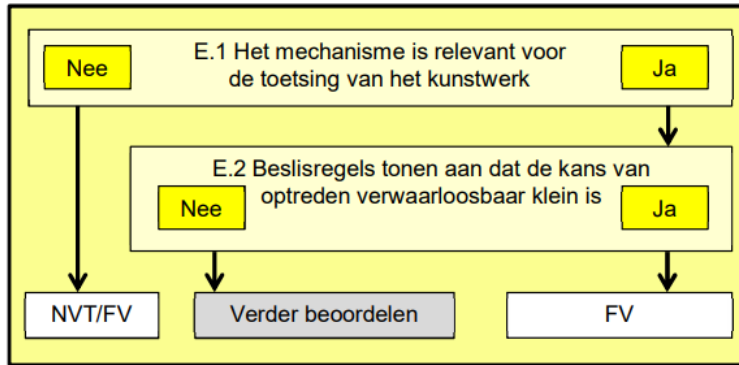
Bij kwelwegen naast het kunstwerk kan het voorkomen dat het kunstwerk wel blijft staan, maar de aansluitende dijk inzakt als gevolg van het erosieproces en uiteindelijk bezwijkt.

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 onderzoeksgegevens daar wel inzicht in moeten geven.

A.3.2 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.

Volgens de schematiseringshandleiding piping kunstwerk [17] verloopt deze eenvoudige toets als volgt:



Figuur A.5 Schema eenvoudige toets piping kunstwerk (PKW) [17, p.13].

Stap E.1: De relevantietoets

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

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

	Beslisregel	Beschrijving
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 hevelling 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 ontwikkeling¹).
- Toets op geometrische kenmerken (quotient $L/\Delta H$ groter dan de minimaal vereiste $L/\Delta H$ -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 als verwaarloosbaar klein kan worden aangemerkt.

Bij gebruik van een van deze beslisregels moet wel altijd worden geverifieerd of de bijdrage van het andere deelfaalmecanisme relevant is. Alleen wanneer de kans op zowel onderloopsheid als achterloopsheid op basis van onderstaande beslisregels als verwaarloosbaar klein kan worden aangemerkt, dan is de kans van optreden van piping verwaarloosbaar klein. Anders kan op grond van deze generieke beslisregels geen oordeel worden geveld en moet het faalmecanisme piping toch beschouwd worden in de analyse van relevante faalpaden.

	Beslisregel	Beschrijving
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.
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]
7	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

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

	Beslisregel	Beschrijving
		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.
8	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.

A.3.3 Eenvoudige beoordeling voor kunstwerken inclusief geohydrologie

Volgens de laatste BOI systematiek moet de beoordeling starten met systeembegrip door het verhaal van de kering te bestuderen. De opzet van de eenvoudige beoordeling met beslisregels wordt gebaseerd op identificatie van verschillende condities waarin met name ook de betekenis van geohydrologie wordt ingevuld.

1. Geometrische condities:

- Locatie en ligging van kunstwerk in dijktraject (kilometrering, nagaan of het dijktraject gevoelig is voor piping).
- Type constructie.
- Afmetingen constructie.
- Funderingswijze constructie.
- 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).
- Aanwezigheid drempel of nok.
- Aanwezigheid dichte bodembescherming buitendijks en/of filterconstructie binnendijks, waterdichtheid c.q. zanddichtheid (a.d.h.v. 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 uitreepunt.
 - 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.
3. Hydrologische condities en hydraulische randvoorwaarden:
- Beschrijving van het systeem waarin het kunstwerk functioneert (ligging t.o.v. kust/boven- of benedenrivier/kanalen/meren, watersysteem, achterliggend boezemsysteem 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.
 - Stormopzet.
 - Opzet vanwege waterspiegelrijzing.
 - Ligging vlakbij rivier of buitenwater:
 - Slibvoorkomen met intreeweerstand.
 - Polders rond kunstwerk of in achterland.
 - 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.
 - Schattingen van grondeigenschappen, volumegewicht van afdekkende lagen en korrelverdeling van zandlagen.
 - Grondopbouw direct naast de constructie (i.s.m. bouwwijze), in waterkering, in voor- en achterland.
 - Algemene informatie over mogelijk voorkomende inhomogeniteit (geulafzettingen).
 - Indien geen beschikking over ondergrondgegevens uitgaan van ongunstige condities:
 - 1. zand direct onder het kunstwerk en een kleidijk aansluitend aan het kunstwerk waarvan de onderzijde dezelfde diepte heeft als de onderzijde van het 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 schematisaties en parameterwaarden.
 - Onzekerheid op de potentiaal tgv tekort aan grondwatermonitoring.
 - Modelrandvoorwaarden op grens invloedsgebied.
- De eerste 5 condities leveren data op die in kaart kunnen worden gebracht (geschematiseerd).
- Input zal bestaan uit:
 - Peilbuismetingen (<https://www.dinoloket.nl/>).
 - Boorbeschrijvingen (<https://www.dinoloket.nl/ondergrondgegevens>).
 - Sondegegevens (<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, Rijkwaterstaat: <https://waterinfo.rws.nl/#/publiek/waterhoogte>).
- Aanmaken verwachte gemiddelde en maatgevende (MHW) waterstanden en meest waarschijnlijk bodemopbouw.

Daarna vindt uitwerking plaats op basis van een eenvoudige methode waarbij de relevantie per fenomeen wordt gecheckt.

A.3.4 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, gegeven een 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 vervolgebeurtenissen 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 vanuit ondergrond, waterkering en belasting bepalend zijn, betreffen faalmechanismen en indirecte mechanismen die in de beschrijving worden meegenomen:

1. Bodem opbarstgevoelig?
 - Dunne deklaag (< 1 á 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 (onderloopsheid)?
 - Zandlaag onder en naast kunstwerk, doorlatendheid, laagdikte, korrelverdeling.
 - Toplaag zandpakket fijn zandig, voldoet niet aan filterregels.
 - Piping in de omgeving vastgesteld aan de hand van wellen.
 - In de omgeving voorkomende doorgraving van de deklaag, sloten of scheuren
 - Kunstwerk gefundeerd op palen, zakkende grond, bodemdaling binnenzijde, scheurvorming in grond langs constructie.
 - Staat van kwelschermen (in de [4, par. 6.3.3.3] staan specificaties vermeld).
4. Ondergrond langloopsheidgevoelig?
 - Plaatsing in kleidijk > nee.
 - Plaatsing in zanddijk > ja.
5. Kunnen vervolgemechanismen 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.

De controle vindt plaats op basis van de volgende kennis:

- Geen hoge MHW-stand.
- Geen groot waterstandsverschil buiten en binnen.
- Ligging buiten pipinggevoelig gebied.
- Ligging buiten gebied met diepe polders.
- Kunstwerk niet op palen gefundeerd.
- Onderloopsheidscherm aanwezig.
- Filter aanwezig aan de uittredezijde.
- Ondergrond in omgeving kunstwerk is niet geroerd en constructie is omsloten door een klei-/veenpakket met een dikte beneden 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)
 - Indien bevestigend antwoord is het oordeel: Geen urgentie.
- Kwelweglengte groter dan $10 \cdot \Delta H$.

Hiermee wordt de eenvoudige beoordeling gedaan met de eerder vermelde beslisregels.

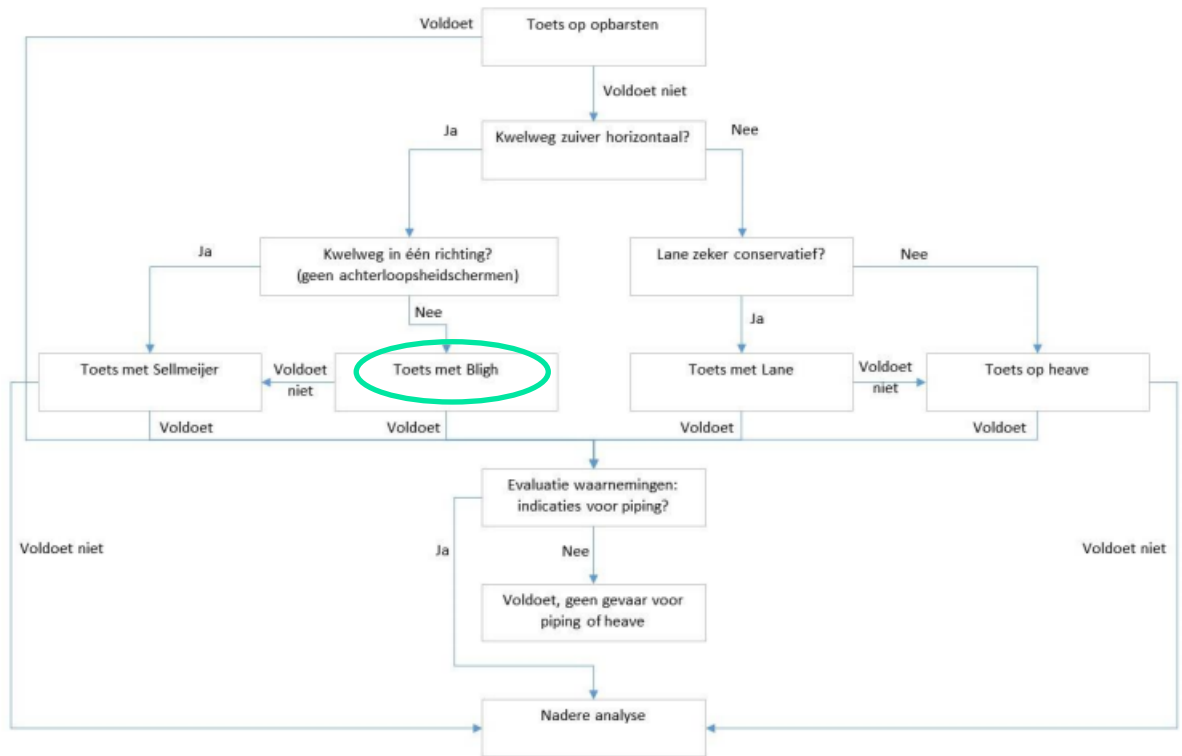
In deze fase wordt alleen uitgesloten of de constructie gevoelig is voor bepaalde faalmechanismen. Een goede beschrijving van de beoordeling van kwelwegen is gegeven in paragraaf 4.8 van [4], maar ook in 4.6 en 4.7 staan beschrijvingen van piping en heave.

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.

A.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].



Figuur A.6 Uitwerking blok Beoordeling uit stappenschema [22]

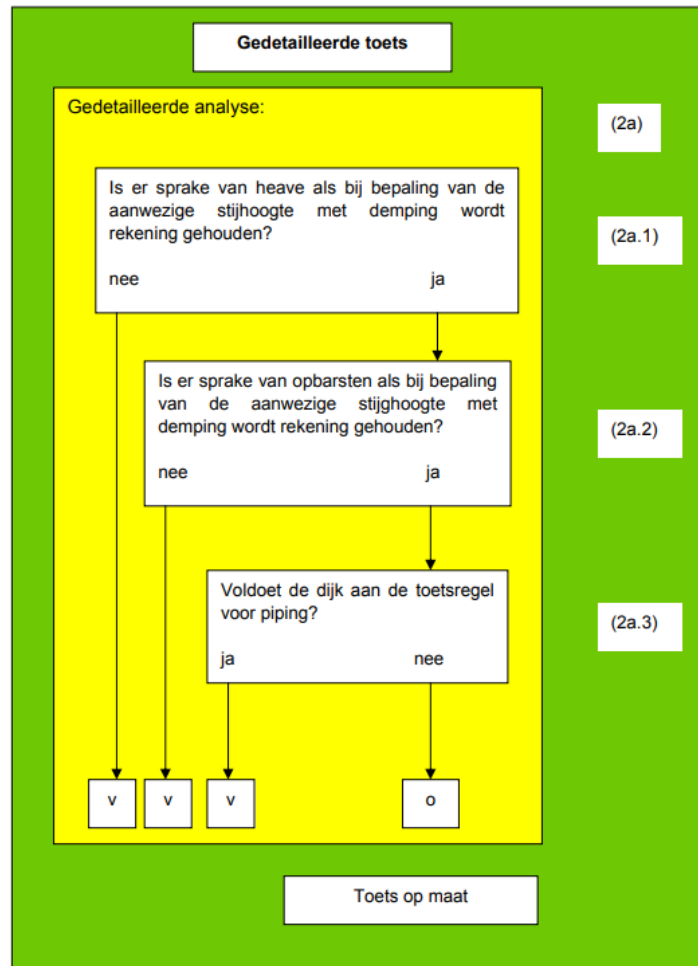
In Figuur A.6 is aangegeven dat bij voorkomen van horizontale stroming langs een voorkomend achterloopsheidscherm de methode van Bligh kan worden toegepast. Naar ons inzien heeft ENW die methode als onbetrouwbaar aangemerkt [25].

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 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.

A.4.1 Algemene aanpak van de gedetailleerde beoordeling volgens handleidingen

De beoordeling voor heave, opbarsten en piping kan stapsgewijs worden doorlopen volgens par 7.3 in het onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen [4], zie Figuur A.7.

Volgens het principe van werken van grof naar fijn wordt de beschrijving die voor de eenvoudige beoordeling is gemaakt, gecontroleerd en zo nodig verfijnd als data ontbreken voor de invulling van toe te passen modellen. 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.



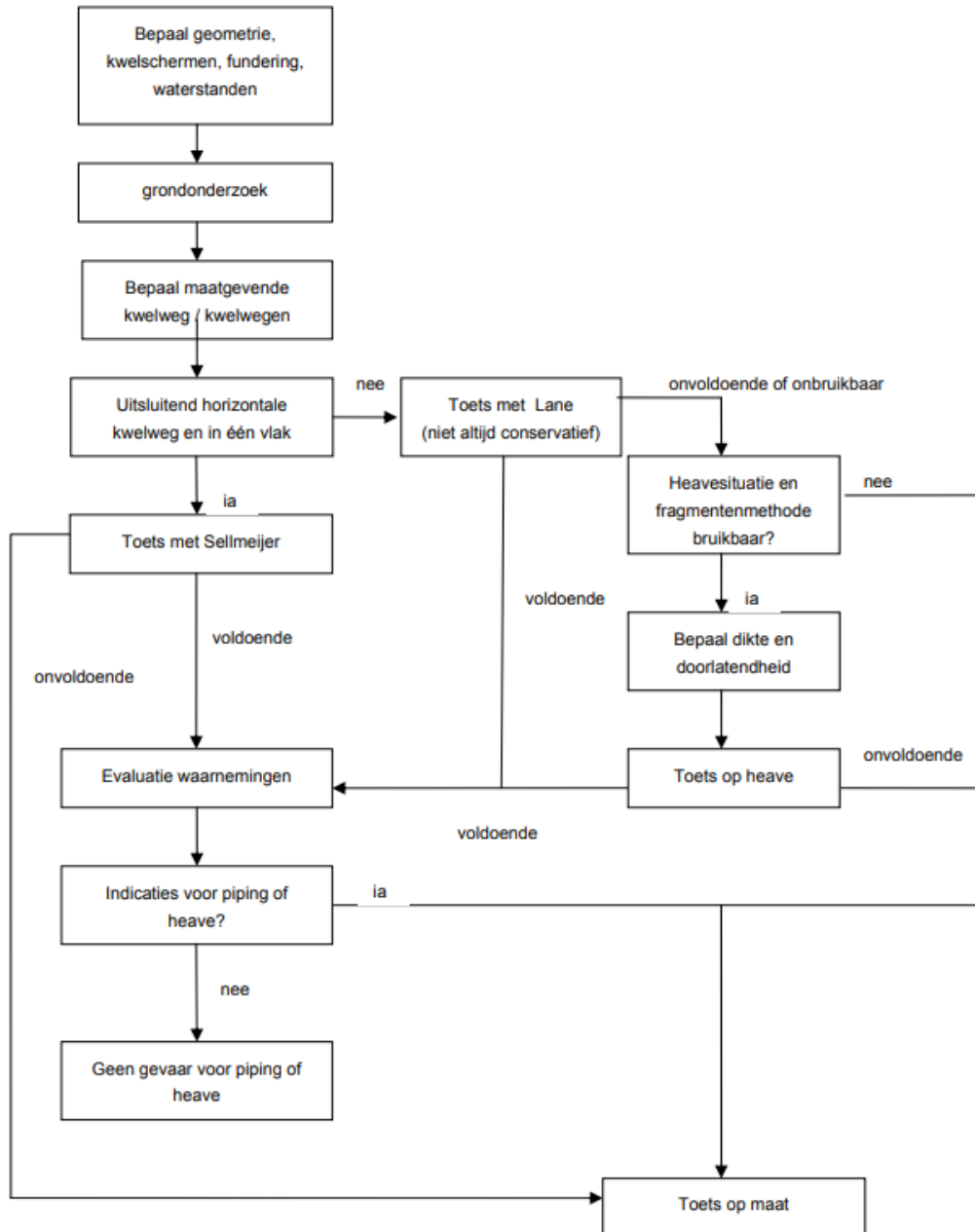
Figuur A.7 Toetsschema gedetailleerde toets [4, p. 119].

Er wordt gecontroleerd of voldoende informatie beschikbaar is om de modellen die in de beoordeling voor het dominante faalpad met piping worden toegepast, te gebruiken. 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.

Er kan een schatting worden gemaakt in welke mate onzekerheden bepalend zijn voor de uitkomst. Mogelijkheden zijn om bij het schematiseren voorlopig een 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 die in een gevoeligheidsanalyse kan worden meegenomen.

De overwegingen bij het schematiseren moeten worden vastgelegd in de beschrijving.

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 Figuur A.8.

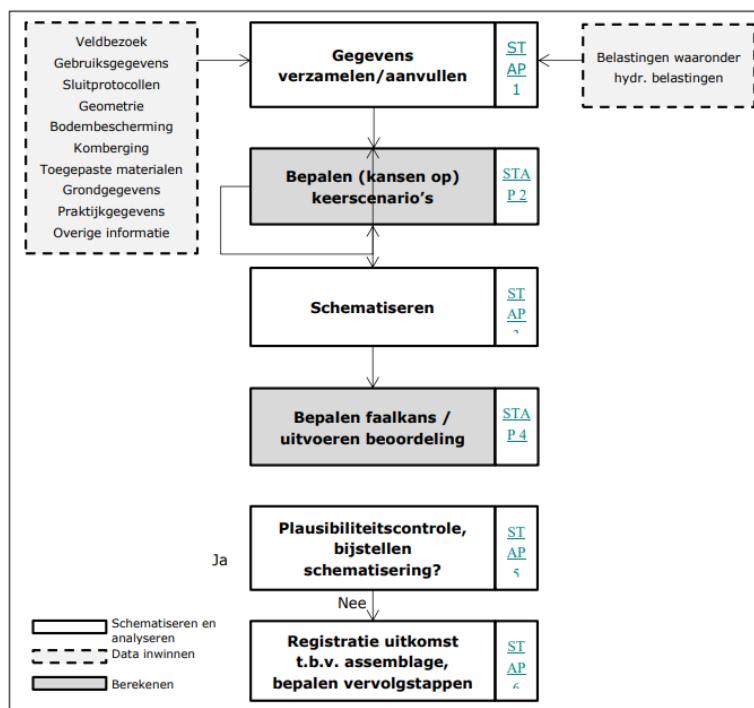


Figuur A.8 Toetsschema gedetailleerde toets voor heave en piping bij kunstwerken [4, p.130].

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 tov kritieke verhang).
- Controle op heave langs kwelscherm.
- Controle voldoende horizontale kwelweglengte.

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



Figuur A.9 Stappenschema beoordeling kunstwerk [21].

De methode naar afronding van een oordeel inclusief probabilistische analyse is nog in ontwikkeling. In de schematiseringshandleiding werd nog voor kunstwerken aangegeven dat geen (semi)probabilistische analyse kan plaatsvinden maar alleen vaststelling van onzekerheden.

Uit de praktijk bereikte ons de mening van beoordelaars dat het afleiden van een faalkans ondoenlijk zou zijn. Wij kunnen niet ontkennen dat een probabilistische aanpak lastig is zonder de mogelijke onzekerheden in de gegevens of modellen te kennen. In de praktijk blijkt dat - bij gebrek aan gegevens om tot een goedkeuring ten opzichte van norm te komen - de beoordelaar aan het waterschap en Rijkswaterstaat een keuze wil voorleggen (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.

Semi-probabilistische analyse zou naar de mening van Deltares momenteel met het separaat beschikbare instrumentarium (probabilistische toolkit van Deltares) geen probleem op moeten leveren. Er zou in ieder geval een gevoeligheidsanalyse voor de verschillende deelmechanismen moeten kunnen worden uitgevoerd, alsook voor de onderliggende geohydrologische analyse. In de Schematiseringshandleiding Piping [16] zijn in Tabel 2.2 waarden voor de verdeling van parameterwaarden aangegeven t.b.v. semiprobabilistische toetsing bij piping onder dijken.

Vanwege benodigde data en modelinput lijkt ons een probabilistische methode voor de gedetailleerde beoordeling vooralsnog een grote stap.

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 een gevoeligheidsanalyse voor een schematisatie worden gedaan met ongunstige waarden voor mogelijke variaties van parameterwaarden bij verschillende mogelijke scenario's.

Overwegingen met betrekking tot de inzet van probabilistische analyse zijn verder opgenomen aan het eind van voorliggend rapport.

A.4.2 Uitwerking gedetailleerde beoordeling inclusief geohydrologie

Het schematiseren van piping (onder- en achterloopsheid) bij kunstwerken draait om het identificeren van mogelijk maatgevende kwelwegen onder en/of langs het kunstwerk. Een kwestie bij de analyse van mogelijk maatgevende kwelwegen is, dat de hydrologische situatie zodanig kan zijn dat de analyse van grondwaterstroming complex is. De situatie en de mogelijke kwelwegen die daar mee samen kunnen hangen, bepalen op welke manier de situatie ook modelmatig in kaart gebracht moet worden om meer inzicht te krijgen over de grondwaterstroming. In dat geval moet de analyse eigenlijk met een driedimensionaal model gebeuren. Als dat aan de orde is, moet de beoordeling van het kunstwerk worden aangemerkt voor aanpak volgens een aangescherpte (specifieke) beoordeling.

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. Ter 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] is aangegeven hoe met de drukvoortplanting van hoogwater onder waterkeringen rekening moet worden gehouden. Enige voorzichtigheid is geboden omdat geohydrologische berekeningen of modellen niet alle grondmechanische aspecten meenemen. Dit betreft vooral het tijdsafhankelijk gedrag in de ontwikkeling van waterdruk, met name in waterremmende lagen.

Hierna zijn enkele opmerkingen vermeld over de berekening van grondwaterstroming:

- Beschikbare gegevens over de waterstandsverlooptijd tijdens hoogwater tonen het niet-stationaire karakter van de belasting. Hierbij kan gebruik worden gemaakt van het programma Waterstandsverloop (zie ook [21] paragraaf 4.3.5.4). Dit verloop kan effect hebben op de grondwaterstroming.
- De tijdsafhankelijkheid kan van invloed zijn op de ontwikkeling van de waterspanningen in de watervoerende en pipinggevoelige 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).

Derhalve kan worden verdeeld in 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.

Een niet-stationaire grondwaterstroming levert meestal (afhankelijk van de bergingsfactor in de ondergrond) een lagere waterspanning in de watervoerende laag dan wanneer uitgegaan wordt van stationaire stroming. Niet-stationaire stroming is vrijwel altijd aan de orde in het benedenrivierengebied, meren, estuaria en langs de kust bij hoogwateromstandigheden. De

beschrijving is ook aan de orde gesteld 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. Daarvoor moeten er wel meetpunten zijn geïnstalleerd in doorlatende lagen onder en landwaarts van de dijk of het kunstwerk. Omdat peilbuismetingen bij lagere buitenwaterstanden gemeten worden, 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 wordt uitgegaan levert dat meestal een conservatieve benadering van het stijghoogtepatroon in de watervoerende laag onder waterkeringen en kunstwerken op.

Uitwerking van de geohydrologische situatie voor gedetailleerde beoordeling

De uitwerking van de beoordeling van kunstwerken op piping vindt plaats met het beschikbare basisinstrumentarium (Opdrijven/opbarsten, heave-controle, piping met formule van Lane of Sellmeijer). Dit gaat als volgt:

- Er wordt gestart met interpretatie van data over de opbouw van de ondergrond. Eerst wordt nagegaan welke data in beschikbare databases aanwezig is (DINOloket en SOS).
- De beoordelaar of zijn adviseur beschrijft dan de 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 er een voorland is met of zonder deklaag, of er polders aanwezig zijn rond het kunstwerk, grondwateronttrekkingen en andere ingrepen in het gebied. Dit leidt tot een indruk van de stroming en de stijghoogteverdeling van het grondwater in het gebied. Hieruit kan worden afgeleid of de situatie complex is of vereenvoudigd mag worden naar een tweedimensionale doorsnede. Ook de impact van het kunstwerk op de grondwaterstand wordt vastgelegd (zoals aanwezigheid van kwelschermen, filterconstructies of waterdichte voorzieningen in het kunstwerk).
- Vervolgens moet worden nagegaan of er lokale onderzoeksdata (bodempopbouw en grondwaterstand) bij het kunstwerk zijn. Liefst wordt op basis van meetreeksen afgeleid welke variaties van grondwaterstanden ter plekke van het kunstwerk voorkomen.
- Indien 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. Voor de tussenafstand tussen de sonderingen wordt aanbevolen deze niet groter dan 25 à 50 meter te laten zijn. Voor de diepte van de sonderingen wordt aanbevolen enkele meters dieper dan het diepste kwelscherm aan te houden en ten minste 3 meter in de watervoerende zandlaag.
- Indien de inventarisatie uit SOS en van lokale geologische en geohydrologische data geen eenduidige karakterisering geeft van de mogelijke bodempopbouw zullen meerdere mogelijke scenario's van schematisatie van de bodempopbouw moeten worden beschouwd. Deze zal men liefst bepalen in gesprek met een geologisch expert.
- Voor de locatie kan men een basisschematisatie kiezen, die kan inliggen tussen de mogelijk ongunstigste en gunstigste schematisatie van de bodempopbouw. Voor elk mogelijk scenario wordt de faalkans berekend. En voor elke schematisatie wordt een kans van voorkomen geschat. De toepassing van schematiseringsfactor past in een semi-probabilistische aanpak. Voor gebruik van modellen ter bepaling van de faalkans kiest men een schematiseringsfactor. 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.

- Indien zekerheid bestaat over bepaalde bodemopbouw of parameterwaarden hoeven daarvoor geen verschillende scenario's te worden aangenomen. Daarmee wordt de kansbeschouwing versimpeld.

Zoals hiervoor vermeld, begint de analyse voor de gedetailleerde beoordeling met afleiding van het stijghoogteverloop en daaruit voortkomende kwelwegen. Daarvoor zijn verschillende mogelijkheden, allereerst met 2 dimensionale analytische oplossingen of modellen. Deze worden in de beschrijving hierna vermeld.

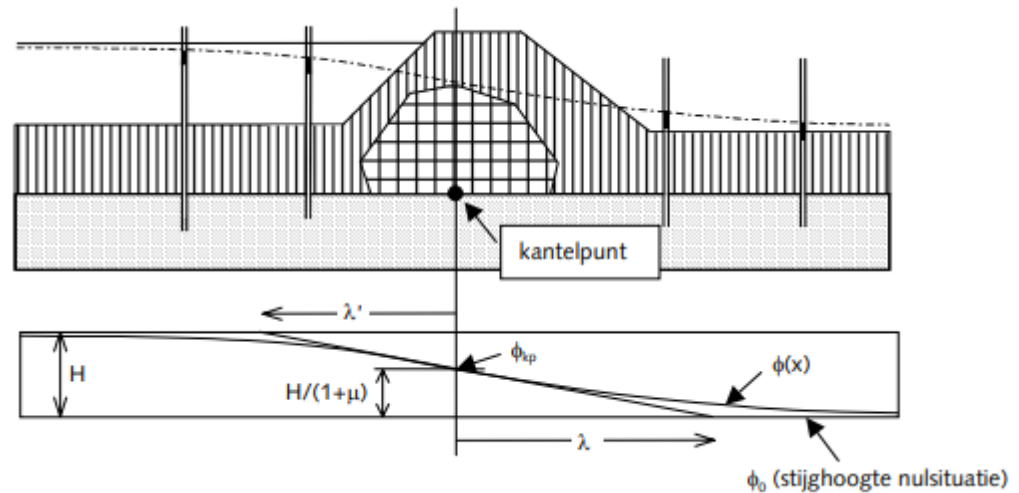
Uitwerking van de gedetailleerde beoordeling op piping

Bij uitvoering van de gedetailleerde beoordeling van het kunstwerk op piping begint de beoordelaar met eenvoudige berekeningen. Deze zijn bij de minst complexe beschouwing gebaseerd op het model van Lane en verdeling van grondwaterstanden volgens een stationaire beschouwing in 2D over het kunstwerk. Dit is een conservatieve benadering.

Bij gebruik van het model van Lane moet de beoordelaar aantonen wat de kans van voorkomen is van ongunstige schematiseringen en welke bijdrage aan de faalkans ontstaat. Bij twijfel zal afstemming met specialisten (geologen) moeten plaatsvinden.

De uit te voeren stappen zijn:

- Allereerst is het nodig om de hydraulische belastingen te bepalen voor de locatie volgens geldende wettelijke veiligheidsnorm met betrekking tot overstroming, zoals vastgelegd in de Omgevingswet.
- Daarnaast wordt de input over grondlagen en geohydrologische eigenschappen en randvoorwaarden, geordend zoals eerder vermeld bij eenvoudige beoordeling, maar met toevoeging:
 - Landelijk hydrologisch model (LHM), laagdikten en doorlatendheid.
 - Regionaal hydrologisch model, laagdikten en doorlatendheid.
 - Lokale informatie: beschikbare boringen en peilbuismetingen met data van laagdikte, doorlatendheid, soortelijk gewicht, grondwaterstand.
 - Bepaling van parameterverdelingen uit beschikbare labdata.
 - Stijghoogten uit websites DINO/BRO of grondwatertools.
- De ligging van het intredepunt wordt afgeleid van de lengte van het voorland, de omvang van de beheerzone, de samenstelling van en de inzigging door de deklaag in het voorland en/of de breedte van de dijkbasis. Voor dit aspect wordt verwezen naar Bijlage B van het Technisch rapport Waterspanningen bij Dijken [3] (zie figuur).
Daarbij moet rekening gehouden worden met heterogeniteit van het voorland in dikte en samenstelling van de toplaag en lokale aanwezigheid van sloten of geulen.



Figuur A 10 Bepaling van intredepunt in voorland aan de hand van metingen en geohydrologische analyse [3, Bijlage B].

- Beoordeling van eventueel aanwezig filter aan uitstroomzijde:
Uitspoeling van zand kan worden voorkomen door toepassing van een filterconstructie. Het filter kan bestaan uit een granulair filter, opgebouwd volgens de filtercriteria (zie onder) of uit een verzwaard filterdoek. Voorwaarden voor een goede werking van de methode zijn dat het filter zanddicht is en meer waterdoorlatend (grover) is dan de ondergrond is. Indien aan uitstroomzijde een filter is geplaatst, controleert beoordelaar of het filter zand levert of voldoet aan filterregels.

Het meest toegepast is het filtercriterium van Terzaghi:

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} < 4 \quad (5.14)$$

waarin:

D_{15} korreldiameter van het grove (filter)materiaal, waarbij 15 gewichtprocent van de deeltjes van het monster een kleinere diameter heeft.

d_{85} korreldiameter van het fijne materiaal, waarbij 85 gewichtprocent van de deeltjes van het monster een kleinere diameter heeft.

Om opbarsten van het filter (het grove materiaal) te voorkomen, moet de doorlatendheid van het filter voldoende groot zijn ten opzichte van het fijne materiaal daaronder. Dit is het geval als aan het volgende, algemeen geaccepteerde, criterium wordt voldaan [Terzaghi, 1922]:

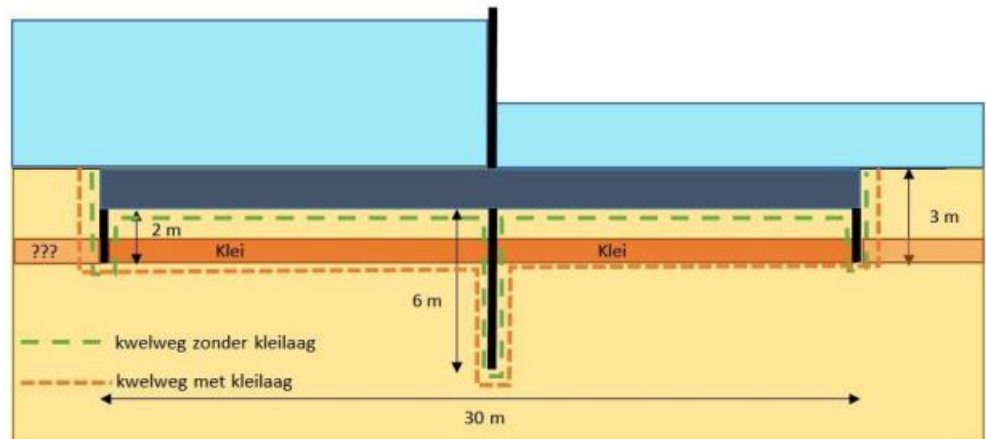
$$\frac{D_{15}}{d_{15}} > 4 \quad (5.15)$$

waarin:

d_{15} korreldiameter van het fijne materiaal, waarbij 15 gewichtprocent van de deeltjes van het monster een kleinere diameter heeft.

- Vervolgens wordt nagegaan wat de waterstand aan binnenzijde van het kunstwerk in kan zijn en waarheen de stijghoogte verloopt: een sloot, een filter, naar opdrijfzone of pipe-uittrede. Nagegaan wordt welk geval het meest kritisch is.

- Met behulp van de onderhavige schematisatie en geanalyseerde data maakt men een schatting van de kwelweg op basis van het ondergrondprofiel, inclusief eventuele kortsluitingen naar een kortere kwelweg:



Figuur A.11 Mogelijke kwelwegen onder een kunstwerk.

- Een eenvoudige schatting van stijghoogteverloop tussen rivier en achterland onderdoor een dijk of kunstwerk (als er geen schermen zijn) kan plaatsvinden met analytische berekening volgens exponentieel verloop als in de formule van Mazure:

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

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 de amplitude van de hoogwatergolf.

λ_w = spreidingslengte die bepaald wordt op basis van doorlaatvermogen van de zandlaag en weerstand van boven en onderliggende kleilagen.

De spreidingslengte bepaalt de mate van demping in de stijghoogte vanaf intredepunt naar achterland. Dit verloop op afstand x vanaf het intredepunt treedt op tot een maximale afstand $> 3 \text{ a } 5 \cdot \lambda_w$ (met λ_w =spreidingslengte).

- Bij inrichting van het kunstwerk met kwelschermen is het mogelijk om het verloop te bepalen met de fragmentenmethode volgens Sellmeijer [1]. Dit is een analytische elementen methode waarmee een lokaal model 2D in 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 en aldus een eenvoudige benadering in 2D wordt gemaakt bij een eerste beoordeling van de stroming onder een kunstwerk door.

Het model gebruikt de volgende parameters:

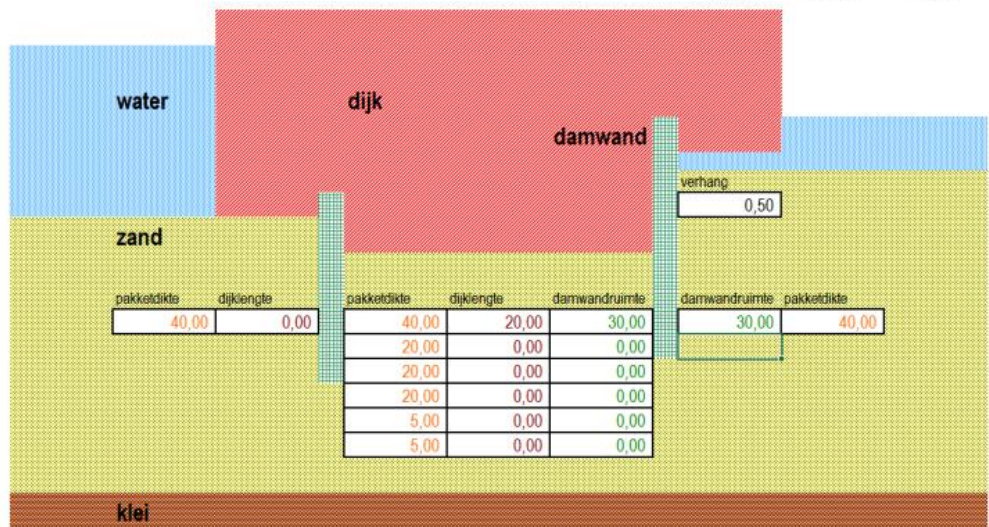
- ϕ_0 = Stijghoogte op niveau onderzijde benedenstrooms kwelscherm.
- ϕ_p = Freatisch niveau ter plaatse van uitreepunt.
- h = Lengte benedenstrooms kwelscherm.

Heave bij kunstwerken

Voer gegevens in in de omlijnde hokjes;
Er zijn maximaal 6 middendelen.

password:

verval 14,303 vervalratio 0,699 debietratio 1,361



Figuur A. 12 Spreadsheet fragmentenmethode.

De beperking van de fragmenten methode zijn:

- Niet geldig voor situaties met een over 3D variërende grondwaterstroming.
- Maximaal 6 fragmenten.
- Isotrope doorlatendheid van de zandlaag.
- Niet geldig voor zeer ondiepe kwelschermen $< 0,1 * D$.
- Een alternatief voor de bepaling van grondwaterstroming onder een kunstwerk met kwelschermen is door gebruik te maken van 2-dimensionale modellen voor grondwaterstroming . Dit kunnen eindige elementen-modellen zijn (Plaxis, Kratos, DGeoFlow).
- Controle opdrijven of opbarsten:
 - Voor de initiatie van het pipingproces in situaties waar een deklaag aanwezig is, is opbarsten een noodzakelijke voorwaarde. Voor evenwicht geldt dat het gewicht van de laag boven evenwichtsniveau groter moet zijn dan de opwaartse waterdruk onder de laag:

$$\frac{d(\gamma_{nat} - \gamma_w)}{\gamma_w(\varphi_z - \varphi_p)} \geq \gamma_{bu} \gamma_{up}$$

Hierin is:

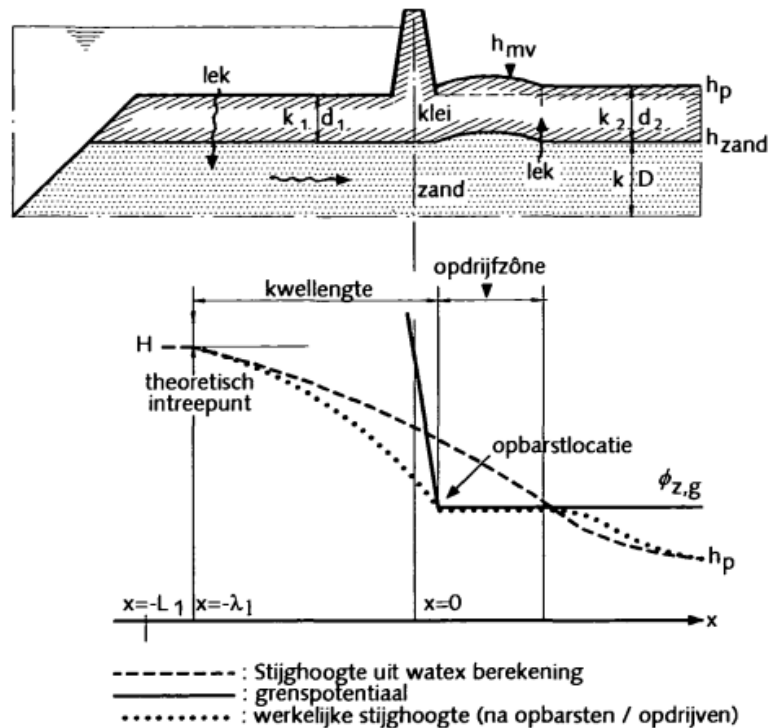
γ_{up} = Veiligheidsfactor voor het faalmechanisme opbarsten die afhankelijk is van de gestelde betrouwbaarheidseis.

$\gamma_{b,u}$ = Schematiseringsfactor voor het faalmechanisme opbarsten.

Voor de veiligheidsfactor opbarsten wordt verwezen naar paragraaf 4.2 van de Handreiking Ontwerpen met Overstromingskansen versie 4 [20].

Voor de schematiseringsfactor opbarsten wordt verwezen naar het Technisch Rapport Grondmechanisch Schematiseren van Dijken [6].

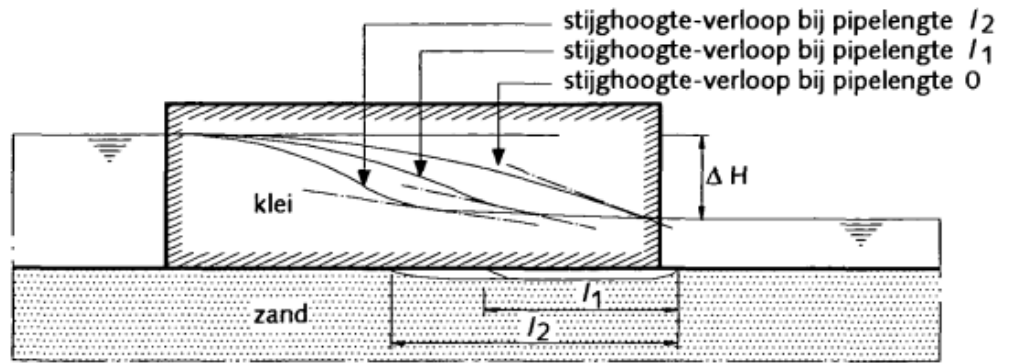
- Er moet in de beschouwing van opbarsten rekening worden gehouden met en aanwezigheid van sloten in het achterland en met heterogeniteit (dikte en samenstelling van de toplaag, geulafzettingen).
- Indien opbarsten aan de orde is moet ter controle de stijghoogte bij opbarsten t.p.v. het uittredepunt worden beschouwd. Deze bepaalt het maximale verhang.



Figuur A 13 Verdeling van potentiaal onder een dijk of kunstwerk van rivier naar achterland, met en zonder opdrijven [9].

Indien opbarsten aan de orde is wordt zo nodig het uittredepunt verlegd en wordt de grondwaterberekening herhaald.

- Indien de situatie piping-gevoelig is dan kan het stijghoogteverloop over kortere afstand optreden, namelijk naar het begin van een pipe. De pipelengte kan men afleiden uit beschouwing van de kwelweglengte door uitvoering van een pipingberekening volgens Sellmeijer. Ook voor dit geval zal de grondwaterberekening moeten worden gecorrigeerd en herhaald. In beschouwing in 2 dimensies levert deze beperking een overschatting van de grondwaterstroming op.



Figuur A 14 Verandering van potentiaal onder een kunstwerk van rivier naar achterland bij ontstaan van een pipe en bij doorgroeien [3].

- Heave controle:

Indien een scherm aanwezig is, is een voorwaarde voor bezwijken door piping dat ook zandtransport optreedt langs het kwelscherm omhoog. Daarbij moet ook heave optreden met verweking van een zandlaag. In de beoordeling wordt het verticale verhang langs de schermwand bepaald. Het verticale verhang moet kleiner zijn dan het kritiek verhang. Hierbij wordt een veiligheidscoëfficiënt van 2 aangehouden ($i_c < 0,5$).

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

Het verhang zal beoordelaar moeten afleiden uit de grondwaterberekening.

De stijghoogte aan onderzijde van het kwelscherm benedenstrooms van het kunstwerk kan berekend worden met een spreadsheet volgens de hiervoor beschreven semi-analytische fragmentenmethode. Het principe is beschreven in Bijlage A3 van Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen [4].

- Piping controle:

- Grondwaterstroming:

De pipingberekening kan alleen worden uitgevoerd als de hydraulische randvoorwaarden, opbarstcontrole en grondwaterstroming duidelijk zijn.

- Controle van de kwelweglengte a.d.h.v. de regel van regel van Lane:

Met deze methode kunnen verticale trajecten in de kwelweg beschouwd worden zodat ook getoetst kan worden op piping als 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 in model van Lane.

ΔH_c = Kritiek verval over het kunstwerk.

ΔH = $h_{bu} - h_{bi}$ = Verval over het kunstwerk.

h_{bu} = Buitenwaterstand.

h_{bi} = Binnenwaterstand.

De creep-factor C_{creep} (zie tabel) is een empirische materiaalconstante van de ondergrond die de weerstand van de ondergrond 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

- Controle piping volgens Lane in combinatie met heave controle deklaag deklaag: Op het stijghoogteverval over het traject tussen intrede- en uitredepunt wordt voor de stroming door de deklaag 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.

Het criterium voor controle op horizontale piping luidt:

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

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

- Controle op spleetvorming bij fundering op palen:
Als bijvoorbeeld een kunstwerk een fundering op palen heeft in een gebied met slappe toplaag en bodemdaling, dan kan een spleet onder het kunstwerk aanwezig zijn. In dat geval mag de horizontale kwelweg onder het kunstwerk niet worden meegeteld.
- Gelaagd profiel
Het komt voor dat de kwelweg door verschillende grondlagen 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 uitreepunt 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.

- Eenvoudige toets van de kwelweglengte a.d.h.v. de regel van Bligh:
Toepassing van de regel van Bligh vond vroeger veelal voor situaties met een horizontale kwelweg plaats maar 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 bezwijkgevallen bekend bij kwallengtes kleiner dan 18H. Door ENW is aangegeven [25] dat de regel van Bligh onveilig is en niet langer mag worden toegepast.

- Piping berekening volgens Sellmeijer:
Deze berekening is alleen uitvoerbaar voor een situatie waarbij geen kwelschermen aanwezig zijn.

Het verval over de constructie moet kleiner zijn dan het kritieke verval :

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

De aangegeven vergelijking is de aangepaste regel van Sellmeijer. Hierbij zijn F_r en F_s gerelateerd aan de bodemeigenschappen en F_g aan de geometrische eigenschappen van de watervoerende laag. Voor de beschrijving van de regel van Sellmeijer wordt verwezen naar de schematiseringshandleiding piping. Deze methode kan echter alleen worden toegepast op een horizontale kwelweg.

Ten behoeve van de berekening kan een eerder aangehouden d50 uit model van Lane worden omgerekend naar de d70 met de volgende formule: $d70 = d50 * 1,35$ (Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen [4] paragraaf 9.5.2.1).

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, dan 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.

In het rapport Onderzoek zandmeevoerende wellen [4, H7] is vermeld om in de gedetailleerde toets 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 op te volgen en de onderbouwing met geohydrologische modellen (geavanceerde analyse) te laten plaatsvinden in de aangescherpte beoordeling.

A.5 Aangescherpte (specifieke) beoordeling kunstwerken op piping

A.5.1 Algemene aanpak bij aangescherpte beoordeling

Indien de gedetailleerde beoordeling wijst op een substantiële mogelijke bijdrage van het kunstwerk aan de overstromingskans van het dijktraject dan moet in principe door aanscherping de faalkans nader worden bepaald.

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 met conservatieve aannamen. Dit kan goedkeuring zijn in plaats van afkeuring van een object omdat in de aangescherpte beoordeling van meer realistische schematisaties wordt uitgegaan.

De stap volgens huidige werkwijze onder BOI is dat **in het werkatelier** beoordeeld zal worden of het mogelijk en noodzakelijk is om het kunstwerk voor faalmechanisme piping nader te analyseren voor het dominante faalpad. Voorheen werd dit aangeduid als een toets op maat.

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 in meer detail beschreven. Voor het faalmechanisme piping geldt zoals eerder al vermeld dat de volgende gebeurtenissen plaatsvinden:

- Initiële mechanisme:
 - Opbarsten.
 - Erosie filterconstructie.
- Indirecte mechanismen:
 - Heave langs schermwand.
 - Zakking grond onder constructie en spleetvorming.
- Vervolgproces 1:
 - Doorgroei pipe.
- Vervolgproces 2:
 - Doorbraak.

Op hoofdlijnen zijn er voor kunstwerken de volgende aanscherpingen mogelijk:

1. Uitwerken van vervolgprocessen.
2. Verfijnder uitwerken initieel mechanisme.

Ad 1 Vervolgproces

Voor de bepaling van de conditionele kansen kan gebruik gemaakt worden van modellen of dit kan op basis van expert judgement worden gedaan. Bij dat laatste moet dus een expert worden ingeschakeld.

De gebeurtenissen worden ondergebracht in een gebeurtenissenboom, tenzij verschillende modellen voor verschillende processen moeten worden gecombineerd. Dan biedt een foutenboom of integrale benadering meer voordeel.

Bij een faalpad met meerdere knopen zoals bij piping is het van belang dat de belasting en duur op een realistische wijze wordt meegenomen: een vervolgproces kan pas beginnen wanneer een eerdere knoop is gefaald, zodoende zal de belastingduur en mogelijk ook het belastingniveau bij vervolgprocessen veranderen.

Ad 2 Initieel mechanisme

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

- Beter uitwerken van de schematisering door het expliciet meenemen van onzekerheden waarvoor in de eerste analyses grove aannames zijn gehanteerd. Bijvoorbeeld verbetering van aannames over effect voorland op de hydraulische belasting of de aannames t.a.v. bodemopbouw, sterkte-eigenschappen of bijvoorbeeld de invloed van anisotropie op het faalgedrag. Ook kunnen historische belastingen gebruikt worden om de onzekerheid over de sterkte te verminderen.
- Beter toepassen van nauwkeuriger geavanceerde modellen waarmee de fysica in meer detail wordt geschematiseerd. Bijvoorbeeld door het inzetten van de eindige elementenmethode.
- Inzetten van geavanceerdere rekentechniek en probabilistische berekening om onzekerheden beter en scherper mee te nemen in plaats van een semi-probabilistische of eenvoudige berekening.

Als een overstromingskans is berekend, is het van belang om de plausibiliteit daarvan te onderbouwen, duiding te geven en consequenties vast te stellen.

De volgende vragen kunnen ter controle worden gesteld:

- In hoeverre komen de uitkomsten overeen met die van vergelijkbare locaties in Nederland?
- Passen de uitkomsten van de modelberekeningen bij waarnemingen? Hiervoor kan gebruik gemaakt worden van de gebiedskennis van de beheerder of andere bronnen zoals de wellendatabase (zie <https://www.wellocaties.app/>).
- In hoeverre komen de uitkomsten overeen met die van eerdere analyses?
- Kunnen de uitkomsten worden verklaard vanuit het verhaal van de kering.

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 bijvoorbeeld minder inspanning vergen om een verbetermaatregel te treffen dan om een aangescherpte beoordeling uit te voeren om het onderdeel alsnog positief te beoordelen.

Mogelijkheden voor aanscherping zijn:

- Voor de belasting door waterstanden zal van de statistiek uit Hydra-Ring of Riskeer gebruik gemaakt worden (zie 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.
 - Ontgroning 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 berekend. Analyse van de waarnemingen kan uitwijzen wat daar de reden voor is.
- Aanvullend grondonderzoek:
 - Bodemopbouw, met beschouwing van heterogeniteit, anisotropie.
 - Bepaling van de korrelgrootte van zandlagen, fijne zandfractie [14].
- Geohydrologisch onderzoek (hierna beschreven).
- Geavanceerde grondwatermodellen toepassen:
 - Zie beschrijving geohydrologie hierna.
- (Semi-)Probabilistische piping- en heave-analyse:
 - Zie hierover de volgende tekst.

Met betrekking tot probabilistische analyse wordt opgemerkt:

- In de huidige praktijk wordt voor het faalmechanisme piping een kritiek verval berekend dat wordt vergeleken met het optredende verval bij normomstandigheden. De hydraulische belastingen volgen uit de wettelijke veiligheidsnorm met betrekking tot overstroming, zoals vastgelegd in de Omgevingswet.
- Voor het faalmechanisme piping bij kunstwerk zou volgens [21] geen faalkans kunnen worden bepaald. Met het BOI-instrumentarium kan namelijk geen volledig probabilistische berekening voor piping bij kunstwerken worden gemaakt.

- Bij analyse met het model van Sellmeijer kan gebruik worden gemaakt van Riskeer. In Riskeer is dit model namelijk probabilistisch opgenomen in het dijkenloop. Er moet dan een berekening voor dijken handmatig worden aangepast om te kunnen gelden voor een kunstwerk. Daarbij wordt dan echter alleen een horizontale kwelweg beoordeeld.
- Bij controle van verwacht optreden van heave langs schermen is het niet mogelijk om met Riskeer of Hydra-Ring een probabilistische berekening uit te voeren. In dat geval zullen andere programma's ingezet moeten worden voor een semiprobabilistische analyse (zoals de Probabilistische Toolkit met gebruik van een Python script voor een model gebaseerd op bijvoorbeeld de eindige elementen methode).
- Semi-probabilistische piping-analyse met Lane of heave-analyse zou in principe wel mogelijk moeten zijn en als volgt kunnen worden uitgevoerd:
 - Bepaal kansverdelingen voor de parameters in de modellen voor het dominante faalmechanisme. 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 piping bij kunstwerken wordt geen lengte-effect in rekening gebracht [16, p.58].
 - Gebruik Hydra-Ring als hulpmiddel om een probabilistische berekening voor een dijkkring uit te voeren. Indien de beoordeling wordt gebaseerd op het model van Lane dan kan dit programma gebruikt worden om een probabilistische beoordeling uit te voeren. Hierbij moet bedacht worden dat de hydraulische belastingen gebaseerd zijn 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.

A.5.2 Aanbevelingen voor aangescherpte (specifieke) beoordeling inclusief geohydrologie

Met betrekking tot onderzoek en metingen wordt in handleidingen voor beoordeling op piping [16, 17, 22, 24] het volgende opgemerkt:

- Juist bij kunstwerken, waar sprake kan zijn van grote onzekerheden in de schematisering door verstoring van de originele grondslag bij aanleg, wordt onderzoek van grondlagen en grondwaterstanden sterk aanbevolen.
- Indien de laagopbouw niet uniform is kan de hulp van een geoloog worden gevraagd om lokale informatie te duiden (voorkomen van tussenzandlagen, geulafzettingen e.d.).
- Grondonderzoek zal 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 monsternamen zijn ter bepaling van volumegewicht van cohesieve lagen en korrelverdeling van de zandlaag. Zo nodig doet men veldproeven of geofysische metingen ter bepaling van doorlatendheid en eventueel anisotropie.
- Met peilbuizen kan de respons van de stijghoogte in de watervoerende zandlagen op de buitenwaterstand worden geanalyseerd. Hiervoor zijn verschillende methoden beschikbaar (bijvoorbeeld [15], [11], [6]). Metingen worden vertaald naar hoogwateromstandigheden, met verhang onder het kunstwerk en stroming langs kwelschermen. In het algemeen wordt de methode niet voorgeschreven; het is aan de beoordelaar om de geschiktheid van de gebruikte methode aan te tonen. De analyse met

vertaling van metingen naar maatgevende omstandigheden vereist specialistische kennis.

- Bij veel kunstwerken is sprake van verticale uitstroming van grondwater achter het kunstwerk. Uit de analyse kan de stijghoogteverdeling ter plaatse van het benedenstroomse kwelscherm onder maatgevende omstandigheden worden afgeleid. Dit verhang moet worden vergeleken met het heave-criterium van 0,5. Indien sprake is van horizontale uitstroming dan ontbreekt een uitstroomcriterium. In dat geval moet de analyse met hulp van experts gebeuren.

Over de inzet van geohydrologische modellen wordt opgemerkt:

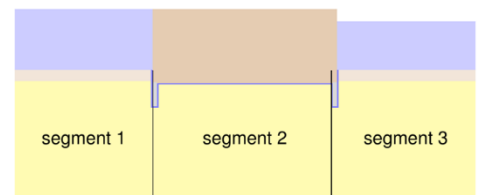
- De keuze van modellen (quasi-stationair of tijdsafhankelijk) moet (zoals eerder beschreven) overeenstemmen met de plaatselijke situatie met verandering van waterstanden (lange duur met trage stochast dan wel relatief korte duur met snelle stochast).
- Driedimensionale of quasi-driedimensionale grondwaterstromingsmodellen zijn nodig waar de geometrie of laagopbouw niet uniform is bij het kunstwerk door variaties in hydrologische condities in voorland en achterland. Daarbij kan het nodig zijn om de schematisering te verbeteren met inzicht in lokale omstandigheden als de grondwaterstanden in meerdere richtingen (3D) variëren wanneer deze door diverse omstandigheden worden beïnvloed, bijvoorbeeld als de laagopbouw niet uniform is verdeeld rond het kunstwerk of als er diepe polders of onttrekkingen in de buurt zijn.

De geohydrologische onderbouwing van de beoordeling zal door experts moeten worden uitgevoerd:

- Informatie over belastingen moet worden beschouwd om te beoordelen of het zinnig is om het effect van tijdsafhankelijkheid mee te nemen (omdat daar een scherpere analyse mee gedaan kan worden). Bij verschillende omstandigheden geldt daarbij:
 - Zee, effect van stormcondities (kort en lang) en getij (springtij tot doottij), tijdsafhankelijkheid van belang.
 - Meren, 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 maar nauwelijks effect van tijdsafhankelijkheid aan de orde is, omdat er één langdurig hoogwater optreedt van circa twee weken, zodat stationair mag worden gerekend.

Als de omgeving geen complicerende randvoorwaarden biedt 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 (van Esch, [19]):
 - Eindige elementen methode.
 - Lokaal model.
 - 2D in verticale vlak.
 - Kunstwerken toepassingen.
 - Zo nodig extra segment toevoegen, bijvoorbeeld voorland of rivier.
- Modflow:
 - Eindige differentie methode.
 - Regionaal model.
 - 2D in horizontale vlak met Dupuit benadering.
 - Geohydrologische toepassingen.
- Plaxis:
 - Eindige elementen methode.



- Lokaal model.
- 2D in verticale vlak.
- Geotechnische toepassingen.
- Grondwaterberekening 3D stationair:
 - TimML:
 - Analytische elementen methode (Bakker).
 - Lokaal model met isotrope eigenschappen.
 - 3D in horizontale vlak met Dupuit lagenbenadering of volledig 3D i.v.m. anisotropie.

Als de omgeving wel complicerende randvoorwaarden biedt (als behalve rivier en vast peil in achterland tevens andere bepalende invloeden gelden, zoals diepe polders, onttrekkingen van grondwater of verstoringen in voorland, danwel complexe ondergrond met variërende gelaagdheid, geulafzettingen en dergelijke) zullen uitgebreidere modelstudies moeten worden verricht. 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 duidelijk worden.

Vervolgens zal het model moeten worden vertaald naar maatgevende hoogwater situatie. Eventuele effecten van specifieke condities in het gebied (erosie in rivier, onderlopend voorland en nevengeulen, stijging waterstand in achterland, berging in polders) zullen daarbij moeten worden meegenomen:

- Analyse meetreeksen en getij:
 - Nagaan of maatgevende situatie hoogwater en getij-effect nader moet worden onderzocht.
- Grondwatermodel 3D:
 - Modflow:
 - Eindige differentie methode.
 - Sub-Regionaal model.
 - 3D in horizontale vlak met Dupuit lagenbenadering of volledig 3D i.v.m. anisotropie.
 - Kratos:
 - Eindige elementen methode.
 - Sub-Regionaal model.
 - 3D in horizontale vlak met Dupuit lagenbenadering of volledig 3D i.v.m. anisotropie.
 - In ontwikkeling.

Vervolgens vindt op basis van de uitgewerkte geohydrologische berekening voor de maatgevende kwelweg een piping-analyse plaats:

- Piping: verval over de constructie moet kleiner zijn dan het kritieke verval volgens Sellmeijer:

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

- D-Geo-Flow:
 - Randvoorwaarden uit grondwaterberekening overnemen en daarna pipinganalyse uitvoeren.

Vervolgens kan een semi-probabilistische analyse worden uitgevoerd:

- Probabilistische toolkit:
 - Bepalen met gevoeligheidsanalyse welke parameters belangrijkst zijn.
 - Verdelingen voor parameterwaarden schatten. Boven- en ondergrensschattingen maken.

- Nagaan of er afhankelijkheden zijn. Voor kunstwerken betreft dat de correlatie tussen waterstanden binnen en buiten.
- Faalkansanalyse maken.

De semiprobabilistische analyse kan worden uitgevoerd als 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) kan volgens hoekpuntenanalyse worden uitgevoerd.

A.5.3 Plausibiliteitscontrole

Nadat de uitkomsten van de analyses in deze fase beschikbaar komen, wordt een plausibiliteitscontrole gedaan. Bij plausibiliteit gaat het om het beoordelen of het resultaat aannemelijk is.

De plausibiliteitscontrole kan gebeuren aan de hand van de volgende generieke vragen:

- Voldoet de berekende faalkans aan de verwachtingen van het betreffende kunstwerk?
- Passen de uitkomsten van de modelberekeningen bij waarnemingen?
- Hoe vergelijkt het beeld met eerdere analyses?

Dit zijn vragen ter verificatie of de berekende faalkans ook voorstelbaar is gelet op de situatie van het kunstwerk en de beschikbare ervaringen (bijvoorbeeld welvorming in het gebied of ervaring van beheerders).

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

Specifiek voor piping bij kunstwerk geldt dat het kan voorkomen dat praktijkwaarnemingen duiden op voldoende weerstand tegen piping, terwijl de rekenkundige beoordeling niet wijst op 'faalkansbijdrage verwaarloosbaar'. In dat geval wordt aanbevolen de praktijkwaarnemingen, mits vertaald naar hoogwatercondities, voldoende betrouwbaar en goed gedocumenteerd, te laten prevaleren boven het oordeel dat op basis van modellen is verkregen.

A.5.4 Afronding: assembleren van uitkomst voor alle faalmechanismen

De assemblage naar dijktraject vindt plaats met:

- Ringtoets (eenvoudige toets of generieke/gedetailleerde toets).
- Riskeer (aangescherpte of specifieke beoordeling a la toets op maat).

In 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.

A.6 Beoordeling en aanbevelingen over 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. In de aanbevelingen worden de volgende categorieën van acties geadresseerd:

- 1) Afwachten tot een volgende versterkingsronde en de situatie laten zoals deze is, in totaal rekening houdend met deze zwakke schakel in de dijkkring, en in de tussentijd in overleg met opdrachtgever en/of werkatelier starten met:
 - Aanvullend onderzoek van ontbrekende data.
 - Monitoring van grondwaterstanden en analyse.
 - Modelleren 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).

A.7 Opmerkingen m.b.t. de probabilistische analyse

De toepassing van de probabilistische analyse op de situatie van piping bij kunstwerken is nog niet uitontwikkeld. Ten behoeve van de voortzetting van de studie voor de beoordeling van piping bij kunstwerken inclusief effect van geohydrologie, waarvoor de aanzet in voorliggend document is beschreven, zal met experts uit de klankbordgroep voor deze studie moeten worden besproken wat een passende manier is om hiermee om te gaan. In navolgende notities zijn enkele ontwikkelingen uit het recente verleden bijeen gebracht.

Volgens paragraaf 2.1 van Bijlage III Sterkte en veiligheid van het WBI proces geldt:

- Het toetsspoor piping bij kunstwerk werd eerder ten onrechte aangemerkt als toetsspoor waarbij in de gedetailleerde toets per vak een semi-probabilistische analyse moet worden uitgevoerd die door extrapolatie een afstand tot de norm levert (groep 2). Volgens WBI viel het toetsspoor piping bij kunstwerk in groep 4 Toetssporen waarvoor geen probabilistische berekening of semi-probabilistische berekening met veiligheidsfactoren (die voor WBI 2017 zijn afgeleid) beschikbaar zijn. Dit betekende dat er (in tegenstelling tot hetgeen in paragraaf 19.2 van Bijlage III Sterkte en veiligheid vermeld staat) géén faalkans kon worden berekend en dus ook niet kon worden vergeleken met de faalkanseis.

Hieruit vloeide voort dat 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) kon worden toegekend. De oplossing was dat de gedetailleerde toets per vak moest worden uitgevoerd met de waterstand die hoort bij de norm van het dijktraject. Indien hieraan werd voldaan dan was het oordeel IIv. Indien hieraan niet werd voldaan dan was het oordeel Vv. De beheerder bepaalde welke norm wordt gehanteerd: signaleringswaarde (waterstand categorie A) of ondergrens (waterstand categorie B). Omdat aldus van een enkele waterstand werd uitgegaan, was volledige probabilistische berekening niet aan de orde.

Verder werd als problematisch gezien dat de methode Sellmeijer alleen voor horizontale kwelwegen kon worden gehanteerd, en dat de methode Lane voor horizontale en verticale kwelwegen (langs kwelschermen) empirisch en zeer conservatief is.

In een brief van mei 2023 van het ministerie I&W aan Waterschap Limburg is de aanpak voorgesteld die volgens BOI [21, p.41] wordt gevolgd:

- Stap (of hoofdroute) 4. Bepalen faalkans / uitvoeren beoordeling ([21] paragraaf 4.7): Voor de berekening die nodig is voor de analyse van de relevante faalpaden zijn meerdere hulpmiddelen beschikbaar (paragraaf 4.1). Hierbij worden de diverse parameters ingevoerd, waarna een faalkans wordt berekend. Op de wijze van bepaling van deze parameters wordt in de gebruikershandleiding Riskeer – Faalmechanismen kunstwerken [31] nader ingegaan aan de hand van de modellen die in Riskeer zijn geïmplementeerd. Voor het faalmechanisme piping bij kunstwerk wordt geen faalkans bepaald. Voor dit faalmechanisme wordt een kritiek verval berekend en vervolgens vergeleken met het optredende verval bij normomstandigheden. Ook voor dit faalmechanisme worden in de gebruikershandleiding Riskeer – Faalmechanismen kunstwerken [31] handvatten gegeven voor de wijze van bepaling van de parameters voor de modellen die voor de beoordeling beschikbaar zijn.

In [21, par.4.7 Piping bij kunstwerk] is opgemerkt:

- Voor het faalmechanisme piping bij kunstwerk is voor de meeste situaties geen faalkansbepaling mogelijk. Dit komt doordat voor de meeste situaties geen probabilistische modellen of semi-probabilistische rekenregels met veiligheidsfactoren beschikbaar zijn (alleen voor het model Sellmeijer is een probabilistisch model beschikbaar als de kwelwegen horizontaal én in rechte lijn lopen). Dit betekent dat er voor andere modellen zoals Lane nu géén faalkans kan worden berekend.

In dat geval kan uit de beoordeling uitsluitend worden opgemaakt dat:

- De faalkansbijdrage verwaarloosbaar klein is (als het faalmechanisme voldoet bij een beoordeling op basis van de beschikbare modellen) óf
- Het faalmechanisme mogelijk een significante bijdrage levert aan de overstromingskans (als het faalmechanisme niet voldoet bij een beoordeling op basis van de beschikbare modellen).

De generieke analyse wordt uitgevoerd met de waterstand met een overschrijdingskans die getalsmatig gelijk is aan de norm (ondergrens) van het dijktraject. Uiteraard geldt dat als in de generieke analyse is geconcludeerd dat 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.

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 kansrijke analyses die daar worden beschreven zijn:

- Peilbuismetingen.
- Geavanceerde grondwaterstromingsmodellen.
- Het principe van “bewezen sterkte”.
- Probabilistische piping- of heave-analyse; hieronder toegelicht.

Uit: Handleiding Kunstwerken [21]:

- Voor het uitvoeren van een probabilistische analyse worden in de vigerende leidraden en technische rapporten geen aanwijzingen gegeven. Er zijn echter wel programma's beschikbaar die gebruikt kunnen worden voor een probabilistische analyse. 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-helppes 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 dijken-som 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.

A.8 Ervaringen uit de praktijk

De wens uit 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 dijkkringen meegenomen. Bij de Limburgse dijkkringen 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).

Tabel A.1 Informatie uit waterveiligheidsportaal over enkele resultaten van beoordeling op piping uit toetsronde LBO-1 [persoonlijke communicatie met Greenrivers].

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	

A.9 Conclusies, voorstel voor beoordeling van kunstwerken op piping inclusief geohydrologie

Het resultaat van de uitgevoerde studie is dat de beoordeling van kunstwerken op piping onder BOI in 3 stappen kan plaatsvinden, werkend van grof naar fijn. Naar aanleiding van de studie komt Deltares tot het volgende voorstel:

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 eerste stap is bedoeld als zeef in de beoordelingsprocedure waarmee kunstwerken die met grote waarschijnlijkheid niet gevoelig zijn voor piping uitgefilterd worden.

2. **Gedetailleerde beoordeling van kunstwerken op 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. Voor kunstwerken die mogelijk kwetsbaar zijn ten aanzien van piping wordt voorafgaand aan pipingbeoordeling een beschrijving gemaakt van de geohydrologische situatie om mogelijke kwelwegen te identificeren. De geohydrologische berekening vindt plaats op basis van schematisatie naar een doorsnedemodel en (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 in een voorbeeldenboek zoals in de BOI opzet is voorzien.

Naar probabilistische methoden ter bepaling van de faalkans ten aanzien van overstroming ter plekke van kunstwerken als gevolg van piping onder beschouwing van geohydrologische omstandigheden zal in de toekomst meer onderzoek moeten plaatsvinden om dit aspect in de beoordelingspraktijk op een goede manier mee te kunnen nemen.

A.10 Literatuuroverzicht

- [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.
- [2] Leidraad kunstwerken, TAW, RWS, Mei 2003 [opmerking: Hierin staat behalve methode Lane in voorbeelden B8 en B9 verder niets over piping, onderloopsheid en heave 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] WBI-Onzekerheden Overzicht van belasting- en sterkteonzekerheden in het wettelijk beoordelingsinstrumentarium Versie 3. F. Diermanse. Deltares rapport 1220080-001-ZWS-0004. 132 pp. Delft. augustus 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] Factsheet D-Geo Flow, Voor toets op maat pipinganalyses. Deltares notitie 11205758-037-GEO-0001, medeauteurs: Rijkswaterstaat, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat en HWBP voor sterkte dijken. Delft. 25 mei 2020.
- [16] Schematiseringshandleiding piping, WBI 2017, RWS, mei 2021.
- [17] Schematiseringshandleiding piping bij kunstwerk, WBI 2017, RWS, mei 2021.
- [18] Handleiding Overstromingskansanalyse Dijken/Dammen, deel 2 Piping, BOI, RWS juli, 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 vervolgmecanismen, 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.

Nog niet beschouwde literatuur:

- [A] 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.

B Verslag Webinar 27 juni 2023

Zie opname Geohydrologie en piping bij kunstwerken 20230627:

<https://youtu.be/ac3W2S28EXY>

B.1 Toelichting John van Esch op geohydrologische modellering

- Schematiseringshandleiding.
- Databronnen.
- Grondwatermodellen.
- Segmentenmethode.
- Conclusies.

Zie PPT en notitie.

Relevante vragen van de deelnemers waren:

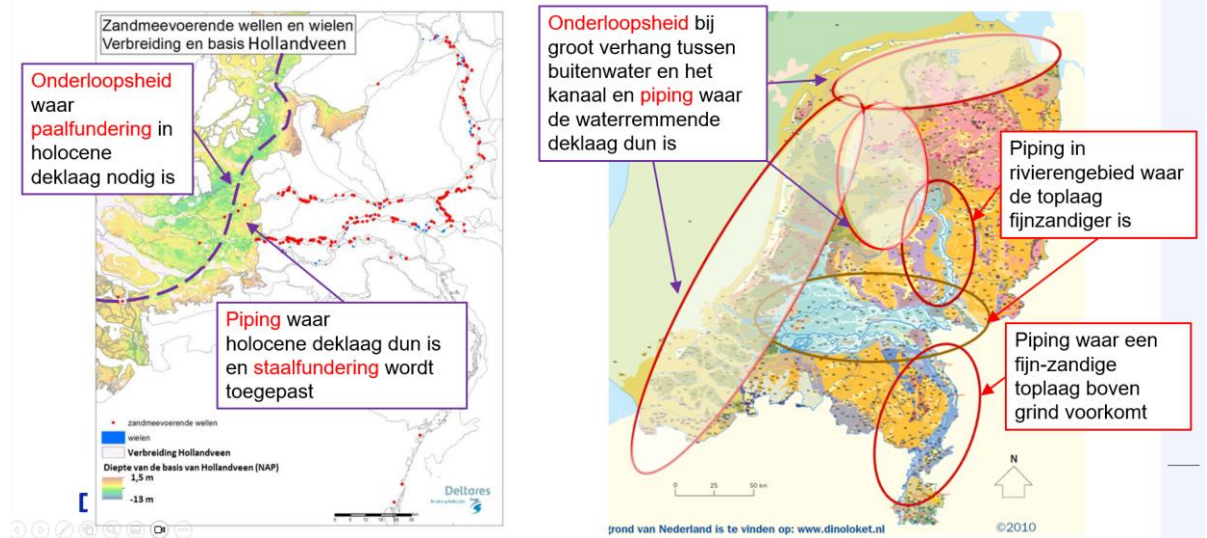
- Bouke van Meekeren (Antea): Meerlaagsheid en anisotropie hebben invloed op heave analyse. Worden die meegenomen in de segmentenmethode?
- Hendrik Kingma: Beschrijving segmentenmethode gezocht. Kan bij het segmentenmodel ook het verval over een kwelscherm in de buitenteen worden berekend? Tot nu toe was het lastig om de dempende werking van een kwelscherm in de buitenteen mee te nemen in berekeningen.
- Mark van der Valk: Heeft de 1 m niet meer te maken met het feit dat je het kunstwerk niet apart hoeft te beschouwen, maar enkel het grondlichaam. Het is inderdaad geen reden om de dijk als geheel als voldoende te beoordelen.
- Ron Stroet: Modellen zijn goed, metingen zijn beter. Zouden we bij kunstwerken waar het kritisch is, zeker in geval van permanent verval, niet meer hebben aan gerichte metingen, dan aan modellen met aannames?
- Bas Berbee: is een handmatig flownet ook een model?

B.2 Toelichting Hans van Meerten op bespreking met experts

B.2.1 Basissituaties en geohydrologie

Bespreking met experts, vraag 1

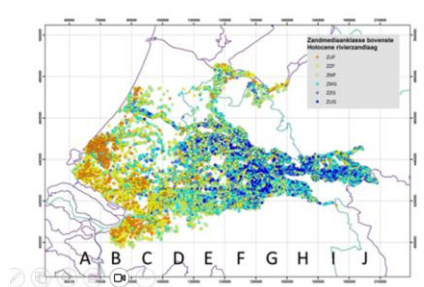
Aspecten tav geologie: gevoeligheid voor piping/onderloopsheid/heave



Bespreking met experts, vraag 1

Aspecten ivm geologie

- Aanwezigheid wellen (zand meevoerend?)
- Hedwigeproef getijdeafzettingen::
 - Gelaagdheid
 - Anisotropie in doorlatendheid
 - Cohesie door klei in zand, biofilms
 - Veel fijne fractie meer schuifweerstand
 - Complexe structuur remt erosie pipe



B.2.2 Bespreking met experts over modelmatige aanpak

Bespreking met experts, vraag 2

Heeft een geohydrologisch model in elke voorbeeldsituatie een toegevoegde waarde voor pipinganalyse van kunstwerken?

Aspecten ivm hydrologische situatie

- Hoogteligging en waterbeheersing:
 - Waterstanden en hoogteligging
 - Polders
 - Waterstandsverschillen
- Lokale topografische of geometrische situatie die grondwaterstand beïnvloedt:
 - Binnen- of buitenbocht van rivier
 - Langs- of kopsloten
 - Omliggend open water
 - Grootte achterliggende polder
 - Grondwateronttrekking
 - Etc

B.2.3 Belang geohydrologie

Geohydrologische condities en onzekerheden worden aangegeven.

Wanneer welk grondwatermodel?

Toetsspoor grof > fijn

- Grondwaterstroming schatten (www.grondwatertools.nl)
Is de stroming 2D of 3D? Diepe polders? Onttrekkingen?
- Grondwaterstroming benaderen obv metingen (DINO, peilbuizen)
- Grondwaterstroming analytisch berekenen bijv met AEM-instrumentarium (TIMml Mark Bakker)
[zie figuur 1 testcase in poldersituatie]
- Grondwaterstroming numeriek berekenen Segmenten methode (John van Esch)
- Verdeling grondwaterstand modelleren in gelaagde geometrie, 2D of 3D met:
EDM = Modflow of EEM = DGFlow
[zie figuur 2, testcase heave langs onderloopsheidscherm]

B.2.4 Typen kunstwerken

Heeft een geohydrologisch model in elke voorbeeldsituatie een toegevoegde waarde voor pipinganalyse van kunstwerken?

Aspecten ivm constructies

- Er zijn veel typen kunstwerken:
Spuisluis, Schutsluis, Uitwaterings/Inlaatsluis, Sifon, Gemaal, Keermuur, Coupure
- Risico korte constructies mogelijk belangrijkst vanwege verval over lengte
- Is de basisinformatie constructie, schermen en fundering op orde?
- Kennis over ondergrond en grondwater aanwezig?
- Monitoring mogelijk of model nodig?

B.2.5 Werken van grof naar fijn

Toetspoor grof > fijn

Eenvoudige toets/beslisregel

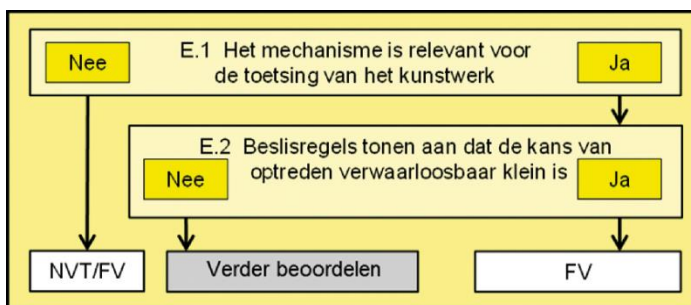
- Is de constructie in orde?
- Conceptueel model (relevantie piping, duur hoogwater, laagdikte)
- Visuele beoordeling situatie op kaart (geometrie, GIS)

Gedetailleerde toets

- Beschouwing kans op opbarsten, heave, kwelweglengte piping Lane
- Beschouwing d70 ism geologie en type gebied (zie figuur)

Toets op maat

- Beschouwing piping op basis van grondonderzoek, monitoring, geavanceerde berekeningen (geohydrologisch model), bewezen sterkte, probabilistische analyse

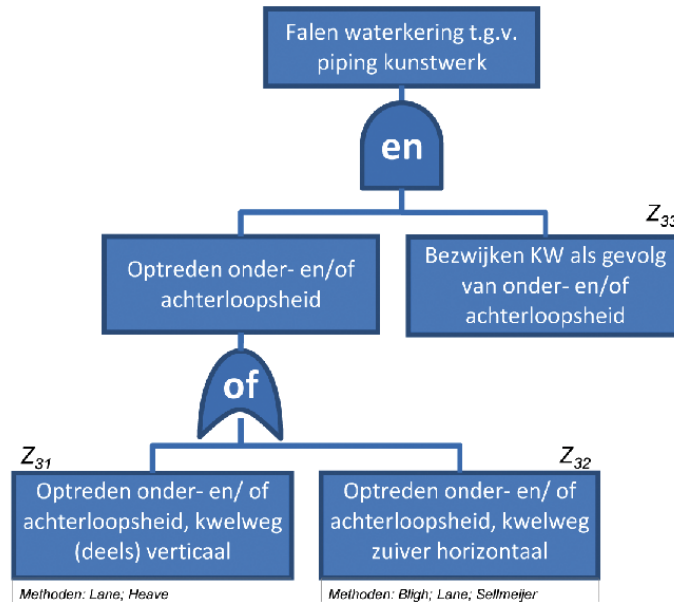


B.2.6 Faalscenario's

- Wat is het faalpad?
- Onzekerheid over aangebrachte schermen, zakking, onderloopsheid ...?
- Wat zijn de maatgevende omstandigheden?
- Beschouwing van scenario's.

B.2.7 Discussie

- Wat is de faalkansruimte?



Z_{xx}: *deelfaalmechanisme*

Figuur 19-2 Foutenboom voor mechanisme onder- en achterloopsheid.

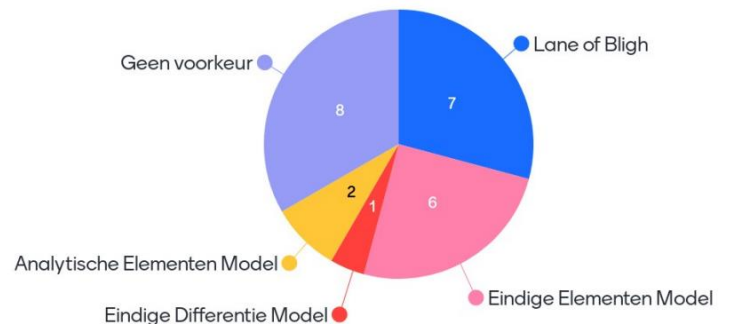
B.3 Aanbevelingen van deelnemers Webinar

Aan het eind van de sessie werden aan deelnemers enkele vragen gesteld per mentimeter. De resultaten zijn hierna kort vermeld:

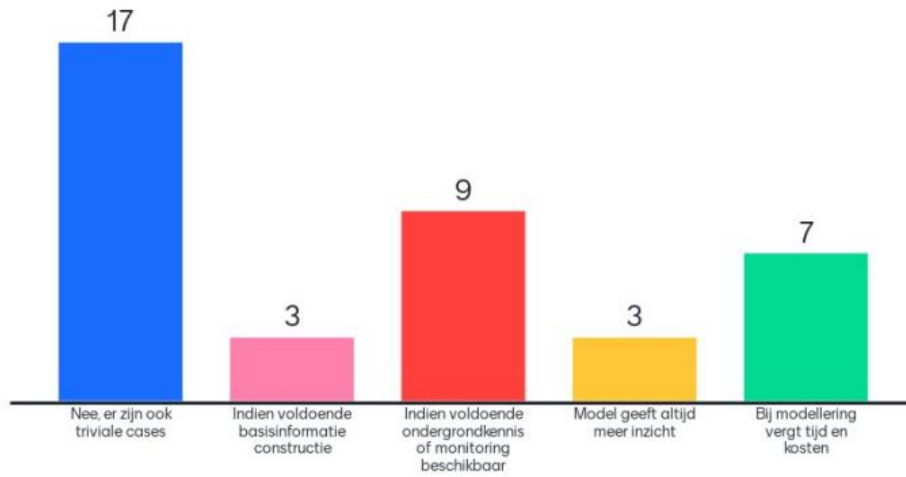
Vraag 1a. Zijn basisgevallen te onderscheiden qua geohydrologie waar een model nodig is bij beoordeling op piping?
Uitkomst: er moet worden gefocust op rivierengebied en verder zal een oordeel per type kunstwerk kunnen verschillen.



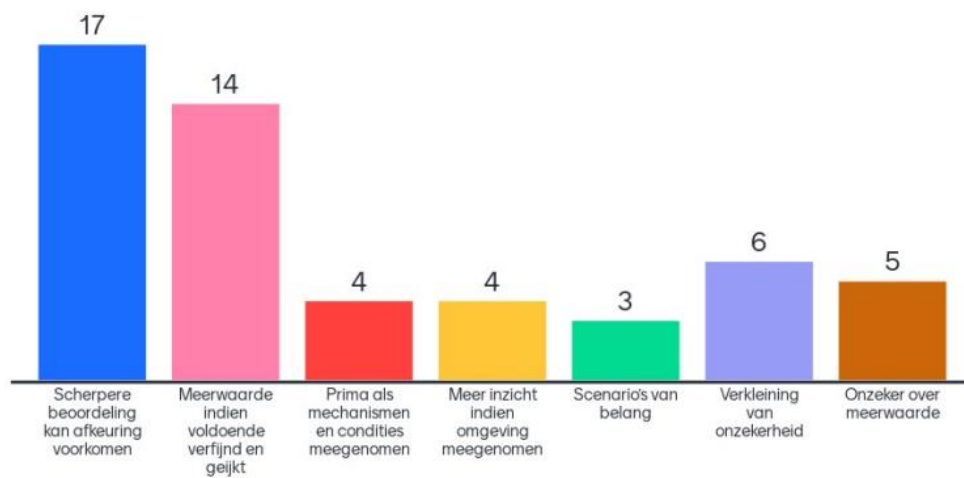
Vraag 1b. Voorkeur voor model? Antwoord: De voorkeuren lopen nogal uiteen en worden mogelijk ook ingegeven door de aard van de beoordeling.



Vraag 2. Heeft een geohydrologisch model in elke situatie een toegevoegde waarde voor pipinganalyse van kunstwerken?
Het antwoord geeft aan dat triviale cases moeten kunnen worden uitgefilterd en dat voor andere gevallen voldoende kennis aanwezig moet zijn om een goed model te creëren.



Vraag 3. Levert toepassing van een geohydrologisch model bij beoordeling van een kunstwerk op piping veel meerwaarde? (multiple true false).



Hier leiden we uit af dat een scherpere beoordeling gewenst is om afkeuring op goede gronden te doen of juist daarvan af te zien. Een model kan daarbij helpen als het maar correct is vervaardigd. Slechts enkele deelnemers zijn onzeker over de meerwaarde van inzet van een model.

Vraag 4. Vervolg van de studie:

Uit de 23 reacties wordt geconcludeerd dat het zwaartepunt volgens deelnemers vooral moet liggen op eenvoudiger model of beslisregels (7+3 van 23). En een relatie met de praktijk via monitoring is ook gewenst (8 van 23). Een klein deel vindt dat het anders moet of meer maatwerk moet zijn.



Vraag 5. Naar de oproep om input voor een voorbeeldenboek te leveren werd als volgt gereageerd:

- 1 iemand wil graag meedenken.
- 4 hebben voorbeelden uit eigen praktijk (meer mensen willen wel meedoen maar hebben geen tijd).

Tenslotte werden de volgende tips gegeven:

- Doorgaan met de studie.
- Wetenschappelijk (opm: vindt men dat te veel het geval?).
- Niet te wetenschappelijk aanpakken.
- Keep it simple.
- Kennis en praktijk.
- Samenwerken met De Innovatieversneller (DIV).
- Kijk naar project Meanderende Maas.
- Van grof naar fijn werken.
- Handelingsperspectief grof naar fijn.
- Praktisch toepasbaar.
- Metingen.
- Heterogeniteit.
- Model en meten.
- Intredeweerstand.

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