

## **SBW Piping Kunstwerken**

**KW6. Aanbevelingen toetsmethode onder- en achterloopsheid  
bij (historische) kunstwerken**

**Titel**

SBW Piping Kunstwerken

KW6. Aanbevelingen toetsmethode onder- en achterloopsheid bij (historische) kunstwerken

<b>Opdrachtgever</b>	<b>Project</b>	<b>Kenmerk</b>	<b>Pagina's</b>
Rijkswaterstaat Waterdienst	1200675-006	1200675-006-GEO-0001	68

**Samenvatting**

De thans door het Voorschrift Toetsen op Veiligheid (VTV) voorgeschreven methoden waarmee waterkerende kunstwerken getoetst moeten worden op piping en heave vereisen allemaal dat voldoende informatie over de constructie en conditie van de geotechnische en bouwkundige componenten onder en naast het kunstwerk beschikbaar is. Dit betreft met name de aanwezige kwelschermen. Dit geldt voor zowel de eenvoudige toetsregels in het huidige VTV als voor complexere modellen beschreven in het Technisch Rapport (TR) Zandmeevoerende wellen, waarvoor het gangbaar is grondwaterstromingsberekeningen uit te voeren. Bij historische kunstwerken ontbreekt de genoemde informatie echter vaak, met als gevolg dat voor deze kunstwerken veelal geen definitief toetsoordeel kan worden gegeven. Het project SBW Piping Kunstwerken is uitgevoerd met het doel een nieuwe gedetailleerde toetsmethode voor piping en heave voor kunstwerken te ontwikkelen, waarmee het aantal kunstwerken waarvoor geen oordeel kan worden gegeven kan worden teruggedrongen.

Uit het uitgevoerde onderzoek blijkt dat het, indien er twijfel bestaat over de toestand van kwelschermen, zeer lastig is daar door middel van metingen wel voldoende zekerheid over te krijgen. Reeds een klein gat in het kwelscherm, dat ten opzichte van een groot gat een relatief grote kans van voorkomen heeft, kan een grote invloed op het uittredeverhang en de stroomsnelheid van het grondwater hebben. Het invloedsgebied is echter zeer beperkt, waardoor detectie via metingen van stijghoogte of stromingsnelheid praktisch gezien vrijwel onmogelijk is. Anderzijds is ook onduidelijk of dergelijke zeer locale grote uittredeverhangen en stroomsnelheden door geconcentreerde stroming bij een gat tot uitspoeling van zand en uiteindelijk constructief bezwijken van het kunstwerk kunnen leiden. Voldoende kennis van het proces en praktische rekenregels- en modellen voor een beoordeling ontbreken. Het is dus lastig te bepalen of en wanneer er sprake is van een probleem. Dit maakt het lastig om te beoordelen of, indien wel gebruik gemaakt wordt van de beschikbare rekenregels en -modellen, tot een voldoende betrouwbaar toetsoordeel gekomen kan worden. Een in onderhavig rapport voorgestelde toetsing op de haalbaarheid van beheersmaatregelen tijdens hoogwatersituaties zou wel tot een voldoende betrouwbaar toetsoordeel kunnen leiden. Of een dergelijke oplossing vanuit beheersoogpunt praktisch is, is een andere vraag (valt buiten de scope van dit onderzoek).

Indien aantoonbaar gemaakt kan worden dat er wel voldoende aanleiding is om gebruik te maken van de bestaande toetsregels en -modellen, terwijl niet alle noodzakelijke gegevens van de onderbouw daarvoor beschikbaar zijn, wordt een stappenplan voorgesteld waarmee op basis van een combinatie van stijghoogtemetingen en modellering van het (verwachte) verhang over het kunstwerk een uitspraak kan worden gedaan over de veiligheid tegen piping en heave tijdens maatgevende omstandigheden. Voorts wordt een aanbeveling gedaan in het VTV of TR Zandmeevoerende wellen een verwijzing op te nemen naar een aantal door STOWA opgestelde stroomschema's, waarmee op basis van gemeenschappelijke en zichtbare kenmerken van een bepaalde groep kunstwerken ondersteuning geboden wordt om lacunes in de beschikbare gegevens van de constructie van een kunstwerk in te vullen.

Ten slotte worden aanbevelingen gedaan met betrekking tot vervolgonderzoek waarmee bestaande kennisleemten op het gebied van piping en heave bij kunstwerken verder kunnen worden gedicht. Hierbij gaat het met name om het beter benutten van de onzekere informatie die de verschillende meetmethoden opleveren met betrekking tot de toestand van kwelschermen, het reduceren van onzekerheden van parameters die het optredende en kritieke uittredeverhang in sterke mate beïnvloeden (zoals porositeit, doorlatendheid en intredeweerstand van het buitenwater) en een betere definitie van de grenstoestand bij piping en heave (dus wanneer van constructief bezwijken sprake is).

**Titel**

SBW Piping Kunstwerken

KW6. Aanbevelingen toetsmethode onder- en achterloopsheid bij (historische) kunstwerken

**Opdrachtgever**

Rijkswaterstaat Waterdienst

**Project**




1200675-006

**Kenmerk**

1200675-006-GEO-0001

**Pagina's**

63

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
4	16-12-2009	Dr. G.A. van den Ham		Ir. E.O.F. Calle		Ing. A.T. Aantjes	

**Status**

definitief

## Inhoud

<b>1 Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1 Inleiding	1
1.2 Probleemstelling	1
1.3 Doelstelling en onderzoeksvragen	2
1.4 Omschrijving SBW Piping Kunstwerken	3
1.5 Opzet rapport	4
<b>2 Beschrijving mechanismen</b>	<b>7</b>
2.1 Overzicht	7
2.2 Heave	8
2.3 Piping	9
<b>3 Rekenmethoden beoordeling optreden heave en piping</b>	<b>11</b>
3.1 Inleiding	11
3.2 Empirisch-statistische modellen voor bezwijken door piping of heave	11
3.2.1 Bligh (1910)	12
3.2.2 Lane (1935)	13
3.2.3 Beschouwing regels van Lane en Bligh met betrekking tot Nederlandse praktijk	14
3.3 Rekenmodel van Sellmeijer voor piping (horizontale terugschrijdende erosie)	15
3.4 Verticale piping	15
3.5 Rekenmodellen voor heave	16
3.5.1 Bepaling optredend verticaal uittredeverhang	16
3.5.2 Onzekerheden optredend uittredeverhang	17
3.5.3 Bepaling kritiek (of toelaatbaar) verticaal verhang bij verticale stroming	17
3.6 Filterregels	19
<b>4 Oorzaken toetsscore “geen oordeel”</b>	<b>21</b>
4.1 Inleiding	21
4.2 Oorzaken “geen oordeel” op piping en heave bij waterkerende kunstwerken.	21
<b>5 Huidige toetsing: VTV en TR Zandmeevoerende wellen</b>	<b>23</b>
5.1 Inleiding	23
5.2 VTV2006	23
5.3 TR Zandmeevoerende wellen	24
<b>6 Methoden ter bepaling van de maatgevende kwelweg(en) (toestand kwelschermen en potentiële in- en uittredepunten)</b>	<b>27</b>
6.1 Inleiding	27
6.2 Methoden ter bepaling van (potentiële) lekwegen	28
6.2.1 Archiefonderzoek	28
6.2.2 Stroomschema's	28
6.2.3 Inschatting onderhoudsstaat en actuele sterkte van kwelschermen	29
6.2.4 Visueel onderzoek	31
6.2.5 Visueel onderzoek onder water	31
6.2.6 Grondonderzoek	33
6.2.7 Meting van grondwaterstanden en -stijghoogten	33

6.2.8	Camerasonde	35
6.2.9	Tracermethoden	35
6.2.10	Geofysische methoden	35
6.3	Beoordeling methoden ter bepaling van (potentiële) lekwegen	37
6.3.1	Bepaling aanwezigheid kwelschermen	37
6.3.2	Bepaling dimensies kwelschermen	37
6.3.3	Detectie (geconcentreerde) lekken in kwelschermen	38
6.3.4	Overzicht beoordeling methoden	39
6.4	Maatregelen	40
6.5	Afwegingsmethode	41
<b>7</b>	<b>Toetsing op haalbaarheid beheersmaatregelen in actuele hoogwatersituaties</b>	<b>43</b>
7.1	Schadebeelden tijdens hoogwater	43
7.2	Beheersmaatregelen tijdens hoogwater	44
7.3	Mogelijke procedures bij toetsing op haalbaarheid beheersmaatregelen	44
<b>8</b>	<b>Concluderende aanbevelingen voor aanpassing toetsing op piping en heave bij waterkerende kunstwerken</b>	<b>45</b>
8.1	Inleiding	45
8.2	Stappenplan toetsing waterkerende kunstwerken	45
8.3	Voorstel aanpassingen TR Zandmeevoerende wellen	48
8.4	Voorstel aanpassingen VTV	49
8.5	Overige aanbevelingen met betrekking tot volgende toetsronde	49
<b>9</b>	<b>Aanbevelingen voor vervolgonderzoek</b>	<b>51</b>
<b>10</b>	<b>Literatuur</b>	<b>53</b>
	<b>Bijlage(n)</b>	
<b>A</b>	<b>A-1</b>	

# 1 Inleiding

## 1.1 Inleiding

De thans door het Voorschrift Toetsen op Veiligheid voorgeschreven methoden waarmee waterkerende kunstwerken getoetst moeten worden op piping en heave vereisen allemaal dat voldoende informatie over de constructie en conditie van de geotechnische en bouwkundige componenten onder en naast het kunstwerk beschikbaar is. Dit betreft met name de aanwezige kwelwanden. Dit geldt voor zowel de eenvoudige toetsregels in het huidige VTV (VTV2006) als voor complexere modellen beschreven in het Technisch Rapport (TR) Zandmeevoerende wellen (TAW 1999), waarvoor het gangbaar is grondwaterstromingsberekeningen uit te voeren. Bij historische kunstwerken ontbreekt de genoemde informatie echter vaak, met als resultaat dat voor historische kunstwerken veelal geen definitief toetsoordeel kan worden gegeven. Daarom is in 2008 het project SBW Piping Kunstwerken gestart, met het doel een nieuwe gedetailleerde toetsmethode voor piping en heave voor kunstwerken te ontwikkelen, waarmee het aantal kunstwerken waarvoor geen oordeel kan worden gegeven kan worden teruggedrongen. Het project is in een aantal deelprojecten uitgevoerd, waarvan de resultaten in deelrapporten zijn vastgelegd. Onderhavig rapport is het eindrapport van het project, waarin de resultaten van de deelprojecten samenkomen. Tevens is getracht de enigszins versnipperd aanwezige, al bestaande kennis op het gebied van toetsing van waterkerende kunstwerken op piping en heave te bundelen.

In dit eindrapport zijn aanbevelingen opgenomen op basis waarvan het VTV en het TR Zandmeevoerende wellen zouden kunnen worden aangepast.

Aanpassingen voor het nieuwe VTV, dat eind 2011 gereed moet zijn, worden uitgevoerd in het project WTI, dat daarvoor put uit de diverse SBW projecten. Naar verwachting zal een nieuwe versie van het TR Zandmeevoerende wellen, waarin ook resultaten uit het project SBW Piping Hervalidatie zullen worden opgenomen, eind 2010 gereed zijn. Het TR valt onder de verantwoordelijkheid van de ENW.

Een alternatief is om voor piping en heave bij waterkerende kunstwerken een apart TR op te stellen, of hiervoor een nieuw hoofdstuk in de Leidraad Kunstwerken op te nemen. Voor beide opties zou dit rapport als basis kunnen dienen. Van belang is dat in het volgende VTV voor wat betreft de gedetailleerde (en eventueel geavanceerde) toetsing op piping en heave bij kunstwerken, naar het juiste TR of leidraad wordt verwezen.

## 1.2 Probleemstelling

In het VTV2006 wordt de toetsing van waterkerende kunstwerken in Katern 7 behandeld. Daarin staat dat drie beoordelingsporen dienen te worden doorlopen:

- hoogte (HT)
- stabiliteit en sterkte (ST)
- betrouwbaarheid sluiting (BS)

In het beoordelingspoor ST moeten de volgende onderdelen getoetst worden:

- stabiliteit van constructie en grondlichaam (STCG);
- sterkte van (waterkerende) constructieonderdelen (STCO);
- piping en heave (STPH);
- stabiliteit van het voorland (STVL).

Voor het doorlopen van de onderdelen van de sporen HT, BS en ST die betrekking hebben op de *bovenbouw* van het kunstwerk (d.w.z. het gedeelte van het kunstwerk dat zich boven

de grond bevindt) kunnen in het algemeen op relatief eenvoudige wijze voldoende gegevens worden verzameld om tot een oordeel te komen. Voor het beoordelingspoor ST blijkt het in het geval van historische kunstwerken echter vaak moeilijk voldoende inzicht te krijgen in de aanwezigheid, omvang en conditie van de *onderbouw* van het kunstwerk, omdat de ontwerp- en uitvoeringsdocumenten niet meer te achterhalen zijn. Onder *onderbouw* verstaat men de geotechnische en bouwkundige componenten onder en naast het kunstwerk, meestal de fundering en de onder- en achterloopsheidsschermen. Vaak kan geen definitief toetsingsoordeel worden gegeven omdat maatgevende kwelwegen niet worden gevonden.

Een score “geen oordeel” kan betekenen dat er sprake is van een gevaarlijke en daarmee ongewenste situatie. Dit probleem kan zich voordoen bij zowel stabiliteit van constructie en grondlichaam (STCG), sterkte van (waterkerende) constructieonderdelen (STCO) als piping en heave (STPH). Dit rapport richt zich alleen op het onderdeel piping en heave. De overige onderdelen, waaronder de fundering, worden in het kader van het reeds genoemde project WTI opgepakt. De resultaten van dat onderzoek zullen in de loop van 2010 beschikbaar komen.

### 1.3 Doelstelling en onderzoeksvragen

Het doel van onderhavig onderzoek is tot een voorstel te komen om de huidige toetsvoorschriften voor piping en heave bij waterkerende kunstwerken zodanig aan te passen dat in de volgende toetsronde het aandeel “geen oordeel” voor dit onderdeel wordt teruggedrongen ten opzichte van de laatste toetsronde. Voorbeelden van zulke waterkerende kunstwerken zijn duikers, sluizen, zinkers en doorlaatwerken. De resultaten van dit onderzoek kunnen als basis dienen voor aanpassing van de toetsvoorschriften in het VTV en TR Zandmeevoerende wellen.

Om bovenstaand doel te bereiken zijn volgende onderzoeksvragen geformuleerd:

- 1 Wat zijn de belangrijkste oorzaken voor de score “geen oordeel” voor het onderdeel piping en heave bij waterkerende kunstwerken in de laatste toetsronde?
- 2 Op welke wijze kan aanvullende informatie over de onderbouw van het historische kunstwerk worden verkregen, waardoor de toetsing beter kan worden uitgevoerd en meer historische kunstwerken kunnen worden beoordeeld op heave en piping? Dit moet leiden tot een *praktische* toetsmethode, d.w.z. een, volgens de definities van het VTV, eenvoudige en/of gedetailleerde toetsmethode die uitvoerbaar is zonder specialistische kennis of zulke hoge kosten met zich meebrengt dat verbetering of renovatie van het kunstwerk meer voor de hand ligt.

Reeds aan het begin van het SBW Piping Kunstwerken onderzoek was duidelijk dat het onmogelijk zou zijn om een praktische, generieke methode te bedenken waarmee voor alle waterkerende kunstwerken voor wat betreft piping en heave tot een toetsoordeel zou kunnen worden gekomen. Daarom is als derde doelstelling geformuleerd:

- 3 Welke mogelijkheden zijn er om (op pragmatische wijze) tot een oordeel te komen, als het toch niet mogelijk blijkt voldoende informatie over de onderbouw te verkrijgen?

Hoofddoel van het onderzoek is het terugdringen van het aandeel “geen oordeel”. Echter ook onterechte toetsoordelen ten gevolge van onjuistheden en/of onbetrouwbaarheid in de voorgeschreven methoden zijn zeer ongewenst: onterecht goedkeuren leidt tot een onveilige situatie, onterecht afkeuren tot onnodige kosten voor maatregelen voor verbetering of herstel van het kunstwerk. Met betrekking tot dit probleem zijn de volgende onderzoeksvragen toegevoegd:

- 4 Welke kennisleemten op het gebied van voorspelling van heave en piping bij kunstwerken bestaan er nog?
- 5 Wat zou gedaan moeten worden om deze te dichten?

Momenteel worden in Nederland kwelschermen vrijwel alleen onder waterkerende kunstwerken toegepast. Het is echter niet uit te sluiten dat kwelschermen onder dijken in de toekomst vaker toegepast zullen worden. Dit heeft ook de Commissie Boertien in 1994 aanbevolen als mogelijke optie voor “uitgekiend ontwerpen” (TAW, 1998). De situatie bij één of meer kwelschermen onder een dijk zal in veel opzichten overeenkomen met een waterkerend kunstwerk met één of meer kwelschermen. Dit betekent dat een robuuste toetsmethode op piping en heave voor een situatie met kwelschermen in de toekomst alleen maar in relevantie zal toenemen.

Behalve in zand kan piping ook optreden in cohesief materiaal (met name in dispersieve kleigrond) en mogelijk veen (Segers, 2009). Er bestaan echter nog geen bruikbare methoden waarmee kwelwegen die geheel langs klei of veen gaan kunnen worden beoordeeld. Hierop zal in de aanbevelingen (hoofdstuk 9) worden teruggekomen. Dit rapport richt zich alleen op piping en heave in zand.

Het onderzoek heeft alleen betrekking op kunstwerken met een waterkerende functie. Niet inbegrepen zijn bijvoorbeeld pijpleidingen of doorpersingen door waterkeringen, waarbij ook piping kan optreden (bijvoorbeeld geconcentreerde waterstroming langs de leiding of piping geïnitieerd door een lek in een waterleiding).

#### 1.4 Omschrijving SBW Piping Kunstwerken

In onderhavig rapport zijn de relevante resultaten opgenomen die binnen de verschillende onderdelen van SBW Piping Kunstwerken tussen mei 2008 en oktober 2009 zijn geproduceerd. Onderstaande lijst somt de belangrijkste onderdelen op, inclusief verwijzingen naar de onderliggende rapporten die te vinden zijn in de literatuurlijst (hoofdstuk 10):

- Een onderzoek naar de oorzaken van de score “geen oordeel” op piping en heave bij waterkerende kunstwerken in de laatste toetsronde, op basis van interviews bij alle waterschappen. Dit onderzoek is uitgevoerd door Royal Haskoning (Sjenitzer 2009).
- Uitvoering van 11 kijkproeven op kleine schaal ter bestudering van het proces van kanaalvorming (onderloopsheid) voor een situatie met kwelscherm. Belangrijkste variabelen in de proeven waren het type zand en de lengte van het kwelscherm. Verder is gekeken naar een situatie met een opening in het kwelscherm. Voor gedetailleerde informatie wordt verwezen naar de factual reports Van den Ham & Kruse (2009a) en Van den Ham & Kruse (2009b).
- Een analyse van genoemde kijkproeven, met daarin:
  - een kwalitatieve beoordeling van de waarnemingen;
  - de gemeten kritieke verhangen waarbij eerste kanaalvorming, fluïdisatie bij het kwelscherm en hydraulische kortsluiting optreedt, en de gemeten waterspanningen rondom het kwelscherm, zijn vergeleken met heave berekeningen uitgevoerd met het 2D grondwaterstromingsmodel MSeep en het kritieke verhang berekend met de regel van Lane. Door het geringe aantal proeven konden slechts zeer beperkte conclusies worden getrokken.

Voor details wordt verwezen naar het rapport voor dit onderdeel: Van den Ham & Kruse (2009c).

- Het uitvoeren van een studie naar de invloed van onzekerheden met betrekking tot de toestand van het kwelscherm op het optredende uittredeverhang, met behulp



van een (3D) numeriek grondwaterstromingsmodel. Onzekerheden betreffen name lekken van verschillende vorm, waarvan wordt aangenomen dat die vaak voorkomen in kwelschermen onder historische waterkerende kunstwerken. Doel van de deze studie was niet alleen de gevoeligheid van het uittredeverhang voor lekken in het kwelscherm te bepalen, maar ook inzicht te krijgen of en in hoeverre het mogelijk is lekken, waarvan de invloed van belang blijkt voor het optreden van piping of heave, te detecteren met de gangbare (en bruikbare) detectiemethoden, zoals het meten van afwijkingen in stijghoogte met behulp van rond het kunstwerk geplaatste peilbuizen (hierop wordt in hoofdstuk 6 verder ingegaan). Deze studie is opgedeeld in 3 fasen:

- Er zijn metingen uitgevoerd bij de historische schutsluis te Hasselt (Overijssel), waarbij in de laatste toetsronde de toets op piping en heave problematisch was in verband met twijfels over de aanwezigheid, afmetingen en toestand van de kwelschermen. Gezien deze problemen en het gegeven dat de ondergrond als pipinggevoelig kan worden beschouwd, werd deze sluis als representatief voor de Nederlandse situatie en als geschikte case voor de studie beschouwd. Voor details met betrekking tot de metingen, waarvan omvangrijke peilbuismetingen de belangrijkste zijn, wordt verwezen naar het Veenbergen (2009) en de daarin genoemde onderliggende rapporten.
  - Het kalibreren van een 3D numeriek grondwaterstromingsmodel (MODFLOW) aan de gemeten waterstanden en stijghoogten bij de hierboven beschreven sluis bij open sluisdeuren (dus geen verhang). Tevens was een validatie van het model voorzien bij gesloten sluisdeuren, dus als er een verhang over de sluis staat. Vanwege het, tegen de verwachting in, niet optreden van een hoogwater binnen de meetperiode, is deze situatie helaas niet opgetreden. Voor meer informatie wordt verwezen naar Veenbergen (2009).
  - Het uitvoeren van de gevoeligheidsanalyse. Het onderzoek is zodanig opgezet dat een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd kon worden met het aan de metingen gekalibreerde en gevalideerde model van de sluis te Hasselt. Omdat een validatie om voornoemde redenen niet mogelijk bleek, is van deze aanpak afgeweken. Het model is daarom enigszins vereenvoudigd, waardoor sneller gevarieerd kon worden in onzekere parameters waarvan de invloed op de gevoeligheid van het uittredeverhang bepaald is.
- Rapportage waarin alle onderzoeksresultaten verwerkt zijn. Onderhavig rapport.

## 1.5 Opzet rapport

Het rapport is zodanig opgezet, dat de beantwoording van de in de vorige paragraaf genoemde onderzoeksvragen in goede samenhang geschiedt.

Hoofdstuk 2 geeft een kwalitatieve beschrijving van de processen en (deel-)mechanismen die bij heave en piping bij waterkerende kunstwerken kunnen optreden. Hierbij wordt de kennis meegenomen die in de kijkproeven is opgedaan. In hoofdstuk 3 worden de thans beschikbare methoden en rekenregels beschreven waarmee deze mechanismen ten behoeve van de toetsing beoordeeld kunnen worden, inclusief een kritische beschouwing met betrekking tot hun beperkingen.

In hoofdstuk 4 wordt ingegaan op de belangrijkste oorzaken voor het grote aantal ontbrekende toetsoordelen in de laatste toetsronde voor wat betreft piping en heave bij waterkerende kunstwerken.

Hoofdstuk 5 geeft een overzicht van de huidige opzet van de toetsing (VTV en TR Zandmeevoerende wellen).

In hoofdstuk 6 wordt een inventarisatie gemaakt van methoden en hulpmiddelen voor het bepalen van maatgevende kwelweg(en) of voor het maken van een grondwaterstromingsanalyse. Hierbij gaat het met name om het vaststellen van intrede- en uittredepunten bij maatgevende omstandigheden en het verkrijgen van inzicht in de aanwezigheid, locatie, dimensie en toestand van kwelschermen. Voorts worden deze methoden met betrekking tot toepasbaarheid bij waterkerende kunstwerken (kosten, nauwkeurigheid) beoordeeld. Dit is belangrijke informatie voor een eventuele afweging tussen (kostbaar) nader onderzoek om tot een toetsoordeel te komen of maatregelen om de constructie te versterken. Hoofdstuk 6 gaat tevens in op mogelijke maatregelen en op een methode om genoemde afweging te maken.

In hoofdstuk 0 wordt een voorstel tot toetsing op de haalbaarheid van beheersmaatregelen bij een hoogwatersituatie gedaan, naar analogie van de toetsing op betrouwbaarheid sluitingen.

In hoofdstuk 8 worden op basis van de voorgaande hoofdstukken voorstellen gedaan tot aanpassing van de gedetailleerde toetsing zoals die thans in het VTV en het TR Zandmeevoerende wellen is voorgeschreven.

In hoofdstuk 9 worden aanbevelingen gedaan voor vervolgonderzoek na 2010 (dus na de volgende toetsronde).



## 2 Beschrijving mechanismen

Dit hoofdstuk beschrijft de processen en deelmechanismen die kunnen optreden bij heave en piping bij waterkerende kunstwerken. In hoofdstuk 3 zullen vervolgens de beschikbare methoden en rekenregels beschreven worden waarmee aan deze processen en deelmechanismen ten behoeve van de toetsing gerekend kan worden.

### 2.1 Overzicht

Kwelschermen hebben de functie de weerstand die een kwelstroom ondervindt te vergroten. Het effect is dat de stroomsnelheid en daardoor de kans op erosie van de zandlaag afneemt. Bij een kunstwerk met één of meer kwelschermen kunnen er twee mechanismen optreden die leiden tot verlies van het waterkerende vermogen van het kunstwerk:

- 1 Bij een opwaartse (verticale) kwelstroom, meestal achter een kwelscherm, nemen de korrelspanningen in het zand af. In het uiterste geval vallen de korrelspanningen geheel weg, waardoor feitelijk een drijfzandsituatie ontstaat. Dit mechanisme wordt heave genoemd. Dit kan twee gevolgen hebben (Calle & Sellmeijer, 1998):
  - 1 een drijfzandsituatie treedt op, waardoor de op de zandlaag gelegen bescherming in ongerede raakt. Indien sprake is van een granulair stortebed, kan dit negatieve gevolgen hebben voor de eventuele filterwerking.
  - 2 door reductie van de effectieve korrelspanning in het gefluidiseerde zand naar 0 wordt het krachterevenwicht op het kwelscherm verstoord. Hierdoor kan het scherm horizontaal verplaatst worden waardoor de aansluiting tussen scherm en constructie verstoord wordt, met desastreuze gevolgen, zoals piping (zie volgende punt).
- 2 Bij voldoende hoge stroomsnelheid van het water dat onder of langs de constructie stroomt kunnen gronddeeltjes worden meegevoerd. Erosie van zand begint op de plaats waar de kwelstroom vanuit de zandlaag aan het oppervlak komt, of - indien een afdekkende laag aanwezig is - in het verbindingskanaal tussen de zandlaag en het oppervlak komt. Daarom wordt ook wel van terugschrijdende erosie gesproken. Andere begrippen voor hetzelfde proces zijn piping en sijn(er)osie. Indien een doorgaand erosiekanaal onder het kunstwerk door ontstaat spreekt men van onderloopsheid. Indien het kanaal door kwelstroming om de kwelschermen heen ontstaat wordt gesproken van achterloopsheid. Een combinatie is ook mogelijk. De maatgevende kwelweg moet door middel van een driedimensionale kwelweganalyse worden bepaald. Piping kan leiden tot holle ruimten onder of naast de constructie waardoor deze verzwakt of beschadigd raakt. Theoretisch kan terugschrijdende erosie ook in verticale richting optreden (dus van boven naar beneden). Het kan echter aangetoond worden dat bij opwaartse kwelstroom veel eerder heave zal optreden dan piping (Van Rossum & Zanen, 1959, zie paragraaf 3.4).
- 3 Recentelijk uitgevoerd experimenteel onderzoek in het kader van SBW Hervalidatie Piping laat in ieder geval in kleine schaal proeven zien dat het pipingproces bij een losse pakking van het zand ook aan de bovenstroomse zijde kan beginnen (Van Beek & Knoeff, 2009). Mogelijk wordt dit mechanisme al dominant bij een relatieve dichtheid die kleiner is dan 60%. In veel gevallen zal de relatieve dichtheid van zand onder waterkerende kunstwerken (natuurlijk of aangebracht) lager zijn. In vervolgonderzoek in SBW 2011-2016 zal deze "voorwaartse" piping verder onderzocht worden.

Indien bij het uittredepunt een filterconstructie aanwezig is, kan uitspoelen van zand uitgesloten worden, mits aan de filterregels voldaan wordt (zie paragraaf 3.6).

Navolgend worden de mechanismen heave en piping (terugschrijdende erosie) nader toegelicht.

## 2.2 Heave

Bepalend voor dit mechanisme is de toename van waterspanningen, vanaf maaiveld met de diepte toenemend in het zand achter het kwelscherm. Indien geen kwelstroming aanwezig is, is die toename hydrostatisch. In het zand is dan korrelspanning aanwezig. Bij een opwaartse kwelstroom zijn de waterspanningen groter dan hydrostatisch (er is dus wateroverspanning), wat leidt tot afname van de korrelspanningen. Een grenstoestand wordt bereikt wanneer de toename van de wateroverspanning ten gevolge van stromingdruk met de diepte gelijk is aan de toename van de korrelspanning voor het geval dat de waterspanning hydrostatisch zou zijn. De toename van de wateroverspanning kan worden uitgedrukt in termen van de verticale gradiënt van de grondwaterpotentiala. De gradiënt waarbij de grenstoestand optreedt wordt kritieke gradiënt genoemd.

Het is de vraag of de hierboven gedefinieerde grenstoestand de uiteindelijke effecten, zoals er twee genoemd zijn onder punt 1 in de vorige paragraaf, voldoende afdekt. Calle & Sellmeijer (1998) merken op dat beide effecten ook al kunnen optreden voordat de korrelspanningen aan benedenstroomse kant van het kwelscherm wegvallen. Mogelijk wordt in de toetsing, waar een veiligheidsfactor variërend tussen 1,7 (zeer losse pakking) en 2,3 (zeer vaste pakking) wordt voorgeschreven, het optreden van de effecten, nog voordat fluïdisatie optreedt, volledig afgedekt, maar aangetoond is dit niet. Een heldere formulering van de relevante grenstoestand wordt door hun daarom aanbevolen.

In zand met een vastere pakking is voor fluïdisatie een toename van het poriënvolume nodig. Uit fluïdisatieproeven in zandkolommen door o.a. Müller-Kirchenbauer (1964) blijkt dat in homogeen zand een met verweking gepaard gaande toename van het poriënvolume plaatsvindt, pas nadat het hierboven beschreven kritische verhang bereikt is. Deze verweking begint aan de onderkant van het zandmonster, waarna de grens tussen het verweekte en nog niet-verweekte zand door het doorstroomde zandlichaam continue naar boven loopt. Het oppervlak van het zandlichaam komt daarbij omhoog (dit opheffen van het zandoppervlak is de oorspronkelijke betekenis van heave). Als het gehele zandlichaam gefluïdiseerd is spreekt men van hydraulische grondbreuk. Meestal is het verhang om tot volledige fluïdisatie en daarmee hydraulische grondbreuk te komen hoger dan het kritieke verhang zoals in de voorgaande alinea's besproken, en hangt af van de initiële relatieve dichtheid van het te fluïdiseren zand en van de eigenschappen (m.n. doorlatendheid) van zand dat zich vóór het te fluïdiseren zand bevindt. Voor zand, dat om te kunnen fluïdiseren zijn poriënvolume moet vergroten, zou mogelijk een andere grenstoestand kunnen gelden.

Indien er sprake is van geconcentreerde lekkage door het kwelscherm ten gevolge van een gat, zal dit leiden tot een verlaging van het gemiddelde verhang over het gehele kwelscherm. In zoverre werkt geconcentreerde lekkage dus positief op de in de vorige paragraaf onder punt 1 genoemde effecten. Voor een toetsing op heave hoeft dus geen rekening gehouden te worden met mogelijke gaten in het kwelscherm. Er kan echter wel een probleem ontstaan voor piping.

### 2.3 Piping

Met piping (sijperosie, onderloopsheid) wordt het ontstaan van holle ruimte onder een dijk of kunstwerk, ten gevolge van geconcentreerde kwelstroom waarbij gronddeeltjes worden meegevoerd, bedoeld. Hierbij kunnen twee belangrijke mechanismen onderscheiden worden:

- 1 suffosie (of interne erosie), waarbij alleen de fijnere fractie tussen de grovere fractie wordt weggespoeld en waarbij de grove fractie, althans in eerste instantie, het korrelskelet in stand houdt.
- 2 terugschrijdende erosie, waarbij het korrelskelet vanaf het begin door het wegspoelen van korrels wordt verstoord.

Uitgaande van homogeen zand, bepaalt de mate van uniformiteit welk van de twee mechanismen optreedt. Suffosie kan alleen optreden in zand met een sterk niet-uniforme korrelverdeling. In COW (1977) wordt gesteld dat er gevaar voor suffosie is als  $D_{60}/D_{10} > 20$ . Indien  $D_{60}/D_{10}$  tussen 10 en 20 ligt is er sprake van een overgangsgebied en bij een waarde kleiner dan 10 kan suffosie uitgesloten worden. Vrijwel alle in Nederland voorkomende watervoerende zandlagen onder primaire waterkeringen bestaan uit zand waarvan de  $D_{60}/D_{10}$  kleiner is dan 10. Suffosie speelt in Nederland zeer waarschijnlijk dan ook geen rol. Dat geldt wel voor terugschrijdende erosie, dat plaatsvindt in meer uniform zand. Voor een gedetailleerde beschrijving van het mechanisme van terugschrijdende erosie wordt verwezen naar het TR Zandmeevoerende wellen en de rapporten van SBW Hervalidatie Piping.

In paragraaf 2.1 is reeds melding gemaakt van het optreden van “voorwaartse piping”, dat is waargenomen in kleinschalige proeven op losgepakt zand die zijn uitgevoerd in het kader van SBW Hervalidatie Piping. In vervolgonderzoek in SBW Piping 2011-2016 zullen de daarbij optredende mechanismen (met name verweking) verder onderzocht worden.



### 3 Rekenmethoden beoordeling optreden heave en piping

#### 3.1 Inleiding

Voor de veiligheidscontrole ten aanzien van piping en heave bij waterkerende kunstwerken zijn verschillende rekenmodellen en rekenregels beschikbaar. In dit hoofdstuk zullen die worden beschreven. Tevens wordt per methode een kritische beschouwing gegeven over hun bruikbaarheid voor de toetsing (betrouwbaarheid methode, relevantie voor Nederlandse ondergrond, etc.).

Voor zowel de beoordeling op heave als piping kunnen de beschikbare methoden of rekenregels in twee groepen verdeeld worden:

- *eenvoudige, empirisch-statistische rekenregels*. Dit zijn de klassieke rekenregels die gebaseerd zijn op enkele globale indicaties van de geometrie van een stuwdam en ondergrond en het percentage onderzochte dammen dat gedurende zijn functioneren (d.w.z. tot het tijdstip van het betreffende onderzoek) bezweek. Algemeen kenmerk is dat ze eenvoudig van opzet zijn en dat weinig parameters nodig zijn, maar ook dat ze (waarschijnlijk) betrekkelijk conservatief zijn. Deze rekenregels worden gebruikt als eerste (ruwe) ontwerpcontrole of veiligheidstoetsing van nieuwe of bestaande waterkeringen. Wanneer blijkt dat de veiligheid van het ontwerp of de bestaande constructie volgens deze rekenregels voldoende gewaarborgd is, kan de controle hiermee in beginsel worden afgesloten (ervan uitgaande dat deze regels voldoende conservatief zijn. Hierop wordt later in de tekst verder ingegaan).
- *geavanceerde rekenmodellen*. Dit zijn in het algemeen de rekenmodellen en -regels die door het onderzoek in de afgelopen decennia beschikbaar zijn gekomen waarbij grondwaterstroming onder en langs de constructie het uitgangspunt is voor de beoordeling van het gevaar op heave of piping. In het algemeen zijn deze modellen en rekenregels ingewikkelder van opzet en zijn er meer parameters nodig voor een controleberekening (bijvoorbeeld de vormgeving van de kwelschermen of verschillen in doorlatendheid van de grond, hoewel dit laatste zeer lastig te bepalen is). Juist daardoor kan beter worden afgeschat welke parameters de uitkomst van de controleberekening sterk beïnvloeden en of het zin heeft deze door grondonderzoek nauwkeuriger vast te stellen of, voor zover het ontwerpgrootheden betreft, in de gewenste richting bij te stellen. Dit leidt tot scherpere toetsingen en, afhankelijk van de situatie, uitgekiender ontwerpen.

#### 3.2 Empirisch-statistische modellen voor bezwijken door piping of heave

De belangrijkste en meest gebruikte rekenregels die gebaseerd zijn op een statistische analyse van bezwijkgevallen van stuwdammen zijn die van Bligh (1910) en Lane (1935). Beide rekenregels leggen voor diverse grondsoorten een relatie vast tussen de kwelweg (L) en het verval (H), waarbij nog net geen piping optreedt.

In de Nederlandse praktijk wordt indien de (maatgevende) kwelweg een verticale component bevat, de regel van Lane voorgeschreven.



## 3.2.1 Bligh (1910)

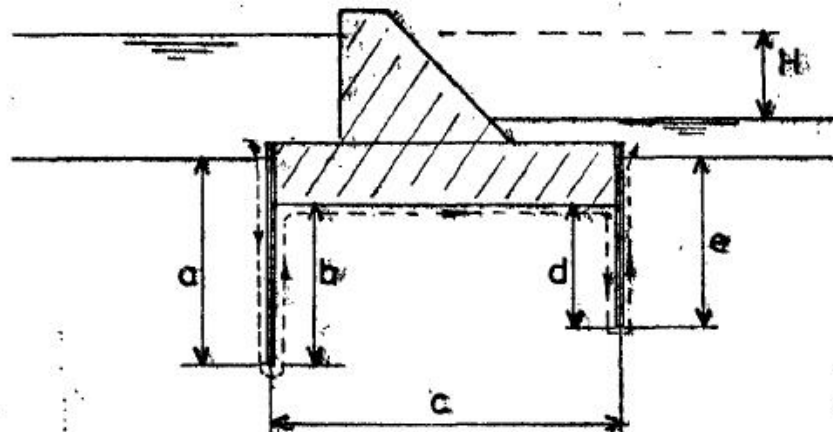
De verhouding tussen de kwelweglengte  $L$  en het maximaal toelaatbare verval  $\Delta H_c$  is volgens Bligh

$$\frac{L}{\Delta H_c} = C_{creep} \quad (3.1)$$

waarin  $C_{creep}$  de creep ratio is, waarvan de grootte afhangt van de grondsoort (zie Tabel 3.1). De kwelweglengte  $L$  is gedefinieerd als de kortste lijn tussen intrede- en uittredepunt, waarbij de begrenzing van de constructie, inclusief verticale elementen (kwelschermen) wordt gevolgd. Op basis van de kwelwegcomponenten gegeven in Figuur 3.1 geldt:

$$L = a + b + c + d + e \quad \text{mits} \quad c \geq 2b$$

$$L = a + c + e \quad \text{als} \quad c < 2b$$



Figuur 3.1 Kwelwegcomponenten voor Bligh

Indien een opbarstkanaal aanwezig is, waardoor zand naar buiten moet worden afgevoerd, zal het gefluidiseerde zand in het kanaal voor extra weerstand zorgen. Op basis van proeven door Sellmeijer (1981) is in het TR Zandmeevoerende wellen de volgende correctie op de regel van Bligh voorgesteld, indien een opbarstkanaal aanwezig is:

$$\frac{L}{\Delta H_c - 0,3d} = C_{creep} \quad (3.2)$$

waarin  $d$  de lengte van het opbarstkanaal is.

Volgens recent onderzoek door Koelewijn (2009) in het kader van SBW Hervalidatie Piping zou de onderbouwing van deze aanpassing zwak zijn, maar zijn er vooral nog onvoldoende redenen om de regel aan te passen.

Grondsoort	Mediane korreldiameter [ $\mu\text{m}$ ]	$C_{\text{creep}}$ (Bligh)	$C_{w,\text{creep}}$ (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

Tabel 3.1 Creep factoren voor regels van Bligh en Lane

## 3.2.2 Lane (1935)

Lane (1935) heeft voor zijn regel gebruik gemaakt van een inventarisatie van meer dan 200 gemetselde en betonnen dammen, verzameld over de gehele wereld. De regel lijkt sterk op die van Bligh, maar volgens Lane moet de bijdrage van de horizontale component van de kwelweg aan de totale kwelweglengte gereduceerd worden vanwege de relatief geringe weerstand die het grondwater langs deze trajecten ontmoet. Dit leidt tot een zogenaamde “weighted creep ratio”,  $C_{w,\text{creep}}$ :

$$\frac{\frac{1}{3}L_h + L_v}{\Delta H_c} = C_{w,\text{creep}} \quad (3.3)$$

waarin  $(\frac{1}{3}L_h + L_v)$  de gewogen kwelweglengte is,  $L_v$  de som van de kwelwegcomponenten die steiler zijn dan  $45^\circ$  en  $L_h$  de som van die die flauwer zijn dan  $45^\circ$ . Lane gaat er vanuit dat indien het contactvlak tussen constructie en ondergrond steiler is dan  $45^\circ$ , een eventuele spleet tussen ondergrond en constructie dichtgedrukt zal worden en geen sprake meer is van weerstandsreductie.

$L_v$  en  $L_h$  worden als volgt berekend (zie Figuur 3.1):

$$L_v = a + b + d + e$$

$L_h = c$ , mits er een goede aansluiting is tussen ondergrond en constructie. Dit zal het geval zijn bij een op staal gefundeerde constructie. Bij op palen gefundeerde kunstwerken moet altijd rekening gehouden worden met zettingen van de ondergrond, waardoor ruimte kan ontstaan tussen constructie en grond. Aanbevolen wordt daarom in dat geval de horizontale kwelweglengte op nul te stellen.

De waarde van  $C_{w,\text{creep}}$  hangt, net als  $C_{\text{creep}}$  bij Bligh, af van de grondsoort, zie Tabel 3.1.

Als de kortste afstand tussen de onderzijde van twee kwelschermen kleiner is dan de helft van de gewogen kwelweglengte tussen beide punten, moet ervan uit worden gegaan dat stroming door de grond onder het kunstwerk maatgevend wordt in plaats van de kwelweg langs de constructie. Voor de bepaling van de gewogen kwelweglengte moet deze kortste afstand (“short path”) dan verdubbeld worden.

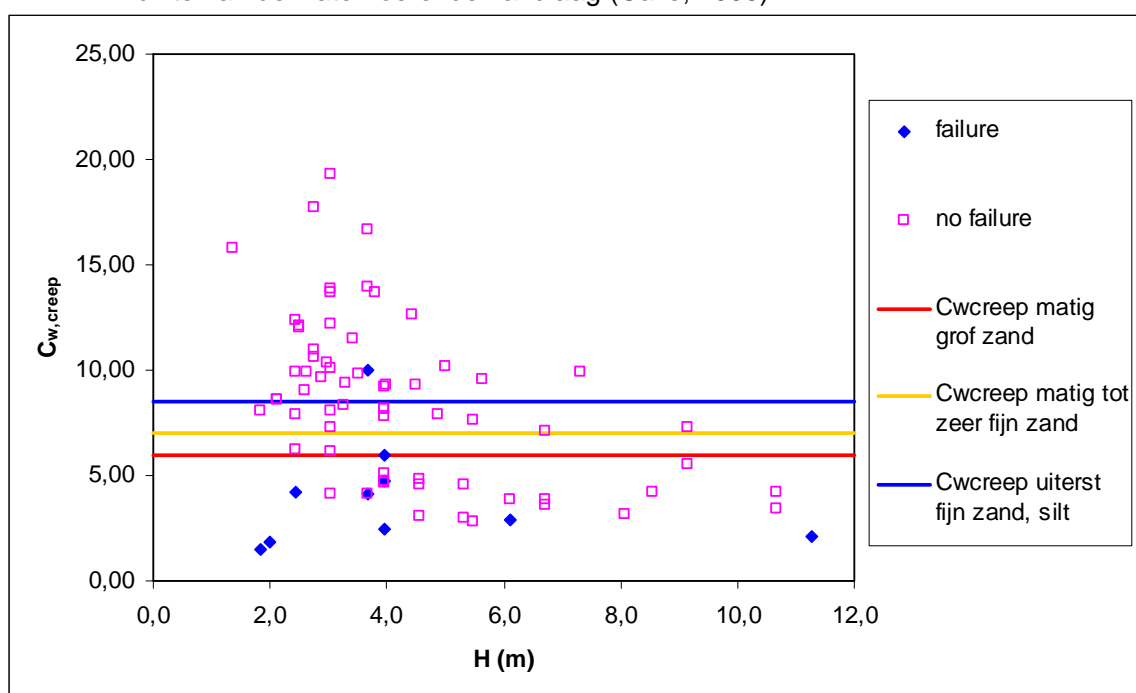
Indien een gewogen kwelweg met daarin een “short path” maatgevend is, moet volgens Lane  $C_{w,\text{creep}}$  worden gereduceerd met een factor 1,25.

### 3.2.3 Beschouwing regels van Lane en Bligh met betrekking tot Nederlandse praktijk

Met betrekking tot de betrouwbaarheid van de regel van Lane en Bligh voor de beoordeling op piping en heave bij waterkerende kunstwerken in Nederland kunnen de volgende opmerkingen worden gemaakt:

- De meest in Nederland onder waterkeringen voorkomende zanden variëren wat betreft de mediane korreldiameter (D50) grofweg tussen 150 en 350  $\mu\text{m}$ . Dit correspondeert ongeveer met de klassen “matig fijn zand” tot “matig grof zand” in Tabel 3.1. Dit wederom komt ongeveer overeen met de door Lane in één groep ondergebrachte grondsoorten zand, fijn zand en silt. In totaal zijn er in die groep 70 dammen geïnventariseerd, waarvan slechts 10 door piping zijn bezweken. In Figuur 3.2 is een overzicht gegeven van de gewogen kwelweglengte en het opgetreden verval over de dam voor zowel de bezweken als niet bezweken dammen. Tevens zijn de door Lane vastgestelde kritieke waarden voor  $C_{w,creep}$  weergegeven. De criteria voor de keuze van de deze waarden door Lane is echter niet geheel duidelijk. Op basis van het geringe aantal bezweken dammen en de vrij grote spreiding in de waarde van  $C_{w,creep}$  lijkt het dat de door Lane gekozen kritieke waarden voor  $C_{w,creep}$  niet geheel veilig zijn.

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



Figuur 3.2 Overzicht resultaten Lane voor grondsoorten representatief voor Nederland

- Bij Bligh is geheel onduidelijk hoeveel dammen per grondsoort geanalyseerd zijn en in hoeveel gevallen sprake was van bezwijken. Een kritische analyse zoals hierboven voor Lane is gegeven, is dan ook lastig.
- Zowel Bligh als Lane zijn bedoeld voor controle op zowel piping als heave, waarbij geen onderscheid gemaakt wordt tussen deze twee mechanismen.

### 3.3 Rekenmodel van Sellmeijer voor piping (horizontale terugschrijdende erosie)

Door Sellmeijer (1989) is een mathematisch rekenmodel ontwikkeld waarmee het optreden van piping (terugschrijdende erosie) in horizontale richting beoordeeld kan worden. Daarin is de potentiaalvergelijking voor de beschrijving van grondwaterstroming gekoppeld aan de vergelijking van laminaire stroming van water door het erosiekanaal en de evenwichtsvergelijking van sleepkracht en stromingsdruk op de zandkorrels (en hun gewicht) in het erosiekanaal en de rolweerstand van de zandkorrels. Het rekenmodel is geïmplementeerd in het 2D grondwaterstromingsprogramma MSeep. Daarmee kan het maximale verval worden uitgerekend waarbij nog net geen doorgaand erosiekanaal ontstaat in het zand dat grenst aan een horizontaal op het zand liggende slecht doorlatende laag (klei of de bodem van een kunstwerk). Op basis van vele numerieke berekeningen is een benaderende analytische formule afgeleid, die is gevalideerd aan proeven in de Deltagoot (ijking rolweerstandshoek). De resultaten voortkomend uit de analytische rekenregel en MSeep blijken te verschillen (met name vanwege een verschillende benadering van het evenwicht op de zandkorrel).

Thans wordt in het project SBW Hervalidatie Piping een herijking van de rekenregel uitgevoerd, wat waarschijnlijk in de loop van 2010 tot een aangepast en uitgebreid toetsmodel zal leiden. De belangrijkste aanpassing is dat korrels in het erosiekanaal niet alleen kunnen rollen maar ook schuiven. De belangrijkste uitbreiding is dat de relatieve dichtheid van het zand als parameter wordt toegevoegd.

Voor details met betrekking tot het bestaande analytische model van Sellmeijer wordt verwezen naar Sellmeijer (1989) en het TR Zandmeevoerende wellen.

### 3.4 Verticale piping

Voor verticale uitspoeling van zand bij verticaal gerichte opwaartse stroming benedenstrooms van een kwelscherm bestaan geen gangbare rekenmodellen. Reden hiervoor is dat dit mechanisme niet als maatgevend wordt beschouwd. In proeven is aangetoond dat als het uittredeverhang voor heave kritiek is, er van het uitspoelen van zandkorrels (piping) nog lang geen sprake is.

Bij goed functionerende kwelschermen lijkt dit een juiste veronderstelling. Echter, in geval van geconcentreerde lekkage van het kwelscherm wordt het risico op instabiliteit van het kwelscherm ten gevolge van heave veel geringer (zie paragraaf 2.2). Dan zou verticale piping opeens maatgevend kunnen worden, met name als er sprake is van een gat dat vrij hoog in het kwelscherm zit en de verticale kwelweg kort is. Een toetsregel bestaat daarvoor niet. De regel van Sellmeijer heeft alleen betrekking op horizontale piping.

Zoals vermeld is het verticale verhang dat noodzakelijk is voor het uitspoelen van zandkorrels groter dan dat voor fluïdisatie (zie ook Van Rossum & Zanen, 1959). Er kan dus vanuit worden gegaan dat de korrels al in suspensie zijn voordat piping begint. Dat betekent dat gesteld mag worden dat de zandkorrels naar boven kunnen uitspoelen als de verticaal gerichte opwaartse stroomsnelheid groter wordt dan de bezinksnelheid van de korrels.

De bezink- (of sedimentatie-)snelheid ( $v$ ) van korrels ten gevolge van alleen de zwaartekracht kan met de wet van Stokes worden benaderd met:

$$v = \frac{2}{9} r^2 g \frac{(\rho_k - \rho_f)}{\mu} \quad (3.4)$$

waarin:

$v$	sedimentatiesnelheid van het gronddeeltje [m/s]
$r$	straal (sferisch) gronddeeltje [m]
$\rho_k$	dichtheid van het gronddeeltje [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_f$	dichtheid van de vloeistof [kg/m <sup>3</sup> ]

- g zwaartekrachtversnelling [ $\text{m/s}^2$ ]  
 $\mu$  dynamische viscositeit van de vloeistof [ $\text{kg/m}\cdot\text{s}$ ]

Onderstaand rekenvoorbeeld geeft aan welk verticaal uittredeverhang ongeveer nodig zou zijn voor uitspoeling van zandkorrels:

Bij een korreldiameter van  $150 \mu\text{m}$  (fijn zand) wordt met bovenstaande vergelijking  $v = 0,02 \text{ m/s}$ . Voor verticale uitspoeling van zand moet de verticaal gerichte opwaartse effectieve snelheid van het grondwater dus minimaal die waarde hebben. Uitgaande van een zeer hoog poriëngehalte van 0,5 (zo ongeveer de meest losse pakking) betekent dit dat de kritieke filtersnelheid  $0,04 \text{ m/s}$  is. De doorlatenheidscoëfficiënt kan berekend worden met

(bijvoorbeeld) de vergelijking van Kozeny-Carman:  $k = \frac{1}{150} \frac{gr^2}{\mu} \frac{n^3}{(1-n)^2}$ . Met  $n = 0,5$  levert

dit  $k = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ . Met de wet van Darcy kan nu het kritieke verhang berekend worden:  $i_c = 0,04 / 1,3 \cdot 10^{-3} \approx 30$ .

Dit is een factor 30 hoger dan het kritieke verhang voor heave.

Hierbij is uitgegaan van een (weinig realistische) uniforme korrelverdeling en een volledig gelijkmatige verticaal gerichte opwaartse grondwaterstroming. Gezien het hoge kritieke verhang is in dat geval het optreden van verticale piping dus vrij onwaarschijnlijk. De grond zal wat betreft doorlatendheid zeker niet homogeen zijn, waardoor de grondwaterstroming zich zal concentreren en lokaal veel hogere stroomsnelheden ontstaan. Indien piping optreedt zal de doorlatendheid en daarmee de stroomsnelheid verder toenemen. Of daarin dergelijk hoge benodigde stroomsnelheden als in bovenstaand voorbeeld kunnen ontstaan is er sterk van afhankelijk of vanuit het omringende zand voldoende water kan toestromen.

### 3.5 Rekenmodellen voor heave

#### 3.5.1 Bepaling optredend verticaal uittredeverhang

Voor de bepaling van het optredende verticale verhang benedenstrooms van een kwelscherm (het uittredeverhang) moet een grondwaterstromingsanalyse gemaakt worden. Dit kan, van eenvoudig naar geavanceerd, op drie manieren gebeuren:

- 1 Analytisch met een vierkantennet
- 2 (Semi)-analytisch met de fragmentenmethode
- 3 Numeriek met grondwaterstromingsmodellen gebaseerd op eindige elementen of eindige differentie methoden, zoals MSeep (2D) of MODFLOW (3D).

De fragmentenmethode is destijds als sneller (want analytisch) alternatief voor de numerieke grondwaterstromingsanalyse ontwikkeld en is geschikt voor de berekening van het uittredeverhang bij een kunstwerk met kwelschermen. Het principe van deze methode, die gebaseerd is op Pavlovsky (1956), wordt beschreven in het TR Zandmeevoerende wellen. Berekeningen kunnen worden uitgevoerd met een door GeoDelft (thans Deltares) ontwikkeld spreadsheetprogramma. Voor eenvoudige situaties kunnen afleesgrafieken gebruikt worden. Standaard fragmenten zijn het kop- tussen- en staartfragment. Door Calle & Sellmeijer (1998) zijn ten behoeve van probabilistische berekeningen extra fragmenten ontwikkeld: een "zettingsfragment", waarbij een zettingspleet tussen de onderkant van het kunstwerk en de zandlaag aanwezig is, een "gatfragment" voor simulatie van geconcentreerde lek door een kwelscherm en een "lekfragment", waarmee gelijkmatig verdeelde lek door het kwelscherm gesimuleerd kan worden.

Met de rekensnelheid van de huidige pc's zijn de argumenten om af te zien van numeriek rekenen echter vrijwel weggevallen. Ten opzichte van de fragmentenmethode bieden de

meeste numerieke modellen meer vrijheid in keuze van geometrie (aantal en vorm van kwelschermen) of grondeigenschappen (grondlagen en doorlatendheden). 2D grondwaterstromingsmodellen zoals MSeep zijn bovendien eenvoudig in gebruik.

Aandachtspunt bij numerieke grondwaterstromingsmodellen zijn punten in de geometrie waar grote verhangen ontstaan, bij een plotselinge overgang van stroomlijn naar potentiaallijn, zoals bij een gat in een kwelscherm of bij de teen van het kunstwerk. In deze (singuliere) punten ontstaat een oneindig hoog verhang en daarmee een oneindig grote stroomsnelheid. In werkelijkheid zal hier sprake zijn van turbulente stroming en is Darcy niet meer geldig. In het eindige elementenmodel is de stroomsnelheid daar niet oneindig. Dit omdat het een discreet mesh betreft. Maar er geldt hoe fijner het mesh, hoe hoger de stroomsnelheid in de teen. Dit fenomeen is uitgebreid beschreven in Pruiksmā & Barends (2009), waar berekeningen met de eindige elementenmethode zijn vergeleken met analytische oplossingen. Daar is ook geconstateerd dat bij een gegeven fijnheid van het mesh de oplossing in de derde knoop vanaf de teen zeer dicht bij de exacte oplossing zit. Wordt bijvoorbeeld met lineaire elementen gewerkt met een elementgrootte van 10 cm, dan is op 20 cm van de teen de gevonden stroomsnelheid nauwkeurig berekend.

### 3.5.2 Onzekerheden optredend uittredeverhang

Uit gevoeligheidsstudies met MODFLOW uitgevoerd in het kader van SBW Piping Kunstwerken (Veenbergen, 2009) blijkt dat het uittredeverhang sterk beïnvloed wordt door de intredeweerstand van het buitenwater in de ondergrond. De bepaling van intredeweerstand is erg lastig te bepalen.

Griffiths & Fenton (1993) hebben voor een kunstwerk met twee kwelschermen via eindige elementen grondwaterstromingsberekeningen de invloed van ruimtelijke onzekerheid van de doorlatendheid, gemodelleerd op basis van het random field concept, op het debiet, de opwaartse druk tussen de twee kwelschermen en het uittredeverhang bij het benedenstrooms kwelscherm gekwantificeerd. Met name de laatste variabele blijkt zeer gevoelig. Als de fluctuatieschaal van de doorlatendheid (isotroop) groter wordt dan de afstand waarover het uittredeverhang is bepaald, groeit de verwachtingswaarde van het uittredeverhang, tenminste, als de variatiecoëfficiënt van de lognormaal verdeelde doorlatendheid groter is dan 1. De onzekerheid van het uittredeverhang lijkt alleen af te hangen van de variatiecoëfficiënt van de doorlatendheid en niet van de fluctuatieschaal.

Uit gevoeligheidsanalyses met de fragmentenmethode door Calle & Sellmeijer (1998), waarbij gebruik gemaakt is van de hiervoor genoemde extra fragmenten (zettings-, gat- en lekfragment) komt naar voren dat met name bij kunstwerken die lang zijn ten opzichte van de dikte van de watervoerende zandlaag een spleet tussen de ondergrond en de onderkant van de constructie grote invloed heeft op het uittredeverhang.

### 3.5.3 Bepaling kritiek (of toelaatbaar) verticaal verhang bij verticale stroming

Het verhang waarbij in de homogeen veronderstelde zandlaag benedenstrooms van het kwelscherm ten gevolge van een verticaal gerichte opwaartse stroming de opwaarts gerichte kracht op de korrels groter wordt dan het gewicht van de korrels (de eerste definitie van de grenstoestand in paragraaf 2.2) wordt als volgt berekend:

$$i_c = \frac{(1-n)(\gamma_k - \gamma_w)}{\gamma_w} \quad (3.5)$$

waarin:

$n$  poriëngehalte van de zandlaag achter het kwelschem [-]

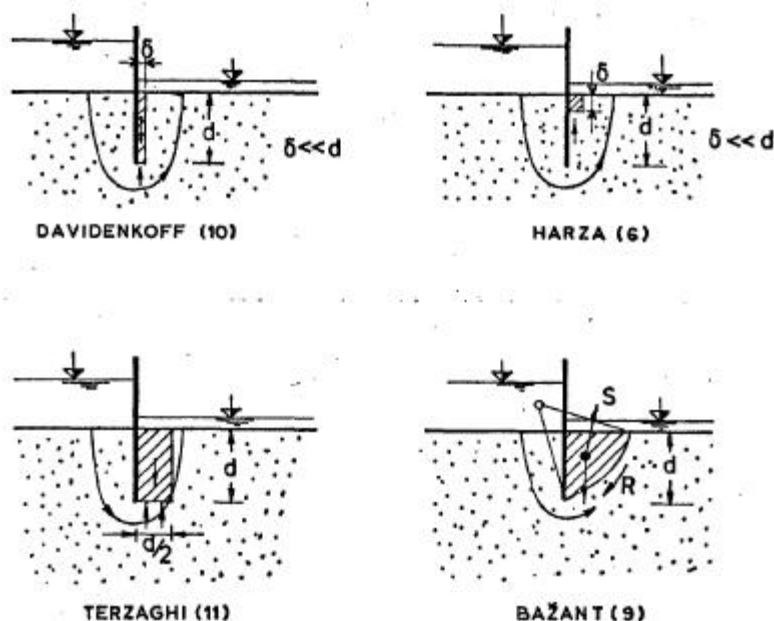
$\gamma_k$  volumegewicht van de korrel [ $\text{kN/m}^3$ ]

$\gamma_w$  volumegewicht van water [ $\text{kN/m}^3$ ]

Uitgaande van  $\gamma_k = 26,5 \text{ kN/m}^3$  en  $\gamma_w = 10,0 \text{ kN/m}^3$ , dan varieert het kritieke verhang afhankelijk van  $n$  tussen 0,83 ( $n=0,5$ ) en 1,16 ( $n=0,3$ ).

Het verticale kritieke verhang is dus niet afhankelijk van korreldiameter en doorlatendheid.

Vergelijking (3.5) geldt voor verticale stroming waarbij de stroom- en equipotentiaalijnen parallel aan elkaar lopen, waarvan sprake is in bijvoorbeeld een kolomproef. Bij stroming onder een kwelschem door vindt aan de onderzijde van het kwelschem echter concentratie van stroomlijnen plaats, waardoor een andere situatie ontstaat. Voorts wordt de dichtheid van de stroomlijnen (een maat voor stromingsdruk) steeds groter in de richting van het kwelschem. Het ligt dus voor de hand dat hydraulische grondbreuk als eerste plaats zal vinden in een grondprisma dichtbij het scherm. Figuur 3.3 geeft de verschillende hypothesen weer wat betreft de vorm van het kritieke grondprisma, volgens Davidenkoff (1956), Harza (1935), Terzaghi (1961) en Bazant (1953).



Figuur 3.3 Vorm van kritische grondlichamen bij hydraulische grondbreuk volgens Davidenkoff (1956), Harza (1935), Terzaghi (1961) en Bazant (1953)

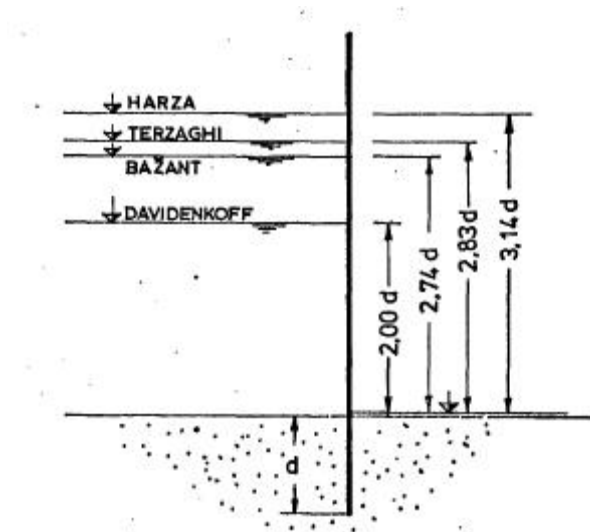
Figuur 3.4 geeft per mechanisme het verval weer waarbij hydraulische grondbreuk optreedt, voor de situatie van een damwand in een grondlichaam met een horizontaal maaiveld aan beide zijden van de wand.

$$\frac{1}{a} \frac{(1-n)(\gamma_k - \gamma_w)}{\gamma_w} = \frac{\Delta H}{d}$$

Hierin is  $\Delta H$  het verschil aan waterstand aan beide zijden van het de wand. Voor  $a$  worden de volgende waarden gegeven:

	$a$
Harza (1935)	3,14
Terzaghi (1961)	2,83
Bazant (1953)	2,74
Davidenkoff (1956)	2,00

Indien voor  $\Delta H$  het verschil tussen de stijghoogte aan de onderkant van de wand en de waterstand aan benedenstroomse zijde wordt genomen, moeten de waarden van  $a$  gehalveerd worden. Het criterium van Davidenkoff komt dan overeen met het criterium voor de kritieke gradiënt in vergelijking 3.5.



Figuur 3.4 Kritieke verval voor hydraulische groundbreuk volgens Davidenkoff (1956), Harza (1935), Terzaghi (1961) en Bazant (1953)

Müller-Kirchenbauer (1964) heeft op schaal proeven uitgevoerd voor een situatie met kwelscherm dat omstroomd wordt (vergelijkbare schaal als "medium-scale" proeven in SBW Hervalidatie Piping). Hij concludeert dat voor een situatie zoals geschetst in Figuur 3.4, waarbij aan weerszijden van het scherm grond aanwezig is, voor de meest losse pakking (maximale waarde voor  $n$ ) het criterium van Davidenkoff geldt. Voor de meest vaste pakking (minimale  $n$ ) geldt het criterium van Harza. Voor pakking daartussenin kan het toelaatbare verval lineair geïnterpoleerd worden tussen deze grenzen.

Indien aan bovenstroomse zijde van het kwelscherm geen grond aanwezig, dus als de stijghoogte aan de onderkant van het scherm gelijk is aan de buitenwaterstand, geldt het criterium van Davidenkoff, ongeacht de pakking. Het criterium in vergelijking 3.5 kan dan toegepast worden.

### 3.6 Filterregels

Uitspoeling van zand kan worden voorkomen door een filter. Dit kan worden bereikt als er bij het (vermoede) uittredepunt een filterconstructie aanwezig is. Het filter kan bestaan uit een granulaire 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. Als bijvoorbeeld door dichtslibbing de doorlatendheid zodanig wordt gereduceerd dat zich onder het filter wateroverdrukken kunnen opbouwen, kan het filter opbarsten.

Als filter kunnen ook een (granulair) stortebed (bodembescherming tegen erosie benedenstrooms van een kunstwerk) of een grovere laag zand als bovenste laag van de grond die benedenstrooms van het kwelscherm aanwezig is fungeren.

Het bekendste en meest gebruikte filtercriterium is dat van Terzaghi (1922):

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} < 4 \quad (3.5)$$

waarin:

$D_{15}$  korreldiameter van het grove (filter)materiaal bij 15% gewichtprocent door zeef.

$d_{85}$  korreldiameter van het fijne materiaal bij 85% gewichtprocent door zeef.

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):

$$\frac{D_{15}}{d_{15}} > 4 \quad (3.6)$$

waarin:

$d_{15}$  korreldiameter van het fijne materiaal bij 15% gewichtprocent door zeef.

Vergelijking 3.6 geldt alleen als zowel het grove als fijne materiaal vrij uniform zijn (steile zeefkromme).

Om effectief te zijn moet een filter een dikte hebben die minimaal gelijk is aan twee a drie keer de diameter van de grootste korrels.

Voor een overzicht van andere filtercriteria wordt verwezen naar bijvoorbeeld Schuler & Brauns (1993).

## 4 Oorzaken toetscore “geen oordeel”

### 4.1 Inleiding

In de laatste toetsronde hebben 185 kunstwerken die onderdeel uitmaken van de primaire keringen uit categorie a (kunstwerken die rechtstreeks bescherming bieden tegen de zee, grote rivieren, het IJsselmeer of het Markermeer) de score “geen oordeel” op het onderdeel piping en heave gekregen. Dit komt overeen met 23% van het totaal aantal kunstwerken, zie Tabel 4.1. Uit categorie b (kunstwerken in waterkeringen zoals de afsluitdijk of de Maeslantkering) hebben voor dit onderdeel 6 kunstwerken geen oordeel gekregen. Dit komt overeen met 14% van het totaal aantal kunstwerken (Arcadis, 2009). (Volgens De Jongh (2006, tevens van Arcadis) zijn dit 130 kunstwerken in categorie a en 12 kunstwerken in categorie b). Naar aanleiding daarvan is in het kader van SBW Piping Kunstwerken en het project WTI onderzoek uitgevoerd naar de oorzaken van de score “geen oordeel”. Het onderzoek in het kader van SBW is uitgevoerd door Royal Haskoning en richt zich alleen op piping en heave (Sjenitzer, 2009). Het WTI-onderzoek is uitgevoerd door Arcadis en richt zich op waterkerende kunstwerken in het algemeen (Arcadis, 2009). Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de resultaten van beide onderzoeken.

Dijkring	Categorie a/b			Categorie c		
	Totaal aantal kunstwerken	Totaal aantal “geen oordeel”	Aantal “geen oordeel” STPH	Totaal aantal kunstwerken	Totaal aantal “geen oordeel”	Aantal “geen oordeel” STPH
Benedenrivierengebied	227	127	46	70	57	16
Bovenrivierengebied	309	125	36	17	14	10
Meren	145	141	31	67	67	2
Zee	55	41	28	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
IJssel- en Vechtdelta	66	55	44	42	42	0
Totaal categorie a	802	489	<b>185</b>	196	180	<b>28</b>
Dijkringverbindingen (categorie b)	42	33	6			

Tabel 4.1 Overzicht aantallen “geen oordeel” laatste toetsronde.

### 4.2 Oorzaken “geen oordeel” op piping en heave bij waterkerende kunstwerken.

Door zowel De Jongh (2006) als Arcadis (2009) zijn de oorzaken van de toetscore “geen oordeel” in de laatste toetsronde op basis van een steekproef van toetsrapportages nader onderzocht. Tabel 4.2 geeft de resultaten van De Jongh weer. Hieruit blijkt dat de belangrijkste oorzaken het ontbreken van gegevens zijn en het nog niet afgerond zijn van een nadere of geavanceerde toetsing.

Categorie	Gegevens ontbreken	VTV niet duidelijk	Toetsmethode ontbreekt	HR ontbreken	Nader/geavanceerd getoetst	Niet getoetst	Geen redenen gegeven	Totaal
a	55	0	0	0	52	10	13	130
b	3	0	0	0	4	3	2	18

Tabel 4.2 Oorzaken “geen oordeel” volgens (De Jongh, 2006).

Door Arcadis (2009) is een steekproef van toetsrapportages van 50 kunstwerken (van in totaal 459 kunstwerken) beschouwd. Daarbij is echter geen onderscheid gemaakt naar toetsspoor (hoogte (HT), stabiliteit en sterkte ST (waaronder piping en heave) en betrouwbaarheid sluiting (BS)). Hoewel er tussen de verschillende gebieden enig verschil is, komen voor alle groepen de volgende oorzaken terug (waarbij oorzaken die voor piping en heave zeker niet relevant zijn, zijn weggelaten):

- Voor meer dan 100 kunstwerken is geen toetsing uitgevoerd. Soms gebaseerd op de verwachting dat er toch niet genoeg gegevens zouden zijn om de toetsing uit te voeren. Soms zijn er geen duidelijke redenen aangegeven.
- Veel kunstwerken zijn getoetst met een beperkte opdracht voor de opdrachtnemer. Indien na de eenvoudige toetsing geen oordeel kon worden gegeven is de toetsing niet doorgezet. Redenen voor het niet doorzetten zijn divers en liggen niet altijd vast. Tijd, geld en verwachting dat de gegevens niet eenvoudig zijn te genereren zijn de belangrijkste.
- Ontbreken van gegevens betreffende de sterkte en stabiliteit (ST) is een belangrijke reden voor het niet kunnen geven van een oordeel. Ontbrekende gegevens zijn zeer divers en lopen van corrosiebepaling tot stabiliteit van het voorland en van het wel of niet aanwezig zijn van kwelschermen tot de frequentie van het gebruik van de keringsmiddelen.
- Bij de analyse van de toetsrapporten, de provinciale rapportage en de landelijke rapportage is gebleken dat er verschillen zijn in het oordeel over kunstwerken tussen deze drie rapportageniveaus. Het is gebleken dat een aantal kunstwerken in de landelijke overzichten op geen oordeel staan, terwijl er wel degelijk een ander oordeel volgt uit de toetsrapportage. Het andere oordeel is geen bewuste aanpassing die is gebaseerd op een ander oordeel van de betreffende verantwoordelijke maar een niet correcte verwerking van de resultaten.

Omdat geen onderscheid is gemaakt naar de verschillende subsporen binnen sterkte en stabiliteit (ST), is niet duidelijk in hoeverre deze oorzaken van toepassing zijn op piping en heave, in het bijzonder bij historische kunstwerken. Het is daarom lastig conclusies te verbinden specifiek voor piping en heave aan de door Arcadis uitgevoerde inventarisatie.

Voor het terugdringen van het aandeel “geen oordeel” worden door Arcadis de volgende oplossingen genoemd:

- Voer voor alle kunstwerken waarvoor in de voorgaande ronde geen toetsing is uitgevoerd ruim voor de sluitingstermijn van de komende toetsonde een toetsing uit zodat er tijd is om ontbrekende gegevens te ontwikkelen.
- Stel voor alle kunstwerken waarvan duidelijk is dat gegevens ontbreken een onderzoeksplan in om de gegevens beschikbaar te maken. En voer dit plan uit zodat de gegevens beschikbaar zijn voor de komende toetsronde.
- Geef de toetsers van kunstwerken voldoende ruimte om alle toetssporen af te lopen. Ervaringen van Arcadis geven aan dat toetsing vaak worden uitgevraagd op laagste prijs. Deze valt te realiseren door een toetsing aan te bieden tot aan de eenvoudige toetsing. Dit geeft in veel gevallen een “geen oordeel” als resultaat;

(Zie verder hoofdstuk “Aanbevelingen”).

## 5 Huidige toetsing: VTV en TR Zandmeevoerende wellen

### 5.1 Inleiding

De Wet op de Waterkering (WoW) schrijft een vijfjaarlijkse toetsing van de per dijkkringgebied aanwezige veiligheid voor volgens het Voorschrift Toetsen op Veiligheid. Bij de huidige manier van toetsen wordt daarbij uitgegaan van een overbelastingsbenadering op dijkvakniveau. Overbelasten (niet gelijk aan bezwijken) treedt op als het overslagdebiet  $q$  groter is dan het toelaatbare debiet. De veiligheidseisen zijn:

- 1 de kans op overbelasting voor elk dijkvak mag niet groter zijn dan de norm die de WoW voor het dijkkringgebied waar het dijkvak deel van uit maakt is vastgesteld. Daarbij wordt meestal uitgegaan van een maatgevende waterstand waarbij een golfbelasting hoort, waaruit een overslagdebiet volgt.
- 6 bij waterstanden gelijk aan of kleiner dan de maatgevende waterstand mag de kans op falen door andere oorzaken dan overloop/overslag niet meer dan 1% (constructief bezwijken) tot 10% (niet sluiten) van de onder punt 1 genoemde norm bedragen.

De eerste eis is voor het bepalen van de kerende hoogte in combinatie met andere geometrische kenmerken en de kwaliteit van de constructie. De tweede eis is ter verificatie van de sterkte van de dijk, waarbij getoetst wordt op alle overige faalmechanismen naast overloop/overslag.

Volgens deze overbelastingsbenadering moet de kans op bezwijken door onvoldoende sterkte of stabiliteit dus kleiner zijn dan  $0,01 \times$  norm. Piping en heave zijn onderdeel van sterkte en stabiliteit.

Het VTV onderscheidt verschillende niveaus van beoordeling: eenvoudige toetsing, gehanteerde ontwerpmethod, gedetailleerde toetsing, geavanceerde toetsing en controle gedrag. Bij gebrek aan gegevens moet een niveau dieper worden gegaan. Het toetsoordeel is kwalitatief, variërend van goed (als ontwerp kwaliteit bestaat), voldoende (als aan de toetscriteria wordt voldaan) tot onvoldoende (als niet aan de toetscriteria wordt voldaan).

Bij historische kunstwerken is de kans groot dat door ontbrekende gegevens voor het onderdeel piping en heave snel wordt uitgekomen bij de geavanceerde toetsing. In het VTV wordt daar onder verstaan dat er specialistische inbreng nodig is. Naast herberekeningen kan daarbij ook gedacht worden aan probabilistische berekeningen.

### 5.2 VTV2006

VTV2006 Katern 7 (Kunstwerken) schrijft voor STPH de volgende stappen voor:

- 1 Eenvoudige toetsing: score voldoende als aangetoond kan worden dat de constructie niet op palen is gefundeerd en dat de constructie, inclusief eventuele kwelschermen, gedurende de gehele toetsperiode (dus rekening houdend met eventuele zetting) minimaal 1m zijn ingebed in een slecht doorlatend klei/-veenpakket. Daarbij kunnen geen in- of uittredepunten voor piping ontstaan op de overgang tussen constructie en grond. Verder moeten de onder het kunstwerk aanwezige zandlagen een score voldoende hebben op piping en heave volgens het toetsspoor piping en heave in Katern 5.
- 2 Een score voldoende als de het kunstwerk is ontworpen volgens de methoden die zijn voorgeschreven in het TR Zandmeevoerende wellen.

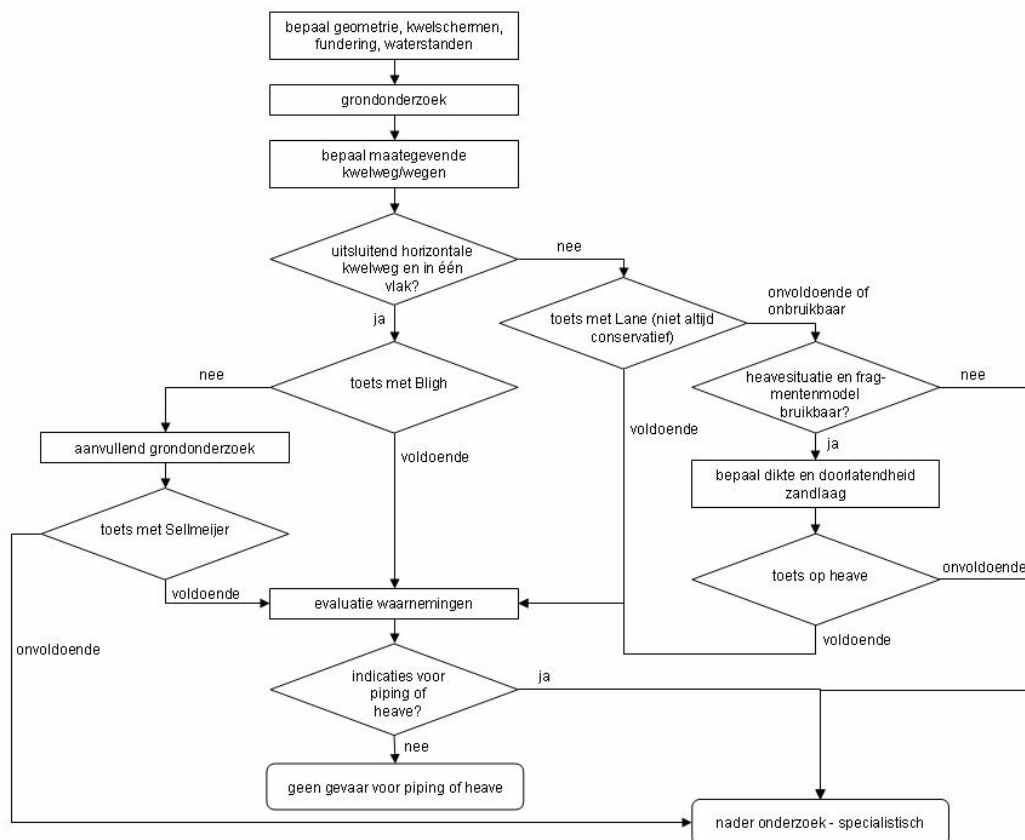
- 3 Gedetailleerde toetsing: analyse van alle mogelijke kwelwegen onder en langs het kunstwerk (driedimensionaal). Vervolgens wordt per mogelijke kwelweg getoetst of de aanwezige kwelweglengte voldoende is. Indien er alleen horizontale kwelweglengte is, kan gebruik gemaakt worden van regel van Bligh of Sellmeijer. Indien er ook verticale kwelweglengte is kan voor piping gebruik gemaakt worden van Lane en als er sprake is van een verticaal uittredepunt kan op heave getoetst worden met een grondwaterstromingsberekening of de fragmentenmethode (TR Zandmeevoerende wellen), indien deze bruikbaar is voor de situatie. Indien er palen onder de constructie aanwezig zijn dan moet worden uitgegaan van het ontstaan van een open ruimte (spleet) tussen onderkant constructie en ondergrond. Als gevolg hiervan dient de horizontale kwelweglengte onder de constructie te worden verwaarloosd. Indien er alleen bovenstrooms een onderloopsheidscherm aanwezig is, mag de horizontale lengte onder de constructie van het scherm tot aan het uittreepunt niet worden meegenomen. Verdieping van de toetsing kan in de volgende richtingen plaatsvinden door toepassing van rekenmodellen die zijn opgenomen in het TR Zandmeevoerende wellen of verdere gegevensverzameling met betrekking tot de ondergrond en constructie
- 4 Geavanceerde toetsing. Het VTV merkt op dat het verstandig is om als eerste stap na te gaan of geavanceerde toetsing zin heeft en welke methoden in aanmerking komen. Het zou kunnen dat de kans verwaarloosbaar is dat de geavanceerde toetsing tot een score voldoende leidt. Behalve modelmatige verfijning behoort een probabilistische piping- en heave-analyse tot de mogelijkheden of kan het principe van "bewezen sterkte" worden gehanteerd.

### 5.3 TR Zandmeevoerende wellen

Figuur 5.1 geeft de stappen weer die voor de toetsing van een kunstwerk op piping en heave doorlopen moet worden.

- 1 Bepaling van geometrie, kwelschermen, fundering en waterstanden.  
Nodig zijn gegevens over:
  - de afmetingen van de constructie;
  - locatie, conditie en afmetingen van de kwelschermen;
  - de aanwezigheid van funderingspalen.
 Bronnen van informatie zijn:
  - bouwtekeningen van de constructie ten behoeve van ontwerp of renovatie
  - opmeten van afmetingen
 Voor wat betreft de afmetingen en toestand van de kwelschermen zijn verder mogelijkheden:
  - blootlegging door ontgravingen. Dit is een nauwkeurige methode, maar praktisch slecht toepasbaar omdat het een zeer ingrijpende actie is. Bij historische kunstwerken kan dit een probleem zijn. Vaak moet een deel van de waterkering aansluitend aan het kunstwerk ontgraven worden en waardoor verzwakking optreedt. Bij ontgravingen beneden de grondwaterspiegel moet bemaling worden toegepast;
  - plaatsing van peilbuizen vlak naast het kunstwerk. Op basis daarvan kan de aanwezigheid of werking van kwelschermen afgeleid worden. Nadeel is dat er in veel gevallen gewacht moet worden op een hoogwater;
  - nagaan of er ervaring is met andere kunstwerken van gelijke ouderdom en constructie in dezelfde omstandigheden.
 Er kan twijfel over de toestand van de kwelschermen bestaan als:

- de kwelschermen periodieke of permanent boven de grondwaterstand uitkomen;
- kwel is geconstateerd tijdens hoogwater of andere belastingsomstandigheden;
- een corrosief milieu aanwezig is bij stalen schermen; de aanwezigheid van zout water of veen veroorzaken relatief veel corrosie (in de Handreiking Constructief Ontwerpen (TAW, 1994) zijn enkele richtlijnen hierover opgenomen);
- negatieve kleef langs de schermen kan zijn opgetreden;
- de verwachte levensduur van de schermen is verstreken;
- de mogelijkheid bestaat dat corrosie door elektrische spanning is opgetreden.



Figuur 5.1 Toetschema piping en heave bij kunstwerken (TR Zandmeevoerende wellen)

- 2 Grondonderzoek lokaal naast het kunstwerk om grondsoort, korrelverdeling en doorlatendheid van het zand van de watervoerende laag te bepalen. In geval van een kunstwerk op klei moet het kunstwerk, of eventueel aanwezige kwelschermen, goed aansluiten op de klei. Als de klei niet goed aansluit op het kunstwerk kunnen in de spleten grote stroomsnelheden ontstaan wat tot erosie van de klei leidt. Geschikte beoordelingsmethoden hiervoor bestaan echter niet.
- 3 Bepaling van de maatgevende kwelweg. Dit kan een combinatie van onderloopsheid en achterloopsheid zijn. Een 3D analyse is hiervoor noodzakelijk.

Bij het bepalen van de maatgevende kwelweg zijn de volgende zaken van belang:

- tussen schermen of constructieonderdelen kan een kortgesloten kwelweg ontstaan;

- een slechte aansluiting van diverse constructieonderdelen, zoals schermen aan de hoofdconstructie kan een kortere kwelweg tot gevolg hebben;
  - horizontale delen in een kwelweg ter plaatse van holten, bv. bij een paalfundering, worden bij toepassing van de regel van Lane niet in rekening gebracht. Bij heavecontroles met behulp van de fragmentenmethode is reductie van de weerstandsfactoren noodzakelijk (zie TR Zandmeevoerende wellen);
  - de maatgevende kwelweg omvat soms slechts over een deel van een constructie, zoals bijvoorbeeld een sluishoofd;
  - diverse hydraulische omstandigheden kunnen van belang zijn, zoals:
    - situatie tijdens hoogwater (toetspeil of MHW);
    - situatie tijdens onderhoud of inspectie.
- 4 Voor de bepaling welke kwelweg maatgevend is moeten vaak berekeningen worden uitgevoerd. Dit betekent feitelijk dat het toetsschema in Figuur 5.1 voor verschillende mogelijke kwelwegen doorlopen moet worden. Zoals eerder opgemerkt bestaat er voor een kwelweg die geheel langs klei gaat geen geschikte beoordelingsmethode.
- 5 Toetsing op piping of heave voor gevonden kwelweg. In geval er sprake is van uitsluitende een horizontale kwelweg wordt eerst getoetst met de regel van Bligh of Sellmeijer. Als de kwelweg ook een verticale component bevat wordt getoetst met de regel van Lane:
- Uitsluitende horizontale kwelweg. Voor Bligh en Sellmeijer zie betreffende paragrafen. Indien het kunstwerk op palen is gefundeerd mag geen horizontale kwelweg in rekening worden gebracht.
  - Kwelweg met een verticale component. Lane is altijd conservatief ten opzichte van het heavecriterium waaraan bijvoorbeeld met behulp van de fragmentenmethode getoetst kan worden. Een uitzondering betreft de situatie waarin het kwelscherm aan de intredezijde langer is dan het kwelscherm aan de uittredezijde, zeker wanneer het watervoerende zandpakket een relatief grote dikte heeft ten opzichte van de lengte van het kunstwerk (in stromingsrichting gezien). Voor die situatie zou eerst een toetsing met de heave regel moeten worden uitgevoerd (Calle, 1998).

*OPMERKING: Dit hoofdstuk is nog niet compleet en zal na het commentaar van RTD in een tweede versie worden afgerond.*

## 6 Methoden ter bepaling van de maatgevende kwelweg(en) (toestand kwelschermen en potentiële in- en uittredepunten)

### 6.1 Inleiding

Zowel voor de bepaling van de maatgevende kwelweg bij MHW (input voor regel van Lane of Bligh) als voor de bepaling van het optredende uittredeverhang (input voor de heavecontrole) is behalve informatie over de aanwezigheid, dimensies en toestand van de kwelschermen onder het kunstwerk ook informatie nodig over de locatie van de intredepunten en de uittredepunten. Voor het wel of niet optreden van piping en heave is daarbij de situatie bij het uittredepunt meestal maatgevend. Bij dijken is het uittredepunt van het grondwater meestal binnendijks gesitueerd. Bij kunstwerken moet er echter rekening mee worden gehouden dat het uittredepunt elders kan liggen. Bijvoorbeeld in geval van een kunstwerk met betonnen vloer kunnen er scheuren in de vloer voorkomen of kan het uittredepunt in het stortebed (beschermingsconstructie tegen erosie door stroming aan binnenzijde van bijvoorbeeld een sluis) liggen of juist aan de rand van het kunstwerk.

Van belang is om alle potentiële uittredepunten vast te stellen. Hulpmiddelen daarbij zijn: dwarsprofielen, bouwtekeningen, visuele inspectie aan maaiveld (is dwarsprofiel nog actueel, staat van het kunstwerk, zichtbare uittredepunten, met name na hoog water) en onder water (beschadigingen kunstwerk, stortebed, zichtbare uittredepunten, zandtransport).

Op basis van deze informatie kan een eerste inschatting worden gemaakt van de uittredepunten en van de potentiële uittredepunten bij MHW, rekening houdend met heave. Op basis van de actuele dwarsdoorsnede kunnen de potentiële intredepunten worden geïdentificeerd, met de daarbij behorende MHW.

Om volledig inzicht te krijgen in de toestand en de kwaliteit van de kwelschermen onder een (historisch) kunstwerk is visuele inspectie meestal niet voldoende. Een mogelijkheid is het gehele kunstwerk te ontgraven. Een zwaarwegend nadeel van dergelijke destructieve methoden is dat deze zeer ingrijpend zijn (extra maatregelen als bemalingen zijn dan meestal noodzakelijk), dat ze de waterkering kunnen verzwakken of dat ze ongewenst zijn in verband met de cultuurhistorische waarde van het kunstwerk. Daarom moet waar mogelijk gebruik worden gemaakt van indirecte methoden. In dit hoofdstuk worden een aantal meetmethoden besproken die een bijdrage aan de beoordeling kunnen leveren, elk met zijn mogelijkheden en beperkingen. Aan de hand van dit overzicht worden conclusies getrokken en aanbevelingen geformuleerd.

In paragraaf 6.2 wordt een overzicht gegeven van de beschikbare methoden om extra informatie te verkrijgen ten behoeve van de bepaling van potentiële kwelwegen op basis waarvan een kwelweganalyse gemaakt kan worden. Hierbij is o.a. gebruik is gemaakt van Lambert & Van Deen (2000), Boer (2005) en Schalkx & Hombergen (2006).

In paragraaf 6.3 wordt vervolgens een beoordeling van de methoden gegeven met betrekking tot de volgende toepassingen:

- 1 bepaling aanwezigheid kwelschermen;
- 2 bepaling dimensies kwelschermen;
- 3 detectie (geconcentreerde) lekken in kwelschermen.



Indien met de aan het begin van de toetsing reeds beschikbare gegevens niet tot een toetsoordeel kan worden gekomen op het onderdeel piping en heave, zijn er in principe twee mogelijkheden tot vervolg: nader onderzoek gebruikmakend van één of meer in dit hoofdstuk geïnterviewde methoden om meer gegevens te verkrijgen, hetgeen vaak tijd kost en kostbaar kan zijn, of het versterken aanpassen van de constructie zodat aan de veiligheidseisen wordt voldaan. In paragraaf 6.5 worden handreikingen gegeven waarmee een afweging tussen mogelijk kostbaar en tijdrovend nader onderzoek om te komen tot een toetsoordeel en mogelijk minder kostbare maatregelen tere versterking van de constructie.

## 6.2 Methoden ter bepaling van (potentiële) lekwegen

### 6.2.1 Archiefonderzoek

Indien over ontwerpen of bouwbeschrijvingen kan worden beschikt, heeft dat verreweg de voorkeur. Helaas is veel verloren gegaan of slecht toegankelijk. Het kan echter de moeite lonen om hier enige inspanning naar te doen. Op basis van visuele kenmerken kan in voorkomende gevallen de bouwperiode worden bepaald, niet alleen doordat bv. in een gevelsteen het bouwjaar is vermeld, maar ook op basis van gebruikte materialen, stijl en dergelijke kunnen bouwperiodes worden onderscheiden. Op basis van de bouwperiode kunnen vervolgens ook weer conclusies worden getrokken over de (vermoedelijke) constructie ondergronds en de daarvoor gebruikte materialen. Hoewel hier natuurlijk altijd sprake is van een hypothese, kan een dergelijke aanpak nuttig zijn. Wel moet worden bedacht dat het ontwerp geen garantie biedt dat de constructie daadwerkelijk conform ontwerp is vervaardigd en bovendien moet rekening worden gehouden met zettingen, slijtage, aantasting etc. van de gebruikte materialen. Desondanks wordt aanbevolen om kunstwerken zo goed mogelijk te documenteren en om de kennis van ontwerp- en bouwmethoden in het verleden uit te breiden.

Archiefonderzoek is betrekkelijk goedkoop en hoeft slechts eenmalig te worden uitgevoerd. Archiefmateriaal is niet altijd aanwezig en dus is archiefonderzoek niet altijd toepasbaar. Bovendien zijn afwijkingen en veranderingen vaak niet gedocumenteerd.

### 6.2.2 Stroomschema's

In het in opdracht van STOWA door DHV opgestelde rapport "Hulpmiddelen voor toetsers - Historische Kunstwerken" (Schalkx & Hombergen, 2006) zijn stroomschema's opgenomen die op basis van gemeenschappelijke kenmerken van een bepaalde groep kunstwerken ondersteuning bieden om lacunes in de beschikbare gegevens van de constructie van een kunstwerk aan te vullen. Hiervoor is gebruik gemaakt van de landelijke database "Kenmerken Historische Kunstwerken" van VNK, waarin de basisgegevens van de waterkerende kunstwerken in primaire waterkeringen zijn ingevoerd door de beheerders, en aanvullende gegevens door archiefonderzoek. In totaal zijn 607 kunstwerken geanalyseerd.

Met behulp van de stroomschema's, die in Appendix A zijn opgenomen, kan een inschatting gemaakt worden van de volgende onbekende kenmerken:

- 1 Is een kwelscherm aanwezig?
- 2 Aantal kwelschermen?
- 3 Schermlengte onder de vloer?

Voor vrijwel alle kunstwerken in de database geldt dat:

- een gemetselde constructie altijd houten kwelschermen heeft en, indien op palen gefundeerd, deze eveneens van hout zijn;

- betonnen constructies die voor 1945 zijn gebouwd vrijwel altijd gefundeerd op houten palen zijn; na 1945 op betonnen palen;
- een houten paalfundering vrijwel altijd samengaat met houten kwelschermen;
- een betonnen paalfundering vrijwel altijd samengaat met een stalen kwelscherm;
- bij één stalen kwelscherm de constructie vrijwel altijd op staal is gefundeerd;
- bij vijf en meer stalen kwelschermen de constructie vrijwel altijd op (betonnen) palen is gefundeerd;
- bij vier of minder houten kwelschermen de fundering op staal gefundeerd is;
- bij vijf of meer houten kwelschermen de fundering altijd uit houten palen bestaat.

Er zijn stroomschema's opgesteld voor de volgende typen kunstwerken, waarbij telkens is aangegeven welke gemeenschappelijke kenmerken bekend moeten zijn:

- Schutsluis (71 kunstwerken):
  - Type constructiemateriaal van de wanden (beton, metselwerk of staal)
  - Funderingstype (op staal of palen): materiaal paalfundering (beton, hout of staal)
  - Lengte sluiskolk
- Keersluis (32 kunstwerken):
  - Type constructiemateriaal van de wanden (beton, metselwerk of staal)
  - Funderingstype (op staal of palen): materiaal paalfundering (beton of hout)
- Uitwateringssluis (117 kunstwerken):
  - Type constructiemateriaal van de wanden (betonnen bak, beton, buis staal, overig, metselwerk gewelf of wandconstructie, betonnen koker)
  - Funderingstype (op staal of palen)
- Gemaal (191 kunstwerken):
  - Funderingstype (buis, koker, gewelf, bak, vloer)
  - Funderingstype (op staal of palen)
- Coupure (127 kunstwerken)
  - Funderingstype (op staal of palen)
- Inlaatsluis (127 kunstwerken):
  - Type constructiemateriaal van de wanden (L-wand of wandenconstructie, buis, metselwerk gewelf of wandconstructie of betonnen koker)
  - Funderingstype (op staal of palen)

In de stroomschema's wordt per onderscheidend kenmerk (bijvoorbeeld fundering op staal of op palen) het percentage van voorkomen in de database aangegeven. Voor een goede afweging is echter ook van belang om het absolute aantal kunstwerken dat voorkomt te beschouwen.

### 6.2.3 Inschatting onderhoudsstaat en actuele sterkte van kwelschermen

Een inschatting van de toestand of sterkte van kwelschermen onder een kunstwerk kan gemaakt worden op basis van kennis en ervaring van kwaliteitsafname (of levensduur) van de verschillende bouwmaterialen en onderdelen uit de tijd dat het kunstwerk gebouwd is, in relatie tot bepaalde omgevingsfactoren.

Kwelschermen kunnen van hout, beton of staal zijn (zie vorige paragraaf). Wat betreft de te verwachten onderhoudsstaat is navolgend gebruik gemaakt van het reeds in de vorige paragraaf genoemde STOWA rapport en het onderzoek van Arends (2004).

#### *Houten kwelschermen*

Gemiddelde dikte van houten planken in kwelschermen varieert van 4 tot 25 cm, met een gemiddelde van 9 cm.

De theoretische restlevensduur van hout is ca. 25 jaar, van hardhout ca. 40 jaar en van hout onder water is dit meer dan 100 jaar. Deze waarden gelden onder normale omstandigheden zonder invloeden van buitenaf.

Hout kan aangetast zijn door schimmels, bacteriën en insecten.

Schimmelaantasting (softrot) vindt alleen boven water plaats. Een cumulatieve droogstand van 10 a 20 jaar zorgt voor ernstige aantasting, waarbij het rottingsproces versneld wordt door een hoge concentratie zuurstof, hogere temperatuur en aanwezigheid van organische stikstof. Een hoog zoutgehalte werkt schimmelremmend.

Aantasting door bacteriën vindt plaats in spinhout, waardoor met name grenenhout gevoelig is. Aantasting door dit proces gaat circa 10 tot 25 keer langzamer dan aantasting door schimmels. Bij zuurstoftekort stopt het proces. Het proces gaat sneller indien als het hout zich in een zandgrond bevindt of als er grondwaterstroming langs het hout plaatsvindt (hetgeen waarschijnlijk met elkaar samenhangt en beide de nutriëntentoevoer bevordert).

Een insect dat hout (alle soorten) aantast is (hei)paalkever. In een zout milieu kunnen gribbel (een kreeftachtige) en paalworm voorkomen. Deze twee beestjes kunnen in ca. 10 jaar tot volledige afbraak van houten planken tot leiden.

#### *Betonnen kwelschermen*

Gemiddelde dikte van betonnen planken in kwelschermen varieert van 10 tot 25 cm, met een gemiddelde van 18 cm.

Betonnen schermen komen in de VNK database slechts 9 keer voor.

Voor beton kan een restlevensduur van ca. 80 jaar worden aangehouden.

Voor de onderhoudstaat kan verder vrijwel alleen worden afgegaan op visuele waarnemingen.

#### *Stalen kwelschermen*

Voor staal kan een restlevensduur van ca. 50 worden aangehouden. Stalen kwelschermen worden sinds 1900 toegepast.

Aantasting van staal hangt af de mate van bescherming en het milieu waarin ze staan en kan plaatsvinden door uniforme corrosie, erosie corrosie, zwerfstrom corrosie en microbiologische corrosie. Tabel 6.1 geeft een indicatie van de gemiddelde snelheid van uniforme corrosie volgens CUR publicatie 211 Kademuren (CUR 211, 2003). Hoewel niet expliciet vermeld, gelden deze waarden voor zoute omstandigheden.

	<b>Gemiddelde snelheid uniforme corrosie [mm/jaar]</b>
Atmosferische	0,05 à 0,10
Spatzone	0,15 à 0,40
Getijdezone	0,10 à 0,25
Laagwater zone	0,10 à 0,25
Onderwater zone	0,05 à 0,20
Bodem	0,02 à 0,05

Tabel 6.1 Gemiddelde snelheden uniforme corrosie volgens CUR211 (2003)

#### 6.2.4 Visueel onderzoek

Visueel onderzoek bestaat uit onderzoek aan maaiveld. Door middel van waterpassingen en visuele inspectie aan maaiveld kan de situatie van het kunstwerk worden vergeleken met eerdere inspectieronden en kunnen zowel potentiële intrede- als uittredepunten worden onderkend. Indien tussen twee inspectiemomenten (extreem) hoog water is opgetreden dient extra aandacht te worden besteed aan eventuele erosieverschijnselen die kunnen zijn opgetreden, zowel ter plaatse van de buitenberm, het buitentalud als eventueel aanwezige kwel sloten. Erosieverschijnselen kunnen wijzen op de het bestaan van lekwegen. Tevens kan de bouwkundige staat van het kunstwerk en van de diverse in het zicht zijnde onderdelen, worden beoordeeld.

Afhankelijk van de samenhang van de grond en de eventueel op het maaiveld aanwezige verharding zal er geleidelijk of na verloop van tijd een plotselinge lokale zetting kunnen optreden. Dit is een visueel waarneembare aanwijzing voor erosie onder het scherm door of lekkage van het scherm

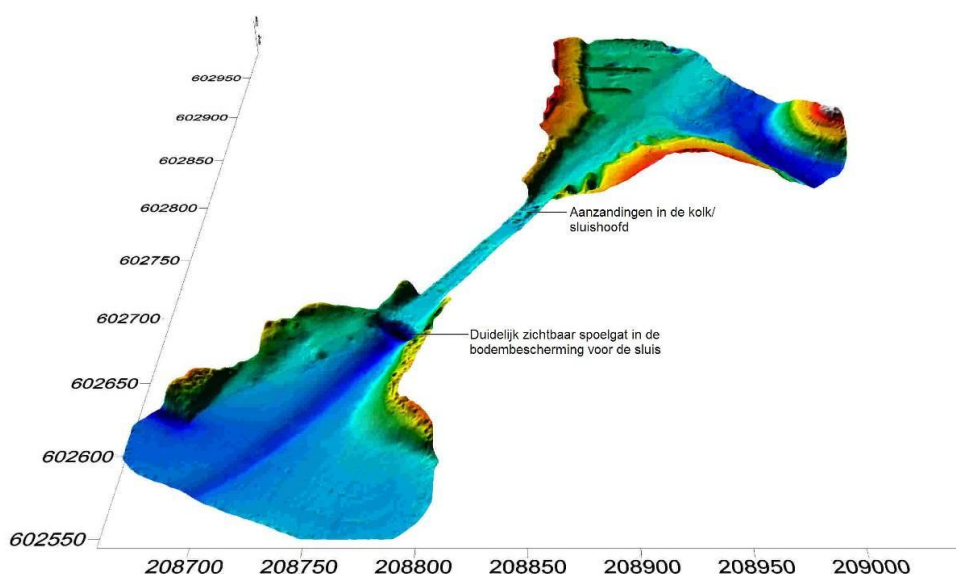
Zaadnoordijk (2009) noemt dat een periode met vorst uitermate geschikt is om een beeld te krijgen van kwel. Kwelintensiteit is af te leiden uit de mate waarin waterlopen dichtvriezen.

Visueel onderzoek kan eenvoudig worden uitgevoerd en is niet kostbaar. Voor een waterpassing is een inspectieteam van twee personen noodzakelijk. Een inspectie tijdens of kort na een periode met hoog water wordt aanbevolen. Bij de hier beschreven onderzoeksmethode kunnen objecten onder water niet worden meegenomen, terwijl deze voor de beoordeling toch van belang zijn. In voorkomende gevallen kan de inspectie plaatsvinden vanaf een boot.

#### 6.2.5 Visueel onderzoek onder water

Potentiële lekwegen kunnen hun in- en/of uittredepunt zowel boven de waterspiegel (maar beneden MHW) als permanent onder de waterspiegel hebben. Dit geldt voor de betonnen vloeren en wanden van duikers en sluizen, maar bv. ook voor stortebedden aan in- en uitstroomzijde, alsmede de taluds.

Door middel van multibeamapparatuur (echolood) kan de hoogteligging van alle onder de waterlijn gelegen elementen in kaart worden gebracht. Aan het meetsysteem kan plaatsbepalingapparatuur op basis van GPS of – indien hoge nauwkeurigheid wordt gewenst – RTK GPS worden gekoppeld. Overige zaken die van invloed zijn op de meetnauwkeurigheid zijn onder meer: het voorkomen dat metingen onder het vaartuig worden uitgevoerd, de aanwezigheid van storende elementen zoals heftorens die de GPS-apparatuur kunnen beïnvloeden, bewegingen van het vaartuig al dan niet gecompenseerd met een motion sensor en de vaarsnelheid.



Figuur 6.1 Voorbeeld 3D bodemkaart (met ontgravingen en aanzandingen) overzicht sluis met voorhavens

Door middel van een zogenaamde patch-test kan de kwaliteit van de metingen worden geborgd. Bij een patch-test wordt via een afwijkend patroon een herhalingsmeting uitgevoerd waarvan de resultaten op de dubbel gemeten punten overeen moeten komen. De resultaten kunnen worden gepresenteerd in raaien of als 3D contourplots (zie Figuur 6.1) die aanwijzingen kunnen geven over de aanwezigheid van aanzandingen, uitspoelingen en anomalieën.

Mede afhankelijk van de resultaten van het multibeamonderzoek kan tevens een duikinspectie worden uitgevoerd. In Nederland bestaan uitgebreide voorschriften ten aanzien van veiligheid, keuring en certificering voor het werken onder water. Zo dient ene duikploeg uit (ten minste) drie personen te bestaan die allen medisch zijn gekeurd en het certificaat luchtduiken A en B bezitten, terwijl ten minste een van de duikers het certificaat duikploegleider en het duikmedisch certificaat MAD A bezit.

Een duikinspectie bestaat uit:

- Het (steekproefsgewijs) controleren aan de hand van het ontwerp
- Het inspecteren van alle voor de duiker bereikbare overgangen tussen constructie onderdelen
- Het beoordelen van aanzandingen en ontgravingen, mede op basis van de uitgevoerde bodemscan

Desgewenst kan de duiker met behulp van een prikstaaf de laagdikte van zand, veen of slib bepalen, met een schuifmaat de afmetingen van stortsteen meten en, zo nodig, monstermateriaal uit de bodem nemen. Plaatsbepaling kan door middel van een dieptemeter en een GPS-systeem worden uitgevoerd. Met de GPS wordt de positie van een dobber bepaald die door de duiker tijdens zijn meting zo goed mogelijk vertikaal boven de meetlocatie wordt gehouden.

Uit ervaringen met duikinspecties blijkt dat de meeste aandacht moet worden besteed aan de overgangen tussen constructieonderdelen, zoals de aansluitingen van betonnen vloeren onderling en de aansluiting van het kunstwerk op een stortebed. Zo mogelijk moet dan ook de

hele omtrek van het kunstwerk worden gecontroleerd. Ook houten constructieonderdelen zijn kwetsbaar. Door middel van indringingsmetingen en houtmonsteranalyse kunnen deze elementen worden beoordeeld.

In verhouding is onder waterinspectie kostbaar. Een duikteam bestaat uit tenminste drie hooggekwalificeerde personen en een vaartuig. De inspectiemogelijkheden worden mede bepaald door de constructie en door het doorzicht onder water.

#### 6.2.6 Grondonderzoek

Naast de informatie van de constructie zelf is de beschikbare informatie van de ondergrond van belang. Voor zover geen lokale bodeminformatie beschikbaar is, wordt aanbevolen om deze lokaal te verzamelen. Belangrijke gegevens daarbij zijn: dikte en volumegewicht van de deklaag, incl. de variatie daarin, waarbij ook de informatie ter plaatse van (de bodems) van sloten en kanalen van belang is; aanwezigheid en samenstelling van de aanwezige zandlagen, waarbij ten minste enkele zeefanalyses van de lagen juist onder de eventuele deklaag en onder en naast het kunstwerk van belang zijn. Deze informatie kan worden verkregen uit boringen en sonderingen. Aanbevolen wordt om peilbuizen (waarop in de volgende paragraaf verder wordt ingegaan) te plaatsen in pulsboringen en – indien mogelijk – de volumegewichten en korrelverdelingen te bepalen uit monsters die zijn verkregen door middel van de Begemann steekmethode.

Grondonderzoek wordt uitgevoerd door middel van sonderingen en boringen, volumegewichten en zeefanalyses worden in een grondmechanisch laboratorium bepaald. De verkregen gegevens dienen eenmalig te worden vastgelegd en zijn dan ook voor latere toetsingen bruikbaar.

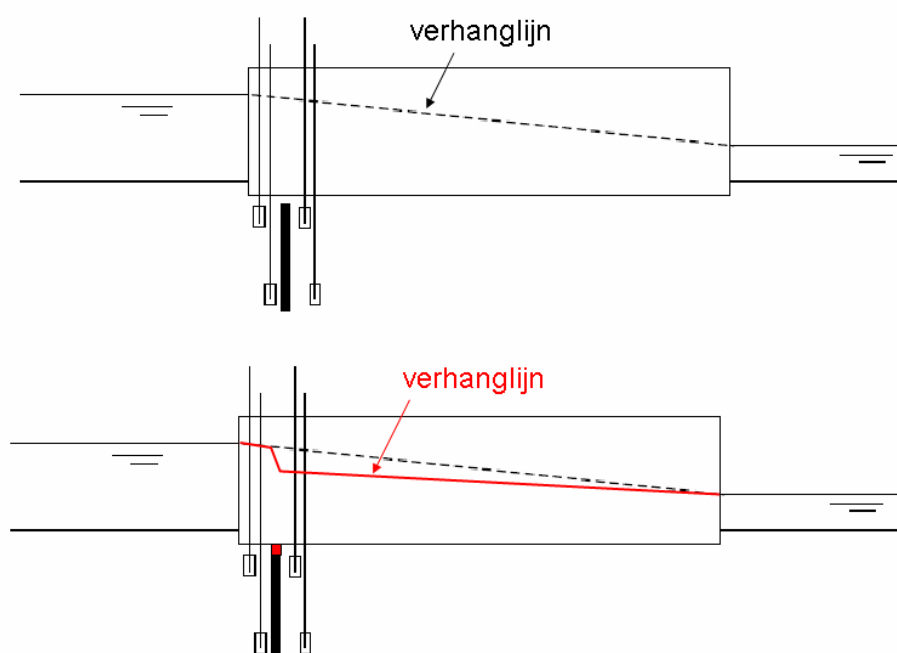
#### 6.2.7 Meting van grondwaterstanden en -stijghoogten

Metingen van grondwaterstanden en –stijghoogten kunnen worden uitgevoerd door middel van peilbuizen en waterspanningsmeters, te plaatsen in een boorgat of sondeergat. De waarnemingen kunnen handmatig dan wel continu, door middel van drukopnemers, worden uitgevoerd. Moeilijkheid is het bepalen van representatieve locaties voor de peilbuizen of waterspanningsmeters. Waterspanningsmeters hebben in het algemeen een beperkte levensduur. Ten opzichte van peilbuizen hebben waterspanningsmeters het voordeel dat de grondwaterdruk direct gemeten kan worden. De respons op snelle waterstandfluctuaties kan dus beter gemeten worden. Dit kan bijvoorbeeld van belang zijn bij sluizen in het getijdegebied.

Informatie over het uittredeverhang kan worden verzameld door stijghoogtemetingen bij verschillende buitenwaterstanden. Bij aanwezigheid van een Holocene deklaag is de stijghoogte direct onder het Holocene pakket daarbij maatgevend. Er dient uiteraard een extrapolatie naar MHW te worden uitgevoerd. Voorwaarde is dan wel dat er een bepaald verval over de kering aanwezig zijn, hoogwater worden afgewacht of kunstmatig een verval kunnen worden aangebracht. In geval van een schutsluis met een groene kolk (geen bodem) kan over zowel het binnen- als buitenhoofd een verval worden gecreëerd door de kolk vol te laten lopen. Een andere mogelijkheid is het uitvoeren van een pompproef, waarbij aan één zijde van het kunstwerk grondwater wordt onttrokken of juist geïnjecteerd. Een pompproef, waarbij grondwater onttrokken wordt, zal zeker waar bebouwing aanwezig is echter de nodige risico's met zich mee brengen door een dalende grondwaterstand in de omgeving van de onttrekkingsputten (voorbeeld N-Z-lijn Amsterdam).

Daarnaast is informatie over het stijghoogte- of grondwaterstandverloop langs en onder het kunstwerk van belang, eveneens bij verschillende buitenwaterstanden.

De invloed van een slecht aansluitend kwelscherm of een lek in het kwelscherm op het verloop van de stijghoogte wordt aangegeven in Figuur 6.2. Indien het scherm niet aansluit op de constructie wordt deze met een stijghoogtemeting meestal niet waargenomen. Of er nu geen scherm aanwezig is of dat het scherm dat aanwezig is niet meer functioneert, leidt tot dezelfde conclusie.



Figuur 6.2 Peilbuizen aan weerszijden van een niet goed aansluitende kwelscherm (boven) en goed aansluitend kwelscherm (onder)

De bepaling van de dimensies van het kwelscherm is met deze methode niet mogelijk. Ook over het aantal kwelschermen en hun locatie, indien alleen aan weerszijden van het kunstwerk stijghoogten gemeten kunnen worden, kan niets gezegd worden.

Het verdient aanbeveling om het aantal en de locaties van meetpunten te laten afhangen van het eerder beschreven veldonderzoek. Om het gevaar voor piping te beoordelen is namelijk de situatie ter plaatse of nabij de in- en uittredepunten maatgevend. Onder uittredepunt wordt hier tevens verstaan een potentieel uittredepunt als gevolg van heave.

Locaties voor het plaatsen van peilbuizen en waterspanningsmeters kunnen tijdens het veldonderzoek worden bepaald aan de hand van de kritieke lekwegen. Uitvoering geschiedt conform de voorschriften in combinatie met het uitvoeren van boringen of sonderingen. Peilbuizen, geplaatst in boringen, hebben in het algemeen een langere levensduur dan waterspanningsmetingen. Met het oog op de noodzaak tot extrapolatie bij MHW wordt aanbevolen om meetcampagnes – naast de periodieke metingen – uit te voeren rondom extreme hoog- en laagwaterperioden. De peilbuizen moeten worden gewaterpast. Het uitvoeren van metingen is betrekkelijk goedkoop.

Opgemerkt wordt dat in de meeste gevallen – voor interpretatie – een extrapolatie naar MHW noodzakelijk is. Die extrapolatie is niet altijd eenvoudig. Er moet rekening mee worden gehouden dat kritieke kwelwegen bestaan waar ten tijde van de toetsing geen grondwaterstroming optreedt. In principe bevindt het kritieke intredepunt zich bij MHW boven de waterstand.

#### 6.2.8 Camerasonde

Een speciale visuele methode is de camerasonde. Deze bestaat uit een geminiaturiseerde camera, die is ingebouwd in een sondeer-equipment. Hiermee kan – tijdens het sonderen – de doorboorde laag worden gezien. Zaken die met de camerasonde kunnen worden aangetoond of geïnspecteerd zijn ondergrondse funderingselementen en kwelschermen en ook ontgrondingen onder een kunstwerk. Zo nodig kan onder een hoek worden gesondeerd, maar voor het aantonen van een ontgraving onder een kunstwerk moet wel eerst een boring door de vloer van het kunstwerk worden gemaakt.

Deze methode is kostbaar en slechts onder specifieke omstandigheden gewettigd.

#### 6.2.9 Tracermethoden

Door aan de bovenstroomse zijde van een kunstwerk een tracer toe te passen en de verblijftijd naar het uitredepunt te meten kan een verblijftijd van het grondwater onder het kunstwerk worden bepaald. Tracers die kunnen worden toegepast zijn: kleurstoffen, radio-actieve tracers, chemische tracers, w.o. zout en temperatuur.

Met tracerproeven kan een gemiddelde stroomsnelheid worden bepaald, rekening houdend met de porositeit van het doorstroomde materiaal.

Kleurstoffen kunnen in principe eenvoudig en milieuvriendelijk worden toegepast, maar kunnen leiden tot klachten. Daarom zijn zij weinig populair; ditzelfde geldt voor chemische en zeker voor radio-actieve tracers, waarbij de laatste aan strenge vergunningseisen moeten voldoen.

Temperatuur als tracer kan worden toegepast door verwarmd water buitendijks te injecteren en de verblijftijd daarvan te monitoren door middel van temperatuurgevoelige opnemers.

Ook bij het plannen van eventuele tracerproeven wordt aanbevolen om dit te doen aan de hand van de eerder beschreven resultaten van het veldonderzoek. Het injecteren van tracers dient zo dicht mogelijk bij een potentieel intredepunt te gebeuren. De tracer zal naar waarschijnlijkheid ter plaatse van een geïdentificeerd uitredepunt weer te voorschijn komen. In geval van potentieel optreden van heave heeft een tracertest minder zin.

Het uitvoeren van tracertesten is momenteel weinig toegepast en mede daardoor kostbaar. Bij het ontwerpen van tracertesten moet rekening worden gehouden met de voorwaarde dat de tracer moet worden geïnjecteerd in de – bij MHW - kritieke stroombaan of dat tenminste kan worden geëxtrapoléerd naar de MHW situatie. Het toepassen van kleurstof als tracer lijkt het meest voor de hand te liggen.

#### 6.2.10 Geofysische methoden

Door middel van geofysische methoden kan op een indirecte wijze informatie over de grond en/of het grondwater worden verkregen.



### *Geo-elektrisch meten*

De meest bekende geofysische methode is geo-elektrisch meten, waarbij – vanaf maaiveld – de elektrische weerstand van grond en grondwater worden vastgesteld. Deze methode is met name geschikt om lekkages in sterk (elektriciteit) isolerende constructies, zoals folies, te meten. Wanneer sterk geleidende materialen in het meetgebied voorkomen of wanneer sterk wisselende elektrische velden voorkomen, zoals elektriciteitskabels, hoogspanningskabels, trein- of tramsporen, worden de metingen eveneens zodanig beïnvloed dat zij interpretatie onmogelijk maken. Geo-elektrische methoden zijn dan niet bruikbaar.

### *Spontane potentiaal (SP) methode*

Een andere meetmethode is de Spontane Potentiaal-methode (SP-metingen). Als gevolg van grondwaterstroming ontstaat enige polarisatie (in de orde van mV), omdat er een klein verschil bestaat in de omvang van positieve en negatieve elektronen. Door aan de oppervlakte de verdeling van dit potentiaalveld te meten, kan onderscheid worden gemaakt tussen stroomsnelheden van het grondwater. Het verschijnsel kan worden versterkt door het toedienen van een instantane 'stroomstoot', hierdoor wordt het oplossend vermogen sterk verbeterd. Door stroom- en nulelektrode te wisselen en door op verschillende diepten deze elektroden aan te brengen kan het stromingsbeeld nog worden verbeterd. Met de huidige kennis van zaken is slechts een kwalitatieve en geen kwantitatieve interpretatie mogelijk.

Het verdient aanbeveling om nader de toepassingsmogelijkheid van SP-metingen te onderzoeken. Recente ontwikkelingen laten zien dat met de methode in een boorgat zeer nauwkeurig zowel verticale als horizontale stromingen gemeten kunnen worden (Pezard et al, 2009).

Toepassing van SP-methoden is relatief kostbaar. Een voorbeeld van een toepassing van de methode is gegeven in Knoops & Wolfs (2005).

### *Radar*

Radarmethoden zijn gebaseerd op het uitzenden en ontvangen van elektromagnetische radiogolven. Uit het teruggekaatste signaal is informatie af te leiden over bijvoorbeeld de opbouw van de bodem of in de bodem aanwezige constructies. Radarmethoden zijn bruikbaar voor de bepaling van de aanwezigheid en dimensies van kwelschermen. De geschiktheid hangt in belangrijke mate af van het verschil in geleidbaarheid tussen de ondergrond en de te detecteren constructieonderdelen. Hogere frequenties vergroten de nauwkeurigheid, maar dempen met toenemende afstand (bijvoorbeeld diepte) ook eerder uit. De methode is onder meer toegepast bij de historische schutsluis te Hasselt dat in het kader van SBW Piping Kunstwerken is onderzocht (Veenbergen, 2009) en bij de schutsluis bij De Blocq van Kuffeler, nabij Almere (Boer, 2005).

Oppervlakteradar is de meest eenvoudige methode en kan snel inzicht geven in de aanwezigheid van kwelschermen. De nauwkeurigheid neemt echter snel af met de diepte waardoor de methode niet geschikt is voor de bepaling van de lengte van de kwelschermen. Bij grondradar worden zender en ontvanger via een boorgat in de grond gelaten, waardoor tot veel grotere diepte nauwkeurig gemeten kan worden.

De toepassing van grondradar is slechts in een beperkt aantal specifieke gevallen mogelijk. De methode is vrij kostbaar en vereist specifieke deskundigheid voor interpretatie. Door het voorkomen van zout water, klei en veen wordt de nauwkeurigheid en interpreteerbaarheid van de meetresultaten nadelig beïnvloed.

*Seismiek*

Deze methode is gebaseerd op akoestische signalen die gereflecteerd worden op discontinuïteiten in de ondergrond. Dit kunnen laagscheidingen zijn of de overgang van grond en constructieonderdelen. Seismische metingen kunnen in een boorgat worden uitgevoerd of via een sondering met een seismische conus.

*Magnetometermeting*

Toepassing van deze methode, die met een sondering met magnetoconus wordt uitgevoerd, is alleen toepasbaar voor de detectie van damwanden van staal of gewapend beton. Daarvoor moet de sondering vlak naast het kwelscherm worden uitgevoerd.

Ook deze methode is onder meer toegepast bij de historische schutsluis te Hasselt dat in het kader van SBW Piping Kunstwerken is onderzocht (Veenbergen, 2009).

**6.3 Beoordeling methoden ter bepaling van (potentiële) lekwegen**

De in dit hoofdstuk gepresenteerde methoden zijn grofweg onder te brengen in drie categorieën:

- 1 archiefonderzoek en ervaringswaarden (database kunstwerken en verwachte levensduur);
- 2 methoden waarbij geen gebruik wordt gemaakt van grondwaterstroming en –druk: de aanwezigheid en dimensies van kwelschermen en aanwezigheid van lekken worden direct bepaald. Met deze methoden wordt getracht een “afbeelding” van de constructie onder de grond te maken;
- 3 methoden waarbij wel gebruik wordt gemaakt van grondwaterstroming en –druk, door het meten van stijghoogten of het meten van stroming.

In de volgende drie paragrafen worden deze groepen van methoden met betrekking tot de reeds in paragraaf 6.1 genoemde toepassingen beoordeeld:

- 1 bepaling aanwezigheid kwelschermen;
- 2 bepaling dimensies kwelschermen;
- 3 detectie (geconcentreerde) lekken in kwelschermen.

**6.3.1 Bepaling aanwezigheid kwelschermen**

Met betrekking tot detectie van de aanwezigheid van kwelschermen zijn de meetmethoden waarmee een “afbeelding” van het deel van de constructie onder de grond (categorie 2) het meest geschikt, in het bijzonder grondradar via boorgaten en seismiek via boorgaten. Dit geldt voor detectie van zowel houten, stalen als betonnen kwelschermen. Toepassing van radar in klei en zand is slecht. Seismische metingen hebben als voordeel dat zij ook via een sondering met seismische conus uitgevoerd worden, waardoor boringen niet noodzakelijk zijn. Bovendien is deze methode geschikt voor alle typen grond. De nauwkeurigheid is echter vrijwel altijd minder groot dan radar.

Met methoden waarbij van grondwaterstroming en –druk gebruik wordt gemaakt (categorie 3) is plaatsbepaling minder goed mogelijk. De werking van kwelschermen kan met stijghoogtemetingen echter wel goed bepaald worden. Slecht aansluitende kwelschermen worden niet gedetecteerd, maar het effect daarvan is hetzelfde als geen scherm.

**6.3.2 Bepaling dimensies kwelschermen**

Als de plaats van het kwelscherm bekend is lijkt voor de bepaling van de lengte van kwelschermen van staal of gewapend beton de magnetometersondering een snelle, goedkope en voldoende nauwkeurige methode. In geval van houten kwelschermen is boorgatradar een alternatief, maar niet erg nauwkeurig. Een andere mogelijkheid is het aantonen van het kwelscherm door een normale sondering onder een hoek uit te voeren.

### 6.3.3 Detectie (geconcentreerde) lekken in kwelschermen

Alleen de methoden waarbij gebruik wordt gemaakt van grondwaterstroming- of druk zijn voor het detecteren van lekken geschikt, d.w.z. er kan pas iets gemeten worden als er sprake is van lekkage. Zoals later in deze paragraaf verder zal worden toegelicht, kan een gat van geringe omvang reeds leiden tot aanzienlijke lekkage. Voor detectie van dergelijke gaten zijn methoden waarbij een “afbeelding” van de kwelschermen wordt gemaakt te onnauwkeurig. Meetmethoden als grondradar en seismiek vallen dus af.

Van de methoden die overblijven, lijken stijghoogtemetingen (met peilbuizen of waterspanningsmeters) en de SP-methode de meest kansrijke te zijn.

In het kader van SBW Piping Kunstwerken is met behulp van 3D-grondwaterstromingsmodellering onderzoek gedaan naar de invloed van lekken van verschillende vorm op het verticale uittredeverhang en de stroomsnelheid in de omgeving van het lek. De resultaten zijn gerapporteerd in Hartman & Veenbergen (2009). In deze gevoeligheidsanalyse is uitgegaan van een kunstwerk bestaande uit één damwand (zoals in Figuur 3.3). Er zijn variatieberekeningen uitgevoerd met een verhang over de damwand dat volgens het criterium van Lane kritisch is (uitsluitend verticale kwelweg). Vervolgens is voor een aantal typen gat in het kwelscherm de invloed op de stijghoogte en stroomsnelheid in de omgeving rondom het gat onderzocht. Voor de keuze van het type gat is gekeken naar wat voor historische kunstwerken het meest relevant wordt geacht:

- Gat van 0,25x0,25 m direct onder de sluisbodem; dit geeft de situatie weer dat de aansluiting tussen kwelscherm en sluisbodem verrot is over de breedte van 1 plank. Tijdens inspecties van historische kunstwerken is gebleken dat dit voor kan komen, o.a. bij de sluis in Hasselt.
- Gat van 0,25x0,25 m 1 m onder de sluisbodem; het is niet zeker of een relatief groot gat redelijkerwijs voor kan komen op diepte. Omdat niet te controleren is of een dergelijk gat aanwezig is met bestaande technieken is het van belang om te bepalen of een dergelijk gat gelokaliseerd kan worden;
- Spleet van 0,25 m breed over de volle hoogte van het scherm. Door aantasting of kromtrekken van het hout kan het voorkomen dat de planken van het kwelscherm niet meer op elkaar aansluiten. Deze situatie is gemodelleerd door een verticale spleet.

Voor beide typen gat blijkt het verticale verhang zeer sterk beïnvloed te worden door de aanwezigheid van het gat. Zoals reeds in hoofdstuk 2 uiteen is gezet heeft geconcentreerde stroming door een lek geen negatieve invloed op de stabiliteit van het kwelscherm ten gevolge van heave, omdat het gemiddelde verhang over het gehele kwelscherm juist afneemt. Dus een gat zou alleen voor (verticale) piping relevant kunnen zijn. Zoals aangegeven in paragraaf 3.4 bestaan er thans geen robuuste rekenmethoden waarmee bepaald kan worden of geconcentreerde stroming door een gat tot uitspoeling van zand kan leiden. In geval van een gat bovenin het kwelscherm (dat een grotere kans van optreden heeft dan een gat dieper in het kwelscherm) zou de rekenregel van Sellmeijer gebruikt kunnen worden, mits deze geïmplementeerd is in een driedimensionaal grondwaterstromingsmodel. Thans bestaat echter alleen een koppeling met het tweedimensionale MSeep (zie paragraaf 3.3).

Verder blijkt uit de gevoeligheidsanalyse dat het invloedsgebied zowel wat betreft het uittredeverhang als de stroomsnelheid zeer beperkt is. Zowel vlak naast als onder het gat is de afwijking van het uittredeverhang en stroomsnelheid nog maar zeer gering. Dit betekent dat een gat alleen waargenomen zou kunnen worden als in alle richtingen langs het

kwelscherm een zeer dicht meetnet van stijghoogte of stroomsnelheid toegepast zou worden. Dit is praktisch niet uitvoerbaar. Bijvoorbeeld: peilbuizen zouden geplaatst moeten worden met een hart-op-hart afstand van 20 cm.

Wellicht dat in de toekomst alleen SP-methoden een bruikbare optie kunnen zijn voor een voldoende nauwkeurige detectie. Indien gebruik gemaakt wordt van zogenaamde kettingsensoren geplaatst in peilbuizen kan bovendien informatie worden verkregen over de diepte van een lekkage. Met stijghoogtemetingen is dit bijna niet mogelijk. SP-methoden en de toepassing daarvan zijn echter nog in een ontwikkelingsstadium, zie bijvoorbeeld Pezard et al (2009).

#### 6.3.4 Overzicht beoordeling methoden

Tabel 6.2 geeft een samenvatting van beschikbare onderzoeksmethoden. Daarin is in de vierde kolom een inschatting van de kosten gegeven. Die zijn uiteraard sterk afhankelijk van de omvang van het kunstwerk; voor een 'eenvoudig' kunstwerk wordt gehanteerd:

1 = ordegrootte tot € 1000

2 = ordegrootte € 1000 - € 5000

3 = ordegrootte € 5000 - € 10.000

4 = ordegrootte meer dan € 10.000

Soort onderzoek	Noodzaak uitvoering	Frequentie	Kosten 1) (Geschat)	Opmerkingen
Archief	Altijd	Eenmalig	1	Onderzoek per definitie onvolledig
Visueel onderzoek	Altijd	Periodiek (elke toetsing)	1	Inclusief waterpassing
Onder water onderzoek	Facultatief	Periodiek (indien aanleiding)	3-4	Bv. elke toetsing een peiling, onder water wanneer daartoe aanleiding
- peiling	Altijd	Elke toetsing	2	
- duikers			3-4	Indien aanleiding
Grondonderzoek	Altijd	Eenmalig	3-4	Locaties op basis visueel en onder water onderzoek
- sonderingen			1-2	
- boringen			2-3	
- labonderzoek			1	
Metten grondwaterstanden	Altijd	Periodiek, c.q. continu	1 (per jaar)	Wsm's geschikter dan peilbuizen bij snelle fluctuaties in waterspiegel
Camerasonde	Zeer specifiek		1-2	Indien duidelijke aanleiding bestaat
Magnetometer	Facultatief	Eenmalig (indien aanleiding)	1	Plaats kwelschermen moet bekend zijn, alleen staal

Soort onderzoek	Noodzaak uitvoering	Frequentie	Kosten 1) (Geschat)	Opmerkingen
Tracerproef	Facultatief	Periodiek (indien aanleiding)	2-3	Op basis van toetsresultaten
Grondradar	Zeer specifiek	Indien aanleiding	2-3	Alleen in zeer specifieke omstandigheden toepasbaar
Soort onderzoek	Noodzaak uitvoering	Frequentie	Kosten 1) (Geschat)	Opmerkingen
Geo-elektrisch	Zeer specifiek	Indien aanleiding	2	Alleen in specifieke omstandigheden (geleidende elementen)
Seismiek	Specifiek	Indien aanleiding	??	Zeer grove methode
Spontane Potentiaal	Specifiek	Indien aanleiding	3-4	Nader onderzoek aanbevolen

Tabel 6.2 Overzicht toepasbaarheid meetmethoden in toetsing

#### 6.4 Maatregelen

Indien het volledige toetsingstraject op piping en heave tot een toetsresultaat “onvoldoende” leidt, of indien de conclusie getrokken wordt dat extra onderzoek om voldoende gegevens voor een toetsoordeel te verkrijgen kostbaarder zijn dan maatregelen (voor afweging, zie volgende paragraaf), moeten er maatregelen worden genomen. Voor het dimensioneren van maatregelen zal van dezelfde rekenregels als voor de toetsing gebruik moeten worden gemaakt. Verschil is dat voor het dimensioneren van maatregelen een langere planperiode van toepassing is dan voor een toetsing (5 jaar). Dit betekent dat een hogere waterstand gehanteerd moet worden.

Als na de afweging besloten wordt om tot maatregelen over te gaan zijn er, zoals aangegeven in TR Zandmeevoerende wellen, voor wat betreft waterkerende kunstwerken twee mogelijkheden:

- 1 verlenging van de kwelweg, horizontaal of verticaal (relevant voor zowel heave als piping);
- 2 voorkomen van het uitspoelen van zand door het aanbrengen of herstellen van een filterconstructie bij het uitstroompunt (alleen relevant voor piping).

Verlenging van de kwelweg kan plaatsvinden door herstel van eventuele lekkages in de kwelschermen. Mogelijke hersteltechnieken zijn het installeren van een vervangende damwand voor of ter plaatse van het bestaande kwelscherm, injectie van cementgroutmengsel of polyurethaanhars, of toepassing van biosealing. Deze laatste methode heeft als belangrijk voordeel dat de kosten in vergelijking met de andere methoden laag zijn en dat het in principe om een niet-destructieve methode gaat. Met name dit laatste aspect kan bij historische waterkerende kunstwerken van belang zijn.

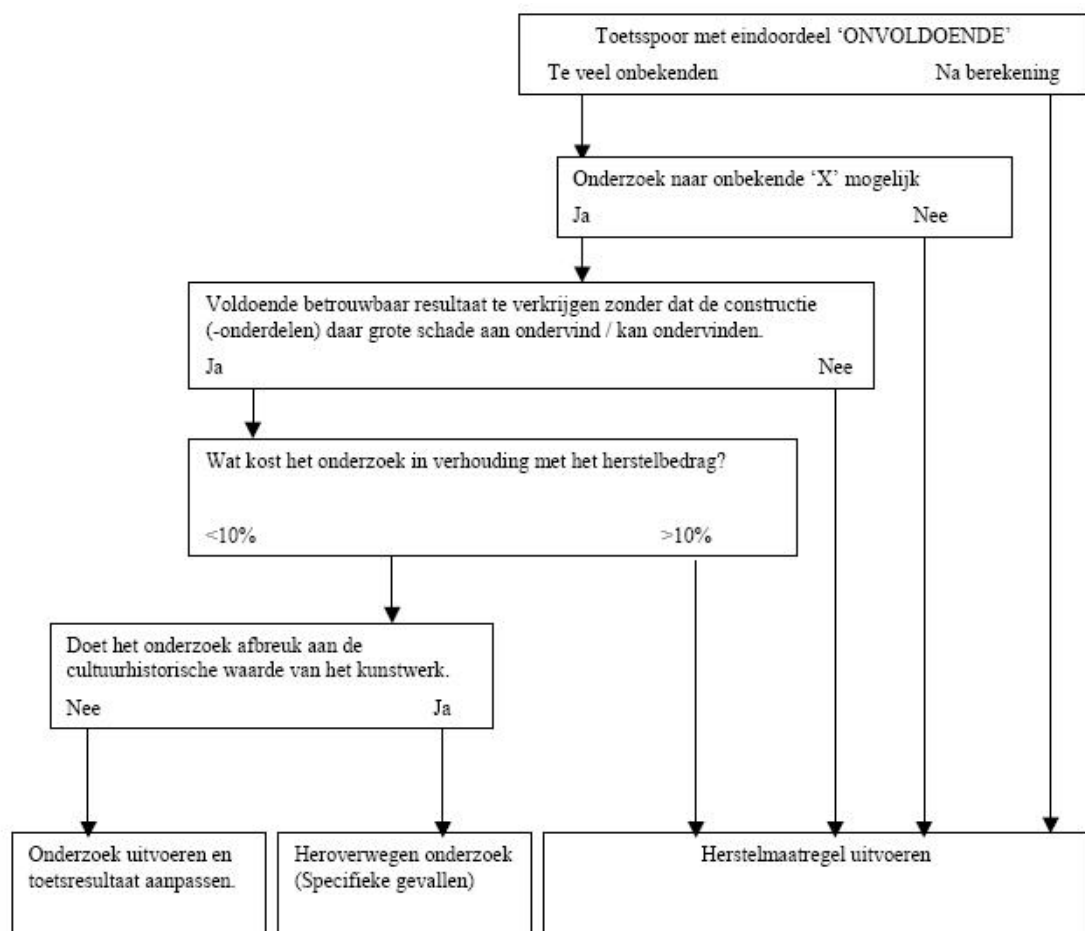
Biosealing is een methode om lekkages af te dichten door gebruik te maken van van nature in de grond aanwezige bacteriën. Aan bovenstroomse zijde van het lek worden nutriënten in de grond geïnjecteerd. Hierdoor ontstaat na enige tijd een explosieve groei van bacteriën in de buurt van het lek, omdat daar door concentratie van de grondwaterstroming de toevoer van nutriënten het grootst is. De bacteriën vormen ijzersulfide hetgeen zal leiden tot een verstopping van het lek. De exacte locatie van het lek hoeft derhalve niet bekend te zijn. Er

kan naar schatting een reductie van het lekdebiet met een factor 5 à 20 worden bereikt (CUR 166). Biosealing is inmiddels in het veld getest (Knoops & Wolfs, 2005). Omdat er gebruik gemaakt wordt van grondwaterstroming is een voorwaarde voor toepassing dat er sprake is van een verval over het kunstwerk.

## 6.5 Afwegingsmethode

Indien met de aan het begin van de toetsing reeds beschikbare gegevens niet tot een toetsoordeel kan worden gekomen op het onderdeel piping en heave, zijn er in principe twee mogelijkheden tot vervolg: nader onderzoek gebruikmakend van één of meer in dit hoofdstuk geïnterviewde methoden om meer gegevens te verkrijgen, hetgeen vaak tijd kost en kostbaar kan zijn, of het versterken/aanpassen van de constructie zodat aan de veiligheidseisen wordt voldaan. In deze paragraaf worden handreikingen gegeven waarmee een afweging kan worden gedaan tussen enerzijds (kostbaar en tijdrovend) nader onderzoek om te komen tot een toetsoordeel en anderzijds (minder kostbare) maatregelen ter versterking van de constructie.

Figuur 6.3 geeft het afwegingsschema weer zoals voorgesteld in het STOWA rapport (Schalkx & Hombergen, 2006).



Figuur 6.3 Afwegingsmethode volgens STOWA rapport (Schalkx & Hombergen, 2006)

In het volgende hoofdstuk wordt nog een derde mogelijkheid voorgesteld: het toetsen op de haalbaarheid van beheersmaatregelen tijdens actuele hoogwatersituaties.



## 7 Toetsing op haalbaarheid beheersmaatregelen in actuele hoogwatersituaties

In paragraaf 6.3.3 is gebleken dat het, indien er twijfel bestaat over de toestand van kwelschermen, zeer lastig is daar door middel van metingen voldoende zekerheid over te krijgen. Dit kan ook vanuit financieel oogpunt gelden (volgens Arcadis (2009) een belangrijke oorzaak voor de toetscore "geen oordeel"). Een toetsing op basis van de in hoofdstuk 3 gepresenteerde rekenregels is dan niet mogelijk. Een mogelijkheid om in die gevallen toch tot een toetsoordeel te komen zou kunnen bestaan uit een toetsing op de haalbaarheid van beheersmaatregelen tijdens actuele hoogwatersituaties waarmee bezwijken van het kunstwerk ten gevolge van piping voorkomen kan worden. (Voor heave is de toestand van de kwelschermen niet van belang, zoals in de voorgaande hoofdstukken uiteen is gezet). Een dergelijke nieuwe toetsprocedure zou gelijkenis vertonen met de procedures die thans in het toetsspoor Betrouwbaarheid Sluizingen (BS) worden voorgeschreven, waarmee getoetst wordt of waterkerende kunstwerken in geval van een dreigend hoogwater gesloten kunnen worden.

Of en welke beheersmaatregelen getroffen moeten worden hangt af van de plaats en oorzaak van schade die tijdens het hoogwater geconstateerd wordt. Op schadebeelden wordt in de volgende paragraaf ingegaan. In paragraaf 7.2 wordt vervolgens een aantal mogelijke beheersmaatregelen voorgesteld. In paragraaf 7.3 worden tenslotte enkele aspecten genoemd die in een toetsprocedure op beheersmaatregelen zouden kunnen worden opgenomen.

De vraag of een toetsing op de haalbaarheid van noodmaatregelen vanuit beheersoogpunt ook praktisch is, wordt in onderhavig rapport buiten beschouwing gelaten.

### 7.1 Schadebeelden tijdens hoogwater

De toetsing op piping en heave houdt in dat geverifieerd wordt dat de kans op constructief bezwijken van het waterkerende kunstwerk ten gevolge van piping of heave kleiner is dan de toelaatbare kans op bezwijken volgende de norm (zie paragraaf 5.1). Onder constructief bezwijken kan het optreden van ontoelaatbaar grote vervormingen van een constructie zodanig dat de samenhang daarvan verloren gaat worden verstaan. Verlies van de samenhang van de constructie kan leiden tot een (plotselinge) sterke toename van het debiet van naar binnen stromend water, hetgeen door erosie van de aansluitende grondconstructie nog verder versterkt kan worden (achterloopsheid). Welke schadebeelden gerelateerd aan piping of heave een indicatie zijn voor een dreigend constructief bezwijken is echter zeer lastig vast te stellen omdat constructief bezwijken op zeer vele manieren kan plaatsvinden en afhankelijk is van vele factoren (waaronder bijvoorbeeld de staat van het kunstwerk).

Een indicatie voor piping of welvorming, op basis waarvan noodmaatregelen genomen zouden kunnen worden, is verkleuring van het water bij hoogwater in het kunstwerk (achter het afsluitmiddel), achter het kunstwerk (ter plaatse van of achter de filterconstructie) of naast het kunstwerk. Dit alles duidt op uitspoeling van zand. Zoals gesteld is het hierbij vaak lastig te bepalen van welke mate van urgentie tot het nemen van beheersmaatregelen sprake is. Bij deformatie of verzakking van het kunstwerk of van naast het kunstwerk liggende grondlichamen is wel sprake van hoogste urgentie.



## 7.2 Beheersmaatregelen tijdens hoogwater

Afhankelijk van de plaats en de oorzaak van de schade, zijn te overwegen maatregelen:

- het aanbrengen van een noodbestorting bij open voegen, scheuren, of ter plaatse van disfunctionerende filters;
- het plaatsen van een damwand;
- instellen van een getrapt verval (indien mogelijk);
- het kunstwerk geheel afsluiten met grondlichaam (mits de sterkte van het kunstwerk en het aansluitend dijklichaam dit toelaten);
- de binnenwaterstand omhoog brengen (indien mogelijk).

## 7.3 Mogelijke procedures bij toetsing op haalbaarheid beheersmaatregelen

Analoog aan de eenvoudige beoordelingsmethode voor betrouwbaarheid sluitingen, zoals beschreven in de Leidraad Kunstwerken, zou de toetsing op beheersmaatregelen tijdens hoogwater uit de volgende aspecten kunnen bestaan:

- waarschuwingssysteem voor piping of welvorming bij het uittredepunt (in of achter het kunstwerk) of deformaties/verzakkingen van het kunstwerk;
- procedure voor mobilisatie: wie doet wat wanneer;
- procedure voor de uitvoering van beheersmaatregelen;
- bedrijfszekerheid van beheersmaatregelen, zoals het aanwezig zijn van voldoende materiaal voor het aanbrengen van een noodbestorting of het afsluiten van het kunstwerk met een grondlichaam.

## 8 Concluderende aanbevelingen voor aanpassing toetsing op piping en heave bij waterkerende kunstwerken

### 8.1 Inleiding

In paragraaf 6.3.3 is beschreven dat het, indien er twijfel bestaat over de toestand van kwelschermen, zeer lastig is daar door middel van metingen wel voldoende zekerheid over te krijgen. Een klein gat in het kwelscherm, dat ten opzichte van een groot gat een relatief grote kans van voorkomen heeft, kan reeds een grote invloed op het uittredeverhang en de stroomsnelheid van het grondwater hebben. Het invloedsgebied is echter zeer beperkt, waardoor detectie via metingen van stijghoogte of stromingsnelheid vrijwel onmogelijk is. Anderzijds is er geen methode beschikbaar waarmee het optreden van piping bij geconcentreerde stroming bij een gat in een kwelscherm beoordeeld kan worden. Het is dus moeilijk te bepalen of er sprake is van een probleem. Dit maakt het lastig om te beoordelen of met de in hoofdstuk 3 gepresenteerde rekenregels met voldoende zekerheid tot een toetsoordeel gekomen kan worden. Een toetsing op de haalbaarheid van beheersmaatregelen tijdens hoogwatersituaties, zoals voorgesteld in hoofdstuk 0, zou wel tot een voldoende betrouwbaar toetsoordeel kunnen leiden. Of een dergelijke oplossing vanuit beheersoogpunt praktisch is, is een andere vraag, die in onderhavig rapport niet beantwoord wordt.

Indien, ondanks ontbrekende gegevens betreffende de onderbouw van het kunstwerk, wel voldoende redenen zijn om gebruik te kunnen maken van bestaande rekenregels, zoals die gepresenteerd zijn in hoofdstuk 3, wordt in de volgende paragraaf een voorstel voor een te volgen stappenplan gedaan. Hierbij gaat het om een aantal extra handvatten, waarmee de praktische toepasbaarheid van de rekenregels- en modellen verbeterd zou kunnen worden, indien voldoende gegevens betreffende de onderbouw ontbreken.

Voor wat betreft de bestaande rekenregels en rekenmodellen worden geen aanpassingen voorgesteld. Wel zullen in het hoofdstuk 9 een aantal mogelijke verbeteringspunten genoemd worden en aanbevelingen tot vervolgonderzoek gegeven worden.

### 8.2 Stappenplan toetsing waterkerende kunstwerken

Op basis van hoofdstuk 6 kan gesteld worden dat er, bij gebrek aan gegevens van de onderbouw, voor de bepaling van de maatgevende kwelweg(en) twee (in termen van kosten en informatie) efficiënte methoden zijn om toch tot meer zekerheid en daarmee mogelijk een toetsoordeel te komen:

- 1 op basis van de STOWA stroomschema's (paragraaf 6.2.2 en Appendix A) kan een inschatting van de aanwezigheid, eigenschappen en dimensies van de kwelschermen worden verkregen;
- 2 stijghoogtemetingen kunnen inzicht geven in de grondwaterstroming onder en om het kunstwerk heen en de werking van eventueel aanwezige kwelschermen.

Het verdient derhalve aanbeveling om het toetsschema in Figuur 5.1 uit te breiden met een verwijzing naar het STOWA stroomschema en met een stappenplan voor de beoordeling op piping en heave op basis van stijghoogtemetingen.

Het stappenplan is grotendeels gebaseerd op Boer (2005) en kan gebruikt worden indien met het toetsschema in Figuur 5.1 niet tot een oordeel kan worden gekomen:

1 *Gegevensverzameling* (waarschijnlijk al uitgevoerd):

- geometrie kunstwerk;
- grondopbouw onder en rondom het kunstwerk;
- type fundering (op palen of op staal);
- plaats, aantal en dimensies van eventueel aanwezige kwelschermen;
- locatie, soort en dimensie van eventueel aanwezige afdichtende lagen of filterconstructies.

In deze fase kan gebruik gemaakt worden van de STOWA stroomschema's.

2 *Opstellen hypothese stijghoogteverloop*

Op basis van de gevonden verwachte maatgevende kwelweg (stap 3 in Figuur 5.1) wordt een hypothese opgesteld over de grondwaterstroming onder en om het kunstwerk. Op basis daarvan wordt een theoretisch lineair verlopende verhanglijn over de lengte-as van het kunstwerk berekend, bijvoorbeeld met MSeep. Daarbij moet rekening worden gehouden met de algehele richting van de grondwaterstroming in het gebied en de invloed van tijdsafhankelijkheid op de stijghoogte in de watervoerende zandlaag (van belang in getijdegebied).

3 *Opstellen meetplan stijghoogten*

De keuze voor peilbuizen of waterspanningsmeters (korte responstijd) hangt af van de grondopbouw (doorlatendheid) en verwachte invloed van tijdsafhankelijkheid (zie paragraaf 6.2.7).

Plaats op minimaal twee locaties meetfilters, één ca. 2m benedenstrooms van de intredezijde en één ca. 2m bovenstrooms van de uittredezijde. Plaats beide buizen zo dicht mogelijk naast het kunstwerk, met een bovenkant filter op ca. 1m onder het aanlegniveau van het kunstwerk. Bij voorkeur worden per locatie filters op twee niveaus geplaatst, waarmee een eventueel verhang tussen de watervoerende pipinggevoelige laag en diepere watervoerende lagen vastgesteld kan worden. Indien er duidelijk sprake is van infiltratie naar de diepere zandlagen toe, zou afhankelijk van de situatie het optreden van heave benedenstrooms van het kwelscherm onder maatgevende omstandigheden wellicht al uitgesloten kunnen worden.

Eventueel kunnen reeds in deze stap extra filters worden geplaatst op meerdere locaties:

- Eventueel kunnen extra meetfilters in dezelfde lijn als 1 en 2 worden geplaatst. Doe dit enkele meters benedenstrooms van een plaats waar een kwelscherm wordt verwacht of een overgang van constructieonderdelen is (bijv. aansluiting sluishoofd op schutkolk). Bij een afwijkende aanlegdiepte van de onderdelen kan gekozen worden voor twee filterniveaus per meetpunt, één op dezelfde diepte als de buizen 1 en 2, en één ca. 1 meter onder aanlegniveau, dus in het invloedsgebied van de fundering.
- Als de lengte van een scherm bekend is kan een filter met de bovenzijde ongeveer ter plaatse van de onderzijde van het scherm aangebracht worden, benedenstrooms van het scherm. In combinatie met een filter op dezelfde locatie, maar ondieper aangebracht, kan ook de richting van verticale stroming achter het scherm gedetecteerd worden.
- Als de configuratie van een scherm bekend is en informatie over stroming rond het scherm benodigd is kan een extra filter aangebracht worden.

4 *Uitvoering metingen en analyse resultaten*

Na plaatsing van de apparatuur en een eerste periode meten kunnen de resultaten worden geanalyseerd. Analyseer in stappen, vergelijk telkens met de hypothese uit stap 2 en zoek een verklaring voor de afwijkingen:

- Eerst moet met de stijghoogten uit de buizen met gelijke filterdiepte, geplaatst in ongeveer één lijn evenwijdig aan de as van het kunstwerk, een verhanglijn op

worden gesteld voor het verloop van de stijghoogte evenwijdig aan de lengte-as van het kunstwerk. Vergelijk het verloop met de hypothese en verklaar de verschillen.

- Bepaal uit een vergelijking tussen de binnen- en buitenwaterstand en de gemeten stijghoogten, respectievelijk het uittrede- en intredeverhang.
- Bepaal de veiligheid tegen het mechanisme heave of piping onder meetomstandigheden.
- Bepaal middels de buizen die benedenstrooms van een (vermoedelijk) scherm geplaatst zijn de werking van het scherm en de relatieve bijdrage van de schermen aan de afname van het verval over de lengte van het kunstwerk.
- Controleer het effect van de funderingswijze. Een verhang dat nagenoeg nul is duidt op een spleet onder de constructie en derhalve een fundering op palen. Bij fundering op staal mag dit niet het geval zijn.
- Bepaal of met voldoende zekerheid een conclusie kan worden getrokken betreffende de veiligheid van het kunstwerk tegen piping/heave onder toetsomstandigheden. Extrapolatie kan bijvoorbeeld met MSeep plaatsvinden. Als er voldoende zekerheid is kan met stap 6 worden verdergegaan. Is er nog onduidelijkheid en kan met de nu beschikbare gegevens geen (betrouwbaar) oordeel worden gegeven dient stap 5 doorlopen te worden.

#### 5 *Verfijning meetprogramma*

Maak gebruik van de extra mogelijkheden genoemd onder stap 3 en/of pas het meetprogramma naar eigen inzicht aan. Bepaal welk(e) verschijnsel(en) nader onderzocht moet(en) worden en pas het meetplan hier op aan (=bijplaatsen meetfilters) of benut de reeds aangebrachte filters op een van de volgende manieren:

- a. Aanpassen van de meetfrequentie. Bij peilbuizen is vanwege de benodigde toestroom van grondwater de responssnelheid beperkt. De gemeten fluctuatie is derhalve een ondergrens voor de stijghoogte.
- b. Aanpassen van de meetomstandigheden. Bijvoorbeeld door:
  - tijdelijk en gecontroleerd wijzigen van het schutregime bij een schutsluis (een dag of nacht meten met volle of lege kolk, als controle op lekkage);
  - kunstmatig aanpassen van het verval, bijvoorbeeld door wijzigen van het peil in een kanaalpand;
  - meten tijdens extreme omstandigheden;
  - uitvoeren van een pompproof (zie opmerkingen in paragraaf 6.2.7).

#### 6 *Eindoordeel veiligheid tegen piping en heave onder toetsomstandigheden*

Geef een eindoordeel over de veiligheid tegen piping/heave bij het kunstwerk. Indien de meetomstandigheden niet overeen kwamen met de toetsomstandigheden moet eerst geëxtrapolerd worden.

Beoordeel vervolgens kwantitatief het uittredeverhang met de heaveregel of de methode van Lane. Als voor de meting boringen zijn uitgevoerd kan de kennis over de bodemopbouw hierbij worden gebruikt.

Betrek in het eindoordeel de werking van de kwelvoorzieningen (zowel horizontaal als verticaal) en hun relatieve effect, de invloed van de bodemopbouw en tijdsafhankelijkheid.

Afgezien van de bezwaren genoemd in paragraaf 8.1, kan met behulp bovenstaande aanpak tot een toetsoordeel gekomen worden zonder dat alle informatie met betrekking tot plaats, dimensies en toestand van eventueel aanwezige kwelschermen bekend hoeft te zijn. Hiermee is een antwoord gegeven op onderzoeksvraag 3 in paragraaf 1.3.

### 8.3 Voorstel aanpassingen TR Zandmeevoerende wellen

Voor het TR Zandmeevoerende wellen worden met betrekking tot het onderdeel piping en heave bij waterkerende kunstwerken de volgende aanpassingen voorgesteld:

- Het volledig opnemen van de in hoofdstuk 6 geïnventariseerde en beoordeelde methoden ter bepaling van de (maatgevende) kwelwegen en gegevens die noodzakelijk zijn voor een grondwaterstromingsanalyse. Daarbij gaat het met name om de bepaling van de aanwezigheid en dimensies van kwelschermen en de aanwezigheid van eventuele lekken in kwelschermen.
- Het opnemen van het aangepaste stappenplan voor de toetsing ter vervanging van het toetsschema in Figuur 5.1, dat is opgenomen in het huidige TR Zandmeevoerende wellen.
- Het opnemen van rekenregels voor verticale piping. De thans beschikbare rekenmodellen voor piping hebben alleen betrekking op horizontale piping. Een uitbreiding naar verticale piping is gewenst, omdat dit bij geconcentreerde lekkage in kwelschermen een probleem kan zijn. In paragraaf 3.4 is hiertoe een voorstel gedaan. Wellicht moet hiertoe echter eerst meer onderzoek gedaan worden. Zie aanbevelingen voor vervolgonderzoek in hoofdstuk 9.
- In het TR Zandmeevoerende wellen wordt voor het toelaatbare kritieke verhang thans een waarde van 0,5 voorgeschreven (paragraaf 5.3.8). Dit komt overeen met een veiligheidsfactor van 1,7 a 2,3 (afhankelijk van de porositeit van het zand benedenstrooms van het kwelscherm). Deze veiligheidsfactor zou alle onzekerheden die het optredend verhang beïnvloeden (waterstand, doorlatendheid ondergrond) en kritieke verhang (met name poriëngehalte) moeten afdekken. Calle & Sellmeijer (1998) stellen voor deze veiligheidsfactor te vervangen door separate partiële veiligheidsfactoren voor poriëngehalte en verval. Met name de invloed van de onzekerheid van poriëngehalte op het uittredeverhang kan erg groot zijn, omdat deze parameter vaak moeilijk te bepalen is. Toepassing van twee separate partiële veiligheidsfactoren in plaats van één sluit nauw aan bij de huidige veiligheidsmarge, maar biedt mogelijkheden de veiligheidsmarge aan te passen afhankelijk van de beschikbare gegevens over het poriëngehalte (zie volgende punt). Hierdoor kan scherper getoetst worden. In Calle & Sellmeijer (1998) worden indicaties voor de aan te houden partiële veiligheidsfactoren gegeven. Voor de overige variabelen kan een veiligheidsfactor van 1,0 aan worden gehouden, maar dient wel van veilige schattingen (karakteristieke waarden) te worden uitgegaan.
- Het opnemen van methoden ter bepaling van het in situ poriëngehalte (en daarmee voor een deel ook de doorlatendheid) van de watervoerende zandlaag, met name benedenstrooms van het kwelscherm. In het TR Voorland, dat thans in het kader van SBW Buitendijkse Zones en Afslagbeheer wordt geschreven (Van den Ham & Van der Ruyt, 2009) en medio 2010 beschikbaar komt, worden mogelijkheden gegeven om via correlatiefuncties met de conusweerstand en elektrische dichtheidsmetingen de relatieve dichtheid te bepalen. Tevens wordt per methode een schatting van de onzekerheid gegeven.
- Het expliciet opnemen van filterregels (die in het huidige TR niet zijn gegeven).
- Het aanpassen van een methode ter afweging van (kostbaar) extra onderzoek om tot een toetsoordeel te komen of het uitvoeren van maatregelen op basis van paragraaf 6.5.
- Het opnemen van de in hoofdstuk 0 voorgestelde toetsing de haalbaarheid van beheersmaatregelen in een hoogwatersituatie (bijvoorbeeld door dit toe te voegen aan Figuur 5.1).

#### **8.4 Voorstel aanpassingen VTV**

Voor de gedetailleerde toetsing met betrekking tot piping en heave bij waterkerende kunstwerken wordt in Katern 7 van het VTV reeds verwezen naar het TR Zandmeevoerende wellen. Indien de STOWA stroomschema's niet opgenomen worden in het TR Zandmeevoerende wellen wordt aanbevolen een verwijzing op te nemen naar het STOWA-rapport "Historische Kunstwerken" en de daaraan ten grondslag liggende database "Kenmerken Historische Kenmerken".

#### **8.5 Overige aanbevelingen met betrekking tot volgende toetsronde**

Bij de veldproef bij de historische schutsluis te Hasselt, een onderdeel van SBW Piping Kunstwerken (zie paragraaf 1.4) trad gedurende de meetcampagne van 3 maanden, tegen de verwachting in, geen verval over de sluis op. De opzet om met behulp van aan weerszijden van het kunstwerk geplaatste peilbuizen een uitspraak te kunnen doen over de werking van de kwelschermen, kon daardoor niet uitgevoerd worden. Gezien de meestal beperkte tijd waarin onderzoek voor een (gedetailleerde) toetsing kan worden uitgevoerd, lijkt het zinvol om bij alle waterkerende kunstwerken waar op grond van ontbrekende informatie niet tot een oordeel op piping en heave kon worden gekomen, reeds op korte termijn peilbuizen rondom het kunstwerk te plaatsen en deze gedurende langer tijd te monitoren.



## 9 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

In dit hoofdstuk wordt getracht een antwoord te geven op onderzoeksvragen 5 en 6 in paragraaf 1.3. Onderstaand volgt een overzicht van kennisleemten en voorstellen om deze op te vullen:

- Het in paragraaf 8.2 voorgestelde stappenplan laat zien dat stijghoogtemetingen via peilbuis- of waterspanningsmetingen een geschikte methode kunnen zijn voor de beoordeling van de werking van kwelschermen. Echter, detectie van kleine lekken, die een grote invloed kunnen hebben op het lokale uittredeverhang en stroomsnelheid en waarvan de kans van aanwezigheid relatief groot is, blijkt niet goed mogelijk (zie paragraaf 6.3.3 en Hartman & Veenbergen (2009)). Met betrekking tot detectie van lekken kan het meest verwacht worden van de Spontane Potentiaal (SP) methoden. De ontwikkeling van deze methoden is nog in volle gang en laat veelbelovende resultaten zien (zie bijvoorbeeld Pezard et al, 2009). Het verdient aanbeveling toepassing van deze methoden in relatie tot waterkerende kunstwerken verder te onderzoeken.
- Zoals aangegeven in paragrafen 6.3.3 en 8.1 blijft met de in paragraaf 6.2 geïnventariseerde meetmethoden altijd een onzekerheid bestaan over de aanwezigheid van geconcentreerde lekken in het kwelscherm, met name als deze klein zijn. Een mogelijkheid om hier mee om te gaan is om voor elke methode de betrouwbaarheid in termen van een zogenaamde probability of detection (PoD) uit te drukken. De PoD is de kans dat een lek van bepaalde omvang in het kwelscherm wel/niet gedetecteerd wordt. Deze PoD's kunnen worden meegenomen in een probabilistische analyse. Hiermee kan beschikbare informatie uit diverse bronnen (meetmethoden) maximaal benut worden. Voor het SBW onderzoek 2011-2016 is hiertoe een onderzoeksvoorstel geschreven (samenwerking Deltares-TNO/groep Vrouwenvelder).
- Gevoeligheidsanalyses, o.a. binnen SBW Piping Kunstwerken (Veenbergen, 2009) en verder Griffiths & Fenton (1993) en Calle & Sellmeijer (1998) hebben aangetoond dat de nauwkeurigheid waarmee bepaald wordt of het optredend uittredeverhang het kritische uittredeverhang overschrijdt, in sterke mate beïnvloed wordt door onzekerheden in de volgende, in de praktijk eveneens moeilijk te bepalen, parameters:
  - de intredeweerstand van het buitenwater: beïnvloedt in sterke mate het optredende uittredeverhang (Veenbergen, 2009);
  - de porositeit: beïnvloedt sterk het kritieke uittredeverhang;
  - de aanwezigheid van een spleet tussen ondergrond en constructie bij lange kunstwerken: beïnvloedt sterk het optredende uittredeverhang ( $L/D > 2$ );
  - de ruimtelijke variatie van de doorlatendheid van de watervoerende laag: beïnvloedt in sterke mate zowel de verwachtingswaarde als de onzekerheid van het optredende uittredeverhang (Griffiths & Fenton).  
Het lijkt van belang vervolgonderzoek te richten op reductie van de onzekerheden in bovengenoemde parameters
- Verbetering van de definitie van de grenstoestand bij heave en piping bij kunstwerken (deze aanbeveling is reeds gedaan door Calle & Sellmeijer (1998), maar tot nu toe nog niet opgepakt). Ook voordat de korrelspanningen benedenstrooms van het kwelscherm volledig zijn weggevallen kan instabiliteit van



het kwelscherm optreden waardoor het kwelscherm niet meer goed aansluit op de constructie of kan een filterconstructie of stortebed in ongerede raken.

- Er is meer kennis vereist over de processen die bij heave en verticale piping optreden. Geconcentreerde lekkage heeft op heave in zoverre een gunstige invloed dat de stabiliteit van het kwelscherm juist vergroot wordt. Fluïdisatie van het zand tussen een lek en een filter (bijvoorbeeld een granulair stortebed) kan echter wel de filterwerking negatief beïnvloeden. Ook kan verticale piping ontstaan. In paragraaf 3.4 is een mogelijkheid aangegeven hoe daaraan gerekend kan worden. Bij een volledig gelijkmatige verticaal gerichte opwaartse grondwaterstroming zal het verticale verhang vrijwel nooit hoog genoeg zijn om verticale uitspoeling van zand te bewerkstelligen. Heterogeniteit in doorlatendheid zal er echter altijd toe leiden dat grondwaterstroming zich zal concentreren, waardoor lokaal stroomsnelheden veel groter worden zodat verticale uitspoeling kan ontstaan. Het proces van het ontstaan van lokale pipes is in diverse experimenten ook waargenomen (bijvoorbeeld Van den Ham & Kruse, 2009c, Mörz et al, 2007). Hoe dit proces precies in zijn werk gaat en hoe daar modelmatig aan te rekenen is, is echter nog onduidelijk.
- Ontwikkeling van een beoordelingsmethode voor kwelwegen die langs klei of veen gaan. Hierbij gaat het niet om terugschrijdende erosie zoals in zand, maar om erosie van reeds bestaande grondopeningen zoals bijvoorbeeld een zettingspleet tussen de uit klei of veen bestaande ondergrond en de onderkant van de constructie. Met name dispersieve kleien kunnen onder bepaalde omstandigheden zeer gevoelig voor erosie zijn (Segers, 2009). Deze kleien zijn ook in Nederland wijd verspreid. Bruikbare rekenregels zijn voor dit type erosie echter niet voorhanden.
- Een door Boer (2005) genoemde aanbeveling is onderzoek naar het “stampen” van een op staal gefundeerde sluis.
- De onzekerheid van het kritieke uittredeverhang wordt in sterke mate bepaald door de onzekerheid van het poriëngehalte van het zand benedenstrooms van het kwelscherm. De doorlatendheid van de watervoerende zandlaag is van belang voor het ontstaan van horizontale en verticale piping. Een nauwkeurigere methode om de doorlatendheid en het poriëngehalte van de watervoerende zandlaag te bepalen is gewenst. Dit zal in SBW 2011-2016 waarschijnlijk worden opgepakt.
- Uitvoeren van een proeftoets met de in het vorige rapport aangereikte nieuwe handvatten voor een gedetailleerde toetsing. Bij voorkeur betreft dit een waterkerend kunstwerk waarover een groot verhang staat, dus een kort kunstwerk (verhouding lengte en dikte zandlaag klein) of een kunstwerk waarover een groot verval staat. Ter bestudering van instationaire effecten zou een kunstwerk gelegen in het getijdegebied interessant zijn.
- Opstellen checklists benodigde informatie gegevensverzameling, richtlijnen hoe een risicoanalyse kan worden gebruikt als basis voor het vaststellen van de informatiebehoefte (hiertoe wordt in het kader van het WTI project door Arcadis een eerste aanzet gegeven (Arcadis, 2009)).
- Het opstellen van handvatten voor het praktisch kunnen uitvoeren van een toetsing bij een historisch kunstwerk met betrekking tot vergunningen en ontheffingen. Bijvoorbeeld: hoe praktisch om te gaan met een situatie waarin eigendom en het beheer van de sluis niet bij één partij liggen (bijvoorbeeld gemeente en waterschap).
- Organiseren van (een) workshop(s) met beheerders en toetsers naar aanleiding van de in onderhavig rapport voorgestelde aanpassingen in de gedetailleerde toetsing op piping en heave bij waterkerende kunstwerken.

## 10 Literatuur

Arcadis (diverse auteurs) (2009). Plan van aanpak toetsing witte vlekken kunstwerken. Arcadis, rapport 074133592:D - C02021.000042 (ten behoeve van WTI).

Arends, G.J. (2004). Historische sluizen en stuwen – waardering en instandhouding. Uitgeverij Matrijs, Utrecht.

Bazant, Z. (1953). Stability of a non-cohesive soil under elliptic upward seepage. Proc. 3rd Int Conf on Soil Mech and Found Eng. Zurich, Vol II, 198 – 203.

Beek, V.M. van, Knoeff, H. (2009). SBW Hervalidatie Piping – B3. Analyse kleinschalige laboratoriumproeven. Deltares, rapport 1001449-008-GEO-0001.

Bligh, W.G. (1910). Dam barrages and weirs on porous foundations. Engineering news, 1910.

Boer, A.J. (2005). De beoordeling van onder- en achterloopsheid bij bestaande waterkerende kunstwerken. Afstudeerrapport TUDelft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, Sectie Waterbouwkunde.

Calle, E.O.F., Sellmeijer, J.B. (1998). Probabilistische gevoeligheidsanalyse heave Fase 5: eindrapportage. Grondmechanica Delft, rapport 370250/54.

Calle, E.O.F. (1998). TR Zandmeevoerende wellen: Regel van Lane vs Heave-analyse. Grondmechanica Delft notitie 10-12-1998 aan dr. ir. G.J.C.M. Hoffmans van RWS DWW.

COW (diverse auteurs) (1979). Zandmeevoerende wellen. Een overzicht van in literatuur aangetroffen “piping”-criteria. Huidige toepassingen bij rivierdijkontwerpen. Centrum voor Onderzoek Waterkeringen, rapport S-77.066.

CUR 166 (diverse auteurs) (2005). CUR publicatie 166 Damwandconstructies, deel 1 en 2. Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving (CUR), Gouda.

CUR 211 (diverse auteurs) (2003). Handboek kademuren. Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving (CUR), Gouda.

Davidenkoff, R. (1956). Zur Berechnung des hydraulischen Grundbruches. Die Wasserwirtschaft 46.

Griffith, W.M. (1913). The stability of weir foundations on and soil subject to hydrostatic pressure. Minutes of Proceedings J.C.E. 1913-1914 Vol 197 Part III.

Griffiths, D.V., Fenton, G.A. (1993). Seepage beneath water retaining structures founded on spatially random soil. Géotechnique 43 (4), 577 – 587.

Ham, G.A. van den, Kruse, G. (2009a). SBW Piping Kunstwerken – KW4a Factual reports laboratorium experimenten fase 1. Deltares, rapport 1001452-017-GEO-0001.

Ham, G.A. van den, Kruse, G. (2009b). SBW Piping Kunstwerken – KW4b Factual reports laboratorium experimenten fase 2. Deltares, rapport 1001452-020-GEO-0001.

Ham, G.A. van den, Kruse, G. (2009c). SBW Piping Kunstwerken – KW9 Analyse kleine schaal proeven. Deltares, rapport 1200675-002-GEO-0001.

Ham, G.A. van den, Ruyt, M. van der (2009). SBW Buitendijkse zones en afslagbeheer – Toetsing op zettingsvloeiing. Deltares, rapport 1200503-001-GEO-0004.

Hartman, A.D., Veenbergen, V. (2009). SBW Piping Kunstwerken – KW8 Gevoeligheidsanalyse grondwaterstroming kunstwerken. Deltares, rapport 1200675-001-GEO-0002.

Harza, L.F. (1935). Uplift and seepage under dams and. Transactions of the American Society of Civil Engineers, Vol. 100, 1352 – 1385.

Jongh, I. de. (2005). Verslag Workshops Toetsen op Veiligheid 2006 – Workshop 3 (Onderloopsheid bij historische kunstwerken), gehouden in De Wageningse Berg op 21 september 2005. Opgesteld door Arcadis, kenmerk 110403/WA6/034/001642.001B.

Jongh, I. de. (2006). Onderzoek naar oorzaken van LRT score Geen Oordeel. Arcadis memo 110403.001705.006 van 1 november 2006 aan Govertine de Raat (DWW).

Knoops, W.P.H, Wolfs, P.P.A. (2005). Welvorming – Lekdetectie in een tunnelbak. Civiele Techniek 2, 18 – 21.

Koelwijn, A.R. (2009). SBW Hervalidatie Piping – E. Evaluatie 0,3d rekenregel. Deltares, rapport 1001453-002-GEO-0002.

Lambert, J.W.M., Deen, J.K. van (2000). Lekdetectie in waterremmende constructies – inventariserende studie – definitief. GeoDelft, rapport 710104.0002 (in opdracht van Delft Cluster).

Lane, E.W. (1934). Security from under-seepage masonry dams on earth foundations. Proceedings ASCE, paper no. 1919, 1235 – 1351 (including discussion).

Miesel, D. (1978). Rückschreitende Erosion unter bindiger Deckschicht. Vorträge der Baugrundtagung, Berlin, Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau E. V., 1978.

Mörz, T., Karlik, E.A., Kreiter, S., Kopf, A. (2007). An experimental setup for fluid venting in unconsolidated sediments: new insights to fluid mechanics and structures. Sedimentary Geology 196, 251 – 267.

Müller-Kirchenbauer, H. (1964). Zur Mechanik der Fließsandbildung und des hydraulischen Grundbruches. Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Grundbau der TH Karlsruhe, Heft 17.

Pezard, P.A., Gautier, S., Le Borgne, T., Legros, B., Deltombe, J.L. (2009). MuSet: a multiparameter and high precision sensor for downhole spontaneous electrical potential measurements. Comptes Rendus Geosciences 341 (10-11), 957 – 964.

- Pruiksma, J., Barends, F. (2009). SBW Hervalidatie Piping – HP4. 2D/3D EEM grondwaterstromingsberekeningen onder een dijk ter bepaling piping-gevoeligheid. Deltares, rapport 1200187-009-GEO-0001.
- Rossum, F. van, Zanen, A. (1959). Onderloopsheid. Onderzoek naar de aard van het verschijnsel en methode ter bepaling van de veiligheidscoëfficiënt. De Ingenieur – Bouw en waterkunde 9, 87-91.
- Schalkx, S.C., Hombergen, V.J.W. (2006). Hulpmiddelen voor toetsers - Historische Kunstwerken. STOWA, rapport 2006-03.
- Schalkx, S.C. (2006). Hulpmiddelen voor toetsers - Voorbeeldenboek Historische Kunstwerken. STOWA, rapport 2006-W02.
- Schuler, U., Brauns, J. (1993). Behaviour of coarse and well-graded filters. In: Brauns, Heibaum & Schuler (eds), Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering, pp. 3-17. Balkema, Rotterdam.
- Segers, W. (2009). Piping in cohesief materiaal – literatuurstudie. Royal Haskoning, rapport 9T5602.B0/R002/903137/Amst (ten behoeve van SBW Piping Kunstwerken).
- Sellmeijer, J.B. (1981). Piping due to flow towards ditches and holes. Proceedings of Euromech 143, Delft, 69 – 72.
- Sellmeijer, J.B. (2006). Numerical computation of seepage erosion below dams (piping). Proc. 3rd Int. Conf. Scour and Erosion, Amsterdam, Nov. 2006, Gouda, CURNET, 2006, 6 pp.
- Sjenitzer, S. (2009). Inventarisatie piping bij waterkerende kunstwerken – Inventarisatie toetsingservaring bij waterschappen. Royal Haskoning, rapport 9T5602A0 (ten behoeve van SBW Piping Kunstwerken).
- Skempton, A.W., Brogan, J.M. (1994). Experiments on piping in sandy gravels. Géotechnique 44 (3), 449 – 460.
- TAW (diverse auteurs) (1999). Technisch rapport Zandmeevoerende wellen. Rapport Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen.
- Terzaghi, K. von (1922). Grundbruch an Stauwerken und seine Verhütung. Die Wasserwirtschaft 17, 445 – 449.
- Terzaghi, K. von, Peck, B.P. (1961). Die Bodenmechanik in der Baupraxis. Berlin, Göttingen, Heidelberg.
- Turnbull, W.J., Mansur, C.J. (1959). Underseepage and its control. Trans ASCE 3247.
- Veenbergen, V. (2009). SBW Piping Kunstwerken – KW5. Simulatie grondwaterstroming sluis Hasselt. Deltares, rapport 1001452-015-GEO-0001.
- VTV2006 (2007). Voorschrift Toetsen op Veiligheid Primaire Waterkeringen. Ministerie van Verkeer en Waterstaat.

Zaadnoordijk, W.J. (2009). Kunstwerken – beschouwing grondwaterstroming rond kunstwerken in relatie tot verlies aan waterkerende of waterscheidende functie. Royal Haskoning, rapport 9T5602A0.11f/R00003/500517/Rott (ten behoeve van SBW Piping Kunstwerken).

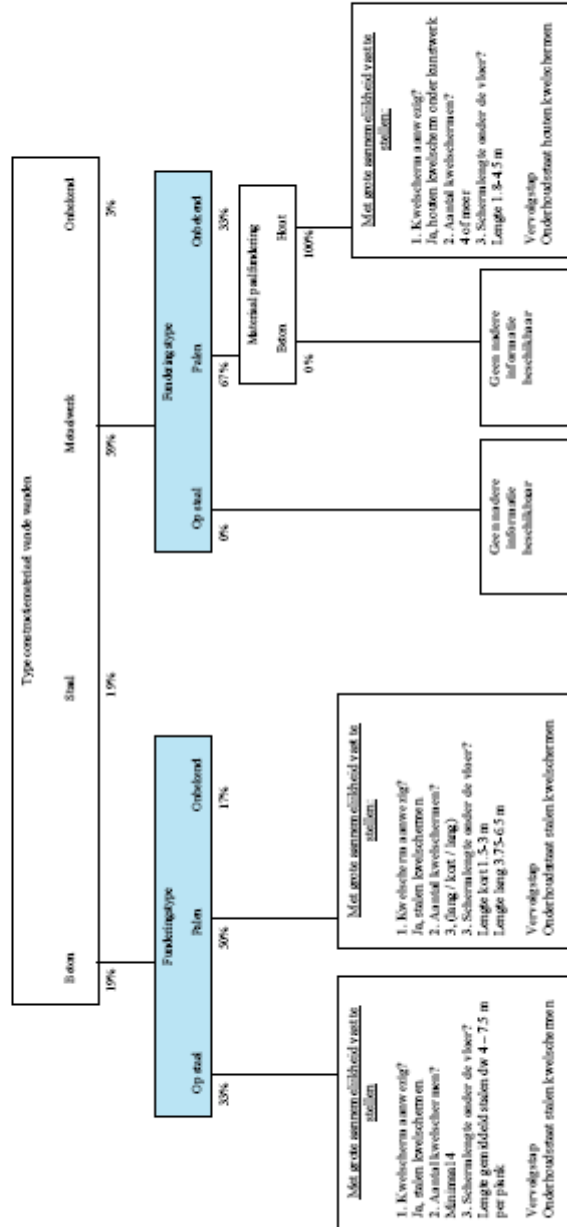
## A Stroomschema's



# Toetsing op Piping en Heave (STPH) Wat is met enige aannemelijkheid te zeggen over de kwelweglengte bij een keersluis?

**Opkissenden:**  
 1. Kwel scherm aanwezig?  
 2. Aantal kwel schermen?  
 3. Scherm lengte onder de vloer?  
 4. Onderhoudsstaat?

32 kunstwerken





## Toetsing op Piping en Heave (STPH) Wat is met enige aannemelijkheid te zeggen over de kwelweglengte bij een uitwateringsluis?

**Ordeindelen:**

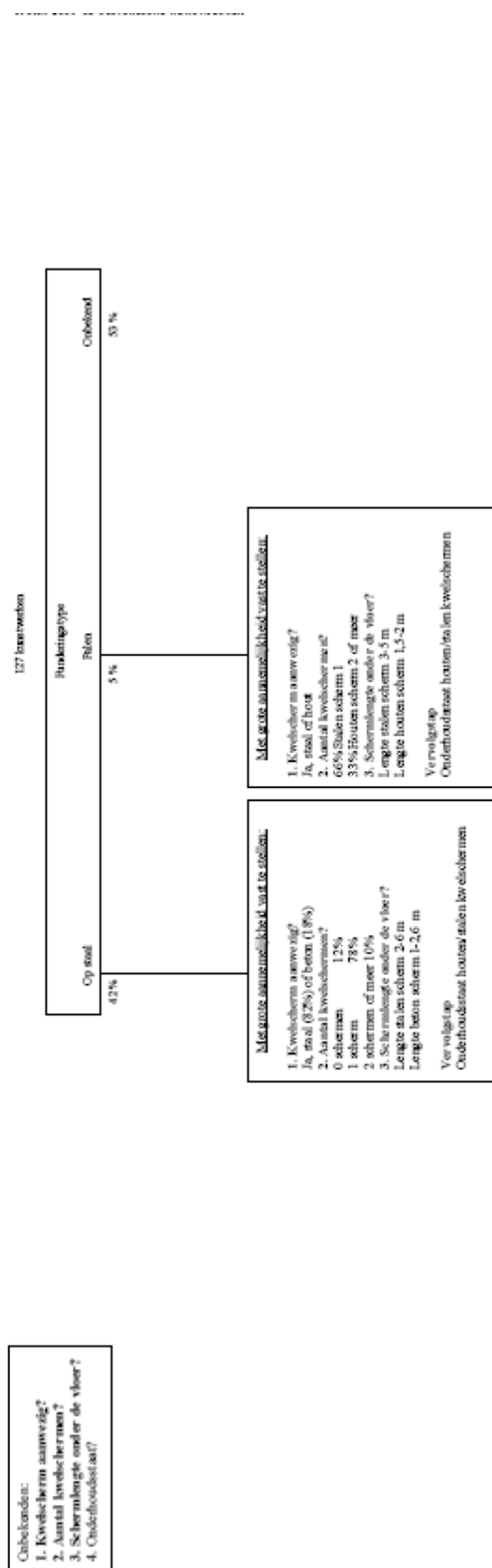
1. Kwelchema aanwezig?
2. Aantal kwelochermen?
3. Schermhoogte onder de vloer?
4. Onderhoudsmaat?

117 kunstwerken

Type oorsnoerstaal van de wanden						
Betonnen bak	Beton	Staal Staal	Overig	Betonnen lozier	Ondebond	
<p>2%</p> <p>Fractie type: 50% op palen 50% op stal</p> <p>Met enige aannemelijkheid valt te stellen:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Kwelchema aanwezig?</li> <li>2. Aantal kwelochermen?</li> <li>3. Schermhoogte onder de vloer?</li> <li>4. Onderhoudsmaat?</li> </ol>	<p>2%</p> <p>Fractie type: Op stal</p> <p>Met enige aannemelijkheid valt te stellen:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Kwelchema aanwezig?</li> <li>2. Aantal kwelochermen?</li> <li>3. Schermhoogte onder de vloer?</li> <li>4. Zee diepte</li> </ol> <p>Vervolg stap Onderhoudsmaat kunstwerken kwelochermen</p>	<p>5%</p> <p>Fractie type: Op stal</p> <p>Met enige aannemelijkheid valt te stellen:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Kwelchema aanwezig?</li> <li>2. Aantal kwelochermen?</li> <li>3. Schermhoogte onder de vloer?</li> <li>4. Zee diepte</li> </ol> <p>Vervolg stap Onderhoudsmaat kunstwerken kwelochermen</p>	<p>9%</p> <p>Fractie type: Op stal</p> <p>Met enige aannemelijkheid valt te stellen:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Kwelchema aanwezig?</li> <li>2. Aantal kwelochermen?</li> <li>3. Schermhoogte onder de vloer?</li> <li>4. Zee diepte</li> </ol> <p>Vervolg stap Onderhoudsmaat kunstwerken kwelochermen</p>	<p>5%</p> <p>Fractie type: Op beton palen</p> <p>Met enige aannemelijkheid valt te stellen:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Kwelchema aanwezig?</li> <li>2. Aantal kwelochermen?</li> <li>3. Schermhoogte onder de vloer?</li> <li>4. m</li> <li>5. Lengte 4 m</li> </ol> <p>Vervolg stap Onderhoudsmaat kunstwerken kwelochermen</p>	<p>10%</p> <p>Fractie type: 40% op palen 60% op stal</p> <p>Met enige aannemelijkheid valt te stellen:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Kwelchema aanwezig?</li> <li>2. Aantal kwelochermen?</li> <li>3. Schermhoogte onder de vloer?</li> <li>4. m</li> <li>5. Lengte staal 2,3-11 m</li> </ol> <p>Vervolg stap Onderhoudsmaat kunstwerken kwelochermen</p>	<p>50%</p> <p>Ondebond</p>



## Toetsing op Piping en Heave (STPH) **Wat is met enige aannemelijkheid te zeggen over de kwelweglengte bij een coupure?**



## Toetsing op Piping en Heave (STPH) Wat is met enige aannemelijkheid te zeggen over de kwelweglengte bij een inlaatsluis?

