

WTI 2017 Toetsregels Kunstwerken

Toetsspoorrappорт Piping

1220087-003

Titel

WTI 2017 Toetsregels Kunstwerken

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
RWS	1220087-003	1220087-003-GEO-0004-jvm	64

Trefwoorden

WTI2017, toetsspoorrapport, kunstwerken, onderloopsheid, achterloopsheid, opbarsten, heave, piping, Bligh, Lane, Sellmeijer

Samenvatting

Dit toetsspoorrapport is opgesteld in het kader van WTI 2017 en bevat de diverse bouwstenen die zijn opgeleverd. In dit toetsspoorrapport zijn in hoofdstuk 2 de toetsschema's opgenomen voor de toets (bouwsteen Toetsschema). De bouwsteen Modelbeschrijving is voor het toetsspoor piping bij kunstwerken niet opgeleverd, omdat voor dit toetsspoor geen (semi-)probabilistische toets is opgenomen in Ringtoets. Hoofdstuk 3 bevat daarom niet meer dan een eerste aanzet voor het factsheet voor de gedetailleerde toets. De vigerende kennisbasis is vastgelegd in de bouwsteen Faalmechanismebeschrijving. Deze bouwsteen bestaat uit de fenomenologische beschrijving (hoofdstuk 4) en de beschrijving van de modellen van Bligh, Lane, Sellmeijer en heave die gebruikt worden in de toetsing (hoofdstukken 5 en 6). De bouwsteen Schematiseringshandleiding maakt geen onderdeel uit van dit toetsspoorrapport maar is opgeleverd als separaat rapport. Er wordt naar verwezen in hoofdstuk 7. De bouwsteen geavanceerde analyses bevat aanwijzingen voor het uitvoeren van de toets op maat en is uitgewerkt in hoofdstuk 8.

Summary

This report is focusing on one specific failure mechanism of water retaining hydraulic structures, being piping (flow of water and eventually sand particles underneath or alongside the structure). The report has been set up in the framework of the research programme WTI-2017 assigned by Rijkswaterstaat. It will form part of the collection of documents underlying the formal legally approved assessment procedure on the quality of the water retaining network in the Netherlands.

The report holds amongst others review schedules, and descriptions of failure mechanisms. The report serves as a background document to the separately reported schematisation manual.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
D2	dec. 2015	ir. B. van Bree		ir. R.C.M. Delhez ir. D. Pereboom		ing. A.T. Aantjes	

Status
definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Algemeen	1
1.2 Achtergrond Wettelijk Toetsinstrumentarium 2017 (WTI 2017)	1
1.3 Modulair Instrumentarium en documentatiestructuur	2
1.3.1 Modulair instrumentarium en bouwstenen	2
1.3.2 Documentatiestructuur WTI2017	3
1.4 Cluster Toetsregels Kunstwerken	3
1.5 Leeswijzer	5
1.6 Referenties	5
2 Toetsschema piping	6
2.1 Algemene toetsschema	6
2.2 Toetsschema eenvoudige toets	7
2.3 Gedetailleerde toets	9
2.4 Onderbouwing beslisregels eenvoudige toets	9
2.5 Referenties	10
3 Factsheet gedetailleerde toets	11
3.1 Faalboom	12
3.2 Deelfaalmechanisme Z ₃₁ : Optreden onder- en achterloopsheid, kwelweg (deels) verticaal	13
3.2.1 Z-functies	13
3.2.2 Sterktemodellen	14
3.2.3 Belastingmodel	15
3.3 Deelfaalmechanisme Z ₃₂ : Optreden onder- en achterloopsheid, kwelweg zuiver horizontaal	16
3.3.1 Z-functies	16
3.3.2 Sterktemodellen	17
3.3.3 Belastingmodel	19
3.4 Deelfaalmechanisme Z ₃₃ : Bezwijken kunstwerk als gevolg van onder- en/of achterloopsheid	20
3.4.1 Z-functie	20
3.4.2 Model	20
3.5 Referenties	21
4 Beschrijving faalmechanisme onder- en achterloopsheid	22
4.1 Inleiding	22
4.2 Fenomenologische beschrijving	22
4.2.1 Beschrijving op hoofdlijnen	22
4.2.2 Gedetailleerde beschrijving van het faalproces	23
4.2.3 Onderscheiden deelfaalmechanismen	26
4.2.4 Reststerkte	27
4.3 Overzicht van het faaltraject piping bij kunstwerken	28
4.4 Beknopte beschrijving van de te toetsen deelfaalmechanismen	29
4.5 Historie van het faalmechanisme	30
4.6 Vigerende veiligheidsfilosofie en huidig toetsinstrumentarium (VTv2006)	31
4.6.1 Vigerende veiligheidsfilosofie	31

4.6.2	Wettelijk toetsinstrumentarium tot op heden	32
4.7	WTI2017	33
4.7.1	Omgang met toetsniveau 1, 2 en 3	33
4.7.2	Wijzigingen in het WTI2017 ten opzichte van het VTV2006	33
4.8	Referenties	33
5	Beschrijving modellen Z₃₁: Optreden onder- en achterloopsheid, kwelweg (deels) verticaal	35
5.1	Inleiding	35
5.2	Beschrijving vigerende kennisbasis, ontwikkelingen en keuze modellen WTI2017	35
5.2.1	Vigerende kennisbasis en modellen	35
5.2.2	Ontwikkeling nieuwe kennis	35
5.2.3	Toepasbaarheid modellen	35
5.2.4	Keuze vigerende modellen toetsing	35
5.2.5	Consequentiële analyse	36
5.3	Beschrijving model van Lane	36
5.3.1	Historie en kennisbasis in meer detail	36
5.3.2	Beschrijving model van Lane	36
5.3.3	Geldigheidsgebied	38
5.4	Beschrijving heave model	39
5.4.1	Historie en kennisbasis in meer detail	39
5.4.2	Mechanismebeschrijving	41
5.4.3	Heavecriterium	42
5.4.4	Rekenmodellen voor de berekening van het optredend verhang	44
5.4.5	Ontwikkeling fragmentenmethode	45
5.4.6	Vergelijking fragmentenmethode met Eindige Elementen Methode en experimenten	48
5.4.7	Globale faalkansschatting op basis van berekend kritiek verval	48
5.5	Vergelijking methode Lane en fragmentenmethode	48
5.6	Advies voor toetsing kunstwerken met (deels) verticale kwelweg	49
5.7	Referenties	49
6	Beschrijving mechanisme Z₃₂: Optreden onder- en achterloopsheid, kwelweg zuiver horizontaal	51
6.1	Inleiding	51
6.2	Beschrijving vigerende kennisbasis, ontwikkelingen en keuze modellen WTI2017	51
6.2.1	Vigerende kennisbasis en modellen	51
6.2.2	Ontwikkeling nieuwe kennis	51
6.2.3	Toepasbaarheid modellen	51
6.2.4	Keuze vigerende modellen toetsing	52
6.2.5	Consequentiële analyse	53
6.3	Beschrijving model van Sellmeijer	54
6.3.1	Historie en kennisbasis in meer detail	54
6.3.2	Het aangepaste rekenmodel van Sellmeijer	54
6.3.3	Geldigheidsgebied	56
6.4	Beschrijving model van Bligh	56
6.4.1	Historie en kennisbasis in meer detail	56
6.4.2	Beschrijving model van Bligh	56
6.4.3	Geldigheidsgebied	57
6.5	Referenties	58

7 Schematiseringshandleiding	59
7.1 Invulling van de schematiseringshandleiding	59
7.2 Referenties	59
8 Toets op Maat	60
8.1 Inleiding	60
8.2 Aanleiding voor de Toets op maat	60
8.2.1 Onzekerheden in schematisatie	60
8.2.2 Inschatting omtrent bijstellen toetsoordeel 'voldoet niet'	62
8.3 Invulling van de Toets op maat	62
8.3.1 Analyse peilbuismetingen	62
8.3.2 Geavanceerde grondwaterstromingsmodellen	63
8.3.3 Analyse bewezen sterkte	63
8.3.4 Probabilistische piping of heave analyse	63
8.4 Referenties	64

Bijlage(n)

A Begrippenlijst	A-1
B Parameterlijsten	B-1

1 Inleiding

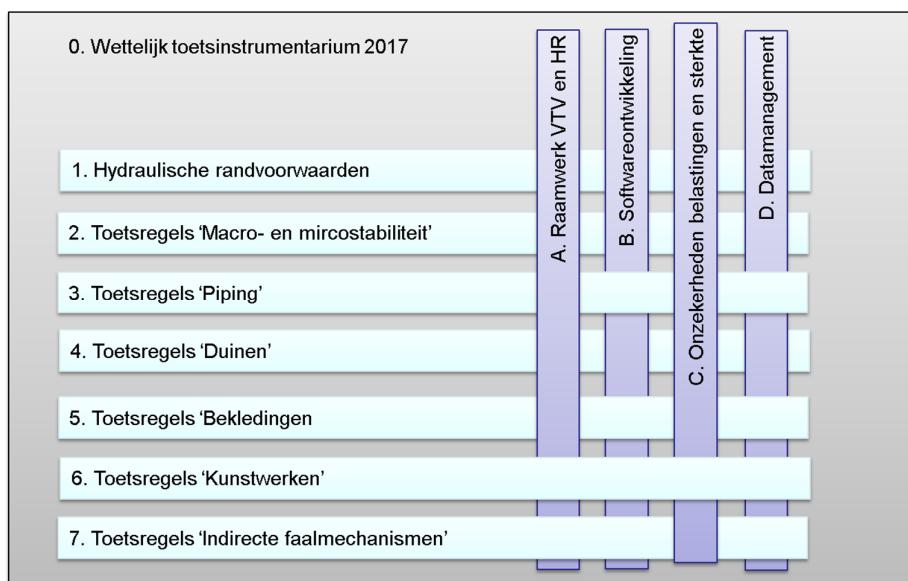
1.1 Algemeen

Voor de ontwikkeling van het Wettelijk Toetsinstrumentarium 2017 (WTI 2017) worden binnen het Cluster Toetsregels Kunstwerken (CTK) achtergrondrapporten voor de diverse toetssporen opgesteld. Dit toetsspoor rapport betreft het toetsspoor *piping* bij kunstwerken (faalmechanisme *onder- en achterloopsheid*). In deze inleiding wordt eerst de achtergrond van het WTI programma kort behandeld. Vervolgens wordt de opbouw van het modulaire instrumentarium belicht en de documentatiestructuur weergegeven. Daarna wordt de inhoud van het Cluster Toetsregels Kunstwerken beschreven en een leeswijzer voor voorliggend toetsspoor rapport gegeven.

1.2 Achtergrond Wettelijk Toetsinstrumentarium 2017 (WTI 2017)

Voor het periodiek toetsen van dijkring(delen) aan de veiligheidsnorm tegen overstromen wordt binnen het onderzoeksprogramma WTI 2017 een Wettelijk Toetsinstrumentarium ontwikkeld dat aan beheerders voorschrijft hoe primaire waterkeringen te beoordelen. Aan de invulling van het WTI 2017 liggen beleidmatige en inhoudelijke argumenten ten grondslag. Door RWS-WVL is, als gedelegeerd opdrachtgever namens het Ministerie van Infrastructuur en Milieu, aan Deltas gevraagd om binnen het WTI 2017 de inhoudelijke componenten van dit nieuwe instrumentarium voor de Vierde Toetsronde te ontwikkelen.

Het WTI 2017 voor de Vierde Toetsronde is de opvolger van het WTI 2011, dat niet gepubliceerd of in gebruik is genomen. De doelstellingen voor het WTI 2017 zijn het overgaan op overstromingskansen en het in het instrumentarium implementeren van zoveel mogelijk nieuwe kennis ten opzichte van het WTI 2011. De uitwerking van deze doelstellingen binnen het (onderzoeks)programma vindt plaats binnen 12 inhoudelijke en meer generieke clusters, zie Figuur 1.1.



Figuur 1.1 Indeling van het WTI/SBW programma in horizontale en verticale clusters

In het programma WTI 2017 worden bestaande bouwstenen verbeterd en nieuwe ontwikkeld. Tezamen vormen de bouwstenen het Wettelijk Toets Instrumentarium. Deze bouwstenen zijn mogelijk ook inzetbaar voor andere processen in het waterveiligheidsveld (ontwerp, beleidsstudies, programmering, crisismanagement en beheer en onderhoud). Het op maat maken van deze bouwstenen voor andere processen dan toetsen van primaire keringen valt buiten de opdracht, maar wordt in de volgende paragraaf wel kort belicht.

Voor de toelichting, de visie en aanpak van het programma WTI 2017 wordt verwezen naar het overkoepelend Programmaplan WTI 2017. De uitgangspunten voor de activiteiten zijn verder uitgewerkt in het document Uitgangspunten WTI 2017 [DLT-uitgangspunt 2012].

1.3 Modulair Instrumentarium en documentatiestructuur

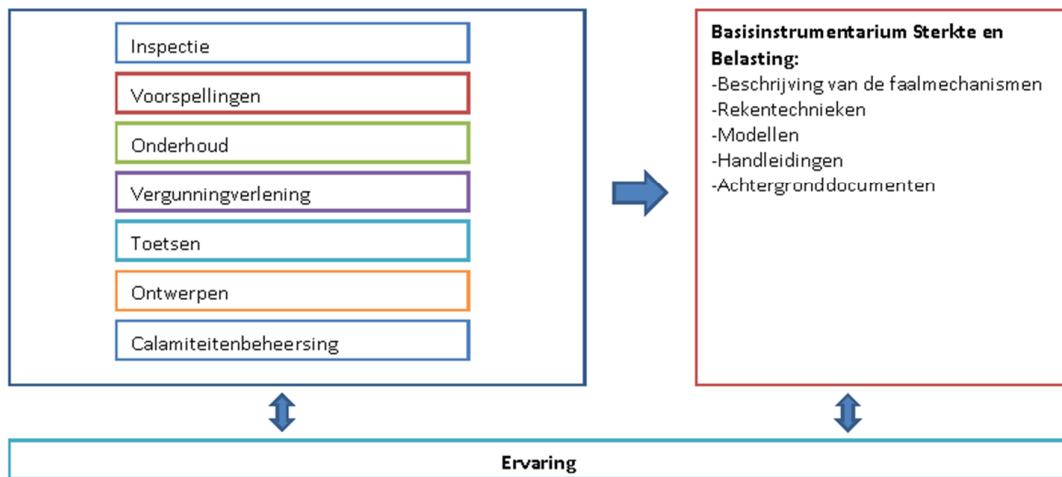
In deze paragraaf wordt aangegeven welke plaats Cluster Toetsregels Kunstwerken heeft in het modulaire instrumentarium en hoe haar uitwerking past in de documentatiestructuur. Voor een volledig overzicht van het modulaire instrumentarium wordt verwezen naar het document Uitgangspunten WTI 2017 [DLT-uitgangspunt 2012].

1.3.1 Modulair instrumentarium en bouwstenen

Het modulair instrumentarium bestaat uit een procesinstrumentarium en een basisinstrumentarium. Het procesinstrumentarium bevat onder andere het toets- en ontwerp-instrumentarium. Het basisinstrumentarium bevat bouwstenen of modules waarmee in de procesinstrumentaria gewerkt kan worden.

Procesinstrumentarium

- Procesbeschrijving
- Handleiding gebruik basisinstrumentarium per proces
- Programma-, project-, organisatiespecifieke eisen en uitgangspunten



Figuur 1.2 Modulair instrumentarium: Procesinstrumentarium en Basisinstrumentarium Sterkte en Belasting

De veiligheid van de waterkering wordt bepaald door de sterkte van de kering in relatie tot de belasting op de kering. Het is dan ook belangrijk dat alle processen die gericht zijn op het behouden van de veiligheid van de kering, op een uniforme manier de sterkte van en de belasting op de waterkering bepalen. Het mag niet voorkomen met het toetsinstrumentarium wordt geconcludeerd dat een kering niet voldoet aan de norm en er volgens op basis van het ontwerpinstrumentarium wordt geconcludeerd dat er geen maatregelen nodig zijn.

Daarom is het streven dat voor alle processen hetzelfde basisinstrumentarium sterke en belasting gebruikt wordt. Cluster Toetsregels Kunstwerken richt zich op de sterke kant van kunstwerken, waarvoor in het basisinstrumentarium de volgende bouwstenen zijn uitgewerkt en verzameld in VTV achtergrondrapporten (zoals het voorliggende toetsspoorrapport):

- Faalmechanismebeschrijvingen: Betreft beschrijving hoe een mechanisme tot doorbraak leidt.
- Schematisatiehandleiding per toetsspoor: Betreft handleiding waarin staat beschreven hoe de werkelijkheid wordt geschematiseerd voor toepassing in een faalmechanismemodel.
- Geavanceerde analyses: Betreft handvatten voor geavanceerde analyses voor toets op maat.

Het basisinstrumentarium wordt modulair opgebouwd. Sommige bouwstenen of modules worden in alle processen gebruikt, andere modules zijn alleen ontwikkeld voor specifieke processen. Modules die kenmerken of gedrag van keringen beschrijven zijn toepasbaar in alle processen. Dit betekent overigens niet dat ook alle gedragsmodellen in alle processen worden gebruikt. De modules die gaan over het omgaan met onzekerheden of rekentechnieken zijn vaker proces-specifiek.

Het procesinstrumentarium beschrijft de processen die gericht zijn op het behouden van de veiligheid van de kering en geeft de uitgangspunten voor het gebruik van het basisinstrumentarium: door wie, hoe en wanneer wordt dit gebruikt. Dit instrumentarium bestaat per proces uit:

- Procesbeschrijving.
- Handleiding voor het gebruik van het basisinstrumentarium; aangevuld met programma-, project- of organisatiespecifieke eisen en uitgangspunten.

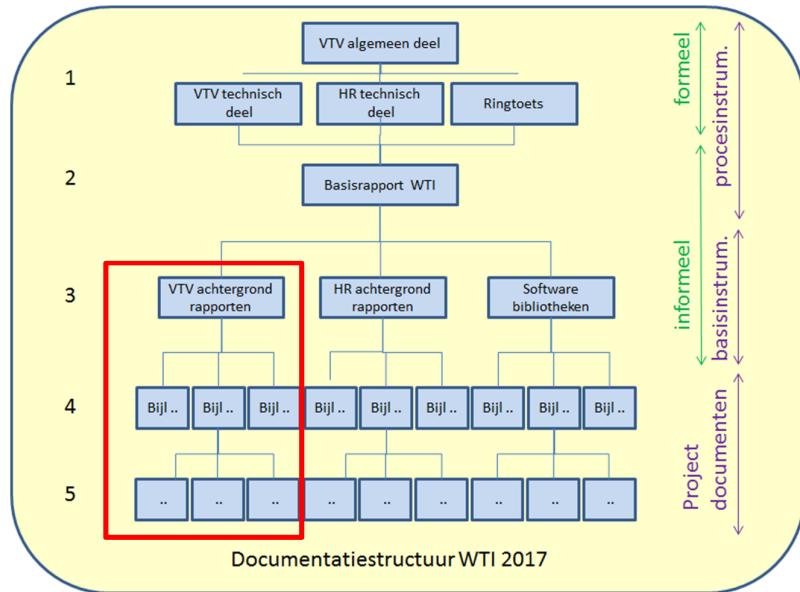
1.3.2 Documentatiestructuur WTI2017

In Figuur 1.3 is een schematische weergave gegeven van de documentatiestructuur binnen WTI2017. Cluster Toetsregels Kunstwerken bestaat uit:

- 1) Bouwstenen die zijn samengevoegd tot VTV-achtergrondrapporten, zoals voorliggend toetsspoorrapport, welke vallen in laag 3 en uit
- 2) Onderliggende (onderzoeks)rapporten die vallen in laag 4. Enkel laag 1 is formeel vastgesteld door de minister.

1.4 Cluster Toetsregels Kunstwerken

Binnen het Cluster Toetsregels Kunstwerken (CTK) vindt het (door)ontwikkelen, implementeren en operationaliseren van kennis rondom het periodiek toetsen van kunstwerken in primaire waterkeringen plaats.



Figuur 1.3 Documentatiestructuur en locatie documentatie WTI CTK

De hoofddoelstelling van het CTK is om tot bouwstenen te komen waarmee eenduidig kan worden getoetst en waarmee het aantal scores “geen oordeel” zal worden teruggebracht ten opzichte van de toetsing met het vorige instrumentarium. De activiteiten binnen het CTK zijn erop gericht om de kwaliteit en de eenduidigheid van het huidige instrumentarium te verbeteren door per faalmechanisme de kennis van bestaande modellen te ontsluiten, modellen waar nodig te optimaliseren en eenduidige schematiseringshandleidingen op te stellen.

De verschillende toetssporren binnen CTK, hun invulling op de verschillende toetsniveaus en de gehanteerde afkortingen zijn in Tabel 1.1 gegeven. De invulling van het instrumentarium voor kunstwerken op toetsniveau 2 gebeurt op basis van Figuur 1.4. Bij punt- en langsconstructies kan een (semi-)probabilistische toets voor een mechanisme alleen op vakniveau worden uitgevoerd. Hieruit volgt dat het toetsinstrumentarium voor kunstwerken alleen op niveau 2a kan worden ingevuld.

Toetsspoor WTI 2017	WTI kennisbasis		invulling niveaus			
	2011	2017	1	2a	2b	3
HT _{kw} : hoogte kunstwerk		X	X	Xp		X
BS : betrouwbaarheid sluiting		X	X	Xp		X
PI _{kw} : piping kunstwerk		X	X	(Xs [#])		X
STC-p : sterkte en stabiliteit puntconstructie	X		X	Xs [#] , Xp		X
STC-l : sterkte en stabiliteit langsconstructie		X	X			X

[#] deze semi probabilistisch toetsregel wordt wel ontwikkeld maar niet in Ringtoets geprogrammeerd.

Tabel 1.1 Overzicht (door)ontwikkeld toetsinstrumentarium WTI 2017 (p=probabilistisch, s=semi-probabilistisch)

	mechanisme & vak (niveau 2a)	traject (niveau 2b)
semi probabilistisch	2a-1 $PI_{kw}^{\#}$ $ST-p^{\#}$	2b-1 n.v.t.
probabilistisch	2a-2 HT_{kw} , BS, ST-p	2b-2 HT_{kw} , BS, ST-p

Toetslaag 2 ondersteund door Ringtoets/HydraRing

wordt wel ontwikkeld maar niet in Ringtoets geprogrammeerd.

Figuur 1.4 Definitie van mogelijkheden voor (semi-)probabilistisch invullen van toetslaag 2 bij kunstwerken

1.5 Leeswijzer

Per faalmechanisme wordt een VTV achtergrondrapport opgesteld. Dit voorliggende toetsspoorrapport betreft het toetsspoor *piping* (faalmechanisme *onder- en achterloopsheid*) en is een bundeling van verschillende bouwstenen. Hieronder is in Tabel 1.2 aangegeven hoe de samenhang binnen dit rapport is in relatie tot de WTI bouwstenen.

Hfst	Titel	WTI 2017 bouwsteen
1	Inleiding	-
2	Toetsschema	Toetsschema
3	Factsheet gedetailleerde toets	Modelbeschrijving(en)
4	Beschrijving faalmechanisme onder- en achterloopsheid	Faalmechanismebeschrijving
5 – 6	Deelfaalmechanismen	
7	Schematiseringshandleiding	Schematiseringshandleiding
8	Handreiking toets op maat	Handreiking toets op maat

Tabel 1.2 Leeswijzer toetsspoorrapport piping

1.6 Referenties

[DLT-uitgangspunt 2012]

Uitgangspunten voor het WTI, Deltares rapport 1206004-002-GEO-0001-v2, 1 oktober 2012, definitief

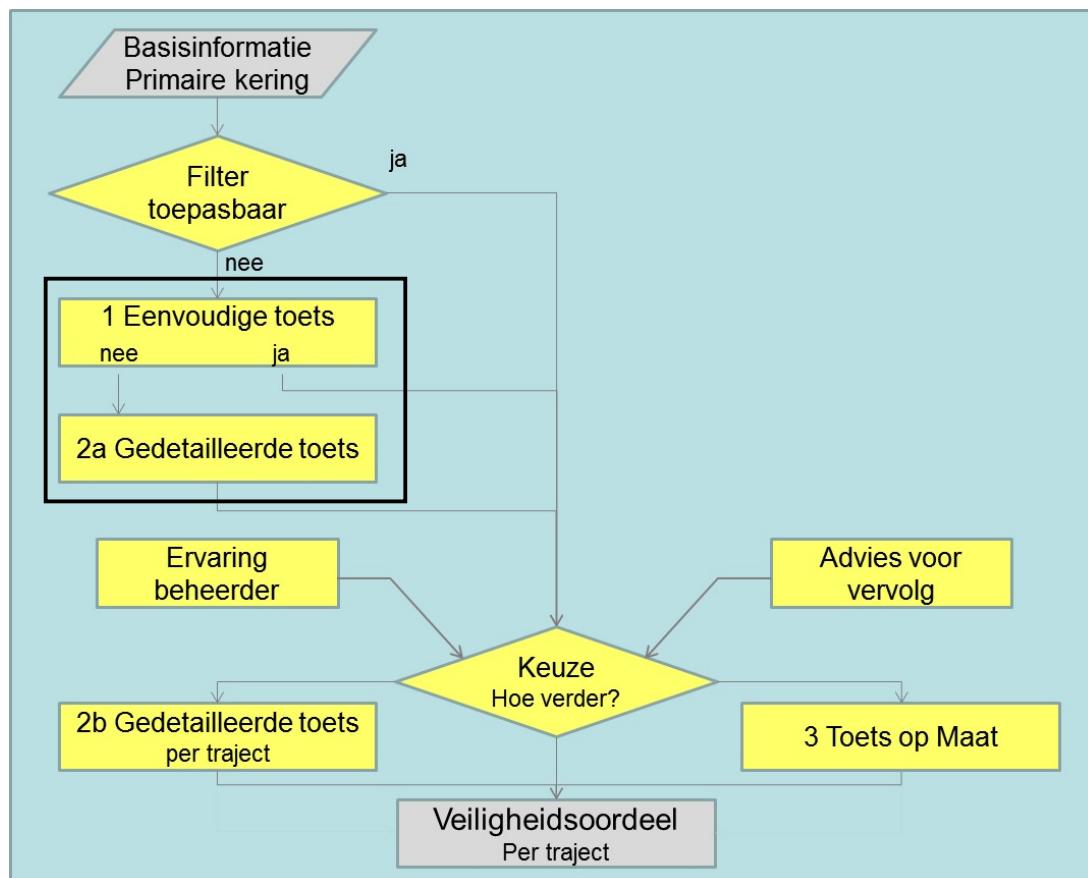
2 Toetsschema piping

In dit hoofdstuk wordt het toetsschema met betrekking tot *piping* bij kunstwerken uitgewerkt. Hierbij is een splitsing gemaakt tussen de eenvoudige toets (toetslaag 1) en de gedetailleerde toets (toetslaag 2). De hier gepresenteerde toetsschema's zijn een nadere specificering van het algemene toetsschema van het WTI2017.

In de eerste paragraaf wordt het algemene toetsschema gegeven. Hierna volgt per toetslaag (1 en 2) het betreffende toetsschema. Aangezien er bij toetslaag 1 gebruik gemaakt wordt van eenvoudige beslisregels, wordt in de laatste paragraaf ingegaan op de onderbouwing van deze beslisregels.

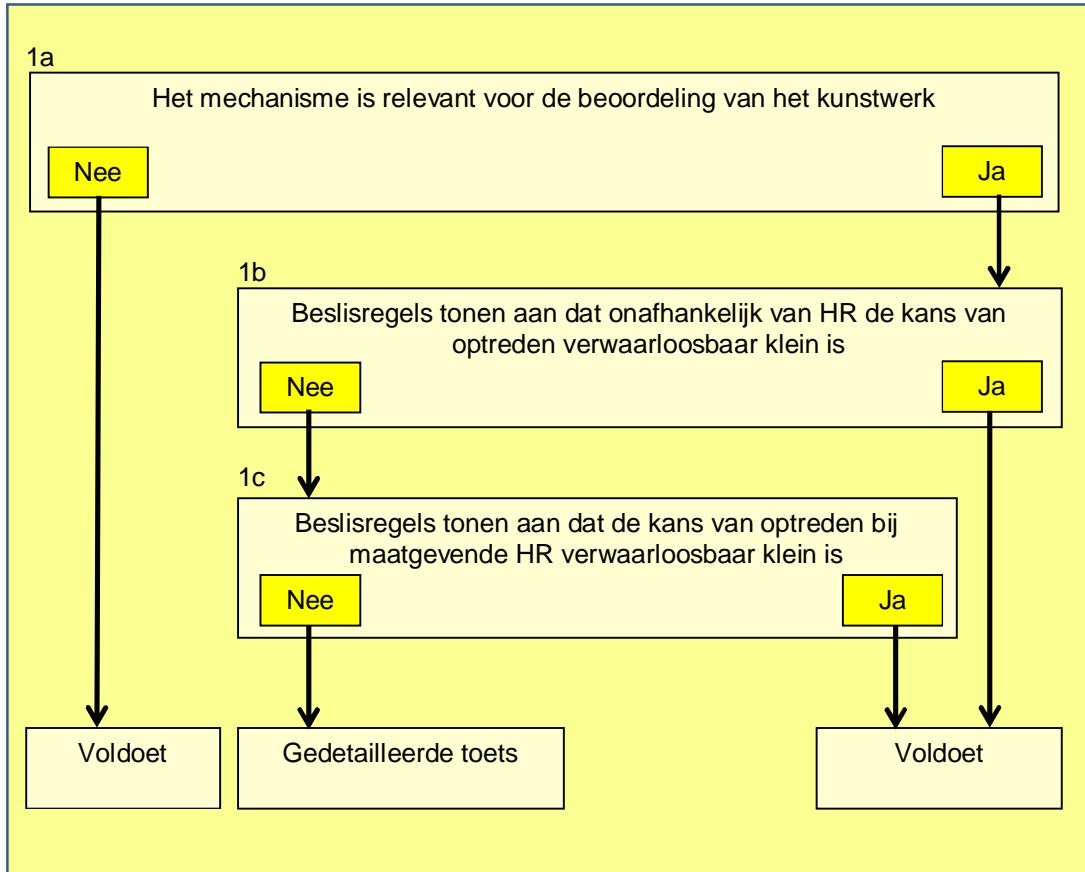
2.1 Algemene toetsschema

In Figuur 2.1 is het algemene toetsschema gegeven waarmee binnen het WTI2017 gewerkt wordt. Middels het zwarte kader is tevens aangegeven waarop het in dit hoofdstuk gepresenteerde toetsschema betrekking heeft.



Figuur 2.1 Algemeen toetsschema WTI2017

2.2 Toetsschema eenvoudige toets



Figuur 2.2 Toetsschema eenvoudige toets piping kunstwerk

Het toetsschema voor de eenvoudige toets (toetslaag 1) van *piping* bij kunstwerken in het WTI 2017 is opgenomen in Figuur 2.2. De eenvoudige toets begint met de vraag of het faalmechanisme relevant is (stap 1a). Dit is altijd het geval, behalve als:

- Aan de uitredezijde van het kunstwerk een filter aanwezig is waarin uitstroming plaatsvindt. Indien dit filter:
 - Voldoet aan de 'filterregels'.
 - De conditie goed is.
 - Zowel onder- als achterloopsheid voorkomt dan is de veiligheid met betrekking tot piping gewaarborgd;
- De kruising met de waterkering bestaat uit een leiding waarvan de leidingdiameter kleiner is dan 0,50 m.

Indien het faalmechanisme wel relevant is, dan kan in sommige situaties op voorhand worden gesteld dat de kans van optreden van het faalmechanisme verwaarloosbaar klein is. Onderscheid wordt gemaakt in de situatie dat dit niet (stap 1b) en wel (stap 1c) afhankelijk is van de buitenwaterstand.

Onafhankelijk van de buitenwaterstand (stap 1b) kan de kans van optreden op piping als verwaarloosbaar klein beschouwd worden als voldaan wordt aan onderstaande voorwaarden:

- De constructie en eventuele kwelschermen worden rondom omsloten door een slecht doorlatend klei/veenpakket van minimaal 1 m dikte (na zetting aan het eind van de toetsperiode), waarbij er geen in- of uittredepunten voor piping via de aansluiting tussen grond en constructie kunnen ontstaan.
- Indien de constructie op palen is gefundeerd moet deze voorzien zijn van een functionerend kwelscherm (dit zal nagenoeg altijd het geval zijn).
- De onder het kunstwerk aanwezige zandlagen moeten zijn beoordeeld als 'voldoet' volgens toetsspoor *piping* in het dijkenspoor.

Stap 1c bestaat uit een versimpelde controle op het mechanisme heave. Indien achterloopsheid niet van toepassing is en één van de kwelschermen heeft een lengte die groter is dan twee keer het verval over het kunstwerk bij maatgevende waterstanden, dan is de faalkans verwaarloosbaar klein. Opgemerkt wordt dat het hierbij lastig is om achterloopsheid op voorhand uit te sluiten. Situaties waarin achterloopsheid uitgesloten kan worden zijn:

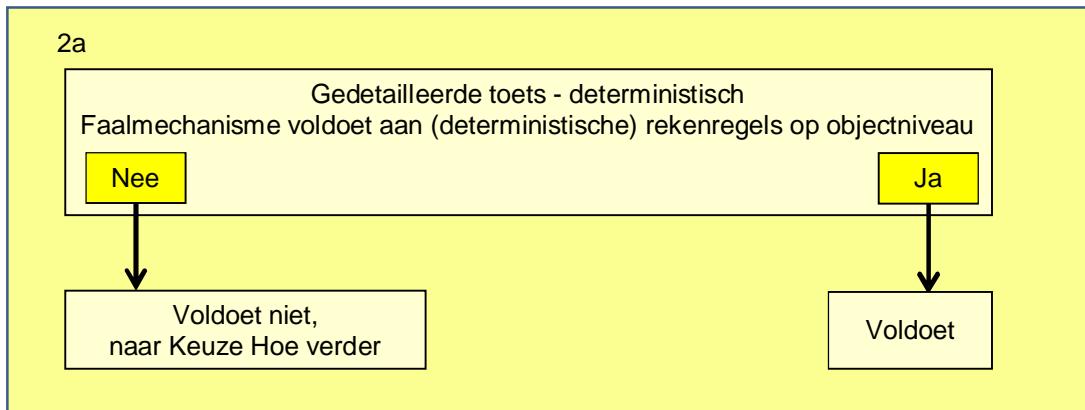
- Kunstwerken die zijn opgenomen in een dijklichaam met een zandkern; in deze situatie dient een toets op microstabilité van het aansluitende grondlichaam gedaan te worden. Tevens dienen de achterloopsheidschermen een bepaalde minimummaat buiten het kunstwerk te zijn doorgezet; neem als praktische maat hiervoor de lengte van het kwelscherm onder de constructie.
- Kunstwerken waarbij aan de binnendijkse zijde van het kunstwerk een filterconstructie is opgenomen om achterloopsheid tegen te gaan; het filter dient hierbij te voldoen aan de 'filterregels' en in goede conditie te zijn.

Omdat zowel normering, toetssystematiek als hydraulische randvoorwaarden ingrijpend gewijzigd zijn, kan niet op een eerder toets- of ontwerpresultaat teruggegrepen worden. Deze stap is daarom geen onderdeel van de eenvoudige toets.

De toetsing wordt voortgezet met de gedetailleerde toets indien niet aan de hand van bovenstaande voorwaarden met zekerheid kan worden gesteld dat piping geen rol speelt of een verwaarloosbaar kleine kans van optreden heeft.

2.3 Gedetailleerde toets

Voor de gedetailleerde toets (toetslaag 2) van de toets van *piping* bij kunstwerken in het WTI 2017 is een nieuw toetsschema opgesteld (zie Figuur 2.3).



Figuur 2.3 Toetsschema gedetailleerde toets piping bij kunstwerken

In het document Uitgangspunten WTI 2017 [DLT februari 2014] is het volgende uitgangspunt opgenomen ten aanzien van het toetsspoor piping bij kunstwerken:

Uitgangspunt 39: Het mechanisme onder- en achterloopsheid (piping) bij kunstwerken heeft geen (fysisch) gedragsmodel als basis. Het model betreft een empirische rekenregel waarvan de betrouwbaarheid onbekend is. Voor dit mechanisme worden in WTI 2017 de toetsregels uit WTI 2011 overgenomen.

Dit betekent dat in de gedetailleerde toets voor het toetsspoor *piping* géén faalkans wordt berekend. Dit in tegenstelling tot de gedetailleerde toets voor de andere toetssporren bij kunstwerken. De toets op niveau 2 wordt uitgevoerd met behulp van de modellen die in hoofdstuk 5 en 6 worden gepresenteerd. Indien het kunstwerk voldoet, wordt verondersteld dat de faalkans voor het faalmechanisme *onder- en achterloopsheid* niet significant bijdraagt aan de overstromingskans van het dijktraject¹.

2.4 Onderbouwing beslisregels eenvoudige toets

In deze paragraaf worden de beslisregels uit de eenvoudige toets herhaald en worden de gedachten die hieraan ten grondslag liggen bijgevoegd. De bedoeling van deze paragraaf is dat deze niet wordt opgenomen in de hoofdrapporten van het WTI2017 maar wel zichtbaar blijft in de achtergrondrapporten, zodat de onderbouwing van deze beslisregels vast ligt. Bij elke beslisregel is in blauwe tekst aangegeven wat de grondslag hiervan is.

Stap 1a

- Aan de uitredezijde van het kunstwerk is een filter aanwezig waarin uitstroming plaatsvindt. Indien dit filter voldoet aan de 'filterregels' en de conditie is goed, dan is de veiligheid met betrekking tot piping gewaarborgd;

Een goed functionerend filter zorgt ervoor dat het water uitreedt in het filter, en dat hierbij geen zanddeeltjes worden meegevoerd. Voor een overzicht van de 'filterregels' waaraan

¹ Binnen het project VNK2 werd hieraan een faalkans gekoppeld van $0,01 \times$ overschrijdingenkansnorm. Een soortgelijke benadering kan binnen het WTI2017 gevolgd worden.

moet worden voldaan wordt verwezen naar paragraaf 5.4.3 en paragraaf 8.6 van [DLT-ozw 2012]. Het filter moet op zowel de locaties met betrekking tot onderloopsheid als tot achterloopsheid zijn aangebracht.

- De kruising met de waterkering bestaat uit een leiding waarvan de leidingdiameter kleiner is dan 0,50 m.

Bij kleine leidingen is het 'afdak' boven de pipe niet groot genoeg om een doorgaande pipe van substantiële afmetingen te laten ontstaan, omdat de pipe vanaf de zijkanten en bovenkant weer wordt dichtgedrukt. De maat van 0,50 meter is een arbitrair gekozen maat op basis van een inschatting door deskundigen op dit vakgebied².

Stap 1b

Deze toetsstap spreekt voor zich, geen toelichting nodig.

Stap 1c

- Indien achterloopsheid niet van toepassing is en één van de kwelschermen heeft een lengte die groter is dan twee keer het verval over het kunstwerk bij maatgevende waterstanden, dan is de faalkans verwaarloosbaar klein.

Als één van de kwelschermen een lengte heeft die groter is dan twee keer het verval over het kunstwerk bij maatgevende waterstanden, dan is het kritieke verhang over het benedenstroomse kwelscherm altijd kleiner dan 0,5. Hiermee wordt voldaan aan het heave-criterium uit [DLT-ozw 2012] en [TAW-TRZW 1999].

2.5 Referenties

[DLT februari 2014]

Uitgangspunten WTI 2017, Deltires rapport 1209429-001-GEO-0011, 17 oktober 2014, definitief

[DLT-ozw 2012]

Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen, Deltires, kenmerk 1202123-003-GEO-0002, 2012

[TAW-TRZW 1999].

Technisch rapport Zandmeevoerende wellen, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, maart 1999

² Opgemerkt wordt dat nader onderzoek op dit vlak gewenst is om tot een onderbouwde maat te komen. Dit kan ertoe leiden dat sommige leidingen, die nu op basis van deze eenvoudige regel niet beoordeeld worden, in de toekomst als nog beoordeeld moeten worden. Vanuit het oogpunt de toetsinspanning te richten op de kunstwerken die het meest risicovol zijn, en kleine leidingen horen daar niet toe, is deze 'educated guess' opgenomen.

3 Factsheet gedetailleerde toets

In het document Uitgangspunten WTI 2017 [DLT februari 2014] is het volgende uitgangspunt opgenomen ten aanzien van het toetsspoor *piping* bij kunstwerken:

Uitgangspunt 39: Het mechanisme onder- en achterloopsheid (piping) bij kunstwerken heeft geen (fysisch) gedragsmodel als basis. Het model betreft een empirische rekenregel waarvan de betrouwbaarheid onbekend is. Voor dit mechanisme worden in WTI 2017 de toetsregels uit WTI 2011 overgenomen.

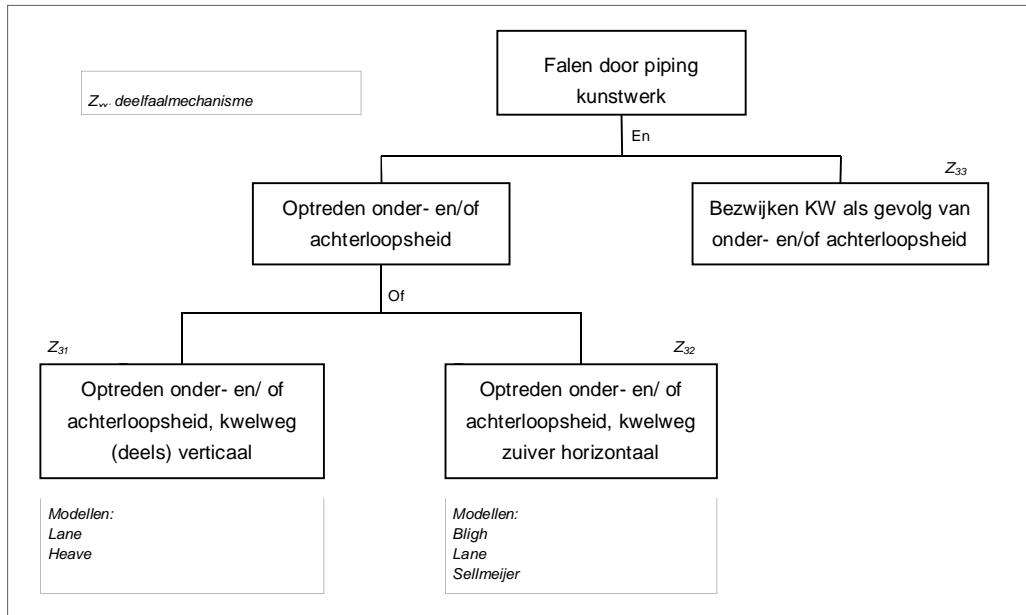
Dit betekent dat in de gedetailleerde toets voor het toetsspoor *piping* géén faalkans wordt berekend. Dit in tegenstelling tot de gedetailleerde toets voor de andere toetssporren bij kunstwerken. De toets op niveau 2 wordt uitgevoerd met behulp van de modellen die in hoofdstuk 5 en 6 worden gepresenteerd. Dit hoofdstuk is wel alvast grotendeels ingevuld met het oog op de verdere ontwikkeling van het toetsspoor *piping* bij kunstwerken na afloop van het WTI2017, maar maakt nadrukkelijk geen onderdeel uit van het WTI2017. Daarom zijn openstaande vragen en uitzoekpunten nog niet nader uitgewerkt, maar deze zijn door middel van *cursief* opgestelde tekstdaanders onder de aanhef ‘*Opmerking*’ weergegeven.

Dit hoofdstuk dient als overzicht voor de totale kennisbasis van het toetsspoor *piping* bij kunstwerken (HT). De factsheet beschrijft het faalmechanisme van faalboom tot aan geschematiseerde parameters. De inhoudelijke en softwarematige uitwerking vindt in andere hoofdstukken plaats. De factsheet bestaat uit de faalboom, de faalfuncties (z-functies), de modellen en de (invulling van de) parameters voor de gedetailleerde toets.

De factsheet van de gedetailleerde toets geeft een samenvatting van enkele bouwstenen waaruit de complete beschrijving van het faalmechanisme bestaat. Het factsheet is een samenstelling van het toetsschema (bouwsteen B-TS, zie hoofdstuk 2), de faalmechanismebeschrijving (bouwsteen B-FMB, zie hoofdstuk 4, 5 en 6) en de schematiseringshandleiding (bouwsteen B-SH, zie hoofdstuk 7).

3.1 Faalboom

In Figuur 3.1 is de modellering van het toetsspoor *piping* in de vorm van de foutenboom weergegeven.



Figuur 3.1 Modellering toetsspoor piping

Falen door onder- of achterloopsheid is gedefinieerd als het uitspoelen van gronddeeltjes ten gevolge van een geconcentreerde kwelstroom, waardoor holle ruimten ontstaan onder (onderloopsheid) of naast (achterloopsheid) een kunstwerk. Uiteindelijk kan het kunstwerk als geheel hierdoor bezwijken.

De volgende deelfaalmechanismen zijn aanwezig:

- Z₃₁ Het uitspoelen van gronddeeltjes ten gevolge van een geconcentreerde kwelstroom die (deels) verticaal gericht is, waardoor holle ruimten ontstaan onder of naast het kunstwerk. Dit leidt tot een proces van terugschrijdende (interne) erosie, waarbij uiteindelijk een doorgaande pipe ontstaat onder het kunstwerk.
- Z₃₂ Het uitspoelen van gronddeeltjes ten gevolge van een geconcentreerde kwelstroom die uitsluitend horizontaal gericht is, waardoor holle ruimten ontstaan onder of naast het kunstwerk. Dit leidt tot een proces van terugschrijdende (interne) erosie, waarbij uiteindelijk een doorgaande pipe ontstaat onder of naast het kunstwerk.
- Z₃₃ Kans dat het kunstwerk bezwijkt (volledig onderuit gaat) gegeven het feit dat onder- of achterloopsheid heeft plaatsgevonden. Heeft betrekking op reststerkte van het kunstwerk (inclusief aanliggende grondlichaam) na het ontstaan van een doorgaande pipe onder of naast het kunstwerk.

De begrippen *onderloopsheid* en *achterloopsheid* roepen soms verwarring op. Onder *achterloopsheid* wordt verstaan de vorming van kanaaltjes of holle ruimten aan de zijkant van een kunstwerk als gevolg van het uitspoelen van grond. De maatgevende kwelweg is meestal zuiver horizontaal gericht (een kwelstroom langs het kunstwerk op het grensvlak van een cohesieve laag), maar kan ook verticale componenten bevatten (denk aan een uitrede onder een binnendijks scherm). In de praktijk wordt achterloopsheid echter vaak 1 op 1 gekoppeld aan het model van Bligh, dus aan situaties met een zuiver horizontale kwelweg.

Onderloopsheid betreft het ontstaan van holle ruimten onder een kunstwerk als gevolg van een geconcentreerde kwelstroom waarbij gronddeeltjes worden meegevoerd. Hierbij loopt de kwelstroom onder het kunstwerk door op het grensvlak van constructie en zand. Onder een kunstwerk zijn doorgaans kwelschermen aanwezig, waardoor de kwelstroom ook verticale componenten omvat. Dit hoeft echter niet altijd het geval te zijn. Denk aan lange duikers en leidingen waarbij geen kwelschermen aanwezig zijn. In de praktijk wordt onderloopsheid echter vaak 1 op 1 gekoppeld aan het model van Lane en/of heave, dus aan situaties met een (deels) verticale kwelweg.

De begrippen onder- en achterloopsheid zijn overgenomen uit het [TAW-TRZW 1999].

3.2 Deelfaalmechanisme Z₃₁: Optreden onder- en achterloopsheid, kwelweg (deels) verticaal

Dit deelfaalmechanisme beschrijft de kans op het uitspoelen van gronddeeltjes ten gevolge van een geconcentreerde kwelstroom die (deels) verticaal gericht is, waardoor holle ruimten ontstaan onder het kunstwerk.

3.2.1 Z-functies

Voor het bepalen van de kans op het uitspoelen van gronddeeltjes ten gevolge van een geconcentreerde kwelstroom die (deels) verticaal gericht is, zijn de modellen van Lane en heave beschikbaar met elk een eigen Z-functie.

Model van Lane

$$Z_{31} = L_L - L_{c,L}$$

Hierin is:

L_L	[m]	Aanwezige kwelweglengte volgens het model van Lane
$L_{c,L}$	[m]	Kritieke kwelweglengte volgens het model van Lane

Opmerking: in Kernel piping dijkenspoor (Piping Kernel - Requirements and functional design, versie 0.3 september 2013) is Lane ook al opgenomen, maar op een andere wijze dan hier.

Model heave

$$Z_{31} = i_{c,h} - i$$

Hierin is:

$i_{c,h}$	[-]	Kritieke heave gradient
i	[-]	Optredende gradient bij uittredepunt

3.2.2 Sterktemodellen

Model van Lane

$$L_L = m_L(L_v + \frac{L_h}{3})$$

	Eenheid	Betreft	Geldigheidsgebied	Type	Parameters Verdeling		Ruimtelijke spreiding		Variatie in de tijd	
					μ	V_r/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
m_L	[-]	model parameter aanwezige kwelweglengte	Zie tekstkader onder * Opmerking	log	2,2	$\sigma = 0,27$	kwk	0	-	1
L_v	[m]	verticale kwelweglengte	-	nor	nom	$\sigma = 0,1$ m	kwk	0	-	1
L_h	[m]	horizontale kwelweglengte voor Lane	-	nor	nom	$\sigma = 0,1$ m	kwk	1	12 uur	0

* Model parameter voor de aanwezige kwelweglengte (m_L) is overgenomen van de "verbeterde faalkansschatting VNK" (Meer, M.T. van der, Stoop, J.D., Verbeterde faalkansschatting kunstwerken VNK, Fugro rapport 1204-0101-001, april 2005)

* Opmerking: de parameter m_L is voor Bligh en Lane hetzelfde. Om toekomst robuust te zijn (met het oog op ontwikkeling van een nieuwe Bligh formulering) zou deze parameter voor beide modellen gescheiden kunnen worden. Voor Bligh is door dhr. Ed Calle voor dhr. Jan Blinde (beiden Deltaires) een globale onderbouwing afgeleid, waarschijnlijk is deze direct overgenomen / 1:1 geëxtrapoleerd naar Bligh bij kunstwerken.

Heave model

$$i_{c,h} = 0,7$$

	Eenheid	Betreft	Geldigheidsgebied	Type	Parameters Verdeling		Ruimtelijke spreiding		Variatie in de tijd	
					μ	V_r/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
$i_{c,h}$	[-]	Kritieke heave gradient	-	log	0,7	$\sigma = 0,1$	kwk	0	-	1

3.2.3 Belastingmodel

Model van Lane

$$L_{c,L} = c_{LANE} \cdot m_c \cdot (h - h_{bi})$$

	Eenheid	Betreft	Geldigheidsgebied	Type	Parameters Verdeling		Ruimtelijke spreiding		Variatie in de tijd	
					μ	V_r/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
$L_{c,L}$	[m]	Kritieke kwelweglengte volgens het model van Lane	-		Is resultaat van formule					
c_{LANE}	[-]	creep-factor behorend bij formule van Lane	-	nor	nom	$V = 0,10$	kwk	0	-	1
m_c	[-]	model parameter Lane/Bligh	Zie tekstkader onder * Opmerking	nor	1	$\sigma = 0,10$	kwk	0	-	1
h	[m+NAP]	buitenwaterstand	-	nor	nom	$\sigma = 0,10$	kwk	0	-	1
h_{bi}	[m+NAP]	binnenwaterstand	-	nor	nom	$\sigma = 0,10$	kwk	0	-	1

* Opmerking: de parameter m_c is voor Bligh en Lane hetzelfde. Om toekomst robuust te zijn (met het oog op ontwikkeling van een nieuwe Bligh formulering) zou deze parameter voor beide modellen gescheiden kunnen worden. Voorts dient uitgezocht te worden of bij bepaling van de waarde van de parameter verschillen tussen Bligh en Lane een rol hebben gespeeld, ofwel: was de modelparameter anders geworden als alleen Lane was meegenomen?

Heave model

$$i = \frac{(\varphi_{scherm} - h_{exit})}{L_{scherm}}$$

	Eenheid	Betreft	Geldigheidsgebied	Type	Parameters Verdeling		Ruimtelijke Spreiding		Variatie in de tijd	
					μ	V_r/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
Zie tekstkader onder * Opmerking										
φ_{scherm}	[m+NAP]	stijghoogte op niveau onderzijde damwand								
h_{exit}	[m+NAP]	freatisch niveau bij uittredepunt	-	nor	nom	$V = 0,10$	kwk	0	-	1
L_{scherm}	[m]	lengte benedenstrooisels kwelscherm	-	nor	nom	$\sigma = 0,10$	kwk	0	-	1

* Opmerking: indien handig de termen gelijk houden aan die bij het dijkenspoor, bijvoorbeeld $\varphi_{scherm} \Rightarrow \varphi_{exit}$ en $L_{scherm} \Rightarrow d$

3.3 Deelfaalmechanisme Z₃₂: Optreden onder- en achterloopsheid, kwelweg zuiver horizontaal

Dit deelfaalmechanisme beschrijft de kans op het uitspoelen van gronddeeltjes ten gevolge van een geconcentreerde kwelstroom die uitsluitend horizontaal gericht is, waardoor holle ruimten ontstaan onder of naast het kunstwerk. Het deelfaalmechanisme *onder- en achterloopsheid, kwelweg (deels) verticaal* kan met drie modellen worden berekend: Bligh, Lane en Sellmeijer.

Hierbij wordt opgemerkt dat in [DLT-ozw 2012] het model van Bligh is komen te vervallen en vervangen door de regel van Sellmeijer. Medio 2014 is de opzet van het toetsspoor *piping* door het cluster Toetsregels Kunstwerken WTI2017 overlegd met de Expertgroep Piping. In dit overleg is door de Expertgroep aangegeven dat er plannen zijn om tot een aangepast model van Bligh te komen. Vooruitlopend hierop heeft de Expertgroep aangegeven dat het verstandig zou zijn het model van Bligh op te nemen in het instrumentarium van de gedetailleerde toets.

3.3.1 Z-functies

Voor het bepalen van de kans op het uitspoelen van gronddeeltjes ten gevolge van een geconcentreerde kwelstroom die zuiver horizontaal gericht is, zijn de modellen van Bligh, Lane en Sellmeijer beschikbaar met elk een eigen Z-functie. Indien gekozen wordt voor het model van Lane geldt dat $Z_{32}=Z_{31}$. Het model van Sellmeijer wordt overgenomen uit het dijkenspoor.

Model van Bligh

$$Z_{32} = L_B - L_{c,B}$$

Hierin is:

L_B	[m]	Aanwezige kwelweglengte volgens het model van Bligh
$L_{c,B}$	[m]	Kritieke kwelweglengte volgens het model van Bligh

Model van Lane

Hierover wordt verwezen naar paragraaf 3.2.1.

Model van Sellmeijer

$$Z_{32} = m_p H_c - H$$

Hierin is:

m_p	[-]	Modelfactor voor het pipingmodel van Sellmeijer
H_c	[m]	Kritiek verval over het kunstwerk
H	[m]	Optredend verval over het kunstwerk

Opgemerkt wordt dat zowel de sterkterm als de belastingterm wordt uitgedrukt in een verval over het kunstwerk. Dit wijkt af van de modellen van Bligh en Lane, waar beide termen worden uitgedrukt in een kwelweglengte. Om maximale aansluiting met het dijkenspoor te behouden is het model van Sellmeijer niet omgeschreven naar een kwelweglengte, maar is het faalmodel uit het dijkenspoor één op één overgenomen.

3.3.2 Sterktemodellen

Model van Bligh

$$L_B = m_L \cdot L_{hB}$$

	Eenheid	Betreft	Geldigheidsgebied	Type	Parameters Verdeling		Ruimtelijke spreiding		Variatie in de tijd	
					μ	V_r/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
m_L	[·]	model parameter aanwezige kwelweglengte	Zie tekstkader onder * Opmerking	log	2,2	$\sigma = 0,27$	kwk	0	-	1
L_{hB}	[m]	horizontale kwelweglengte voor Bligh		-	nor	nom	$\sigma = 0,1$ m	kwk	1	12 uur

* Opmerking: de model parameter voor de aanwezige kwelweglengte (m_L) is overgenomen uit de “verbeterde faalkansschatting VNK” (Meer, M.T. van der, Stoop, J.D., Verbeterde faalkansschatting kunstwerken VNK, Fugro rapport 1204-0101-001, april 2005).

Om toekomst robuust te zijn (met het oog op ontwikkeling van een nieuwe Bligh formulering) zou deze parameter voor beide modellen gescheiden kunnen worden.

Model van Lane

Hiervoor wordt verwezen naar paragraaf 3.2.2.

Model van Sellmeijer

$$m_p H_c = (F_{resistance} F_{scale} F_{geometry}) \cdot L$$

$$F_{resistance} = \eta \frac{\gamma_{sub.particals}}{\gamma_{water}} \tan \theta_{sellmeijer.revised}$$

$$F_{scale} = \frac{d_{70.m}}{\sqrt[3]{\kappa L}} \left(\frac{d_{70}}{d_{70.m}} \right)^{0.4}, \quad \kappa = \frac{\nu_{water}}{g} k$$

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

	Eenheid	Betreft	Geldigheidsgebied	Type	Parameters Verdeling		Ruimtelijke spreiding		Variatie in de tijd		
					μ	V_r/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t	
$F_{resistance}$	[-]	Weerstandsfactor, beschrijft het grensevenwicht van zandkorrels op de bodem van de pipe		Is resultaat van formule							
F_{scale}	[-]	Schaalfactor, reflecteert de verhouding tussen de processschaal van het mechanisme dat voor korreltransport zorgt en de processschaal van de grondwaterstroming die dit transportmechanisme aandrijft		Is resultaat van formule							
$F_{geometry}$	[-]	Geometriefactor, beschrijft de invloed van de vorm van de geometrie van de ondergrond op de grondwaterstroming		Is resultaat van formule							
κ	[m ²]	Intrinsieke doorlatendheid van de pipinggevoelige zandlaag		Is resultaat van formule							
m_p	[-]	Modelfactor voor het pipingmodel van Sellmeijer									
L	[m]	Lengte van de kwelweg									
η	[-]	Coëfficiënt van White		det *	0,25						
$\gamma_{sub,partic als}$	[kN/m ³]	Volumegewicht van de zandkorrels onder water		det *	16,5	-	-	-	-	-	
γ_{water}	[kN/m ³]	Volumegewicht van water		det *	9,81	-	-	-	-	-	
Θ	[°]	Rolweerstandshoek van de zandkorrels		det *	37	-	-	-	-	-	
d_{70}	[m]	70%-fraktiel van de korreddiameter in de bovenste zandlaag									
$d_{70,m}$	[m]	Referentie waarde voor 70%-fraktiel in Sellmeijer regel									
ν_{water}	[m ² /s]	kinematische viscositeit van water		det *	1,33E-6	-	-	-	-	-	
g	[m ² /s]	Zwaartekrachtversnelling	-	det *	9.81	-	-	-	-	-	
k	[m/s]	Darcy doorlatendheid									
D	[m]	Dikte watervoerend pakket									

* Zie navolgende tekstdader onder * Opmerking

* Opmerking: de waarden voor de deterministische parameters zijn overgenomen uit het document 'Stochastic variables for uplift, heave and piping in WTI2017, Timo Schreckendiek, 1 mei 2014'. De waarden voor de stochasten zijn echter niet hierin opgenomen, evenmin als in het document 'WTI2017 Failure Mechanisms -Piping Kernel Requirements and Functional Design, Timo Schreckendiek, 4 september 2013'. Aanvulling is dus nog nodig.

3.3.3 Belastingmodel

Model van Bligh

$$L_{c,B} = c_B \cdot m_c \cdot (h - h_{bi})$$

	Eenheid	Betreft	Geldigheids-gebied	Type	Parameters Verdeling		Ruimtelijke spreiding		Variatie in de tijd	
					μ	V_r/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
$L_{c,B}$	[m]	Kritieke kwelweglengte volgens het model van Bligh	-	Is resultaat van formule						
c_B	[-]	creep-factor behorend bij formule van Bligh	-	nor	nom	$V = 0,10$	kwk	0	-	1
m_c	[-]	model parameter Lane/Bligh	Zie tekstkader onder * Opmerking	nor	nom	$V = 0,10$	kwk	0	-	1
h	[m+NAP]	buitenwaterstand	-	nor	nom	$\sigma = 0,10$	kwk	0	-	1
h_{bi}	[m+NAP]	binnenwaterstand	-	nor	nom	$\sigma = 0,10$	kwk	0	-	1

* Opmerking: de parameter m_c is voor Bligh en Lane hetzelfde. Om toekomst robuust te zijn (met het oog op ontwikkeling van een nieuwe Bligh formulering) zou deze parameter voor beide modellen gescheiden kunnen worden. Voorts dient uitgezocht te worden of bij bepaling van de waarde van de parameter verschillen tussen Bligh en Lane een rol hebben gespeeld, ofwel: was de modelparameter anders geworden als alleen Lane was meegegenomen?

Model van Lane

Hiervoor wordt verwezen naar paragraaf 3.2.3.

Model van Sellmeijer

$$H = (h - h_{bi} - r_c d)$$

	Eenheid	Betreft	Geldigheidsgebied	Type *	Parameters Verdeling		Ruimtelijke spreiding		Variatie in de tijd	
					μ	V_r/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
φ_{scher_m}	[m+NAP]	stijghoogte op niveau onderzijde damwand								
h	[m+NAP]	buitenwaterstand								
h_{bi}	[m+NAP]	binnenwaterstand								
r_c	[-]	Reductiefactor voor de fractie van de deklaagdikte waarmee het verval over het kunstwerk wordt gereduceerd als gevolg van de hydraulische weerstand in het opbarstkanaal								
d	[m]	Deklaagdikte								

* Opmerking: de waarden voor de deterministische parameters zijn overgenomen uit het document 'Stochastic variables for uplift, heave and piping in WTI2017, Timo Schreckendiek, 1 mei 2014'. De waarden voor de stochasten zijn echter niet hierin opgenomen, evenmin als in het document 'WTI2017 Failure Mechanisms -Piping Kernel Requirements and Functional Design, Timo Schreckendiek, 4 september 2013'. Aanvulling is dus nog nodig.

3.4 Deelfaalmechanisme Z₃₃: Bezwijken kunstwerk als gevolg van onder- en/of achterloopsheid

Dit deelfaalmechanisme beschrijft de kans op falen (bezwijken) van het kunstwerk gegeven het feit dat onder- en/of achterloopsheid optreedt.

3.4.1 Z-functie

$$Z_{33} = \beta_{kw|piping} - u$$

Hierin is:

- $\beta_{kw|piping}$ [-] Betrouwbaarheidsindex corresponderend met de faalkans van het kunstwerk gegeven het optreden van onder- of achterloopsheid
- u [-] Standaard normaal verdeelde variabele, betreft hulpmiddel voor de probabilistische som

3.4.2 Model

$$\beta_{kw|piping} = -\Phi^{-1}(P_{f,kw|piping})$$

Φ^{-1} : inverse van de normale verdeling

Hierin is:

	Eenheid	Betreft	Geldigheidsgebied	Type	Parameters Verdeling		Ruimtelijke spreiding		Variatie in de tijd	
					μ	V_r/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
$P_{f,kw piping}$	[-]	Faalkans kunstwerk gegeven erosie bodembescherming	$0 \leq P_{f,kw erosie} \leq 1$	det	Invoer	-	-	-	-	-
u	[-]	Intrinsieke onzekerheid model		nor	0	$\sigma=1,0$	-	-	-	-

3.5 Referenties

[DLT-ozw 2012]

Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen,
Deltarès, kenmerk 1202123-003-GEO-0002, 2012.

[TAW-TRZW 1999]

Technisch rapport Zandmeevoerende wellen,
Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, maart 1999

4 Beschrijving faalmechanisme *onder- en achterloopsheid*

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een beschrijving gegeven van het faalmechanisme *onder- en achterloopsheid* van kunstwerken behorend bij het toetsspoor *piping*. Deze beschrijving is geënt op hetgeen hierover staat beschreven in het Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen [DLT-ozw 2012] en het Technisch rapport Zandmeevoerende wellen [TAW-TRZW 1999].

Paragraaf 4.2 beschrijft het fenomeen piping, het faalproces en de te toetsen deelfaalmechanismen die hierbij horen. Tevens wordt ingegaan op de reststerkte die aanwezig is tussen optreden van de deelfaalmechanismen en daadwerkelijk bezwijken van het kunstwerk. Het faalproces wordt schematisch weergegeven in paragraaf 4.3. In paragraaf 4.4 worden de te toetsen deelfaalmechanismen nader beschreven. Paragraaf 4.5 gaat in op de historie van het faalmechanisme *onder- en achterloopsheid*, waarna in paragraaf 4.6 de vigerende kennisbasis aan bod komt. Paragraaf 4.7 tot slot gaat in op de wijzigingen in het WTI2017 ten opzichte van de vigerende kennisbasis en de wijze waarop de semi-probabilistische toets is vormgegeven binnen het WTI2017.

4.2 Fenomenologische beschrijving

4.2.1 Beschrijving op hoofdlijnen

Falen door *piping* vindt plaats als uitspoelen van gronddeeltjes optreedt ten gevolge van een geconcentreerde kwelstroom, waardoor holle ruimten ontstaan onder (onderloopsheid) of naast (achterloopsheid) een kunstwerk. Het erosieproces hoeft niet altijd tot falen te leiden. Het kan weer stoppen als het waterstandsverschil niet groot genoeg is of niet lang genoeg aanhoudt om de erosie op gang te houden. Als het proces niet stopt, ontstaat een proces van terugschrijdende erosie waarbij deze holle ruimten uitgroeien tot een doorgaand kanaal onder het kunstwerk. Het erosieproces gaat dan ongecontroleerd verder en de erosie van gronddeeltjes onder en/of naast het kunstwerk neemt sterk toe. Uiteindelijk kan het kunstwerk als geheel hierdoor instabiel worden en bezwijken, met als gevolg een bres in de waterkering.

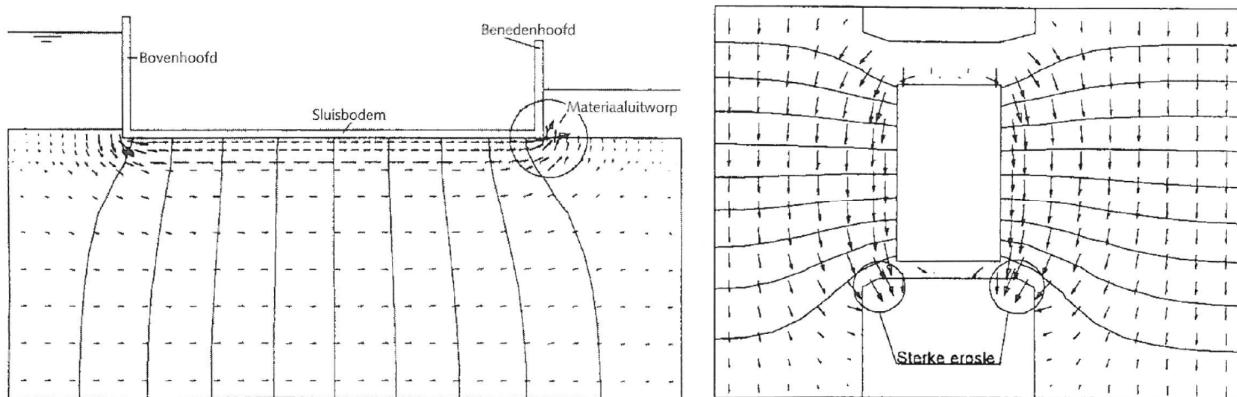
In Nederland wordt de term ‘piping’ als synoniem voor terugschrijdende erosie gebruikt, omdat vooral dat pipingmechanisme voor Nederland van belang is. Onder de noemer piping vallen internationaal echter verschillende vormen van interne erosie. De twee belangrijkste mechanismen zijn terugschrijdende erosie en suffosie. Suffosie is het fenomeen dat alleen de fijnere fractie tussen de grovere fractie wordt weggespoeld en waarbij (althans in eerste instantie) het korrelskelet in stand blijft. Suffosie kan alleen optreden in zand met een sterk niet-uniforme korrelverdeling. Het Nederlandse zand is relatief fijnkorrelig en uniform. Dit betekent dat suffosie in Nederland vrijwel geen rol speelt en alleen terugschrijdende erosie relevant is. In hoofdstuk 4 van [DLT-ozw 2012] wordt hier nader op ingegaan.

Piping kan niet optreden als uitspoeling van gronddeeltjes niet mogelijk is als gevolg van een goed functionerend filter aan de benedenstroomse zijde van het kunstwerk.

4.2.2 Gedetailleerde beschrijving van het faalproces

Belasting

De belasting op het kunstwerk wordt gevormd door het verval over het kunstwerk, zijnde het verschil tussen de buitenwaterstand en de waterstand aan de binnenzijde van het kunstwerk. Bij toenemend verval neemt de grondwaterstroming onder het kunstwerk toe. Dit leidt tot een geconcentreerde grondwaterstroming onder en/of naast het kunstwerk. In het voorbeeld van een sluis in Figuur 4.1 is links te zien dat het water vlak onder de bodem van het kunstwerk sneller zal stromen (pijlen dichter op elkaar) dan dieper in de ondergrond. Ter hoogte van het benedenhoofd komt het water weer aan de oppervlakte en is er sprake van concentratie van grondwaterstroming. Hier is het gevaar voor erosie dus het grootst en begint het pipingproces. In Figuur 4.1 rechts is een bovenaanzicht van hetzelfde kunstwerk getekend. Vlak naast het kunstwerk treedt een concentratie aan stroomlijnen op, waar erosieproblemen zich voor kunnen doen.



Figuur 4.1 Links: onderloopsheid bij een kunstwerk; schematisatie langsdoorsnede. Rechts: Achterloopsheid bij een kunstwerk; schematisatie bovenaanzicht. Beide figuren zijn ontleend aan [RWS-OS 2000]

Sterkte

De sterke van het kunstwerk met betrekking tot piping bestaat uit twee componenten: de lengte van de kwelwegen onder en/of naast het kunstwerk en de eigenschappen van de ondergrond waarop het kunstwerk gefundeerd is. Beide dragen bij aan de weerstand die de grondwaterstroming onder en naast het kunstwerk ondervindt.

De component van de kwelweglengte is direct gerelateerd aan het kunstwerk zelf en wordt gevormd door de mate waarin de kwelstroom wordt geforceerd een langere route af te leggen door de ondergrond (kwelweg). Dit wordt bepaald door de geometrie en funderingswijze van het kunstwerk. De hoofdafmetingen van het kunstwerk worden doorgaans bepaald door de functie; met behulp van kwelschermen onder- en naast het kunstwerk kan de kwelweg vervolgens verlengd worden. De fundatiewijze bepaalt of het deel van de kwelweg dat onder de constructie zit ook bijdraagt aan de weerstand die de grondwaterstroming onder en naast het kunstwerk ondervindt. Bij kunstwerken die op staal zijn gefundeerd is dit wel het geval. Bij kunstwerken die op palen zijn gefundeerd kan het voorkomen dat de ondergrond wel zakt en het kunstwerk niet. Hierdoor ontstaat een spleet tussen kunstwerk en ondergrond, waardoor de weerstand over dit deel van de kwelweg sterk afneemt. Dit deel van de kwelweg draagt

dan niet bij aan de weerstand die de grondwaterstroming onder en naast het kunstwerk ondervindt.

De weerstand die de grondwaterstroming onder en naast het kunstwerk ondervindt is ook sterk afhankelijk van het materiaal waaruit de ondergrond bestaat. In cohesieve, slecht doorlatende grondlagen is de grondwaterstroming zeer klein. Daarnaast zorgt de onderlinge samenhang ervoor dat er geen gronddeeltjes uitspoelen. Cohesieve, slecht doorlatende grondlagen zijn daarom niet gevoelig voor piping. In niet-cohesieve, goed doorlatende grondlagen (zand) is de grondwaterstroming veel groter. Daarnaast is er geen onderlinge samenhang tussen de deeltjes, zodat gronddeeltjes makkelijk door de grondwaterstroming kunnen worden meegevoerd.

De mate waarin niet-cohesieve grondlagen gevoelig zijn voor piping hangt af van de korreldiameter. Hierin spelen twee tegengestelde effecten een rol. De weerstand van de individuele korrel tegen uitspoelen neemt toe als de korrelgrootte toeneemt. De doorlatendheid van de ondergrond, en hiermee de grondwaterstroming, neemt echter ook toe bij toenemende korreldiameter. Het eerste (weerstandbiedende) effect is echter sterker, waardoor fijnkorrelige materialen gevoeliger zijn voor piping dan grofkorrelige.

Het faalproces van initiatiefase tot bezwijkfase

De grondwaterstroming onder en/of naast het kunstwerk neemt recht evenredig toe als bij stijgende buitenwaterstanden het verval over het kunstwerk toeneemt. Ter plaatse van het uittredepunt van de geconcentreerde grondwaterstroming (zie Figuur 4-1) neemt het debiet en hiermee de stroomsnelheid van het uittredende grondwater toe. In eerste instantie gaat het om 'schoon' grondwater en worden geen gronddeeltjes meegenomen. Wanneer de grondwaterstroming krachtig genoeg is dan worden de volgende processen in gang gezet (zie Figuur 4.2):

- Erosie van de zandlaag
Bij kunstwerken met een benedenstrooms kwelscherm ontstaat een situatie waarbij het zand tussen de onderzijde van het kwelscherm en het uittredepunt zich in gefluïdiseerde toestand bevindt (heave, zie plaatje linksboven in Figuur 4.2). Individuele zandkorrels worden meegevoerd en rondom de uitstroomopening van de wel afgezet. Dit wordt welvorming genoemd, zie plaatje rechtsboven in Figuur 4.2. In de zandlaag ontstaat hierdoor een holle ruimte ter plaatse van het uittredepunt, die zich later bovenin de zandlaag direct onder het kunstwerk in vorm van kanaaltjes (pipes) in bovenstroomse richting (richting buitenwater) uitbreidt. Dit wordt terugschrijdende erosie genoemd en is schematisch weergegeven het derde plaatje van Figuur 4.2.
- Het ontstaan van doorgaande pipes
Bij voldoende groot verval over het kunstwerk blijven de erosiekanaaltjes groeien, tot ze het buitenwater bereiken. Er is dan een open verbinding tussen buitenwater en uittreepunt ontstaan, waardoor het kunstwerk onderloops is geworden. Het mechanisme onderloopsheid of piping is daarmee een feit.

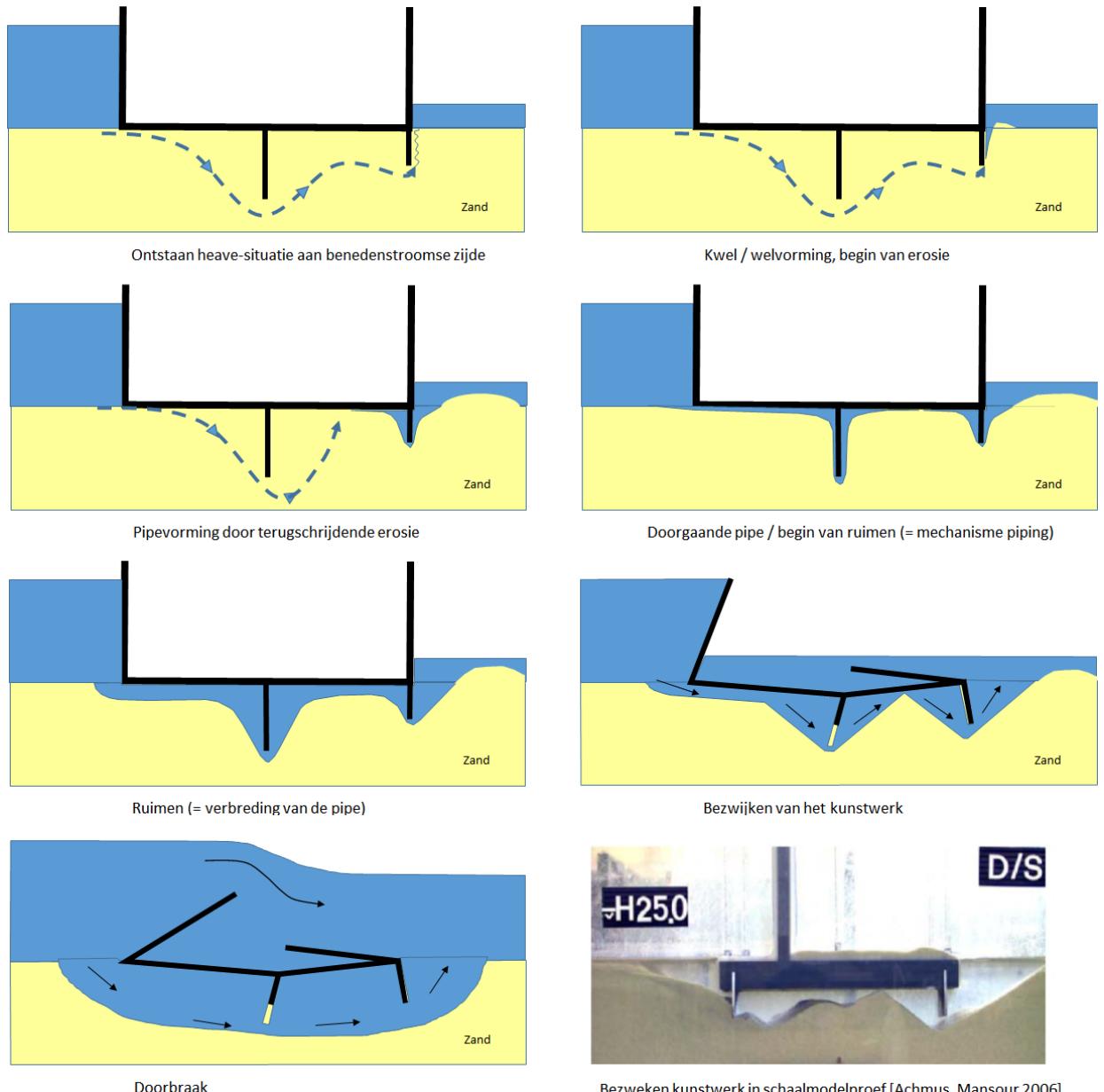
Volgens het model van Sellmeijer heeft de kanaalvorming in eerste instantie een reducerende werking op het erosieproces, doordat stromingsgradiënten afnemen zodat (bij gelijk blijvende buitenwaterstand) de terugschrijdende erosie tot stilstand komt. Wanneer het verval over de kering echter groot is, zal de terugschrijdende erosie zich

zover doorzetten, dat het erosieproces niet gereduceerd wordt, maar juist versterkt. Het verval, waarbij het proces van terugschrijdende erosie nog net stopt, wordt het kritieke verval genoemd. In de IJkdijkproeven is echter waargenomen dat als eenmaal een zandmeevoerende wel is ontstaan, het pipingproces niet meer tot stilstand komt. Bij gelijkblijvend verval stopt het zandtransport niet meer en de lengte van het kanaal blijft toenemen. Er ontstaat dus geen evenwichtssituatie. Dit lijkt in tegenspraak met de theorie van Sellmeijer.

- Verbreden van het doorgaande kanaal in benedenstroomse richting
Zodra het kanaaltje contact maakt met het water aan de bovenstroomse zijde van het kunstwerk (buitenzijde) treedt het ruimproces op. Onder 'ruimen' wordt het proces verstaan waarbij het kanaaltje door een drukgolf, die met de stroom meeloopt, vanaf de bovenstroomse naar de benedenstroomse kant versneld verder gaat eroderen. Deze drukgolf ontstaat als gevolg van het verdwijnen van het laatste stukje weerstand aan de bovenstroomse zijde van het kunstwerk.
- Bezwijken van het kunstwerk
Uiteindelijk leidt dit proces, naar wordt aangenomen, tot holle ruimten onder het kunstwerk die zo groot zijn dat verzakking en breuk, en dus bezwijken, van het kunstwerk optreedt. Bij voldoende hoge waterstand zal dan een bres in de waterkering ontstaan ter plaatse van het kunstwerk.

In Figuur 4.2 is dit proces gevisualiseerd voor het ontstaan van een doorgaande pipe onder het kunstwerk (onderloopsheid). Indien sprake is van pipevorming naast het kunstwerk op het grensvlak met een cohesieve laag (achterloopsheid) is het verloop van het pipingproces analoog aan het verloop van het pipingproces bij dijken. In [DLT-ozw 2012] paragrafen 4.3 en 4.6 wordt het pipingproces voor dijken in meer detail beschreven.

Bovenstaande beschrijving is gebaseerd op een kunstwerk dat zich in een zandige laag bevindt. Indien het kunstwerk is opgenomen in een ondoorlatend pakket, dan kan piping optreden vanuit de hieronder gelegen watervoerende zandlagen. In paragraaf 4.3 van [DLT-ozw 2012] is het bijbehorende faalproces beschreven. Dit faalproces is in principe hetzelfde als piping in het dijkenspoor.



Figuur 4.2 Verschillende fasen bij het ontstaan van piping bij een in Nederland veel voorkomende situatie van de ondergrondsdopbouw bij een kunstwerk. Rechtsonder een foto van een bezwiken kunstwerk in een schaalmodelproef [Achmus, Mansour 2006]

4.2.3 Onderscheiden deelfaalmechanismen

De volgende deelfaalmechanismen worden onderscheiden in de foutenboom die het falen van de kering beschrijft (zie paragraaf 4.4):

- Z₃₁ Optreden onder- en/ achterloopsheid, kwelweg (deels) verticaal
Het uitspoelen van gronddeeltjes ten gevolge van een geconcentreerde kwelstroom die (deels) verticaal gericht is, waardoor holle ruimten ontstaan onder en/of naast het

kunstwerk. Dit leidt tot een proces van terugschrijdende (interne) erosie, waarbij uiteindelijk een doorgaande pipe ontstaat onder of naast het kunstwerk.

- Z_{32} Optreden onder- en/of achterloopsheid, kwelweg zuiver horizontaal
Het uitspoelen van gronddeeltjes ten gevolge van een geconcentreerde kwelstroom die zuiver horizontaal gericht is, waardoor holle ruimten ontstaan onder en/of naast het kunstwerk. Dit leidt tot een proces van terugschrijdende (interne) erosie, waarbij uiteindelijk een doorgaande pipe ontstaat onder of naast het kunstwerk.
- Z_{33} Bezwijken kunstwerk als gevolg van onder- en/of achterloopsheid
Kans dat het kunstwerk bezwijkt (volledig onderuit gaat) gegeven het feit dat onder- of achterloopsheid heeft plaatsgevonden. Heeft betrekking op reststerkte van het kunstwerk (inclusief aanliggende grondlichaam) na het ontstaan van een doorgaande pipe onder of naast het kunstwerk.

De begrippen *onderloopsheid* en *achterloopsheid* roepen soms verwarring op. Onder *achterloopsheid* wordt verstaan de vorming van kanaaltjes of holle ruimten aan de zijkant van een kunstwerk als gevolg van het uitspoelen van grond. De maatgevende kwelweg is meestal zuiver horizontaal gericht (een kwelstroom langs het kunstwerk op het grensvlak van een cohesieve laag), maar kan ook verticale componenten bevatten (denk aan een uitrede onder een binnendijks scherm). Tot voor kort werd achterloopsheid echter vaak 1 op 1 gekoppeld aan het model van Bligh, dus aan situaties met een zuiver horizontale kwelweg.

Onderloopsheid betreft het ontstaan van holle ruimten onder een kunstwerk als gevolg van een geconcentreerde kwelstroom waarbij gronddeeltjes worden meegevoerd. Hierbij loopt de kwelstroom onder het kunstwerk door op het grensvlak van constructie en zand. Onder een kunstwerk zijn doorgaans kwelschermen aanwezig, waardoor de kwelstroom ook verticale componenten omvat. Dit hoeft echter niet altijd het geval te zijn. Denk aan lange duikers en leidingen waarbij geen kwelschermen aanwezig zijn. Tot voor kort werd onderloopsheid echter vaak 1 op 1 gekoppeld aan het model van Lane en/of heave, dus aan situaties met een (deels) verticale kwelweg.

4.2.4 Reststerkte

Bij het faalmechanisme *piping* is sprake van reststerkte na het moment van overschrijden van het kritieke verval. Dit is het verval, waarbij het proces van terugschrijdende erosie nog net stopt (althans volgens de theorie van Sellmeijer) dan wel na het ontstaan van een zandmeevoerende wel (waarnemingen IJkdijk). Deze reststerkte zit opgesloten in het deelfaalmechanisme Z_{33} *Bezwijken kunstwerk als gevolg van onder- en/of achterloopsheid*. Middels dit deelfaalmechanisme kan de kans worden meegenomen dat het kunstwerk als geheel bezwijkt (onderuit gaat) door erosie van de ondergrond nadat doorgaande pipevorming heeft plaatsgevonden.

Voordat het kunstwerk als geheel bezwijkt na het overschrijden van het kritieke verval moet een aantal vervolgprocessen zijn beslag krijgen. Allereerst moet een doorgaande pipe worden gevormd onder of naast het kunstwerk. Uit experimenteel onderzoek bij dijken volgt dat het kanaal bij constant verval langzaam in bovenstroomse richting groeit. De snelheid waarmee kanaaltjes groeien is afhankelijk van het verval. Zodra het kanaaltje dat vanaf de benedenstroomse zijde stroomopwaarts is gegroeid en contact maakt met het water aan de bovenstroomse zijde van de dijk (buitenzijde, tijdsduur meerdere dagen in de IJkdijkproef), treedt het ruimproces op. Het mechanisme *piping* is daarmee een feit. Nadat het kanaal de bovenstroomse zijde heeft bereikt kost het bij constant verval nog geruime tijd (meer dan 24

uur in de IJkdijkproef) voordat het geruimde kanaal de benedenstroomse zijde bereikt. Dit proces zou sneller kunnen verlopen als het kritieke verval ruim wordt overschreden.

Zodra het ruimproces de benedenstroomse zijde heeft bereikt, resulteert dit in een forse toename van zandtransport en debiet. In geval van achterloopsheid zal naast zand ook klei meespoelen en er vormt zich een zogenaamde modderfontein. Water stroomt met groot geweld door het geruimde kanaal. Wat dan gebeurt, is slecht te voorspellen, omdat schaal- en praktijkproeven bij kunstwerken ontbreken. In geval van achterloopsheid zal het proces vergelijkbaar zijn met dat bij dijken. Bij dijken treden in de dijk grote scheuren op en de dijk zakt aan de bovenstroomse zijde. Dit leidt uiteindelijk tot verlies van het waterkerende vermogen van de waterkering met bresvorming tot gevolg. Bij onderloopsheid van het kunstwerk moet als gevolg van erosie van grond onder en langs het kunstwerk de overall-stabiliteit van het kunstwerk onvoldoende worden, waarna kantelen of afschuiven van het hele kunstwerk optreedt. Ook kan een proces in gang worden gezet waarbij successievelijk delen van het kunstwerk constructief bezwijken, met het falen van de kering als uiteindelijk gevolg. Tevens kan het zo zijn dat het kunstwerk wel blijft staan, maar de aansluitende dijk inzakt als gevolg van het erosieproces en uiteindelijk bezwijkt.

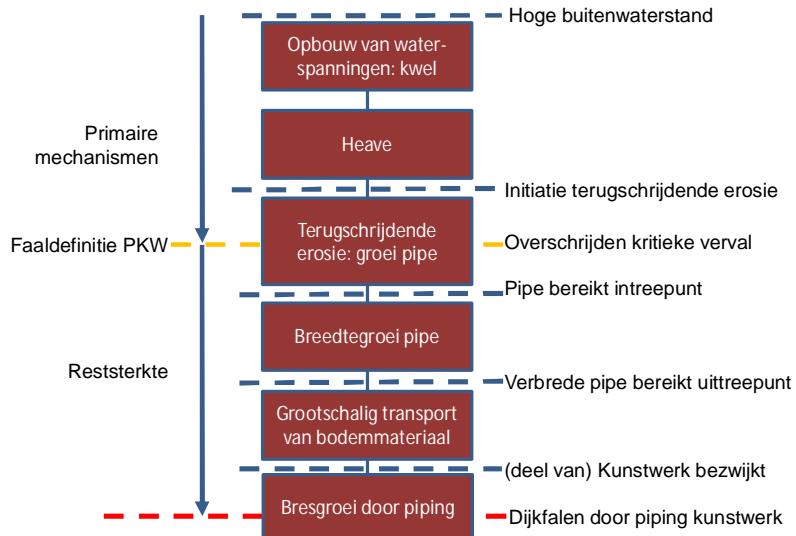
De reststerkte van het kunstwerk na het overschrijden van het kritieke verval is dus afhankelijk van een groot aantal factoren. De belangrijkste zijn:

- Grondslag onder het kunstwerk
De vorming van een doorgaande pipe en het ruimingsproces gaat in fijnzandige grond sneller dan in zandgronden met een grovere fractie.
- Fundatie van het kunstwerk
Een kunstwerk dat op palen staat zal minder snel (deels) bezwijken dan een kunstwerk dat op staal gefundeerd is. Aan de andere kant gaat het proces van pipevorming bij kunstwerken op palen naar verwachting weer sneller indien sprake is van een spleet onder het kunstwerk.
- Aanwezigheid van kwelschermen
Het proces van pipevorming en ruiming van de doorgaande pipe gaat langzamer naarmate er meer of diepere kwelschermen aanwezig zijn.
- Geometrie van het kunstwerk
Een kort kunstwerk zal sneller kantelen of afschuiven dan een lang kunstwerk.

Nadat het kritieke verval is overschreden moet er dus nog het nodige gebeuren voordat het kunstwerk als geheel bezwijkt. Dit kan in rekening worden gebracht via het deelfaalmechanisme *Z₃₃ Bezwijken kunstwerk als gevolg van onder- en/of achterloopsheid*. Helaas is het zeer lastig de reststerkte te kwantificeren en uit te drukken in een concrete kans op bezwijken van het kunstwerk als geheel nadat het kritieke verval is overschreden. Concrete aanwijzingen hiervoor ontbreken, waardoor in de praktijk reststerkte niet wordt meegenomen en de kans op het overschrijden van het kritieke verval de faalkans van het kunstwerk als geheel bepaalt. Het moge duidelijk zijn dat er dan nog een aanzienlijke mate van reststerkte aanwezig is. Visuele waarnemingen van het bezwijkproces en van de tijdsduur ervan ontbreken echter bij kunstwerken.

4.3 Overzicht van het faaltraject piping bij kunstwerken

In onderstaande figuur is een schematisch overzicht gegeven van het traject dat leidt tot falen van het kunstwerk als gevolg van piping.



Figuur 4.3 Gebeurtenissen leidend tot falen van de waterkering door piping gerelateerd aan het kunstwerk

4.4 Beknopte beschrijving van de te toetsen deelfaalmechanismen

Voor het toetsspoor piping bij kunstwerken wordt géén volledig probabilistische toets op niveau 2b uitgewerkt. Toetsing vindt plaats op niveau 1 (Eenvoudige toets) en 2a (Gedetailleerde toets, semi-probabilistisch).

In de toetsing worden de volgende deelfaalmechanismen onderscheiden:

- Z_{31} Optreden onder- en/of achterloopsheid, kwelweg (deels) verticaal.
- Z_{32} Optreden onder- en/of achterloopsheid, kwelweg zuiver horizontaal.
- Z_{33} Bezwijken kunstwerk als gevolg van onder- en/of achterloopsheid.

Z_{31} Optreden onder- en/of achterloopsheid, kwelweg (deels) verticaal

Dit deelfaalmechanisme betreft het uitspoelen van gronddeeltjes ten gevolge van een geconcentreerde kwelstroom die (deels) verticaal gericht is, waardoor holle ruimten ontstaan onder en/of naast het kunstwerk. Dit leidt tot een proces van terugschrijdende (interne) erosie, waarbij uiteindelijk een doorgaande pipe ontstaat onder en/of naast het kunstwerk. Het kritieke verval is het verval waarbij nog net geen doorgaande pipe ontstaat. Dit kritieke verval is afhankelijk van de grondslag onder het kunstwerk en de aanwezige kwelweglengte, die wordt bepaald door de geometrie van het kunstwerk (afmetingen, kwelschermen). De kwelweglengte wordt buiten Ringtoets om bepaald met vigerende ontwerpregels. Doorgaans is hiervoor een gedegen driedimensionale analyse van het kunstwerk noodzakelijk. In de schematiseringshandleiding (zie hoofdstuk 7) worden hiervoor aanwijzingen gegeven.

Z_{32} Optreden onder- en/of achterloopsheid, kwelweg zuiver horizontaal

Dit deelfaalmechanisme betreft het uitspoelen van gronddeeltjes ten gevolge van een geconcentreerde kwelstroom die zuiver horizontaal gericht is. Voor het overige is dit deelfaalmechanisme hetzelfde als deelfaalmechanisme Z_{31} .

Z₃₃ Bezwijken kunstwerk als gevolg van onder- en/of achterloopsheid

Dit deelfaalmechanisme betreft de kans dat het kunstwerk als geheel bezwijkt (volledig onderuit gaat) gegeven het feit dat onder- en/of achterloopsheid heeft plaatsgevonden. Hierdoor ontstaat een dusdanige erosie van bodemmateriaal onder en/of naast het kunstwerk dat de overall-stabiliteit van het kunstwerk onvoldoende wordt. Dit kan gebeuren door kantelen of afschuiven van het hele kunstwerk, of door een proces waarbij opeenvolgend delen van het kunstwerk constructief bezwijken met het bezwijken van het totale kunstwerk als uiteindelijke gevolg. Tevens kan het zo zijn dat het kunstwerk wel blijft staan, maar de aansluitende dijk inzakt als gevolg van het erosieproces en uiteindelijk bezwijkt. Dit kan leiden tot een bres in de waterkering, met bresgroei tot gevolg.

Dit deelfaalmechanisme behandelt dus in feite de aanwezige reststerkte van het kunstwerk (inclusief aanliggende grondlichaam) na het ontstaan van een doorgaande pipe onder en/of naast het kunstwerk. Zoals in paragraaf 4.2.4 is uitgelegd ontbreken handvatten om deze reststerkte te kwantificeren.

4.5 Historie van het faalmechanisme

In 2012 is door het onderzoeksprogramma Sterkte en Belasting Waterkeringen (SBW) het Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen gepubliceerd [DLT-ozw 2012]. In dit onderzoeksrapport wordt een verbeterde rekenregel voor het faalmechanisme piping gepresenteerd. Het Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen is juni 2013 door het Ministerie van Infrastructuur en Milieu beschikbaar gesteld aan alle waterkeringbeheerders, met als toevoeging dat in 2013 aanvullend een werkwijzer piping wordt opgesteld. Deze Werkwijzer Piping bij Dijken [MIM-WPbD 2014] is juni 2014 gepubliceerd. Het Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen [DLT-ozw 2012] kan hiermee als vigerende kennisbasis beschouwd worden. Overigens heeft de werkwijzer specifiek betrekking op piping bij dijken. [DLT-ozw 2012] is breder opgezet. Hoewel ook hier de nadruk ligt op de dijken wordt tevens aandacht besteed aan piping bij kunstwerken.

Het faalmechanisme *piping* bij kunstwerken kent een lange historie. Door Bligh is in 1910 een aantal bezwijkgevallen van op staal gefundeerde gemetselde kleine stuwdammen op verschillende grondslag in India geïnventariseerd en geanalyseerd. Met de rekenregel wordt het toelaatbare verval over de constructie berekend, als product van de totale horizontale en verticale kwelweglengte (*line of creep*) onder de constructie en een factor die afhankelijk is van de grondslag. In de opvatting van Bligh worden horizontale en verticale stukken (verticale wanden van een constructie of verticale kwelwegen langs een scherm) even zwaar meegerekend bij de bepaling van de kwelweg. Door Lane is die aanpak sterk bekritiseerd. Hij stelde dat de verticale delen van de ‘*line of creep*’ een relatief grotere bijdrage aan de weerstand leveren dan de horizontale. In 1935 is door Lane een, eveneens empirische, rekenregel opgesteld, waarbij horizontale en verticale delen van de kwelweg op gewogen wijze in rekening worden gebracht. Bij dijkversterkingen in Nederland was de regel van Bligh tot begin van de jaren negentig in gebruik voor situaties waarin uitsluitend een horizontale kwelweg aanwezig was. Hiermee werd dus impliciet de kritiek van Lane onderschreven. Bij kunstwerken werd uitgegaan van de rekenregel van Lane (voor onderloopsheid) of Bligh (achterloopsheid). Van beide rekenregels werd altijd aangenomen dat ze conservatief van aard zijn. Recent onderzoek heeft echter uitgewezen dat dit niet de regel van Bligh bij dijken in ieder geval niet het geval is.

Door Harza is in 1935 een criterium voor heave opgesteld in termen van de kritieke ‘flotation gradiënt’; in latere onderzoeken is voortgeborduurd op dit concept. In 1995 zijn, gebaseerd

op het heave-criterium, met behulp van het zogenoemde Fragmentenmodel (zie paragraaf 5.4.5) ontwerpregels afgeleid voor het dimensioneren van kwelschermen.

Vanaf de jaren vijftig zijn in Nederland, Duitsland en de Verenigde Staten verschillende onderzoeksprogramma's van start gegaan met het doel het pipingproces beter te begrijpen en te modelleren. Met name in het Duitse onderzoek (vanaf de jaren zeventig) is middels modelproeven het proces van ontstaan en uitgroeien van erosiekanaaltjes in een zandlaag onder de ondoorlatende onderrand van een waterkering onderzocht. Het Nederlandse onderzoek resulteerde eind jaren tachtig van de vorige eeuw in de ontwikkeling van het wiskundige model van Sellmeijer [Sellmeijer, 1988], waarmee het erosieproces dat ten grondslag ligt aan piping fundamenteel wordt beschreven. In 1994 is het Technisch Rapport voor controle op het mechanisme piping bij rivierdijken [TAW-TRCP 1994] gepubliceerd, waarin ontwerpregels voor de ontwerp- en adviespraktijk zijn afgeleid gebaseerd op het model van Sellmeijer. De hierbij toegepaste veiligheidsfilosofie is gebaseerd op de overschrijdingskans van een bepaalde waterstand. Deze is dan vertaald naar sterkenormen. Dit was duidelijk anders dan het vooroorlogse onderzoek, waar de veiligheidsfilosofie alleen gebaseerd was op de hoogst voorgekomen waterstand.

Zoals uit de titel van [TAW-TRCP 1994] al blijkt betreft het alleen ontwerpregels voor dijken. Voor kunstwerken is [TAW-LCVW 1976] lange tijd vigerend. Hierin wordt voor onder- en achterloopsheid de formule van Lane voorgeschreven. In 1997 is [TAW-LWKBC 1997] uitgebracht als groene versie van de Leidraad Kunstwerken [TAW-LK 2003]. Hierin wordt voor onderloopsheid merkwaardigerwijze in eerste instantie verwezen naar de formules van Bligh en Sellmeijer. Bij geconstateerde kwelwegtekorten worden damwandschermen vervolgens gedimensioneerd met de formules van heave en Lane. Deze werkwijze heeft de definitieve versie van [TAW-LK 2003] dan ook niet gehaald. In [TAW-LK 2003] wordt voor piping direct doorverwezen naar het Technisch Rapport Zandmeevoerende wellen [TAW-TRZW 1999], dat in 1999 is verschenen. In [TAW-TRZW 1999] worden voor zowel dijken als kunstwerken de vigerende modellen van Bligh, Lane, Sellmeijer en heave voor de controle op piping gepresenteerd. Ook in de wettelijke toetsingen tot en met de derde toetsronde is in de toetsvoorschriften (o.a. [DWW-VTV06 2007]) zoveel mogelijk aangesloten op [TAW-LK 2003] en hiermee op [TAW-TRZW 1999].

Tot het moment van ter beschikking stellen van [DLT-ozw 2012] was [TAW-TRZW 1999] vigerend voor zowel dijken als kunstwerken. De belangrijkste verschillen tussen [TAW-TRZW 1999] en [DLT-ozw 2012] zijn dat in [DLT-ozw 2012] de rekenregel gebaseerd op het model van Sellmeijer is aangepast en dat het model van Bligh niet meer van toepassing is verklaard.

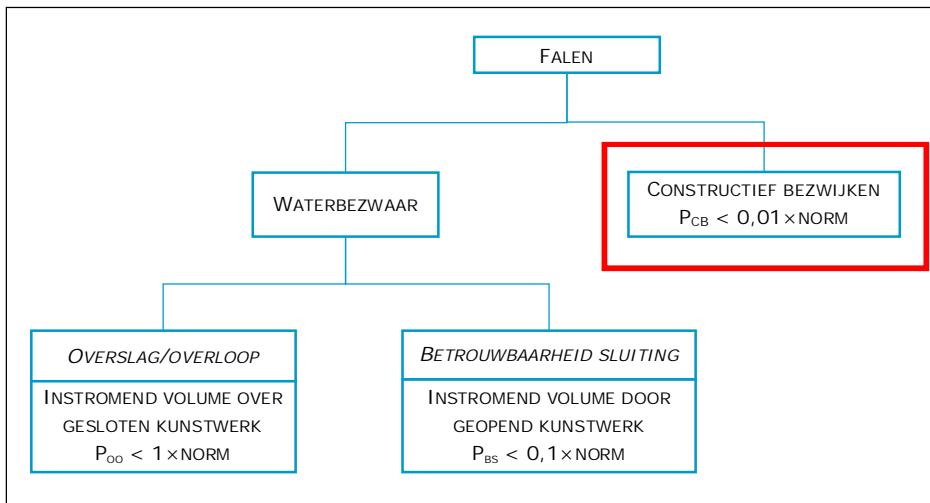
Een uitgebreidere beschrijving van de historie van het faalmechanisme piping is te vinden in hoofdstuk 3 van [DLT-ozw 2012].

4.6 Vigerende veiligheidsfilosofie en huidig toetsinstrumentarium (VTV2006)

4.6.1 Vigerende veiligheidsfilosofie

De vigerende veiligheidsfilosofie is opgenomen in de Leidraad Kunstwerken [TAW-LK 2003]. In deze veiligheidsfilosofie wordt het falen van een kunstwerk opgedeeld in een tak 'waterbezuwaar' en een tak 'constructief bezwijken' (Figuur 4-1). Bij de laatste tak wordt verondersteld dat dit altijd tot ten minste substantiële gevolgen leidt en in de meeste gevallen zullen de gevolgen meteen groot zijn. Het constructief bezwijken leidt in de regel ook direct tot een onbeheersbare situatie, waarin nog weinig herstelmaatregelen mogelijk zijn. De

eerste tak geeft weliswaar aanleiding tot (grote) problemen, maar de situatie hoeft niet direct onbeheersbaar te zijn.



Figuur 4-1 Faalboom kunstwerk Leidraad Kunstwerken [TAW-LK 2003]

Uitgangspunt in de Leidraad Kunstwerken [TAW-LK 2003] is de overbelastingsbenadering. De essentie van de overbelastingsbenadering is dat primair eisen worden gesteld aan de kans per jaar op overschrijding van een toelaatbaar instromend volume buitenwater via het gesloten kunstwerk of geopende kunstwerk (voorwaarde 1). Daarnaast wordt als aanvullende eis gesteld dat de kans op constructief bezwijken van het kunstwerk, gegeven dat normomstandigheden niet worden overschreden, klein dient te zijn ten opzichte van de kans op overschrijding van het toelaatbaar instromend volume (voorwaarde 2).

Piping valt onder constructief bezwijken van het kunstwerk. Conform de huidige Leidraad Kunstwerken [TAW-LK 2003] wordt aan het faalmechanisme voldaan wanneer de faalkans kleiner is dan 1% van de veiligheidsnorm zoals vastgelegd in de huidige waterwet. In formulevorm is dit:

$$P_{f,CB} < 0,01 \times \text{norm} \quad (1)$$

4.6.2 Wettelijk toetsinstrumentarium tot op heden

In de wettelijke toetsingen tot en met de derde toetsronde is in de toetsvoorschriften (o.a. [DWW-VTV06 2007]) zoveel mogelijk aangesloten op [TAW-LK 2003] en hiermee op [TAW-TRZW 1999]. De toets volgt het algemene schema voor sterkte en stabiliteit en bestaat uit vier stappen:

1. Eenvoudige toets

In de eerste stap vindt een controle plaats aan de hand van eenvoudige criteria, die erop neerkomen dat een kunstwerk dat geheel is omsloten door een ondoorlatend pakket in principe niet getoetst hoeft te worden.

2. Gehanteerde ontwerpmethode

Als ontworpen is volgens [TAW-TRZW 1999] of [TAW-HCO 1994] en de belasting is niet significant toegenomen dan voldoet het kunstwerk voor *piping*.

3. Gedetailleerde toetsing
In deze stap wordt een herberekening uitgevoerd conform [TAW-TRZW 1999].
4. Geavanceerde toetsing
Dit behelst met name gebruik van grondwaterstromingsmodellen om 3D-analyses uit te voeren of tijdsafhankelijk te rekenen, probabilistische piping- of heave analyses en toepassing van bewezen sterkte.

4.7 WTI2017

- 4.7.1 Omgang met toetsniveau 1, 2 en 3
Voor het toetsspoor *piping* bij kunstwerken wordt géén probabilistische toets op niveau 2 uitgewerkt. De toets op niveau 2 wordt uitgevoerd aan de hand van de beschikbare modellen uit het WTI2011.
- 4.7.2 Wijzigingen in het WTI2017 ten opzichte van het VTV2006

Modellen

In het WTI2017 wordt grotendeels aangesloten op de huidige wijze van toetsen. Het belangrijkste verschil is dat gebruik wordt gemaakt van de nieuwe rekenregel van Sellmeijer conform [DLT-ozw 2012]. De aanbeveling uit [DLT-ozw 2012] om het model van Bligh ook voor kunstwerken niet meer toe te passen wordt niet overgenomen. Dat betekent dat het model van Bligh voor de toetsing van kunstwerken gewoon gebruikt kan blijven worden.

Veiligheidsfilosofie

Daarnaast is een nieuwe veiligheidsfilosofie geïntroduceerd, die in het WTI2017 voor het eerst wordt toegepast. In plaats van de overschrijdingskansbenadering is overgestapt naar de overstromingskansbenadering. Hierbij is per dijktraject vastgelegd wat de maximaal toelaatbare kans op een overstroming mag zijn. Ten behoeve van de niveau 2a-toets is per faalmechanisme vervolgens vastgelegd welk deel van de faalkansruimte in principe voor het betreffende faalmechanisme is gereserveerd. Voor piping bij kunstwerken is dit 2% van de beschikbare faalkansruimte.

Omdat voor het toetsspoor *piping* bij kunstwerken géén probabilistische toets op niveau 2 wordt uitgewerkt, heeft de nieuwe veiligheidsfilosofie geen consequenties voor de methode van toetsing voor het toetsspoor *piping* bij kunstwerken.

4.8 Referenties

[Achmus, Mansour 2006]

Achmus, M., Mansour, B.G.S. (2006): Considerations and model Tests on the Design of River Barrages with Respect to Piping. 3rd Int. Conference on Scour and Erosion, Amsterdam

[DLT-ozw 2012]

Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen,
Deltaires, kenmerk 1202123-003-GEO-0002, 2012

[DWW-VTV06 2007]

Voorschrift Toetsen op Veiligheid primaire waterkering 2006 (VTV2006),
Dienst Weg- en Waterbouwkunde (RWS), ISBN 978-90-369-5762-5, september 2007

[MIM-WPbD 2014]

Werkwijzer Piping bij Dijken

Versie 1.1, groeidocument

Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 12 juni 2014

[RWS-OS 2000]

Ontwerp van schutsluizen

Rijkswaterstaat, Bouwdienst, ISBN 90-369-3306-4, juni 2000

[Sellmeijer, 1988]

On the mechanism of piping under impervious structures

Ph.D-thesis 1670

[TAW-BWKBC 1997]

Basisrapport Waterkerende Kunstwerken en Bijzondere Constructies,

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 1997

[TAW-HCO 1994]

Handreiking Constructief Ontwerpen

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, april 1994

[TAW-LCVW 1976]

Leidraad voor ontwerp, beheer en onderhoud van constructies en vreemde objecten in, op en nabij waterkeringen

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, april 1976

[TAW-LK 2003]

Leidraad Kunstwerken,

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, ISBN 90-369-5544-0, mei 2003

[TAW-LWKBC 1997]

Leidraad Waterkerende Kunstwerken en Bijzondere Constructies,

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 1997

[TAW-TRCPR 1994]

Technisch Rapport voor controle op het mechanisme piping bij rivierdijken

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, januari 1994

[TAW-TRZW 1999]

Technisch rapport Zandmeevoerende wellen,

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, maart 1999

5 Beschrijving modellen Z₃₁: Optreden onder- en achterloopsheid, kwelweg (deels) verticaal

5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een beschrijving gegeven van de faalmechanismemodellen die horen bij het deelfaalmechanisme Z₃₁: *Optreden onder- en achterloopsheid, kwelweg (deels) verticaal*. Begonnen wordt met een beschrijving van de vigerende kennisbasis en de van toepassing zijnde modellen (paragraaf 5.2). Tevens wordt in deze paragraaf ingegaan op nieuwe ontwikkelingen aangaande deze faalmechanismemodellen en wordt een keuze gemaakt welke modellen in het WTI2017 gebruikt worden.

Paragrafen 5.3 en 5.4 beschrijven vervolgens de faalmechanismemodellen Lane en heave in meer detail. Hierbij wordt dieper ingegaan op de historie en kennisbasis van het faalmechanismemodel, waarna het faalmechanismemodel zelf beschreven wordt. Hierbij wordt aandacht besteed aan het geldigheidsgebied en wordt (ingeval van het model van heave) ingegaan op de verschillende berekeningswijzen die voor dit model mogelijk zijn. In paragraaf 5.5 worden de resultaten van berekeningen met de methodes van Lane en heave (berekend met behulp van de zogeheten fragmentenmethode) met elkaar vergeleken. Paragraaf 5.6 besluit met een advies hoe de modellen in te zetten in de toetsing.

5.2 Beschrijving vigerende kennisbasis, ontwikkelingen en keuze modellen WTI2017

5.2.1 Vigerende kennisbasis en modellen

De vigerende kennisbasis voor het toetsspoor piping is vastgelegd in het Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen [DLT-ozw 2012]. In [DLT-ozw 2012] worden de modellen van Lane en heave van toepassing verklaard indien sprake is van een kwelweg die verticale componenten bevat.

5.2.2 Ontwikkeling nieuwe kennis

Binnen het onderzoeksprogramma Sterkte en Belastingen Waterkeringen, dat in 2007 van start is gegaan, is onderzoek verricht naar piping bij kunstwerken. In [SBW-PiKu4 2012] zijn in hoofdstuk 3 de resultaten opgenomen van een literatuurstudie van experimentele onderzoeken naar piping bij kunstwerken. In paragraaf 5.4.6 worden de conclusies hiervan besproken.

Het onderzoeksprogramma Sterkte en Belastingen Waterkeringen is in 2012 opgegaan in het WTI2017. Voor zover bekend wordt zowel binnen Deltarès, de TU Delft als in het buitenland momenteel geen experimenteel onderzoek uitgevoerd naar piping bij kunstwerken.

5.2.3 Toepasbaarheid modellen

Voor situaties waarbij sprake is van een kwelweg die verticale componenten bevat wordt gebruik gemaakt van het model van Lane of heave. Beide modellen zijn specifiek van toepassing op deze situatie.

5.2.4 Keuze vigerende modellen toetsing

Voor de keuze ten aanzien van de vigerende modellen wordt aangesloten bij [DLT-ozw 2012]. Dit betekent dat voor situaties waarbij sprake is van een kwelweg die verticale componenten bevat het model van Lane of heave wordt gebruikt. Dit is volledig in lijn met [DLT-ozw 2012].

5.2.5 Consequenteanalyse

Het gebruik van de modellen van Lane en heave is conform de vigerende ontwerp- en toetspraktijk. Een consequenteanalyse is derhalve niet aan de orde.

5.3 Beschrijving model van Lane

5.3.1 Historie en kennisbasis in meer detail

In 1935 is door Lane een onderzoek verricht aan 278 metselwerkdammen op verschillende grondslag [Lane 1935]. Het doel van het onderzoek was om de benodigde lengte van de kwelweg te bepalen om bezwijken door piping te voorkomen. De kwelweg is de weg die het water langs het kunstwerk moet afleggen. Volgens Lane is de weerstand langs een verticale weg beduidend groter dan de weerstand langs een horizontale weg. Dit blijkt ook uit het onderzoek. De dammen die faalden hadden geringe verticale kwelweglengtes. Dit was reden voor Lane om, in tegenstelling tot de methode Bligh die in 1910 werd gepubliceerd en tot dan veel gebruikt werd, de weerstand van de verticale kwelweglengte een factor 3 hoger te stellen dan die van de horizontale kwelweglengte.

Daarnaast hanteert Lane andere zogeheten creep-factoren dan Bligh, die een maat zijn voor de weerstand van de ondergrond tegen uitspoelen. In Tabel 5.1 worden deze gegeven. Lane geeft ook waarden voor klei van 3 (zachte klei) tot 1,6 (stijve klei), met hierbij de toevoeging dat de waarden voor medium en zachte klei onzeker zijn. In de Nederlandse praktijk zijn deze waarden, waarschijnlijk om deze reden, niet overgenomen.

In zijn paper geeft Lane aan dat zowel de reductiefactor van 1/3 op de horizontale kwelweglengte als de waarden van de creepfactoren conservatief gekozen zijn; in zijn onderzoek stelt Lane dat geen enkel bezwijkgeval is gevonden bij dammen die zijn nagerekend met de voorgestelde Creep-waarden. Dit is echter niet helemaal waar: er is 1 dam (zie Figuur 5.2) die bezweken is waarbij de Creep-waarde groter is dan de door Lane voorgestelde Creep-waarde.

5.3.2 Beschrijving model van Lane

Een beschrijving van het model van Lane is te vinden in paragraaf 5.3.4 van [DLT-ozw 2012]. Volledigheidshalve is deze paragraaf hier nagenoeg integraal overgenomen.

Door Lane (1935) is op basis van een inventarisatie van bezwijkgevallen van constructies waarbij de kwelweg deels uit verticale stukken bestond de volgende rekenregel opgesteld:

$$\Delta H \leq \Delta H_c = \frac{\left(\frac{1}{3}L_h + L_v\right)}{C_{w,creep}} \quad (5.1)$$

Hierin is L_h de totale lengte van de horizontale delen van de kwelweg en L_v de totale lengte van de verticale delen van de kwelweg, de 'line of creep'. In Figuur 5.1 is de kwelweg waarmee gerekend moet worden weergegeven. Merk op dat de verticale kwelweg langs een scherm gelijk is aan twee keer de lengte van het scherm. Het in rekening brengen van de horizontale kwelweglengte is alleen toegestaan wanneer een goede aansluiting tussen de onderkant van de constructie en de ondergrond gewaarborgd is.



Figuur 5.1 Kwelweg bij waterkerend kunstwerk met kwelschermen

De factor $C_{w,creep}$ is een materiaalconstante van de ondergrond en wordt de gewogen creep-factor genoemd. $C_{w,creep}$ is gebaseerd op een bovengrens wat impliceert dat bij het aanwenden van de regel van Lane voor de veiligheidsfactor geldt: $\gamma = 1,0$. In Tabel 5.1 zijn de door Lane aangegeven waarden voor verschillende typen materiaal in de grondlaag weergegeven.

De empirische rekenregel van Lane is in beginsel bedoeld voor controle op piping (horizontale erosie), waarbij heave (verticaal uitreeverhang) impliciet ook getoetst wordt en voldoet als wordt voldaan aan het pipingcriterium volgens de rekenregel van Lane. In de regel van Lane wordt geen onderscheid gemaakt tussen deze twee verschillende mechanismen; bij gebruik van de geavanceerdere rekenregels van Sellmeijer (horizontale erosie) en heave (verticaal uitreeverhang) worden deze beide deelfaalmecanismen wel separaat beschouwd.

Grondsoort	Mediane korreldiameter [μm] ¹	$C_{w,creep}$ (Lane) met $\gamma = 1,0$
Uiterst fijn zand, silt	< 105	8,5
Zeer fijn zand	105 – 150	
Zeer fijn zand (mica)		7
Matig fijn zand (kwarts)	150 – 210	7
Matig grof zand	210 – 300	6
Zeer/uiterst grof zand	300 – 2000	5
Fijn grind	2000 – 5600	4
Matig grof grind	5600 – 16000	3,5
Zeer grof grind	> 16000	3

¹ Indicaties conform NEN 5104 (September 1989)

Tabel 5.1 Creep-factoren voor de regels van Lane

Merk op dat in de regel van Lane de verticale kwelweg door een opbarstkanaal niet nog eens expliciet in rekening wordt gebracht; deze wordt immers al ‘meegerekend’ bij de verticale kwelwegdelen. De methode van Lane wordt uitsluitend toegepast wanneer de methode Sellmeijer niet toepasbaar is.

In het bijzonder bij kunstwerken hoeft de maatgevende kwelweg niet in één (verticaal of horizontaal) vlak te liggen. Het is zaak de kortst mogelijke kwelwegen na te gaan. De verticale en horizontale kwelweglengtes worden gevonden door sommatie van de verticale respectievelijk horizontale kwelwegonderdelen. Hier wordt in hoofdstuk 7

Schematiseringshandleiding nader op ingegaan. Ook de opmerkingen die in paragraaf 5.3.4 van [DLT-ozw 2012] worden besproken en die betrekking hebben op schematisering worden in de schematiseringshandleiding behandeld.

In de toetsingspraktijk wordt in situaties met verticaal uitstredende kwel, bijvoorbeeld achter een kwelscherm, de regel van Lane ook wel gebruikt als eerste grove controle op heave. Uitgangspunt daarbij is de veronderstelling dat deze regel altijd conservatiever is dan een expliciete controle op heave, bijvoorbeeld met de fragmentenmethode of eindige elementen grondwaterstromingsprogramma's. Aan de hand van een (beperkt) aantal vergelijkende berekeningen is die veronderstelling getoetst [Calle & Sellmeijer, 1998]. Resultaat van die toetsing is, dat in het merendeel van de beschouwde gevallen de veronderstelling juist is, maar dat er uitzonderingen op de regel zijn. Met name in situaties met meerdere kwelschermen en waarbij het scherm bij het uitstreep punt relatief kort is ten opzichte van de andere schermen, was de heavecontrole met behulp van de fragmentenmethode maatgevend. In de praktijk zullen die situaties niet zo vaak voorkomen, maar ze zijn ook niet uit te sluiten. Bij de keuze van de rekenregel voor een eerste toetsing dient men daarop bedacht te zijn. In paragraaf 5.5 wordt hier nader op ingegaan.

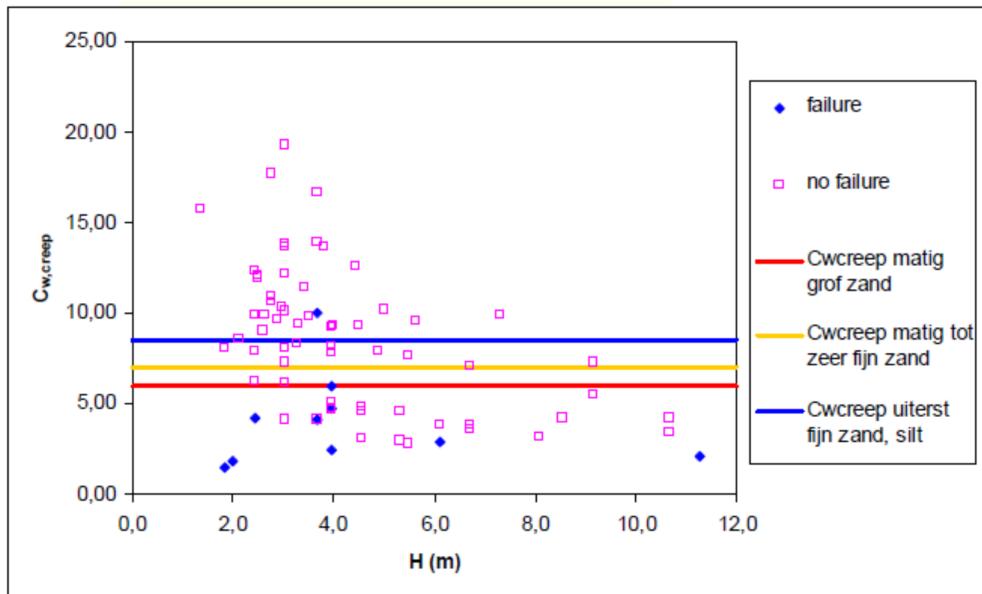
5.3.3 Geldigheidsgebied

Lane merkt zelf op dat zijn methode alleen van toepassing is op metselwerkdammen die op staal staan, of waarbij een goede aansluiting met een verticaal kwelscherm aanwezig is. In de praktijk wordt de methode breder toegepast voor alle voorkomende typen kunstwerken. Hier lijkt geen fundamenteel bezwaar tegen te zijn.

De methode Lane is nadrukkelijk van toepassing op kunstwerken met verticale schermen. Er zijn geen begrenzingen van het toepassingsgebied. In paragraaf 3.2.2 van [SBW-PiKu6 2009] is met betrekking tot de betrouwbaarheid van de regel van Lane voor de beoordeling op piping en heave bij waterkerende kunstwerken in Nederland het volgende gesteld.

De meest in Nederland onder waterkeringen voorkomende zanden variëren wat betreft de mediane korreldiameter (D_{50}) grofweg tussen 150 en 350 µm. Dit correspondeert ongeveer met de klassen "matig fijn zand" tot "matig grof zand" in Tabel 5.1. 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 5.2 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 5.2 Overzicht resultaten Lane voor grondsoorten representatief voor Nederland

In Figuur 5.2 is de gewogen creepfactor uitgezet tegen het verval over de onderzochte dammen. Te zien is dat het verval veelal tussen de 1,5 en 10 meter ligt, met enkele uitschieters naar boven. De verticale kwelweglengte is bij slechts 1 van de onderzochte dammen kleiner dan 5 meter³. Dit betekent dat terughoudend moet worden omgegaan met het toepassen van de formule van Lane bij kwelwegen waarin de verticale component gering is.

Hoe betrouwbaar de regel is voor horizontale kwelwegen langs schermen tegen achterloopsheid is niet recent onderzocht. Hier wordt in paragraaf 6.2.3 nader op ingegaan.

5.4 Beschrijving heave model

5.4.1 Historie en kennisbasis in meer detail

Door Harza [Harza, 1935] is een criterium voor heave opgesteld in termen van de kritieke 'flotation gradiënt'; in latere onderzoeken is voortgeborduurd op dit concept. Dit kritieke verhang is het verhang waarbij (in een homogeen veronderstelde zandlaag) benedenstroms van het kwelscherm de opwaarts gerichte kracht op de korrels door een verticaal gerichte opwaartse stroming groter wordt dan het gewicht van de korrels. Het kritieke verhang wordt als volgt berekend:

$$i_c = \frac{\varphi - h_p}{d} = \frac{(1-n)(\gamma_k - \gamma_w)}{\gamma_w} \quad (5.2)$$

Hierin is:

i_c = kritieke verhang [-]

φ = stijghoogte aan onderzijde kwelscherm [m NAP]

h_p = polderpeil [m NAP]

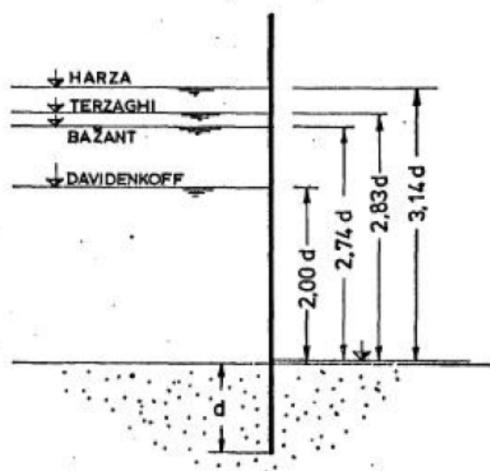
³ Dit is niet te zien in Figuur 5.2 maar blijkt uit de paper van Lane [Lane 1935]

n = poriëngehalte van de zandlaag achter het kwelscherm [-]

γ_k = volumegewicht van de korrel [kN/m^3]

γ_w = volumegewicht van water [kN/m^3]

Vergelijking (5.2) geldt voor verticale stroming waarbij de stroom- en equipotentiaallijnen parallel aan elkaar lopen, waarvan sprake is in bijvoorbeeld een kolomproef. Bij stroming onder een kwelscherm door vindt aan de onderzijde van het kwelscherm 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 kwelscherm. Het ligt dus voor de hand dat hydraulische grondbreuk als eerste plaats zal vinden in een grondprisma dichtbij het scherm. Diverse onderzoekers hebben verschillende hypothesen onderzocht wat betreft de vorm van het kritieke grondprisma, met de onderstaande uitkomsten (zie Figuur 5.3):



Figuur 5.3 Kritieke verval voor hydraulische grondbreuk volgens Davidenkoff (1956), Harza (1935), Terzaghi (1961) en Bazant (1953)

Indien voor ΔH het verschil tussen de stijghoogte aan de onderkant van de wand en de waterstand aan benedenstroomse zijde wordt genomen (zoals in vergelijking 5.2) dan moeten de waarden in Figuur 5.3 gehalveerd worden. Het criterium van Davidenkoff komt dan overeen met het criterium voor de kritieke gradiënt in vergelijking 5.2.

Müller-Kirchenbauer (1964) heeft op schaal proeven uitgevoerd voor een situatie met kwelscherm dat omstroomd wordt. Hij concludeert dat voor een situatie zoals geschetst in Figuur 5.3, 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 geïnterpolerd 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 5.2 kan dan toegepast worden.

In 1995 zijn, gebaseerd op het heave-criterium, door Sellmeijer met behulp van het zogenoemde Fragmentenmodel ontwerpregels afgeleid voor het dimensioneren van kwelschermen. De teksten en figuren in deze paragraaf zijn ontleend aan [DLT-ozw 2012].

5.4.2 Mechanismebeschrijving

Een beschrijving van het mechanisme heave is te vinden in paragraaf 4.7 van [DLT-ozw 2012]. Volledigheidshalve is deze paragraaf hier integraal overgenomen. Toevoegingen zijn *cursief* aangegeven.

Indien aan de binnenzijde van grondconstructies *en kunstwerken* op de watervoerende zandlaag geen of slechts een dunne afdekkende grondlaag aanwezig is, kunnen de verticale korrelspanningen aldaar wegvalLEN onder invloed van kwel. Dit wordt aangeduid met heave, wat overeenkomt met de vorming van drijfzand en met name optreedt bij verticaal uitstredend grondwater.

Bij waterkerende kunstwerken en bij dijken kunnen kwelschermen worden toegepast. Kwelschermen vergroten de weerstand die een kwelstroom ondervindt. Het effect is dat de kwel vermindert en dat, nog belangrijker, de stroomsnelheid en daardoor de kans op erosie van de zandlaag afneemt. Bij kwelschermen aan de benedenstroomse zijde van de waterkering wordt de uitstreding van de kwelstroom verticaal (zie Figuur 5.4). Hierbij doet zich het verschijnsel voor dat door de opwaartse kwelstroom de korrelspanningen in het zand achter het scherm afnemen. In het uiterste geval vallen de korrelspanningen geheel weg, waardoor feitelijk een drijfzandsituatie ontstaat. Dit mechanisme wordt heave genoemd.

Heave kan twee gevolgen hebben [Calle & Sellmeijer, 1998]:

1. Een drijfzandsituatie treedt op, waardoor de op de zandlaag gelegen bescherming kapotgaat. Indien sprake is van een granulair stortbed, kan dit negatieve gevolgen hebben voor de eventuele filterwerkning.
2. Door reductie van de effectieve korrelspanning in het gefluïdiserde zand naar 0 wordt het krachtenevenwicht op het kwelscherm verstoord. Hierdoor kan de aansluiting tussen scherm en constructie verstoord worden, met desastreuze gevolgen, zoals piping (zie volgende punt).

Opgemerkt wordt dat beide effecten ook al kunnen optreden bij een geringere opwaartse kwelstroom dan noodzakelijk voor volledige fluïdisatie. Het ontbreken van een heldere grenstoestand moet bij de toetsing of het ontwerp worden afgedekt door een veiligheidsfactor (zie paragraaf 5.4.3).

Een derde effect is niet beschreven in paragraaf 4.7 van [DLT-ozw 2012] omdat het niet als maatgevend wordt beschouwd. Bij afwezigheid van een bescherming op de zandlaag kan uitspoeling van zanddeeltjes optreden. Hiermee wordt het pipingproces in gang gezet. Bij kunstwerken met een kwelscherm aan de benedenstroomse zijde is overschrijden van het heave-criterium nodig voordat piping kan ontstaan. Hierbij wordt aangetekend dat voor het uitspoelen van zanddeeltjes (lees: begin van piping) een veel groter kritiek verhang nodig is dan voor het ontstaan van een heave-situatie. In paragraaf 5.5 van [DLT-ozw 2012] wordt hier nader op ingegaan en wordt middels een rekenkundig voorbeeld aangegeven dat het benodigde kritieke verhang voor verticale piping een factor 30 groter is dan het kritieke verhang voor heave. Een geschikt rekenmodel ontbreekt echter en daarnaast bevat het voorbeeld een rekenfout, zodat met de theoretische beschouwing uit paragraaf 5.5 van [DLT-ozw 2012] terughoudend moet worden omgegaan. Voor toetsing volstaat de constatering dat het veilig is te veronderstellen dat overschrijding van het heave-criterium zeker niet direct leidt tot piping, waarmee een veilige ondergrens is vastgesteld voor het kritieke verhang voor piping.

Bepalend voor dit mechanisme is de toename van waterspanningen, vanaf het maaiveld, met de diepte in het zand achter het kwelscherf (zie Figuur 5.4). Indien geen kwelstroming aanwezig is, dan 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 met de diepte gelijk is aan de toename van de korrelspanning wanneer de waterspanning hydrostatisch zou zijn. De toename van de wateroverspanning kan worden uitgedrukt in termen van de verticale gradiënt van de grondwaterpotentiaal. De gradiënt waarbij de grenstoestand optreedt wordt kritieke gradiënt genoemd. De feitelijke verticale gradiënt van de grondwaterpotentiaal achter het kwelscherf, dus de toename van de wateroverspanning met de diepte, is in het algemeen niet constant. Daarom wordt bij heave controles gerekend met de over het kwelscherf gemiddelde verticale gradiënt van de grondwaterpotentiaal. Deze wordt getoetst aan de kritieke gradiënt, waarbij een veiligheidsfactor in acht wordt genomen.

Indien er sprake is van geconcentreerde lekkage door het kwelscherf ten gevolge van een gat, zal dit leiden tot een verlaging van het gemiddelde verhang over het gehele kwelscherf. In zoverre werkt geconcentreerde lekkage dus positief op de genoemde gevolgen van heave (punt 1 en 2 op de vorige pagina). Voor een toetsing op heave hoeft dus geen rekening gehouden te worden met mogelijke gaten in het kwelscherf. Er kan echter wel een probleem ontstaan voor piping doordat de stroming door het gat leidt tot grotere stroomsnelheden bij het uittredepunt.

Vanouds zijn kwelschermen bij dijken geweerd, omdat ze gezien werden als ‘vreemde elementen’. Door de Commissie Boertien is echter aanbevolen om kwelschermen als mogelijke optie voor ‘uitgekiend ontwerpen’ niet uit te sluiten. Deze aanbeveling heeft ertoe geleid dat goede en gemakkelijk te gebruiken rekenmodellen voor controle op het mechanisme heave zijn ontwikkeld (zie ook paragraaf 5.4.5).

5.4.3 Heavecriterium

Het criterium waaraan het mechanisme heave getoetst kan worden is te vinden in de paragrafen 5.4 en 7.3.2.2 van [DLT-ozw 2012]. Deze paragrafen zijn in [DLT-ozw 2012] gericht op grondlichamen en overlappen elkaar enigszins. Daarom zijn beide paragrafen onderstaand samengevoegd en enigszins aangepast en toegespitst op kunstwerken.

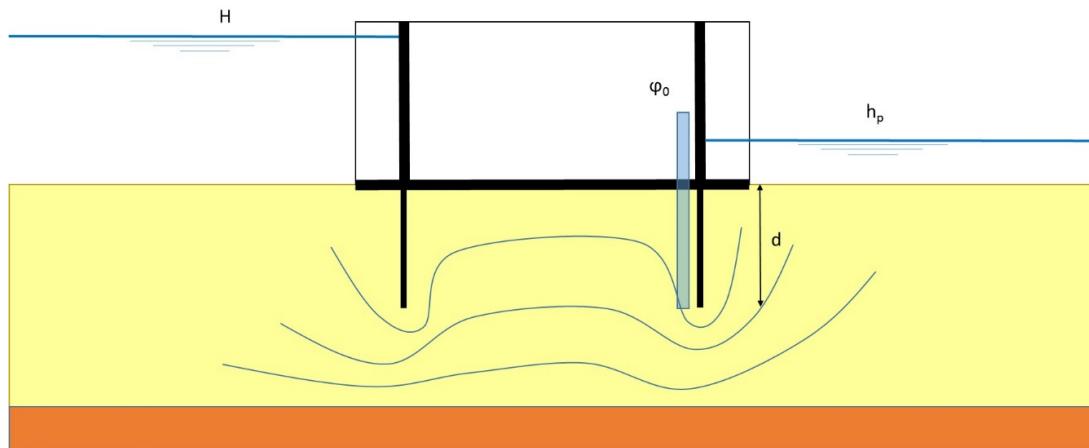
Om voldoende veiligheid tegen heave te waarborgen dient bij een verticale kwelstroming in zandige grond achter een kwelscherf het maximaal optredende verhang kleiner te zijn dan het verhang waarbij heave optreedt. Het verhang waarbij heave optreedt, het kritieke verhang i_c , is (zie Figuur 5.4):

$$i_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{(1-n)(\gamma_k - \gamma_w)}{\gamma_w} \geq \frac{\varphi_o - h_p}{d} \quad (5.3)$$

Hierin is:

- γ' = het ondergedompeld volumegewicht van de grond [kN/m^3]
- γ_w = het volumegewicht van het (grond)water [kN/m^3]
- φ_o = de stijghoogte ter plaatse van de onderkant van het kwelscherf [m t.o.v. referentie] waar het uitreeverhang maximaal is.
- h_p = het polderpeil (vrije waterspiegel of maaiveld) [m t.o.v. referentie]
- n = de porositeit [-] in de zandlaag

γ_k = het volumegewicht van het korrelmateriaal [$= 26 \text{ kN/m}^3$]
 d = diepte van het kwelscherm [m]



Figuur 5.4 Mechanisme Heave bij kunstwerken

Indien de grond laagsgewijs is opgebouwd, kan het ondergedompelde volumegewicht door laagsgewijze sommatie worden berekend:

$$\gamma' = \frac{1}{d} \sum_i d_i \gamma'_i \quad (5.4)$$

Het uittredeverhang i is sterk afhankelijk van het totale verval over het kunstwerk en de geohydrologische configuratie en de plaats en diepte van eventuele kwelschermen.

Het heavecriterium luidt:

$$i_{optr} = \left(\frac{\varphi_o - h_p}{d} \right)_{optr} \leq i_{c,rep} \quad (5.5)$$

waarin i_{optr} het optredend verhang is en $i_{c,rep}$ een veilige toelaatbare waarde is voor het kritieke verhang waarbij heave optreedt.

Het kritieke verhang i_c is afhankelijk van de porositeit (zie formule 5.3). Uitgaande van een volumegewicht van de korrel 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 ($n=0,3$). Als regel [TAW-LOR1, 1987] wordt op grond van praktijkervaringen een veilige toelaatbare waarde aangehouden van $i_{c,rep} = 0,5$. Dat zou betekenen dat dan de veiligheidsfactor γ in de range van 1,66 en 2,32 zal liggen, echter door de in de praktijk aanwezige heterogeniteit van de ondergrond wordt deze theoretische veiligheid (homogene grond) veelal niet behaald.

Bij de controle op heave wordt dus nagegaan of het optredende verhang over het benedenstroomse kwelscherm kleiner is dan het kritieke verticale verhang i_c van 0,5:

$$i_{optr} = \left(\frac{\varphi_o - h_p}{d} \right) \leq 0,5 \quad (5.6)$$

Voor kunstwerken op een zandige ondergrond met kwelschermen wordt aangenomen dat wanneer het (verticale) uittredeverhang i groter is dan 0,5 zandmeevoerende wellen ontstaan en een verdergaande controle op piping is vereist. Afhankelijk van de gegradeerdheid en pakking van de zandlaag nabij het uittreepunt kunnen grotere toelaatbare verhangen dan 0,5 worden toegestaan. Daartoe zijn dichtheidsmetingen van de zandlaag nodig. In [DLT-ozw 2012] wordt hiervoor verwezen naar Bijlage A. Concrete aanwijzingen hieromtrent zijn echter niet opgenomen in deze bijlage. Nader onderzoek op dit punt is nodig indien optimalisatie van het heave-criterium gewenst is.

5.4.4 Rekenmodellen voor de berekening van het optredend verhang

Een beschrijving van de beschikbare rekenmodellen voor de berekening van het optredend verhang ten behoeve van de controle op het mechanisme heave is te vinden in paragraaf 5.4.2 van [DLT-ozw 2012]. Deze paragraaf is hier deels overgenomen.

Het optredend verticale verhang aan de binnenzijde van het kunstwerk is afhankelijk van het totale verval over de kering en het grondwaterstromingspatroon in de zandlaag. Hiermee is het optredend verticale verhang aan de binnenzijde van het kunstwerk afhankelijk van de geohydrologische configuratie van die laag en de plaats en diepte van de kwelschermen. Voor de bepaling van het optredende verhang is een grondwaterstromingsanalyse nodig. In beginsel kan dit met elk daartoe geschikt rekenmodel.

In paragraaf 5.4.2 van [DLT-ozw 2012] worden de volgende modellen onderscheiden:

- Berekening met behulp van een ('multi-purpose') computerprogramma voor numerieke grondwaterstromingsanalyse, gebaseerd op een eindige elementen of eindige differentieel methode (EEM of EDM).
- Berekening met een semi-analytisch rekenmodel (fragmentenmethode). Deze methodiek is in TAW (thans ENW) kader ontwikkeld, specifiek voor heavecontroles bij dijken of waterkerende kunstwerken met verticale kwelschermen.
- Analytische berekening met een vierkantennet.

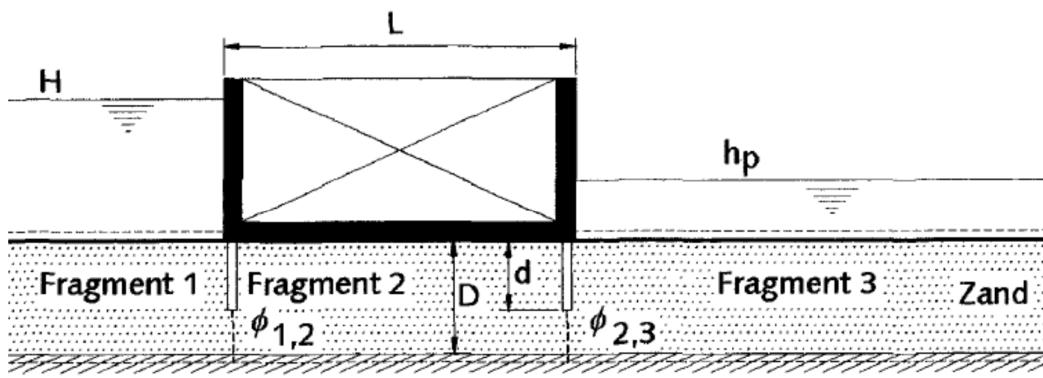
De fragmentenmethode is in de jaren 80 en 90 van de vorige eeuw in opdracht van TAW (thans ENW) als sneller (want analytisch) alternatief voor de numerieke grondwaterstromingsanalyse ontwikkeld en is geschikt voor de berekening van het uittredeverhang bij een kunstwerk met kwelschermen. Het principe van deze methode wordt beschreven in Bijlage A3 van [DLT-ozw 2012]. Berekeningen kunnen worden uitgevoerd met een spreadsheetprogramma dat verkrijgbaar is via de Helpdesk Water. Voor eenvoudige situaties kunnen afleesgrafieken gebruikt worden.

Met de rekensnelheid van de huidige pc's zijn de argumenten om af te zien van numeriek rekenen deels 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 zijn bovendien eenvoudig in gebruik. Toch maakt de eenvoud van de fragmentenmethode en het feit dat dit beschikbaar is in een veelgebruikt programma als Excel dat de fragmentenmethode in de praktijk nog steeds veel gebruikt wordt. Daarom wordt in de volgende paragraaf nader ingegaan op de fragmentenmethode. In paragraaf 5.4.6 worden de uitkomsten van de fragmentenmethode vergeleken met uitkomsten van numerieke berekeningsmodellen en experimenten.

Analytische berekeningen met een vierkantennet vinden in de praktijk niet of nauwelijks meer plaats en worden daarom ook niet verder beschouwd.

5.4.5 Ontwikkeling fragmentenmethode

De fragmentenmethode is in de 80'er en 90'er jaren van de vorige eeuw ontwikkeld. De fragmentenmethode is een rekentechniek gebaseerd op grondwaterstromingsberekeningen die speciaal is bedoeld voor het analyseren van de grondwaterstroming onder dijken of kunstwerken met kwelschermen. Het is een semi-analytische techniek die als voordeel boven een numerieke grondwaterstromingsanalyse heeft dat zeer snel berekeningen kunnen worden uitgevoerd. De fragmentenmethode is uitgebreid beschreven in bijlage A3 van [DLT-ozw 2012]. In Figuur 5.5 is een voorbeeld van een constructie met kwelschermen gegeven en een opdeling in fragmenten.



Figuur 5.5 Schematisch weergegeven kunstwerk met twee kwelschermen in een doorlatende zandlaag

Standaard fragmenten zijn het kop- tussen- en staartfragment. Daarnaast zijn extra fragmenten ontwikkeld: een "zettingsfragment", waarbij een zettingsspleet 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. Voor de adviespraktijk is echter nog niet een toegankelijke implementatie van deze fragmenten beschikbaar. Alleen de invloed van een zettingsspleet kan worden verdisconteerd in de handmatige berekeningen aan de hand van de in bijlage A3.2 van [DLT-ozw 2012] gegeven tabellen. De invloed van de zettingsspleet kan worden meegenomen door de weerstandsfactoren van de fragmenten waar een zettingsspleet aanwezig is, of kan zijn, te reduceren. Als veilige stelregel moeten de weerstandsfactoren van die fragmenten worden gehalveerd. Afhankelijk van de verhouding tussen de dikte van het zandpakket en de lengte van het fragment kan minder gereduceerd worden. In de heavegrafieken in bijlage A3.2 van [DLT-ozw 2012] en in de spreadsheetberekening (zie onder) kan deze invloed niet worden verdisconteerd.

Met de fragmentenmethode wordt het optredend verhang bepaald. Voor het mechanisme heave is het optredende verticale verhang over het kwelscherm in fragment 3 van belang.

$$i_{optr} = \frac{\phi_{2,3} - h_p}{d} \quad (5.7)$$

Berekeningen kunnen worden uitgevoerd met een spreadsheetprogramma. Voor eenvoudige situaties kunnen afleesgrafieken en tabellen gebruikt worden welke zijn opgenomen in bijlage A3 van [DLT-ozw 2012].

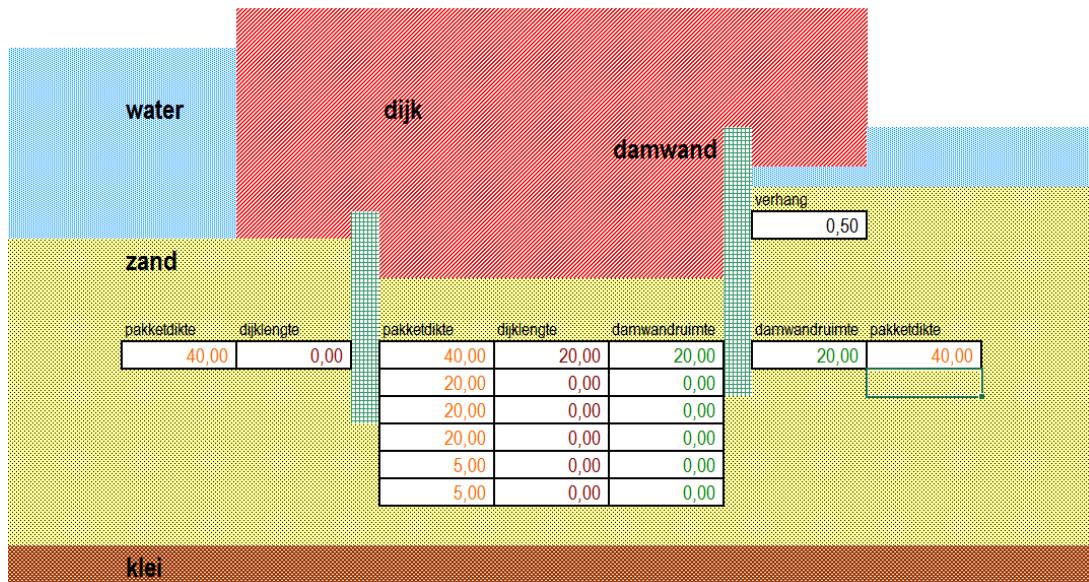
Heave bij kunstwerken

password:

Voer gegevens in in de omliggende hokjes;

Er zijn maximaal 6 middendelen.

verval	vervalratio	debieratio
28,196	0,355	1,000



Figuur 5.6 Spreadsheet fragmentenmethode

Figuur 5.6 geeft het invoerscherm en de uitkomsten. De invoer staat in de rechthoekjes. De uitvoer staat aangegeven als vet gedrukte getallen bovenin. In de excel sheet is een beschrijving van het programma met invoer, uitvoer en beperkingen opgenomen.

In bovenstaand voorbeeld is het volgende te zien:

Invoer

- Als criterium voor een toelaatbaar uitstroomverhang is een over de hoogte van het benedenstroms geplaatste kwelscherf gemiddeld verhang gekozen van 0,5.
- Er zijn twee damwanden.
- De pakketdikte van de doorlatende laag (zand) is 40 meter.
- Het kunstwerk (aangeduid als dijk⁴) is in rood getekend.
- Naast de linkerdamwand is de term 'dijklengthe' nul; dit wil zeggen dat de linkerdamwand aan het linkeruiteinde van het kunstwerk staat.
- De rechterdamwand staat altijd aan het rechteruiteinde van het kunstwerk.

⁴ Dit is enigszins verwarrend; daar waar 'dijk' en 'dijklengthe' staat kan echter gewoon 'kunstwerk' en 'kunstwerklengthe' gelezen worden

- Tussen de linker- en rechterdamwand kunnen maximaal 6 fragmenten worden opgegeven. In dit voorbeeld is 1 fragment met een dijk lengte van 20 meter opgegeven. Als er meer kwelschermen tussen de twee damwanden aanwezig zijn moeten meer fragmenten worden opgegeven. Bijvoorbeeld bij één extra kwelscherm zijn er twee tussenfragmenten.
- De damwandruimte geeft de verticale afstand tussen teen van de damwand en ondoorlatende basis (kleilaag) aan. Voor beide damwanden is in dit voorbeeld 20 meter gekozen.

Uitvoer

- De uitkomst is een toelaatbaar verval van 28,2 m. Dit kan worden vergeleken met het werkelijke verval over het kunstwerk. In dit geval zal het toelaatbare verval ruimschoots groter zijn dan het werkelijke verval, zodat aan de toets op heave wordt voldaan.
- De debietratio is niet nodig om de toets te doen.

Het spreadsheet is buitengewoon handig om snel een toets op piping uit te voeren. Beperkingen zijn er in:

- Geometrie: maximaal 6 fragmenten mogelijk.
- Grondslag: In de fragmentenanalyses wordt in beginsel uitgegaan van isotrope doorlatendheid van de zandlaag. De horizontale en verticale doorlatendheden kunnen echter verschillend zijn, bijvoorbeeld door aanwezigheid van horizontale stoorlaagjes of lensjes. In de meeste gevallen kan dit verdisconteerd worden door de fragmenten (verticaal of horizontaal) te verschalen. Aanbevolen wordt echter om hierbij een deskundige te raadplegen.
- Toepassingsgebied:
 - Voor damwandlengten kleiner dan 0,1 maal de dikte van de zandlaag zijn de berekeningen met de fragmentenmethode onnauwkeurig. Sowieso kan aan de werking van zeer korte kwelschermen (kleiner dan 1 m) getwijfeld worden. Als de schermlengte (bij het uittredepunt) kleiner is dan 1 m, moet daarom worden uitgegaan van afwezigheid van het scherm. Als de schermlengte groter is dan 1 m, maar kleiner dan 0,1D, mag de fragmentenmethode niet worden gebruikt voor controle van de verticale uittredegradiënt. In dat geval dient een numeriek grondwaterstromingsmodel gebruikt te worden voor de berekening van de grondwaterstroming in de watervoerende zandlaag.
 - Invloed van zettingsspleet, gat in kwelscherm en lek door kwelscherm kan niet worden meegenomen in het ter beschikking gestelde spreadsheet.

Voor kunstwerken waarbij de grondwaterstroming sterk 3-dimensionaal is vanwege een ingewikkelde geometrie en/of grondlagenopbouw kunnen beter niet met de fragmentenmethode worden beschouwd; numerieke grondwaterstromingsberekeningen geven hier een betrouwbaarder beeld van het uitreeverhang.

- 5.4.6 Vergelijking fragmentenmethode met Eindige Elementen Methode en experimenten
 In [SBW-PiKu4 2012] is in hoofdstuk 3 een opsomming opgenomen van vier experimentele onderzoeken naar piping bij kunstwerken. De resultaten van de experimenten zijn vergeleken met berekeningsresultaten met MSeep en de fragmentenmethode. De belangrijkste conclusies uit de uitgevoerde vergelijking zijn:

- Bij korte kwelschermen geeft MSeep een groter kritiek verval dan de fragmentenmethode, het verschil kan circa 30-40% bedragen. De oorzaak hiervan is de schematisatie van het potentiaalverloop in de fragmentenmethode. Bij lange damwanden is de schematisatie in de fragmenten methode nauwkeuriger dan MSeep.
- Uit de berekeningen bleek dat wanneer de kritieke heave gradiënt op 1,0 wordt gezet de berekeningen met MSeep en fragmentenmethode in de meeste gevallen (met uitzondering van de simulaties van de metingen van Achmus) nog steeds conservatief zijn ten opzichte van de resultaten uit de experimenten. Nu wordt in ontwerpberkeningen voor onderloopsheid een kritieke heave gradiënt van 0,5 gebruikt.
- De fragmenten methode bleek een snel toepasbare methode om voor het mechanisme onderloopsheid verschillende metingen met elkaar te vergelijken. De verwachting is dat dit ook geldt voor praktijksituaties. Tevens bleek de fragmentenmethode in alle gevallen conservatief ten opzichte van de resultaten uit de experimenten. Wanneer het mechanisme onderloopsheid kritisch blijkt, kan alsnog besloten worden tot een numerieke berekening.

De traditionele methoden Bligh en Lane worden niet ondersteund door de metingen.

- 5.4.7 Globale faalkansschatting op basis van berekend kritiek verval
 Met behulp van de fragmentenmethode of numerieke berekeningsmodellen kan een kritiek verval over het kunstwerk worden uitgerekend waarbij het heavecriterium juist niet wordt overschreden. Dit kritieke verval kan aan de hand van de binnenwaterstand worden teruggerekend naar een kritieke buitenwaterstand voor het mechanisme heave. De kans van voorkomen van deze kritieke buitenwaterstand kan worden afgelezen uit de overschrijdingskanslijn ter plaatse van het kunstwerk, die met Hydra-Ring gegenereerd kan worden. Deze kans van voorkomen kan als eerste globale faalkansschatting worden gezien.

Hierbij worden de onzekerheden aan de sterktekant niet expliciet meegenomen in de beschouwing. De vraag is of dit erg is. Binnen het WTI is de keuze gemaakt piping bij kunstwerken te toetsen op ambitieniveau C, wat inhoudt dat er deterministisch getoetst wordt. Om tot schematisatie van de ondergrond te komen moet de opbouw van de ondergrond doorgaans sterk vereenvoudigd worden. In de praktijk worden hierin veelal conservatieve keuzes gemaakt. De gekozen waarden behorend bij de ondergrondschematisatie kunnen hierdoor doorgaans worden beschouwd als evident veilige waarden cq. ondergrenzen. Bovendien wordt een robuuste veiligheidsfactor van circa 2 op het kritieke verhang toegepast. Dit samen maakt dat de overschrijdingskans van de berekende kritieke buitenwaterstand als een veilige bovengrens kan worden beschouwd van de werkelijke faalkans.

5.5 Vergelijking methode Lane en fragmentenmethode

Als eenvoudige rekenregel voor controle op het heave-mechanisme wordt in de praktijk vanouds de regel van Lane gehanteerd. In een aantal TAW/ENW-Leidraden wordt deze regel aanbevolen als eerste ruwe toets; de achterliggende gedachte daarbij is dat de regel van Lane onder alle omstandigheden voldoende veilig is. Die gedachte is nooit een wetenschappelijke onderbouwing gegeven en voor hele korte schermen en een lange

kwelweglengte is deze gedachte ook niet juist. Een vergelijking tussen heave berekeningen met de fragmentenmethode en het criterium van Lane laat zien dat Lane in vrijwel alle gevallen conservatief is ten opzichte van het heave criterium, behalve in de volgende (zelden voorkomende) situaties:

- Het kwelscherm aan de intrede zijde is langer dan het kwelscherm aan de uitrede zijde, zeker wanneer het watervoerende zandpakket een relatief grote dikte heeft ten opzichte van de lengte van het kunstwerk (in stromingsrichting gezien) [Calle 1998].
- Er is sprake van meerdere zeer korte (ten opzichte van de dikte van het watervoerende zandpakket) kwelschermen en een relatief lang kunstwerk.

Voor deze uitzonderingssituaties zou eerst een toetsing met de heave regel moeten worden uitgevoerd [Calle 1998].

Uit de praktijk komen ook geen directe aanwijzingen waaruit zou blijken dat het criterium van Lane niet conservatiever zou zijn dan de berekeningsmodellen voor heave. Met de fragmentenmethode en numerieke berekeningsmodellen is, in elk geval voor schermen tegen onderloopshheid, wel een wetenschappelijk beter onderbouwd instrument voor heave-controle beschikbaar gekomen dat naar de mening van de samenstellers van [DLT-ozw 2012] de voorkeur geniet.

De inhoud van deze paragraaf is grotendeels ontleend aan paragraaf 5.4.2 van [DLT-ozw 2012]. Elementen uit paragrafen 3.2.3 en 5.3 van [SBW-PiKu6 2009] zijn hieraan toegevoegd.

5.6 Advies voor toetsing kunstwerken met (deels) verticale kwelweg

Indien de kwelweg onder en/of langs het kunstwerk verticale elementen bevat, wordt geadviseerd de toetsing als volgt in te steken:

1. De eerste toets wordt uitgevoerd met Lane, behalve als sprake is van een uitzonderingssituatie zoals genoemd in paragraaf 5.5.
2. Als de toets met Lane niet voldoet en de fragmentenmethode kan worden toegepast dan kan de toets met de fragmentenmethode worden uitgevoerd. Voor de beperkingen van de fragmentenmethode wordt verwezen naar paragraaf 5.4.5.
3. Als de toets met fragmentenmethode niet voldoet kan een numerieke grondwaterstromingssom gemaakt worden. Dit heeft alleen zin als de kwelschermen kort zijn. Het kritieke verval met de numerieke methode kan dan namelijk 30 à 40% hoger zijn dan met de fragmentenmethode.
4. Voor de toets met de fragmentenmethode en numerieke methode is een kritiek verticaal verhang van 0,5 te hanteren.

5.7 Referenties

[Calle 1998]

E.O.F. Calle. Vergelijking Rekenregel van Lane en Heave-analyse o.b.v. Fragmentenmethode.

Memo d.d. 10-12-98 aan RWS DWW (G. Hoffmans)

[Calle & Sellmeijer, 1998]

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

[DLT-ozw 2012]

Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen,
Deltas, kenmerk 1202123-003-GEO-0002, 2012

[Harza, 1935]

Harza, L.F.: Uplift and Seepage under Dams on Sand
Proc. ASCE, paper 1920

[Lane 1935]

Security from Under-seepage Masonry Dams on Earth Foundations.
ASCE, Volume 100, paper 1919
Lane, E.W. (1935)

[SBW-PiKu4 2012]

SBW Piping Kunstwerken 4. Bureaustudie inventarisatie problemen en oplossingen piping bij
historische kunstwerken
Deltas, februari 2012

[SBW-PiKu6 2009]

SBW Piping Kunstwerken 6. Aanbevelingen toetsmethode onder- en achterloopsheid bij
(historische) kunstwerken
Deltas, december 2009

[TAW-LOR1, 1987]

Leidraad voor het ontwerpen van Rivierdijken, deel 1 (Bovenrivieren).
Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 1987

6 Beschrijving mechanisme Z₃₂: Optreden onder- en achterloopsheid, kwelweg zuiver horizontaal

6.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een beschrijving gegeven van de faalmechanismemodellen die horen bij het deelfaalmechanisme Z_{32} : *Optreden onder- en achterloopsheid, kwelweg zuiver horizontaal*. Begonnen wordt met een beschrijving van de vigerende kennisbasis en de van toepassing zijnde modellen (paragraaf 6.2). Tevens wordt in deze paragraaf ingegaan op nieuwe ontwikkelingen aangaande deze faalmechanismemodellen en wordt een keuze gemaakt welk model in het WTI2017 gebruikt wordt. Omdat het WTI2017-model in beperkte mate afwijkt van het huidig vigerende model wordt aangegeven wat daar de consequenties van zijn in termen van verwachte impact op het toetsresultaat.

Paragrafen 6.3 en 6.4 beschrijven vervolgens de faalmechanismemodellen in meer detail. Hierbij wordt dieper ingegaan op de historie en kennisbasis van het faalmechanismemodel, waarna het faalmechanismemodel zelf beschreven wordt.

6.2 Beschrijving vigerende kennisbasis, ontwikkelingen en keuze modellen WTI2017

6.2.1 Vigerende kennisbasis en modellen

De vigerende kennisbasis voor het toetsspoor piping is vastgelegd in het Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen [DLT-ozw 2012]. In [DLT-ozw 2012] worden de modellen van Lane of Sellmeijer⁵ van toepassing verklaard als sprake is van een volledig horizontale kwelweg. Het model van Bligh is in [DLT-ozw 2012] in navolging van de bevindingen bij dijken niet meer van toepassing verklaard en zou dus niet meer gebruikt mogen worden voor situaties met een volledig horizontale kwelweg. Dit is echter volledig gebaseerd op onderzoek dat voor dijken is uitgevoerd. Omdat bij kunstwerken door de aanwezigheid van kwelschermen sprake is van een ander grondwaterstromingsbeeld dan bij dijken is binnen het WTI besloten het model van Bligh te handhaven bij de toetsing van kunstwerken. Dit is mede ingegeven door het ontbreken van geschikte rekenmodellen die het model van Bligh kunnen vervangen.

6.2.2 Ontwikkeling nieuwe kennis

Hierover wordt verwezen naar paragraaf 5.2.2.

6.2.3 Toepasbaarheid modellen

Voor situaties waarbij sprake is van een volledig horizontale kwelweg én de kwelstroom loopt in één richting wordt het model van Sellmeijer gebruikt. Indien sprake is van een volledig horizontale kwelweg en de kwelstroom loopt niet in één richting –bij de aanwezigheid van kwelschermen - dan wordt in eerste instantie het model van Bligh gebruikt. Als met het model van Bligh een score ‘voldoet niet’ wordt berekend dan kan het model van Sellmeijer gebruikt worden om alsnog tot een score ‘voldoet’ te komen. De verwachting is overigens dat dit in de praktijk weinig soelaas zal bieden.

⁵ In paragraaf 5.8 van [DLT-ozw 2012] wordt voor situaties met een volledig horizontale kwelweg alleen de rekenregel van Sellmeijer benoemd als zijnde van toepassing. In paragrafen 5.3.4 en 6.3.5 wordt echter gesteld dat de methode van Lane in alle gevallen mag worden toegepast, met name in gevallen waarin Sellmeijer niet kan worden toegepast.

Toelichting bij toepasbaarheid model van Sellmeijer

Het model van Sellmeijer is onverkort toepasbaar voor de volgende situaties:

- Kwelweg onder (onderloopsheid) het kunstwerk.
- Kwelweg naast (achterloopsheid) het kunstwerk indien er geen achterloopsheidschermen aanwezig zijn.

Indien de kwelweg naast een kunstwerk loopt waarbij achterloopsheidschermen aanwezig zijn, is het model van Sellmeijer niet onverkort toepasbaar. Het model van Sellmeijer is bedoeld voor horizontale grondwaterstroming in één richting. Dit is het geval als de kwelweg onder het kunstwerk door loopt of langs het kunstwerk bij een kunstwerk zonder achterloopsheidschermen. In deze situaties is het model van Sellmeijer dus onverkort van toepassing.

Bij kunstwerken zijn echter bijna altijd achterloopsheidschermen aanwezig naast het kunstwerk. Hierdoor wordt de kwelstroom gedwongen van richting te veranderen, waardoor de kwelweg langer wordt en de weerstand tegen piping toeneemt. Dit effect kan niet worden gekwantificeerd en meegenomen in het model van Sellmeijer. Onder verwaarlozing van de aanwezigheid van achterloopsheidschermen is wel sprake van horizontale grondwaterstroming in één richting. Het model van Sellmeijer kan dan ook toegepast worden om te proberen alsnog tot een score 'voldoet' te komen als met het model van Bligh een score 'voldoet niet' wordt berekend.

Toelichting bij toepasbaarheid model van Bligh

In [DLT-ozw 2012] is geconcludeerd dat het model van Bligh niet onder alle omstandigheden voldoende veiligheid biedt bij dijken. Dit is reden geweest Bligh te schrappen en te vervangen door Sellmeijer of (indien Sellmeijer niet kan worden toegepast) Lane. Dit is echter geheel gebaseerd op onderzoek bij dijken. Indien géén sprake is van horizontale grondwaterstroming in één richting (dus bij kunstwerken met achterloopsheidschermen) kunnen de ervaringen bij dijken niet onverkort worden overgenomen.

Omdat geen specifiek onderzoek naar achterloopsheid bij kunstwerken gedaan is, zou met een schuin oog naar praktijkwaarnemingen kunnen worden gekeken. In Nederland zijn veel kunstwerken gerealiseerd waarbij de lengte van de achterloopsheidschermen is ontworpen met Bligh. Er zijn geen bezwijkgevallen bekend van kunstwerken op achterloopsheid waarbij de kwelschermen zijn ontworpen met Bligh. In de wetenschap dat (met name in regionale kringen maar ook wel in primaire kringen) veel kunstwerken een (bijna) maatgevende belasting hebben ondergaan, kan voorzichtig worden geconcludeerd dat de regel van Bligh voor kunstwerken in ieder geval niet evident onveilig is geweest. Omdat een beter model momenteel niet vorhanden is, is besloten het model van Bligh vooralsnog te handhaven.

6.2.4 Keuze vigerende modellen toetsing

Resumerend is binnen het WTI2017 de volgende keuze gemaakt:

- Voor situaties waarin sprake is van horizontale grondwaterstroming in één richting (dus géén onder- en achterloopsheidschermen) is de situatie bij kunstwerken volledig analoog aan de situatie bij dijken. Daarom mag de methode van Bligh niet worden toegepast voor situaties waarin de kwelweg onder (onderloopsheid) het kunstwerk door gaat of naast (achterloopsheid) het kunstwerk loopt én er geen achterloopsheidschermen aanwezig zijn.

- Gebaseerd op de praktijkervaring lijkt het erop dat de methode van Bligh wel voldoende veiligheid biedt voor de situatie achterloopsheid bij kunstwerken mét een achterloopsheidscherm en daarom in deze situatie wel kan worden toegepast. Dit is mede ingegeven doordat er geen beter model beschikbaar is. Indien de toetsing met het model van Bligh geen score ‘voldoet’ oplevert, kan nog een toetsing met Sellmeijer worden uitgevoerd waarbij geen rekening wordt gehouden met de achterloopsheidschermen.

Voor kunstwerken met achterloopsheidschermen wordt dus afgeweken van [DLT-ozw 2012] en mag het model van Bligh wél worden gebruikt.

6.2.5 Consequenteanalyse

Het gebruik van het model van Sellmeijer bij kunstwerken is nieuw, tot op heden werd hiervoor het model van Bligh gebruikt. Onderstaand worden de consequenties hiervan beschreven. Hierbij wordt onderscheid gemaakt in het gebruik van het model van Sellmeijer en de verwachte uitkomsten van de toetsing.

Gebruik Sellmeijer-model

Het gebruik van het model van Sellmeijer kent een aantal nadelen van praktische aard ten opzichte van het gebruik van het model van Bligh:

- Andere invoerparameters vereist
Het model van Sellmeijer vereist een ander soort invoer dan het model van Bligh. Waar bij Bligh volstaan kon worden met een vrij grove classificatie van het zand in de ondergrond moet bij Sellmeijer veel meer informatie verzameld worden. Hierbij gaat het onder meer om de d_{70} , de dikte en doorlatendheid van het watervoerend pakket. Dit vergt beduidend meer inspanning ten aanzien van de inwinning van gegevens en de schematisering dan bij de methode van Bligh. Daarnaast is het de vraag hoe realistisch deze gegevens zijn, aangezien de grond onder en/of naast een kunstwerk vaak aangevulde grond betreft en dus (meestal sterk) afwijkt van de oorspronkelijke bodemopbouw.
- Ruime ervaring vereist
Voor een correcte schematisatie met het model van Sellmeijer is het essentieel dat de toetser een ruime mate van ervaring heeft met het schematiseren van piping. Doorgaans is deze ervaring opgedaan bij de toetsing van dijken. In de praktijk komt het regelmatig voor dat de toetsing van kunstwerken wordt gedaan door mensen die weinig affiniteit met dijktoetsingen en de bijbehorende ondergrondschematisaties hebben. Er zal dus meer interactie moeten komen tussen ‘dijkentoetsters’ en ‘kunstwerktoetsters’. Hoewel dit geen onoverkomelijk probleem is, is het zeker iets om bewust van te zijn.
- Toetsinspanning is groter
Een ander aspect van het gebruik van de formule van Sellmeijer is dat niet snel op voorhand kan worden gezien of onder- of achterloopsheid ten gevolge van een zuiver horizontale kwelweg in één richting maatgevend is ten opzichte van de overige kwelwegen. Bij de formule van Bligh was dit met een eenvoudige handsom te bepalen op basis van dezelfde invoerparameters als de formule van Lane. Nu dit niet meer zo eenvoudig kan, moeten alle situaties met een zuiver horizontale kwelweg in één richting mee worden genomen in de toetsing. De toetsinspanning neemt hierdoor toe.

Verwachte uitkomsten van de toetsing

Het model van Sellmeijer is niet per definitie strenger dan het model van Bligh. Toch wordt verwacht dat toetsing met de aangepaste regel van Sellmeijer vaker tot een score 'voldoet niet' leidt dan de toetsing met Bligh (die tot op heden is toegepast) zou hebben gedaan. Dit geldt alleen voor kunstwerken zonder kwelschermen. Deze komen in de praktijk gelukkig niet zo vaak voor. Al met al wordt dus iets meer afkeur verwacht ten opzichte van de tot op heden toegepaste toetsmethodiek, die neerkomt op het gebruik van het model van Bligh in alle situaties met een horizontale kwelweg.

6.3 Beschrijving model van Sellmeijer

Voor de beschrijving van het model van Sellmeijer wordt rechtstreeks verwezen naar de relevante paragrafen uit [DLT-ozw 2012]. Omdat de paragrafen over het model van Sellmeijer zijn geschreven met het oog op toetsing en ontwerp van dijklichamen, is waar nodig een beschouwing over de toepassing bij de toetsing van kunstwerken toegevoegd.

6.3.1 Historie en kennisbasis in meer detail

Hiervoor wordt verwezen naar paragrafen 3.1.2 en 3.2 van [DLT-ozw 2012], waarin een uitgebreide beschrijving van uitgevoerd onderzoek is opgenomen.

6.3.2 Het aangepaste rekenmodel van Sellmeijer

Een beschrijving van het aangepaste rekenmodel van Sellmeijer is gegeven in paragraaf 5.3.5 van [DLT-ozw 2012]. De toetsregel is beschreven in paragraaf 7.3 van [DLT-ozw 2012]. Kortweg komt de toetsregel die hoort bij het aangepaste rekenmodel van Sellmeijer neer op de volgende formule:

$$\frac{\Delta H_c}{\gamma_n \cdot \gamma_b} > (\Delta H - 0,3d) \quad (6.1)$$

met:

$$\Delta H_c = L \cdot F_{resistance} \cdot F_{scale} \cdot F_{geometry} \quad (6.2)$$

$$F_{resistance} = \frac{\gamma'_p}{\gamma_w} \{ \eta \tan(\theta) \} \quad (6.3)$$

$$F_{scale} = \frac{d_{70m}}{\sqrt[3]{\kappa L}} \left(\frac{d_{70}}{d_{70m}} \right)^{0,4} \quad (6.4)$$

$$F_{geometry} = F(G) = \text{MSeep}^{\text{standaarddijk}} = 0,91 \left(\frac{D}{L} \right)^{\frac{0,28}{\left(\frac{D}{L} \right)^{2,8}} + 0,04} \quad (6.5)$$

Hierin is:

ΔH_c	= kritieke verval over het kunstwerk [m]
ΔH	= aanwezig verval over de waterkering [m]
d	= karakteristieke waarde van de dikte van de afdekende laag [m]
γ_n	= veiligheidsfactor (van de vereiste betrouwbaarheidsindex afhankelijke partiële weerstandsfactor) [-]
γ_b	= schematiseringsfactor [-] volgens het TR Grondmechanisch Schematiseren bij Dijken [ENW-trgsd 2011]
L	= karakteristieke lengte van de kwelweg (horizontaal gemeten) [m]
$F_{\text{resistance}}, F_{\text{scale}}, F_{\text{geometry}}$	= factoren[-], zie toelichting onder deze opsomming
γ'_p	= (schijnbaar) volumegewicht van de zandkorrels onder water [kN/m ³]
γ_p'	= $\gamma_p - \gamma_w$ met $\gamma_p = 26$ kN/m ³ γ_w volumegewicht van water (9,81) [kN/m ³]
θ	= rolweerstandshoek van de zandkorrels ($\theta=37$) [°]
η	= coëfficiënt van White ($\eta=0,25$) [-]
k	= intrinsieke doorlatendheid van de pipinggevoelige/bovenste zandlaag [m ²]
k	= $v \cdot k/g = 1,35 \cdot 10^{-7} \cdot k$
k	= specifieke doorlatendheid van de pipinggevoelige/bovenste zandlaag [m/s]
v	= kinematische viscositeit van water bij 10°C ($v = 1,33 \cdot 10^{-6}$ [m ² /s])
g	= versnelling van de zwaartekracht ($g = 9,81$) [m/s ²]
d_{70}	= karakteristieke waarde voor de 70-percentielwaarde van de korrelverdeling [m]
d_{70m}	= gemiddelde d_{70} van de in de kleine schaalproeven toegepaste zandsoorten, waarop deze formule is gefit ($2,08 \cdot 10^{-4}$ m)
D	= karakteristieke waarde voor de dikte van het zandpakket [m]

Er kunnen drie factoren worden onderscheiden: een resistance, een scale en een geometry factor. De eerste factor beschrijft het grensevenwicht van zandkorrels op de bodem van de pipe. De tweede term reflecteert de verhouding tussen de processschaal van het mechanisme dat voor korreltransport zorgt en de processschaal van de grondwaterstroming die dit transportmechanisme aandrijft. Voor schaalproeven is dit een belangrijke verhouding. De laatste term beschrijft de invloed van de vorm van de geometrie van de ondergrond op de grondwaterstroming. Deze is afhankelijk van de verhouding tussen dikte en lengte van de aanwezige zandlagen. In geval van een meerlagensysteem is deze factor ook afhankelijk van het doorlatendheidscontrast tussen de zandlagen. De geometry factor is situatieafhankelijk en moet worden bepaald met de pipingmodule uit het grondwaterstromingsmodel MSeep. Aanwijzingen hoe dit te doen zijn echter niet opgenomen in [DLT-ozw 2012]. Voor een standaard dijkconfiguratie met één homogene zandlaag onder het ondoorlatende dijklichaam wordt de factor benaderd door:

$$F(G)_{\text{standaarddijk}} = 0,91 \left(\frac{D}{L} \right)^{\frac{0,28}{(\frac{D}{L})^{2,8} - 1} + 0,04} \quad (6.6)$$

Hierbij dringt de vraag zich op of een kunstwerk ook valt onder de definitie van een standaard dijkconfiguratie. Omdat een kunstwerk per definitie een ondoorlatende onderzijde heeft, kan formule 6.2 ook gebruikt worden voor kunstwerken op een ondergrond die bestaat uit één doorlatende zandlaag.

De partiële weerstandsfactor γ_n (veiligheidsfactor) is afhankelijk van de voor een bepaalde dijkring vereiste betrouwbaarheidsindex. In de veiligheidsfactor zijn de modelonzekerheid, het vereiste veiligheidsniveau, het lengte-effect en de toegestane kansbijdrage door piping aan het falen van de waterkering verwerkt. Voor de bepaling van de veiligheidsfactor, zie hoofdstuk 10.3.5 van [DLT-ozw 2012]. Deze veiligheidsfactoren worden momenteel binnen het dijkenspoor van het WTI2017 gekalibreerd.

Opgemerkt wordt dat deze benadering specifiek voor het dijkenspoor is ontwikkeld. Zo speelt bij kunstwerken het lengte-effect niet. Een separate benadering voor kunstwerken is echter niet beschikbaar. Vooralsnog wordt daarom vastgehouden aan de gepresenteerde methode uit paragraaf 10.3.5 van [DLT-ozw 2012].

6.3.3 Geldigheidsgebied

De aangepaste regel van Sellmeijer is gevalideerd van een d_{70} van 150 µm (kleinste d_{70} toegepast bij kleine schaalproeven) tot een d_{70} van 500 µm en een relatieve dichtheid van >50%.

6.4 Beschrijving model van Bligh

6.4.1 Historie en kennisbasis in meer detail

De vigerende kennisbasis omrent het model van Bligh is vastgelegd in het Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen [TAW-TRZW 1999]. In 1910 is door Bligh een empirische rekenregel opgesteld, op basis van een aantal bezwijkgevallen van op staal gefundeerde, kleine gemetselde dammen op verschillende grondslag in India. Met de rekenregel kan een veilige waarde voor het toelaatbare verval over de constructie berekend worden, als product van de totale horizontale en verticale kwelweglengte (line of creep) onder de constructie en een factor die afhankelijk is van de grondslag.

In het model van Bligh worden verticale en horizontale kwelwegen even zwaar meegewogen, een aanpak die later door Lane sterk bekritiseerd is (zie paragraaf 5.3.1). In de Nederlandse ontwerppraktijk voor zowel dijken als kunstwerken werd de regel van Bligh aanbevolen in situaties waarin uitsluitend horizontale kwelweg aanwezig was, daarmee werd dus impliciet de kritiek van Lane onderschreven.

6.4.2 Beschrijving model van Bligh

Een beschrijving van het model van Lane is te vinden in paragraaf 4.2.2 van [TAW-TRZW 1999].

Door Bligh (1910) is op basis van een inventarisatie van bezwijkgevallen van kleine stuwdammen de volgende empirische rekenregel opgesteld:

$$\Delta H \leq \Delta H_c = \frac{L}{C_{creep}} \quad (6.7)$$

Hierin is:

- ΔH = verval over het kunstwerk [m].
- ΔH_c = kritieke verval over het kunstwerk [m].
- L = de minimaal aanwezige kwelweglengte [m].
- C_{creep} = creep-factor.

De kwelweglengte L is in de oorspronkelijke formule van Bligh gelijk aan de totale lengte van de horizontale en verticale delen van de kwelweg, de 'line of creep'. Bij de toetsing van kunstwerken wordt de methode Bligh alleen gebruikt als de kwelweg zuiver horizontaal loopt, dus verticale delen van de kwelweg komen niet voor. Het in rekening brengen van de horizontale kwelweglengte is alleen toegestaan wanneer een goede aansluiting tussen de onderkant van de constructie en de ondergrond gewaarborgd is.

Indien een opbarstkanaal aanwezig is waardoor zand naar buiten moet worden afgevoerd, zal het gefluïdiceerde zand in het kanaal voor extra weerstand zorgen. Op basis van proeven door Sellmeijer (1981) is in [TAW-TRZW 1999] de volgende correctie op de regel van Bligh voorgesteld, indien een opbarstkanaal aanwezig is:

$$(\Delta H - 0,3d) \leq \Delta H_c = \frac{L}{C_{creep}} \quad (6.8)$$

waarin d de lengte van het opbarstkanaal is.

De factor C_{creep} is een materiaalconstante van de ondergrond en wordt de creep-factor genoemd. In Tabel 6.1 zijn de door Bligh aangegeven waarden voor verschillende typen materiaal in de grondlaag weergegeven.

Bij toepassen van de regel van Bligh dient geen veiligheidsfactor in rekening te worden gebracht; de benodigde veiligheid is al verdisconteerd in de rekenregel zelf.

Grondsoort	Mediane korreldiameter [μm] ¹	C_{creep} (Bligh) met $\gamma = 1,0$
Uiterst fijn zand, silt	< 105	
Zeer fijn zand	105 – 150	18
Zeer fijn zand (mica)		18
Matig fijn zand (kwarts)	150 – 210	15
Matig grof zand	210 – 300	
Zeer/uiterst grof zand	300 – 2000	12
Fijn grind	2000 – 5600	9
Matig grof grind	5600 – 16000	
Zeer grof grind	> 16000	4

¹ Indicaties conform NEN 5104 (September 1989)

Tabel 6.1 Creep-factoren voor de regels van Bligh

6.4.3 Geldigheidsgebied

De methode Bligh is van toepassing op kunstwerken waarbij sprake is van een zuiver horizontale kwelweg. Er zijn geen begrenzingen van het toepassingsgebied.

In paragraaf 5.3.3 wordt een beschouwing gegeven van het toepassingsgebied van de formule van Lane. In tegenstelling tot de studie van Lane is bij Bligh geheel onduidelijk hoeveel dammen per grondsoort geanalyseerd zijn en in hoeveel gevallen sprake was van bezwijken. Een analyse zoals in paragraaf 5.3.3 voor Lane is gegeven, is dan ook niet te maken.

6.5 Referenties

[DLT-ozw 2012]

Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen,
Deltas, kenmerk 1202123-003-GEO-0002, 2012.

[TAW-TRZW 1999]

Technisch rapport Zandmeevoerende wellen,
Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, maart 1999;

7 Schematiseringshandleiding

7.1 Invulling van de schematiseringshandleiding

De schematiseringshandleiding is opgenomen in een apart document:

Schematiseringshandleiding faalmechanisme onder- en achterloopsheid [DLT-shoa 2015].

7.2 Referenties

[DLT-shoa 2015]

WTI 2017 Cluster Toetsregels Kunstwerken - Schematiseringshandleiding faalmechanisme onder- of achterloopsheid, Deltares rapport 1220087-003-GEO-0003, 24 november 2015, definitief (of latere versies).

8 Toets op Maat

8.1 Inleiding

Voor de Toets op maat is alleen het proces voorgeschreven. Het proces bestaat uit 3 stappen:

- Stap 1: Inventariseren mogelijkheden nadere analyses.
- Stap 2: Beoordelen effectiviteit analyses (kosten-baten analyse).
- Stap 3: Uitvoeren nadere (locatie specifieke) analyse.

In dit hoofdstuk wordt een beschrijving gegeven van de mogelijkheden die een toets op maat biedt voor het toetsspoor *piping* bij kunstwerken. In paragraaf 8.2 wordt ingegaan op de redenen om een toets op maat uit te voeren. Indien hiertoe besloten wordt, dan worden in paragraaf 8.3 aanwijzingen gegeven hoe deze toets op maat uitgevoerd kan worden.

8.2 Aanleiding voor de Toets op maat

Er zijn twee situaties waarin kan worden besloten een toets op maat uit te voeren:

- Indien op grond van de gedetailleerde toetsing geen eindscore kan worden toegekend omdat er te veel onzekerheden in de schematisatie zijn.
- Indien de gedetailleerde toets een score ‘voldoet niet’ oplevert, maar ingeschat wordt dat met een geavanceerde beoordeling een score ‘voldoet’ mogelijk is.

Afhankelijk van de situatie is het mogelijk met behulp van een toets op maat tot een score ‘voldoet’ te komen. Echter, er zijn ook situaties waarin een toets op maat niet zinnig is omdat de kans klein is dat een toets op maat tot een score ‘voldoet’ leidt of omdat de kosten van een toets op maat groter zijn dan de kosten van het treffen van een verbetermaatregel. Voordat een toets op maat wordt uitgevoerd moet daarom eerst worden beoordeeld of het zinnig is een toets op maat uit te voeren.

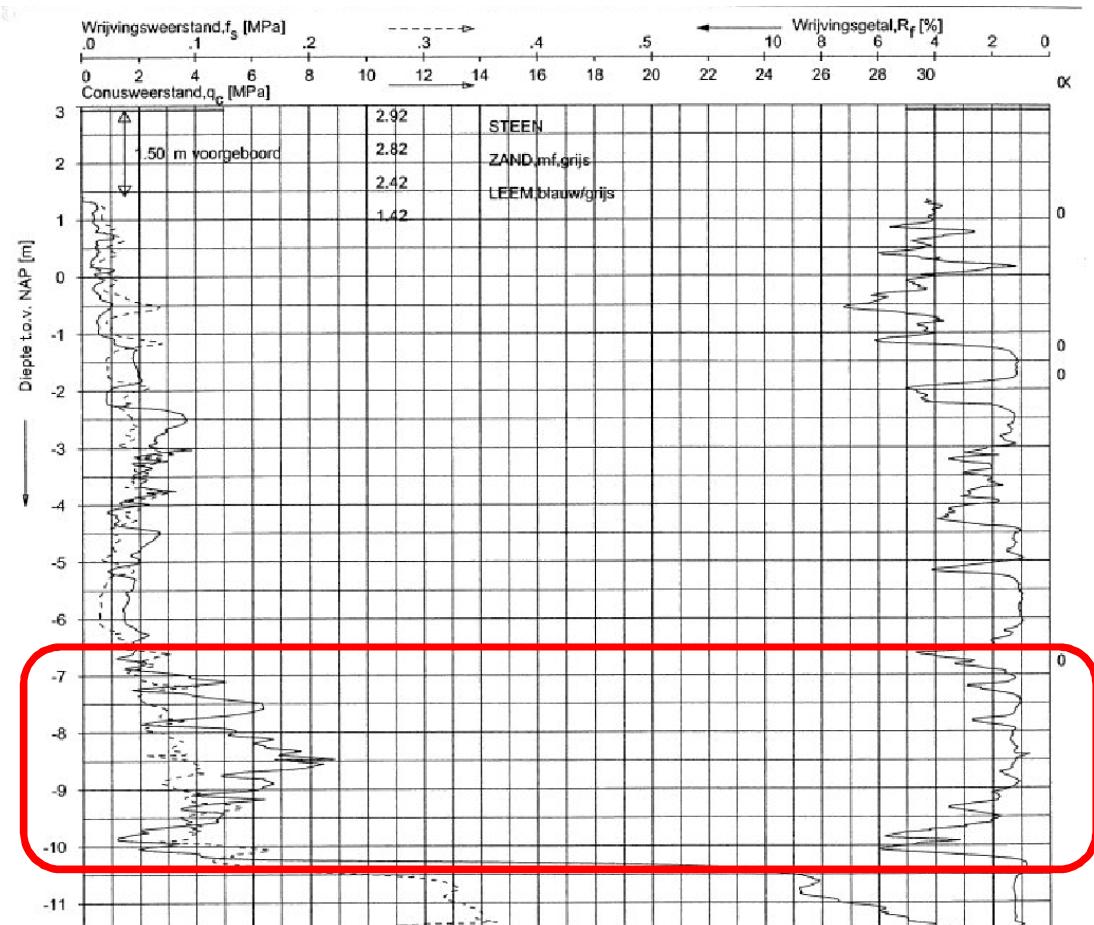
8.2.1 Onzekerheden in schematisatie

Onzekerheden in bodemopbouw en aanwezigheid/werking van kwelschermen kunnen reden zijn om een toets op maat uit te voeren.

Onzekerheid in bodemopbouw

Het kan voorkomen dat de onzekerheid omtrent de bodemopbouw onder en naast het kunstwerk dermate groot is dat geen goede schematisatie is op te stellen. Indien een conservatieve schematisatie dan de score ‘voldoet niet’ oplevert kan het goedkoper zijn geen nader grondonderzoek uit te laten voeren, maar een toets op maat uit te voeren. Met name het inwinnen van gegevens omtrent de bodemopbouw direct onder het kunstwerk is kostbaar omdat hiervoor door de vloer van het kunstwerk geboord moet worden.

Daarnaast kan het zijn dat nader grondonderzoek niet zinvol is om uit te laten voeren omdat de geconstateerde bodemopbouw zich lastig laat interpreteren. Dit is bijvoorbeeld het geval indien een laag bestaat uit een samenspel van dunne zand- en kleilaagjes en twijfel bestaat of deze laag nu pipinggevoelig is of niet. In Figuur 8.1 is hiervan een voorbeeld gegeven.



Figuur 8.1 Voorbeeld van min of meer onzekere bodemopbouw

In Figuur 8.1 is in het rode kader een voorbeeld gegeven van een zandige laag met diverse stoorlaagjes. Hoewel verwacht mag worden dat de weerstand tegen piping in deze laag groter is dan in een laag die alleen uit zand bestaat, kan in het model van Lane/Bligh deze laag niet anders dan als zand geschematiseerd worden. Nader grondonderzoek is in dit geval niet zinvol omdat de bodemopbouw wel bekend is maar lastig te schematiseren is.

Onzekerheid omtrent aanwezigheid of werking van kwelschermen

Met name bij historische kunstwerken is de aanwezigheid, locatie en lengte van kwelschermen vaak niet of onvoldoende bekend. Zelfs als de locatie en lengte van de kwelschermen wel bekend zijn dan is vaak niet bekend in welke staat de kwelschermen zijn en of ze nog functioneel zijn (aansluiting met kunstwerk niet is gegarandeerd). Het is vaak lastig hiervoor een adequate inschatting te maken, met name bij kunstwerken die zelden of nooit een verval keren.

8.2.2 Inschatting omtrent bijstellen toetsoordeel ‘voldoet niet’

Voordat wordt overgegaan tot een toets op maat moet een inschatting worden gemaakt van de kans dat deze toets op maat leidt tot een bijstelling van het toetsoordeel van ‘voldoet niet’ naar ‘voldoet’. Indien wordt ingeschat dat een toets op maat kansrijk is, kan deze worden uitgevoerd. Dit zal met name het geval zijn als:

- Het geconstateerde veiligheidstekort klein is.
- Als gevolg van het gebruikte model de nodige vereenvoudigingen in de schematisatie zijn gemaakt om tot een toetsoordeel te komen.
- Gebruik is gemaakt van een empirisch, niet op fysica gestoeld model (gebruik van model van Bligh bij achterloopsheid) en het geconstateerde veiligheidstekort beperkt is.
- De kennisonzekerheid dermate groot is dat het toetsoordeel uit de gedetailleerde toets onvoldoende basis biedt voor een betrouwbare uitspraak omtrent het veiligheidsoordeel.

8.3 Invulling van de Toets op maat

Er zijn een viertal mogelijkheden voor een toets op maat:

- Analyse peilbuismetingen.
- Geavanceerde grondwaterstromingsmodellen uit voeren, o.a. door tijdsafhankelijkheid in te bouwen.
- Analyse ‘bewezen sterke’.
- Probabilistische piping- of heave- analyse.

Op deze aspecten wordt in onderstaande paragrafen nader ingegaan. Onderstaande teksten zijn deels ontleend aan paragraaf 7.5.3 van [DLT-ozw 2012].

8.3.1 Analyse peilbuismetingen

Juist bij kunstwerken, waar sprake kan zijn van grote onzekerheden in de schematisatie, wordt het uitvoeren van peilbuizenonderzoek sterk aanbevolen. Hiermee kan de respons van de stijghoogte in de watervoerende zandlagen op de buitenwaterstand goed in beeld gebracht worden. Hiervoor zijn verschillende methoden beschikbaar (bijvoorbeeld [TAW-WD, 2004], [Scheldestromen, 2013], [SBW-Pi6C, 2013]). Binnen het WTI2017 wordt geen methode voorgeschreven; het is aan de toetser om de geschiktheid van de gebruikte methode aan te tonen.

Aanbevolen wordt op 3 plaatsen langs het kunstwerk te meten: aan de buitenzijde, kruin en binnenzijde van het kunstwerk. Indien het vermoeden bestaat dat de grondaanvulling of aansluiting aan beide zijden verschillend is en de maatgevende situatie kan niet op voorhand duidelijk worden dan wordt aanbevolen aan beide zijden van het kunstwerk peilbuizen te plaatsen. Bij veruit het grootste deel van de kunstwerken is sprake van verticale uitstroming. Uit de peilbuismetingen kan dan de stijghoogte ter plaatse van (en hiermee het verhang over) het benedenstroomse kwelscherf onder maatgevende omstandigheden worden afgeleid. Dit verhang kan eenvoudig worden vergeleken met het heave-criterium van 0,5.

Indien sprake is van horizontale uitstroming dan ontbreekt een dergelijk uitstroomcriterium. Aanbevolen wordt in dat geval de hulp van experts in te schakelen.

8.3.2 Geavanceerde grondwaterstromingsmodellen

In sommige gevallen is het zinvol om voor de analyse van piping en heave gebruik te maken van geavanceerde grondwaterstromingsmodellen. Hierbij kan worden gedacht aan:

- Niet-stationaire grondwaterstromingsmodellen voor situaties waarbij de duur van hoogwater relatief kort is, zoals bijvoorbeeld in een getijdegebied.
- Driedimensionale of quasi-driedimensionale grondwaterstromingsmodellen voor situaties waarbij de geometrie of laagopbouw niet uniform is in de richting van de waterkering of loodrecht op de waterkering.

Deze modellen kunnen worden gebruikt om een betere inschatting te kunnen maken van de stijghoogte onder maatgevende omstandigheden of om het uitredeverhang te kunnen bepalen. Opgemerkt wordt dat bij een zeer gelaagde bodemopbouw of slechts beperkte gegevens van de bodem deze geavanceerde modellen niet worden aanbevolen.

Voor een beschrijving van de verschillende methodes wordt verwezen naar de vigerende achtergronddocumenten en technische rapporten. In de vigerende technische rapporten zijn geen algemene criteria opgenomen met betrekking tot het kritieke uitredeverhang voor horizontale uitreding. Voor de beoordeling van het berekende uitredeverhang is daarom specialistische kennis omtrent het faalmechanisme piping vereist.

8.3.3 Analyse bewezen sterkte

Er zijn kunstwerken waarbij het maatgevende verval bij toetspeil + toeslagen al eens in het verleden is opgetreden of zelfs is overschreden. Dit kan onder hoogwateromstandigheden zijn geweest (bijvoorbeeld bij kunstwerken langs de oude Zuiderzee) of tijdens onderhouds- of inspectiewerkzaamheden. In dit geval kan een toetsing op basis van 'bewezen sterkte' zinvol zijn. Voor deze aanpak is het van belang dat omstandigheden in het verleden vergelijkbaar zijn met de huidige maatgevende omstandigheden. In het Technische Rapport Actuele Sterkte van Dijken [ENW, 2007] staat een uitgewerkte methode voor het spoor Macrostabilité binnenaarts voor grondlichamen. Met behulp van specialistische kennis is het soms mogelijk om deze methode toe te passen voor piping bij kunstwerken.

8.3.4 Probabilistische piping of heave analyse

Voor het uitvoeren van een probabilistische analyse worden in de vigerende leidraden en technische rapporten geen aanwijzingen gegeven. Met PC-Ring en Ringtoets / Hydra-Ring zijn echter wel hulpmiddelen beschikbaar gekomen om een probabilistische toetsing uit te voeren.

Indien het toetsoordeel gebaseerd is op het model van Bligh of Lane dan kan PC-Ring gebruikt worden om een probabilistische beoordeling uit te voeren. In het programma PC-Ring is het model van Lane namelijk opgenomen. Hierbij moet bedacht worden dat de hydraulische randvoorwaarden in PC-Ring gebaseerd zijn op de TMR2006. Deze kunnen afwijken van de hydraulische randvoorwaarden die zijn opgenomen in Ringtoets / Hydra-Ring. De faalkans kan als volgt ingeschat worden:

- Genereer de overschrijdingsfrequentielijn uit Ringtoets / Hydra-Ring ter plaatse van het beschouwde kunstwerk.
- Genereer de overschrijdingsfrequentielijn uit PC-Ring ter plaatse van het beschouwde kunstwerk.
- Bepaal het verschil tussen beide overschrijdingsfrequentielijnen.

- Corrigeer de waterstand in PC-Ring met dit verschil en voer de probabilistische berekening binnen PC-Ring uit.

Indien het toetsoordeel is gebaseerd op het model van Sellmeijer of het heave-model dan kan gebruik worden gemaakt van Ringtoets / Hydra-Ring. In Ringtoets / Hydra-Ring zijn beide modellen namelijk probabilistisch opgenomen in het dijkenspoor. Er moet dan een dijkensom handmatig worden aangepast en worden omgeschreven naar een kunstwerkensom. Bij gebruik van het model van Sellmeijer kan eenvoudigweg de invoer uit het kunstwerkenspoor worden overgenomen.

Bij het model van heave is het iets ingewikkelder. Hier moet het verhang over het benedenstroomse kwelscherm worden omgeschreven naar een verhang over de deklaag. Dit kan als volgt gebeuren:

- Neem de dikte van de deklaag gelijk aan de lengte van het benedenstroomse kwelscherm.
- Bepaal middels de fragmentenmethode het verval over het benedenstroomse kwelscherm. Dit kan door gebruik te maken van het spreadsheet. Hierin wordt het verhang berekend over het benedenstroomse kwelscherm. Dit kan aan de hand van de lengte van het benedenstroomse kwelscherm worden teruggerekend naar het verval over het benedenstroomse scherm.
- De ‘dempingsfactor’ die in Ringtoets / Hydra-Ring moet worden ingevuld kan nu bepaald worden door het berekende verval over het benedenstroomse kwelscherm te delen door het verval over het kunstwerk dat hoort bij de maatgevende buitenwaterstand.

De berekende faalkans kan worden vergeleken met de (nader te bepalen) faalkanseis voor piping voor het betreffende kunstwerk. Hieruit volgt het toetsoordeel ‘voldoet’ of ‘voldoet niet’.

8.4 Referenties

[DLT-ozw 2012]

Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen,
Deltarès, kenmerk 1202123-003-GEO-0002, 2012

[ENW, 2007]

Technisch Rapport Actuele sterkte van dijken - Gedetailleerde en geavanceerde methoden voor de beoordeling van de macrostabiliteit binnenaarts
Datum 27 maart 2009

[SBW-Pi6C, 2013]

SBW Piping 6C, ‘Invloed van demping van de belasting bij piping’,
Deltarès, rap.no. 1206013-002-GEO-0001, Delft, 2013

[Scheldestromen, 2013]

Waterschap Scheldestromen, ‘Rapportage Verlengde 3^e Toetsing, onderdeel dijken’,
Middelburg, 2013, rap.no. 2013007747

[TAW-WD, 2004]

Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken
Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 2004

A Begrippenlijst

Verwezen wordt naar de Begrippenlijst in ‘Voorschrift Toetsen op Veiligheid, Technisch Deel VTV-Technisch Deel (WTI 2017)’. Deltares rapport 1220078-000-GEO-0009, 15 december 2015, definitief (of latere versies).

B Parameterlijsten

Verwezen wordt naar de Symbolen lijst in ‘Voorschrift Toetsen op Veiligheid, Technisch Deel VTV-Technisch Deel (WTI 2017)’. Deltares rapport 1220078-000-GEO-0009, 15 december 2015, definitief (of latere versies).

Verwezen wordt naar de parameterlijsten zoals opgenomen gaan worden in komende versie(s) van de ‘Handleiding datamanagement voor het uitvoeren van een toets met het WTI2017’. De huidige meest recente versie betreft Deltares rapport 1209432-002-GEO-0002, Versie 2, 19 augustus 2014, definitief.