

WTI 2017 Kunstwerken

Toetsspoorrapport Hoogte



WTI 2017 Kunstwerken

Toetsspoorrapport Hoogte

1220087-001

Titel
WTI 2017 Kunstwerken

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
RWS	1220087-001	1220087-001-GEO-0010- jvm	54

Trefwoorden

WTI2017, Kunstwerken, hoogte, toetsspoorrapport, toetsschema's, factsheet, fenomenologische en faalmechanisme beschrijvingen, schematisatie, toets op maat, komberging

WTI2017, Hydraulic structures, Height, Review schedules, factsheet, phenomenon descriptions and description of failure mechanisms, schematisation, review level 3, storage capacity

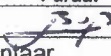


Samenvatting

Dit toetsspoorrapport is opgesteld in het kader van WTI 2017 en bevat de diverse bouwstenen die zijn opgeleverd voor het toetsspoor Hoogte. In hoofdstuk 2 zijn de toetsschema's opgenomen voor de toets (bouwsteen Toetsschema). Hoofdstuk 3 bevat het factsheet voor de gedetailleerde toets. De vigerende kennisbasis is vastgelegd in de bouwsteen Faalmechanismebeschrijving voor de mechanismen bezwijken bodembescherming, bezwijken kunstwerk als gevolg van erosie bodem, en onvoldoende bergend vermogen. De faalmechanismebeschrijving is te vinden in hoofdstuk 4 tot en met 7 van dit rapport. Dit rapport bevat de fenomenologische beschrijving (hoofdstuk 4) alsmede de beschrijving van de achterliggende deelfaalmechanismen Z_{11} , Z_{12} en Z_{13} (hoofdstuk 5-7). De bouwsteen Schematiseringshandleiding maakt geen onderdeel uit van dit toetsspoorrapport maar is opgeleverd als separaat rapport. Er wordt naar verwezen in hoofdstuk 8. De bouwsteen geavanceerde analyses bevat aanwijzingen voor het uitvoeren van de toets op maat en is uitgewerkt in hoofdstuk 9. In bijlage C is de beschrijving van de komberging opgenomen.

Summary

This report is focusing on one specific failure mechanism of water retaining hydraulic structures, being Height (with mechanisms failure of water bottom protection layers, failure of structure caused by erosion of the water bottom, and insufficient storage capacity). 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
D1>D2	dec. 2015	ir. B. van Bree		ir. D. Pereboom		ir. L. Voogt	
ook Verwerking extern commentaar							

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 hoogte	6
2.1	Algemene toetsschema	6
2.2	Toetsschema eenvoudige toets	7
2.3	Gedetailleerde toets	8
3	Factsheet gedetailleerde toets	9
3.1	Inleiding	9
3.2	Faalboom	9
3.3	Bepaling overslag- / overloopdebiet per strekkende meter kruinbreedte	10
3.3.1	Golfcondities	11
3.3.2	Bepaling overslag-/overloopdebiet	11
3.4	Deelfaalmechanisme Z_{11} : Bezwijken bodembescherming	13
3.4.1	Z-functie	13
3.4.2	Sterktemodel	13
3.4.3	Belastingmodel	14
3.5	Deelfaalmechanisme Z_{12} : Bezwijken kunstwerk als gevolg van erosie bodem	14
3.5.1	Z-functie	14
3.5.2	Model	14
3.6	Deelfaalmechanisme Z_{13} : Onvoldoende bergend vermogen	14
3.6.1	Z-functie	15
3.6.2	Sterktemodel	15
3.6.3	Belastingmodel	15
3.7	Referenties	15
4	Beschrijving faalmechanisme overslag en overloop	16
4.1	Inleiding	16
4.2	Fenomenologische beschrijving	16
4.2.1	Beschrijving op hoofdlijnen	16
4.2.2	Gedetailleerde beschrijving van het faalproces	16
4.2.3	Te toetsen deelfaalmechanismen	18
4.2.4	Reststerkte	18
4.3	Schematisch overzicht van het faalproces	21
4.4	Beknopte beschrijving van de te toetsen deelfaalmechanismen	21
4.5	Historie van het faalmechanisme	22
4.6	Vigerende veiligheidsfilosofie en huidig toetsinstrumentarium (VTV2006)	23
4.6.1	Vigerende veiligheidsfilosofie	23
4.6.2	Wettelijk toetsinstrumentarium tot op heden	24

4.7	WTI2017	25
4.7.1	Wijzigingen in het WTI2017	25
4.7.2	Omgang met 2a-1 semi-probabilistisch versus 2a-2 probabilistisch	25
4.8	Referenties	26
5	Beschrijving deelfaalmecanisme Z₁₁: Bezijken bodembescherming	27
5.1	Inleiding	27
5.2	Definitie	27
5.3	Historie en kennisbasis belastingmodellen	28
5.3.1	Historie en recente kennisontwikkeling	28
5.3.2	Vastlegging vigerende kennisbasis en keuze WTI	28
5.4	Historie en kennisbasis sterktemodellen	32
5.4.1	Historie en recente kennisontwikkeling	32
5.4.2	Kennisbasis sterkte bodembescherming	33
5.4.3	Keuze model WTI2017	35
5.5	Referenties	36
6	Beschrijving deelfaalmecanisme Z₁₂: Kans bezijken kunstwerk als gevolg van erosie bodem	38
6.1	Inleiding	38
6.2	Historie en kennisbasis	38
6.3	Beschrijving van het model	38
6.4	Nieuwe kennis	39
6.5	Keuze model WTI2017	40
6.6	Referenties	40
7	Beschrijving deelfaalmecanisme Z₁₃: Onvoldoende bergend vermogen	41
7.1	Inleiding	41
7.2	Definitie en historie	41
7.2.1	Definitie	41
7.2.2	Historie	41
7.3	Kennisbasis instromend volume (belasting)	42
7.3.1	Modellen instromend debiet	42
7.3.2	Bepaling instromend volume	42
7.3.3	Geavanceerde modellen ter bepaling instromend volume	44
7.4	Kennisbasis kombergend vermogen (sterkte)	44
7.4.1	Basisformulering	44
7.4.2	Het kombergend oppervlakte	45
7.4.3	Toelaatbare peilverhoging	46
7.4.4	Kombergend vermogen per kunstwerk	47
7.5	Nieuwe kennis	48
7.6	Keuze model WTI2017	49
7.7	Referenties	49
8	Schematiseringshandleiding	50
8.1	Invulling van de schematiseringshandleiding	50
8.2	Referenties	50
9	Toets op Maat	51
9.1	Inleiding	51
9.2	Aanleiding voor de Toets op maat	51

9.3	Invulling van de Toets op maat	51
9.3.1	Nadere bepaling optredend overslag-/overloopdebiet	52
9.3.2	Nadere inschatting van het kritieke debiet	52
9.3.3	Nadere bepaling kombergend vermogen	52
9.3.4	Kwantificering van de aanwezige reststerkte	53
9.4	Referenties	53
Bijlage(n)		
A	Begrippenlijst	A-1
B	Parameterlijsten	B-1
C	Definitie falen komberging	C-1

1 Inleiding

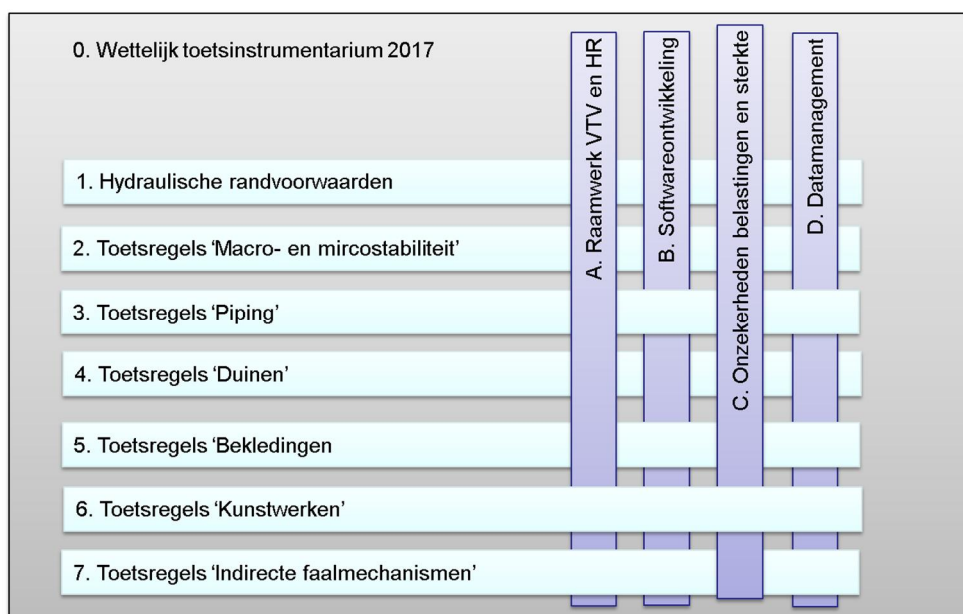
1.1 Algemeen

Voor de ontwikkeling van het Wettelijk Toetsinstrumentarium 2017 (WTI 2017) worden binnen het Cluster Toetsregels Kunstwerken (CTK) achtergrondrapporten voor de diverse toetssporen opgesteld. Dit toetsspoorrapport betreft het toetsspoor *hoogte* (faalmechanisme *overslag en overloop*). 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 toetsspoorrapport gegeven.

1.2 Achtergrond Wettelijk Toetsinstrumentarium 2017 (WTI 2017)

Voor het periodiek toetsen van dijkkring(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 beleidsmatige en inhoudelijke argumenten ten grondslag. Door RWS-WVL is, als gedelegeerd opdrachtgever namens het Ministerie van Infrastructuur en Milieu, aan Deltares 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.

1.3 Modulair Instrumentarium en documentatiestructuur

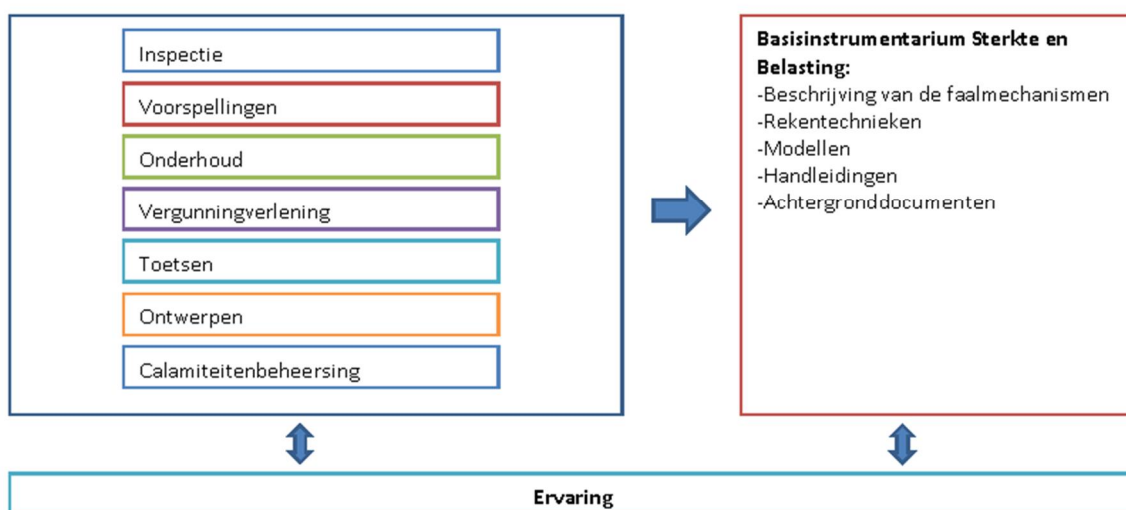
In deze paragraaf wordt aangegeven welke plaats Cluster Toetsregels Kunstwerken heeft in het modulaire instrumentarium en hoe haar uitwerking past in de documentatiestructuur. Voor een volledig overzicht van het modulaire instrumentarium wordt verwezen naar het document Uitgangspunten WTI 2017 [DLT-uitgangspunt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

1.3.1 Modulair instrumentarium en bouwstenen

Het modulaire 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 sterkte en belasting gebruikt wordt. Cluster Toetsregels Kunstwerken richt zich op de sterkte 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 WT12017

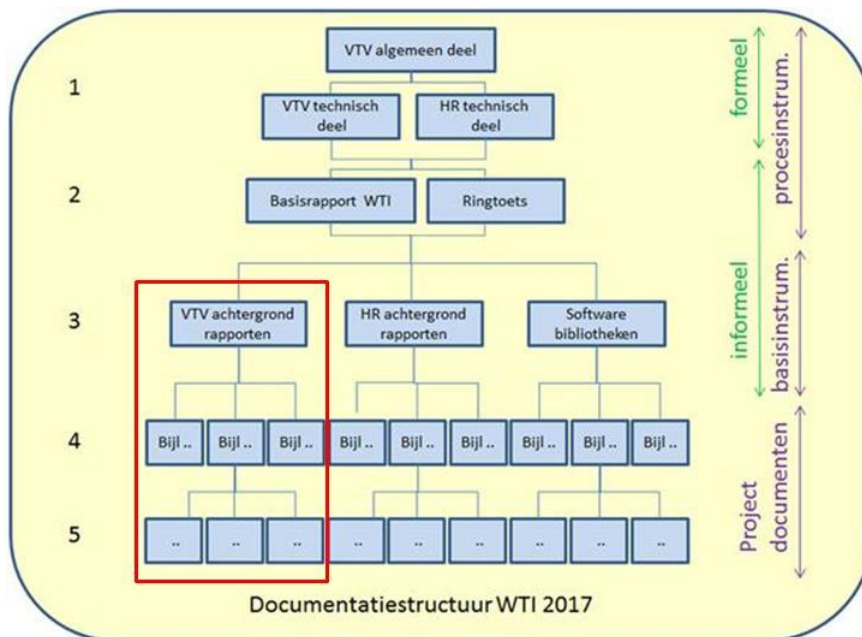
In Figuur 1.3 is een schematische weergave gegeven van de documentatiestructuur binnen WT12017. Cluster Toetsregels Kunstwerken bestaat uit:

- 1) Bouwstenen die zijn samengevoegd tot VTV-achtergrondrapporten, zoals voorliggend toetsspoorrapport, welke vallen in laag 3.
- 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.

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.



Figuur 1.3 Documentatiestructuur en locatie documentatie WTI CTK

De verschillende toetsporen 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
Pl _{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 toetsspoorrapport betreft het toetsspoor *hoogte* (faalmechanisme *overslag en/of overloop*) 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	-
4	Beschrijving faalmechanisme overslag en overloop	Modelbeschrijving(en)
5 - 7	Beschrijving Deelfaalmechanismen	Faalmechanismebeschrijving
8	Schematiseringshandleiding	Schematiseringshandleiding
9	Handreiking toets op maat	Handreiking toets op maat

Tabel 1.2 Leeswijzer Toetsspoorrapport hoogte

1.6 Referenties

[DLT-uitgangspunt 2012]

Uitgangspunten voor het WTI 2017, Deltares rapport 1206004-002-GEO-0001, Versie 2, 1 oktober 2012, definitief

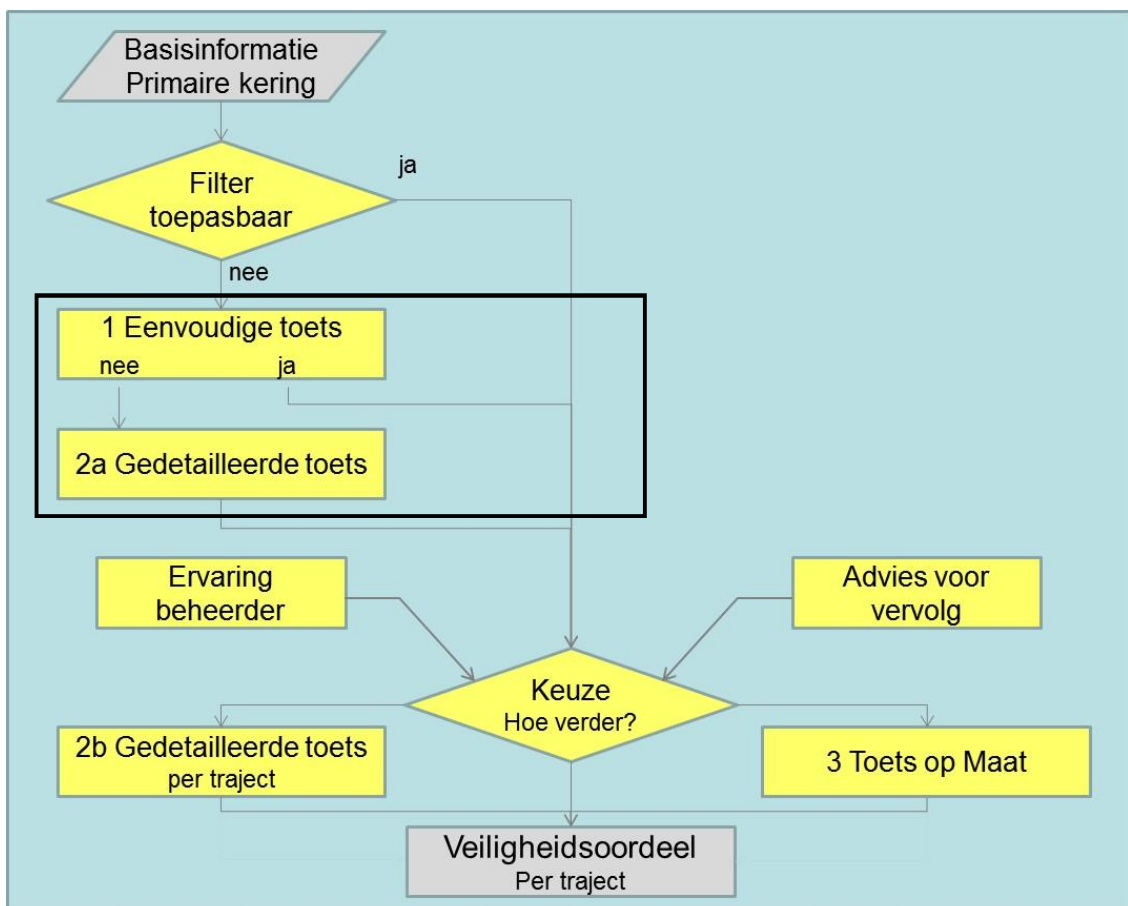
2 Toetsschema hoogte

In dit hoofdstuk wordt het toetsschema met betrekking tot *hoogte* 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) een paragraaf met het betreffende schema.

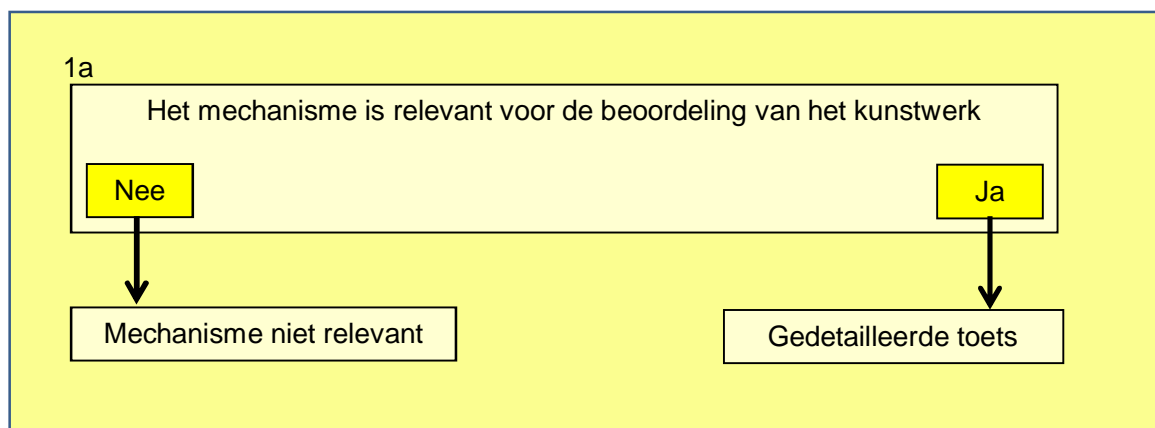
2.1 Algemene toetsschema

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



Figuur 2.1 Algemeen toetsschema WTI2017

2.2 Toetsschema eenvoudige toets



Figuur 2.2 Toetsschema eenvoudige toets hoogte bij kunstwerken

Het toetsschema voor de eenvoudige toets (toetslaag 1) van hoogte bij kunstwerken in het WTI 2017 (zie Figuur 2.2) is sterk vereenvoudigd ten opzichte van het WTI 2011. De eenvoudige toets bestaat uit de vraag of het faalmechanisme relevant is. Dit is het geval als de kerende hoogte wordt verzorgd door het kunstwerk zelf. Indien de kerende hoogte wordt verzorgd door het dijklichaam dan is het toetsspoor *hoogte* niet relevant voor het kunstwerk. De beoordeling van de hoogte van het dijklichaam wordt dan uitgevoerd binnen het dijkenstroom. Voorbeelden van kunstwerken die zelfstandig de kerende hoogte verzorgen zijn schutsluizen, keersluizen en coupures. Bij leidingen en duikers die door een dijklichaam heen voeren wordt de kerende hoogte bepaald door het dijklichaam ter plaatse van het kunstwerk.

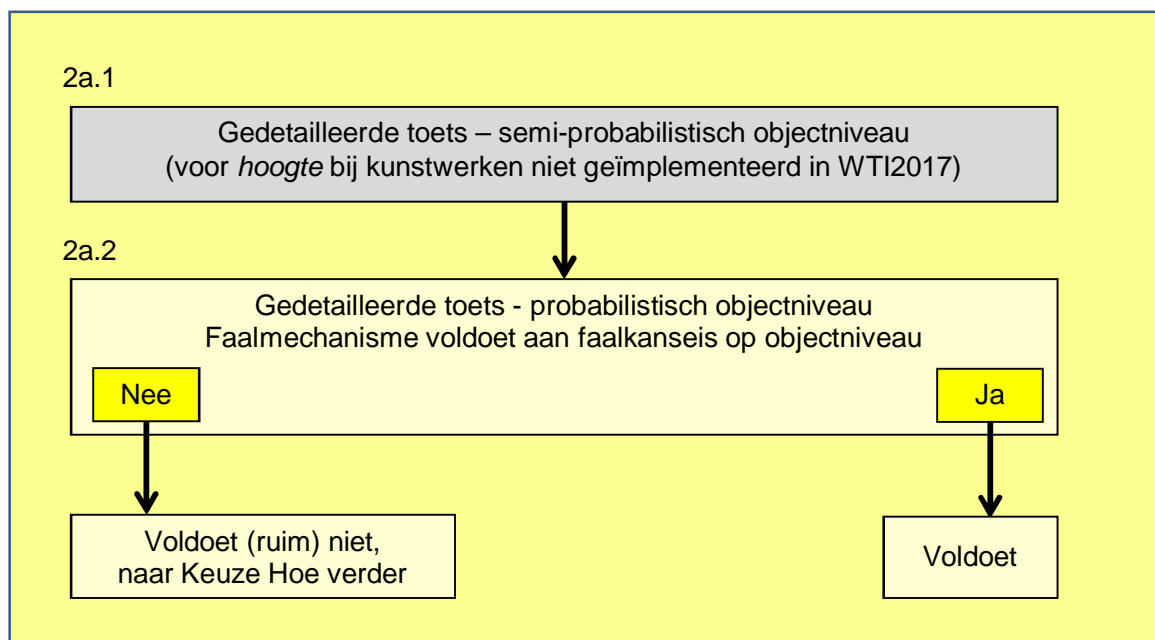
Indien het faalmechanisme wel relevant is, dan wordt in alle gevallen een gedetailleerde beoordeling uitgevoerd¹. In het WTI2017 is het wenselijk om voor alle kunstwerken een faalkans uit te rekenen. Dit komt doordat toetssystematiek, hydraulische randvoorwaarden en normering ingrijpend gewijzigd zijn, zodat niet op een eerder toets- of ontwerpresultaat teruggegrepen kan worden. Ook om de volgende redenen is het wenselijk om voor alle kunstwerken een faalkans uit te rekenen:

- De uitkomst van dit toetsspoor draait mee in de beoordeling op niveau 2b van het toetsspoor *hoogte* in het dijkenstroom, waardoor een beoordeling op gedetailleerd niveau noodzakelijk is.
- Bij het ontwerp van kunstwerken is de faalkanseis voor het faalmechanisme *golfoverslag en overloop* 1 à 2 ordes minder streng dan de faalkanseis voor de overige faalmechanismen. Dat betekent dat bij veel kunstwerken de faalkans van het kunstwerk als geheel wordt gedomineerd door de faalkans van het faalmechanisme *golfoverslag en overloop* die in dit toetsspoor wordt bepaald.
- Tot slot wordt opgemerkt dat de gedetailleerde toets voor het toetsspoor *hoogte* bij kunstwerken een relatief beperkte inspanning vergt.

¹ Als voor hoogte de uitkomst van de eenvoudige toets 'faalmechanisme wel relevant' is, is er direct een gedetailleerde toets nodig. Er is dus geen verschil tussen de benodigde inspanning voor een eenvoudige en een gedetailleerde toets. Om die reden is er voor hoogte ook geen factsheet 'eenvoudige toets'. In hoofdstuk 3 wordt het Factsheet gedetailleerde toets behandeld.

2.3 Gedetailleerde toets

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



Figuur 2.3 Toetsschema gedetailleerde toets hoogte bij kunstwerken

Voor het toetsspoor *hoogte* bij kunstwerken wordt in het WTI2017 geen invulling gegeven aan stap 2a.1 (gedetailleerde toets – semi probabilistisch). De benodigde gegevens voor een semi-probabilistische toets zijn namelijk gelijk aan de gegevens benodigd voor een probabilistische toets.

Voor de gedetailleerde toets van hoogte kunstwerk in het WTI 2017 wordt een probabilistische toets met een faalkanseis op objectniveau uitgevoerd met behulp van de door het WTI programma beschikbaar gestelde software (het programma Ringtoets). Als hieruit blijkt dat de kans op falen van de kering door overslag of overloop kleiner is dan de beschikbare faalkansruimte, dan is het oordeel 'Voldoet' voor het toetsspoor hoogte. Is de berekende faalkans groter dan de beschikbare faalkansruimte, dan moet verder worden gegaan met de Toets op maat.

3 Factsheet gedetailleerde toets

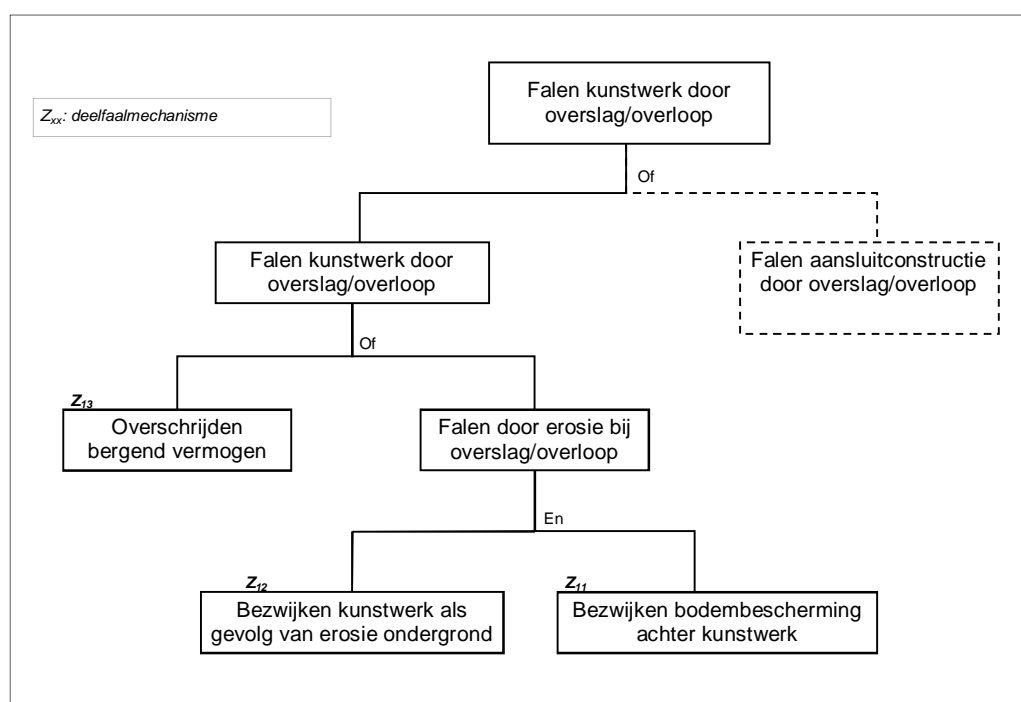
3.1 Inleiding

Dit hoofdstuk dient als overzicht voor de totale kennisbasis van het toetsspoor *hoogte* 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), de faalmechanismebeschrijving (bouwsteen B-FMB) en de schematiseringshandleiding (bouwsteen B-SH).

3.2 Faalboom

In onderstaande figuur is de modellering van het toetsspoor *hoogte* in de vorm van de faalboom weergegeven.



Figuur 3.1 Faalboom toetsspoor *hoogte* voor waterkerende kunstwerken

De faalboom geeft aan hoe uit de kansen op de onderscheiden gebeurtenissen kan worden gekomen tot de kans op de topgebeurtenis: de kans op falen van het waterkerend kunstwerk door overslag en/of overloop.

Falen als gevolg van tekort aan *hoogte* vindt plaats indien er door golfoverslag en/of overloop zoveel water over het hoogwaterkerend gesloten kunstwerk of aansluitconstructie gaat, dat

het faalcriterium (optreden significante gevolgen²) wordt overschreden. Dit kan enerzijds optreden bij een standzeker kunstwerk, waar door overschrijding van het bergend vermogen aan de binnenzijde van het kunstwerk significante gevolgen ontstaan³. Anderzijds kan het kunstwerk zelf bezwijken als gevolg van bezwijken van de bodembescherming aan de binnenzijde van het kunstwerk, waarna erosie van de ondergrond optreedt. Hierdoor bezwijkt het kunstwerk als geheel, waardoor een bres in de waterkering ontstaat, zie hiervoor de Leidraad kunstwerken [TAW, 2003].

Een tekort aan kerende hoogte bij een aansluitingsconstructie⁴ is niet in de modellen van dit faalmechanisme opgenomen. Wel is hiervoor een handreiking opgesteld die gebruikt kan worden voor aansluitconstructies [Deltares, 2015]. Dit toetsspoor behandelt alleen de kerende hoogte van het kunstwerk zelf.

De volgende deelfaalmechanismen zijn aanwezig:

- Z₁₁ Bezwijken van de bodembescherming achter het kunstwerk als gevolg van het overslaande of overlopende water, wat uiteindelijk leidt tot het ontstaan van erosiekuilen.
- Z₁₂ Kans dat het kunstwerk als geheel bezwijkt (onderuit gaat) door erosie van de ondergrond nadat bezwijken van de bodembescherming heeft plaatsgevonden. Heeft betrekking op het eroderen van de onbeschermd bodem, het ontstaan van ontgrondingskuilen en hiermee op de reststerkte van het kunstwerk na bezwijken bodembescherming.
- Z₁₃ Falen van het kunstwerk als gevolg van onvoldoende waterbergend vermogen in het achterland doordat er te veel water overslaat/overloopt gedurende een hoogwatergolf.

3.3 Bepaling overslag- / overloopdebiet per strekkende meter kruinbreedte

Bij de deelfaalmechanismen Z₁₁ en Z₁₃ speelt het debiet dat door golfoverslag en/of overloop over de kruin van het kunstwerk slaat een belangrijke rol. In deze paragraaf wordt ingegaan op de wijze van bepaling van dit overslag-/overloopdebiet. Hierbij wordt eerst ingegaan op de bepaling van de significante golfhoogte, waarna vervolgens de modellen worden gegeven waarmee het overslag-/overloopdebiet worden bepaald.

² Wat significante gevolgen zijn verschilt per kunstwerk. Bij een coupure in stedelijk gebied treden sneller significante gevolgen op als bij eenzelfde coupure in landelijk gebied. In de schematiseringshandleiding wordt hier nader op ingegaan

³ In schematiseringshandleiding aandacht aan besteden dat dit in principe alleen geldt voor situaties dat na overschrijding van het bergend vermogen het kunstwerk bezwijkt door een ontoelaatbaar groot verval waarna bodembescherming bezwijkt etc. Komberging zoals bedoeld in LK2003 buiten beschouwing laten, betreft wateroverlast. Dat dit als ontwerpcriterium wordt meegenomen is goed en logisch, de LK2003 is immers een ontwerpleidraad. Zin in voorgaande voetnoot 'Bij een coupure...gebied.' kan dan vervallen. Het lijkt goed een eenduidige definitie van significante gevolgen op te stellen, die binnen het hele WTI gehanteerd wordt. Voorstel is alleen toetsen op volledig bezwijken van kunstwerken, dus op een bres in de waterkering. Dat sluit ook aan op het dijkenpoor. Het voorkomen van wateroverlast hoort niet in een toets op de hoogwaterkerende veiligheid thuis maar is een keuze van de beheerder (onder welke condities sta ik een bepaalde mate van wateroverlast toe).

⁴ Binnen het WTI2017 is een aansluitingsconstructie gedefinieerd als een constructie met als primair doel om de aansluiting tussen twee verschillende typen waterkeringen (dijk, duin, kunstwerk en hoge gronden) te kunnen realiseren binnen de gestelde randvoorwaarden (bijvoorbeeld stabiel maken).

3.3.1 Golfcondities

De hoek van golfinval β is als volgt gedefinieerd:

$$\begin{aligned} |\theta - \Psi_{KW}| \leq 180 &\Rightarrow \beta = |\theta - \Psi_{KW}| \\ |\theta - \Psi_{KW}| > 180 &\Rightarrow \beta = \left| (|\theta - \Psi_{KW}|) - 360 \right| \end{aligned} \quad 3-1$$

De waarde van de golfhoogte H_s die in de modellen voor de bepaling van het overslag-/overloopdebiet wordt gehanteerd is – voor zeer scheef invallende golven – een gereduceerde waarde van de golfhoogte $H_{s,HR}$ die vanuit de hydraulische randvoorwaarden als input wordt gegenereerd:

$$H_s = \gamma_s \cdot H_{s,HR} \quad 3-2$$

De invloedsfactor γ_s is geïntroduceerd om een geleidelijke overgang van aanlandige naar aflandige golfrichtingen mogelijk te maken om convergentieproblemen rondom deze overgang te voorkomen:

$$\begin{aligned} 0 < \beta \leq 80 &\Rightarrow \gamma_s = 1.0 \\ 80 < \beta \leq 110 &\Rightarrow \gamma_s = (110 - \beta)/30 \\ 110 < \beta \leq 180 &\Rightarrow \gamma_s = 0.0 \end{aligned} \quad 3-3$$

Of kortweg:

$$\gamma_s = \max\{0.0; \min\{1.0; (110 - \beta)/30\}\} \quad 3-4$$

	Eenheid	Betreft	Geldigheidsgebied	Type	Parameters Verdeling		Ruimtelijke spreiding		Variatie in de tijd	
					μ	V/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
ψ_{kw}	[°N]	Oriëntatie normaal van kunstwerk	$0^\circ < \psi_{kw} \leq 360^\circ$	det	invoer	-	-	-	-	-
θ	[°N]	Golfrichting	$0^\circ < \theta \leq 360^\circ$		Wordt gegenereerd door Hydra-Ring					
$H_{s,HR}$	[m]	Significante golfhoogte zoals gegenereerd door Hydra-Ring		-	Wordt gegenereerd door Hydra-Ring					
φ	[°]	Hoek windrichting		-	Wordt gegenereerd door Hydra-Ring					
β	[°]	Hoek van golfaanval	$0^\circ < \beta \leq 180^\circ$		Is resultaat van formule					
γ_s	[-]	Rekenkundige invloedsfactor overgang aan- en aflandige golven	$0 < \gamma_s < 1$		Is resultaat van formule					
H_s	[m]	Significante golfhoogte		-	Is resultaat van formule					

3.3.2 Bepaling overslag-/overloopdebiet

Voor het berekenen van het overslaande / overlopende debiet over het kunstwerk zijn drie modellen beschikbaar, alle afkomstig uit Leidraad kunstwerken [TAW, 2003]:

- Alleen overslag [1].
- Zowel overslag als overloop [2].
- Alleen overloop (bij geen of aflandige golven) [3]

Met het overslag-/overloopdebiet wordt bedoeld het debiet dat over de harde constructie van het kunstwerk stroomt (bijvoorbeeld sluisdeuren). Alle overloopformules ([3.9] en [3.11]) zijn gebaseerd op een situatie met een volkomen overlaat.

Alleen overslag [1]

Invallende golven, waterstand lager dan of gelijk aan niveau keermiddel (geen overloop):

$$\begin{aligned} h &\leq h_{kr} \\ H_s &> 0 \end{aligned} \quad 3-5$$

Golfoverslagdebiet q_{os} :

$$q_{os} = m_{os} \cdot \sqrt{g \cdot (H_s)^3} \cdot e^{\left(-3.0 \cdot \frac{h_{kr} - h}{H_s} \cdot \frac{1}{\gamma_\beta \cdot \gamma_n}\right)} \quad 3-6$$

Het effect van de hoek van golfval wordt verdisconteerd middels de reductiefactor γ_β :

$$\begin{aligned} 0 \leq \beta \leq 20 &\Rightarrow \gamma_\beta = 1.0 \\ 20 < \beta \leq 180 &\Rightarrow \gamma_\beta = \max\{\cos(\beta - 20); 0.7\} \end{aligned} \quad 3-7$$

Zowel overslag als overloop [2]

Invallende golven, waterstand hoger dan niveau keermiddel:

$$\begin{aligned} h &> h_{kr} \\ H_s &> 0 \end{aligned} \quad 3-8$$

Gecombineerd overslag- en overloopdebiet q_{os+ol} :

$$q_{os+ol} = m_{ol} \cdot 0.55 \cdot \sqrt{-g \cdot (h_{kr} - h)^3} + m_{os} \cdot \sqrt{g \cdot (H_s)^3} \quad 3-9$$

Alleen overloop

Geen golven, waterstand hoger dan niveau keermiddel:

$$\begin{aligned} h &> h_{kr} \\ H_s &= 0 \end{aligned} \quad 3-10$$

Met $H_s = 0$ reduceert formule 2.9 naar de formule voor de situatie met alleen overloop:

$$q_{ol} = m_{ol} \cdot 0.55 \cdot \sqrt{-g \cdot (h_{kr} - h)^3} \quad 3-11$$

Bovenstaande kan worden samengevat in de volgende formule:

$$q_{os/ol} = ALS(h \leq h_{kr}; q_{os}; ALS(H_s = 0; q_{ol}; q_{os+ol})) \quad 3-12$$

	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_{os}	[-]	Modelfactor voor overslagdebiet	-	logn	0,09	$\sigma=0,06$	KW	0	-	1
g	[m/s ²]	Gravitatieversnelling	-	det	9,81	-	-	-	-	-
h_{kr}	[mNAP]	Hoogte keermiddelen	-	nor	invoer	$\sigma=0,05m$	KW	0	-	1
γ_n	[-]	Invloedsfactor neusconstructie	$0 \leq \gamma_n \leq 1$	det	1,00	-	-	-	-	-
m_{ol}	[-]	Modelfactor overloopdebiet volkomen overlaat	$1 \leq m_{ol} \leq 1,3$	nor	1,1	$\sigma=0,03$	KW	0	-	1
H_s	[m]	Significante golfhoogte	-	Wordt gegenereerd door Hydra-Ring						
h	[mNAP]	Locale buitenwaterstand	-	Wordt gegenereerd door Hydra-Ring						
γ_β	[-]	Invloedsfactor scheve golfaanval	$0,7 < \gamma_\beta < 1$	Is resultaat van formule						
β	[°]	Hoek van golfaanval	$0^\circ < \beta \leq 180^\circ$	Is resultaat van formule						

3.4 Deelfaalmechanisme Z_{11} : Bezijken bodembescherming

Dit deelmechanisme beschrijft de kans op het bezijken van de bodembescherming achter het kunstwerk als gevolg van het overslaande of overlopende water, wat uiteindelijk leidt tot het ontstaan van erosiekuilen.

3.4.1 Z-functie

$$Z_{11} = Q_c - Q_{os/ol} \quad 3-13$$

Hierin is:

Q_c	[m ³ /s]	Kritiek debiet waarbij de bodembescherming bezwijkt.
$Q_{os/ol}$	[m ³ /s]	Optredend overslag-/overloopdebiet over het kunstwerk bij een bepaalde waterstand.

3.4.2 Sterktemodel

De sterkte van de bodembescherming wordt in rekening gebracht via het model directe invoer, waarbij de sterkte van de bodembescherming buiten Hydra-Ring om door de gebruiker wordt bepaald.

$$Q_c = q_c \cdot B_{sv} \quad 3-14$$

	Eenheid	Betreft	Geldigheidsgebied	Type	Parameters Verdeling		Ruimtelijke spreiding		Variatie in de tijd	
					μ	V_r/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
q_c	[m ³ /s/m]	Kritieke overslag-/overloopdebiet	$0,1 \leq q_c \leq 10$	logn	invoer	$V_r=0,15$	KW	0	-	1
B_{sv}	[m]	Stroomvoerende breedte bodembescherming	$B_{sv} \geq 0$	nor	invoer	$\sigma=0,05$	KW	0	-	1

3.4.3 Belastingmodel

$$Q_{os/ol} = q_{os/ol} \cdot B$$

3-15

	Eenheid	Betreft	Geldigheidsgebied	type	Parameters Verdeling		Ruimtelijke spreiding		Variatie in de tijd	
					μ	V_r/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
B	[m]	Breedte van de kruin van het kunstwerk	$B > 0$	nor	invoer	$\sigma=0.05$	KW	0	-	1
$q_{os/ol}$	[m ³ /s/m]	Gemiddeld Overslag-/overloopdebiet	-	Is resultaat van formule						

3.5 Deelfaalmecanisme Z_{12} : Bezijken kunstwerk als gevolg van erosie bodem

Dit deelfaalmecanisme beschrijft de kans op falen (bezijken) van het kunstwerk gegeven het feit dat er erosie van de ondergrond optreedt na bezijken van de bodembescherming. Dit kan leiden tot ontgrondingskuilen en daarmee instabiliteit van het kunstwerk initiëren.

3.5.1 Z-functie

$$Z_{12} = \beta_{kw|erosiebodem} - u$$

3-16

Hierin is:

- $\beta_{kw|erosie}$ [-] Betrouwbaarheidsindex corresponderend met de faalkans van het kunstwerk gegeven het bezweken zijn van de bodembescherming met het optreden van erosie van de bodem als gevolg
- u [-] Standaard normaal verdeelde variabele, betreft hulpmiddel voor de probabilistische som

3.5.2 Model

$$\beta_{kw|erosiebodem} = -\Phi^{-1}(P_{f,kw|erosiebodem}) \quad \Phi^{-1}: \text{inverse van de normale verdeling}$$

3-17

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
$P_{f,kw erosiebodem}$	[-]	Faalkans kunstwerk gegeven bezijken bodembescherming en optreden van erosie bodem	$0 \leq P_{f,kw erosiebodem} \leq 1$	det	Invoer	-	-	-	-	-
u	[-]	Hulpparameter probabilistische som		nor	0	$\sigma=1,0$	-	-	-	-

3.6 Deelfaalmecanisme Z_{13} : Onvoldoende bergend vermogen

Dit deelfaalmecanisme beschrijft de kans dat het aanwezige bergend vermogen niet toereikend is om het totale volume dat tijdens een hoogwatergolf over het kunstwerk stroomt te bergen in het achterliggende systeem, zonder dat dit tot significante gevolgen leidt.

3.6.1 Z-functie

$$Z_{13} = V_c - V_{os/ol}$$

3-18

Hierin is:

V_c [m³] Maximaal aanwezige volume aan kombergend vermogen in het achterland, waarbij geen significante gevolgen optreden. Dit is de sterkte van het achterland

$V_{os/ol}$ [m³] Inkomend volume als gevolg van overslag/overloop over het gesloten kunstwerk gedurende een hoogwaterperiode. Dit is de belasting van het achterland

3.6.2 Sterktemodel

$$V_c = m_{kom} \cdot A_{kom} \cdot \Delta h_{kom}$$

3-19

	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_{kom}	[-]	Modelfactor kombergend vermogen	-	log	1,0	$\sigma=0,20$	KW	0	-	1
A_{kom}	[m ²]	Kombergend oppervlak	$A_{kom} > 0$	log	invoer	$V_r=0,10$	KW	0	-	1
Δh_{kom}	[m]	Toegestane peilverhoging komberging	$0 < \Delta h_{kom} < 10$	log	invoer	$\sigma=0,10$	KW	0	-	1

3.6.3 Belastingmodel

$$V_{os/ol} = m_{in} \cdot t_s \cdot q_{os/ol} \cdot B$$

3-20

	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_{in}	[-]	Modelfactor instromend volume		det	1	-	-	-	-	-
t_s	[uur]	Stormduur	$t_s > 0$	log	7,5	$V_r=0,25$	KW	1	-	0

Voor het overslag-/overloopdebiet over het gesloten kunstwerk zijn een aantal modellen beschikbaar, hiervoor wordt verwezen naar paragraaf 3.3.2.

3.7 Referenties

[Deltares, 2015]:

WTI 2017 Cluster Toetsregels Kunstwerken - Handreiking aansluitconstructies (product 6.0F)
Deltares rapport 1220087-006-GEO-0002, Versie D1, 6 juli 2015, definitief

[TAW, 2003]

Leidraad Kunstwerken,

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

4 Beschrijving faalmechanisme *overslag en overloop*

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een beschrijving gegeven van het faalmechanisme *overslag en overloop* van kunstwerken behorend bij het toetsspoor *hoogte*. Deze beschrijving is geënt op hetgeen hierover staat beschreven in de Leidraad kunstwerken [TAW, 2003].

Het faalmechanisme *overslag en overloop* kan zowel bij punt- als langsconstructies een rol spelen. In het laatste geval gaat het om zowel vaste als demontabele keringen die over grotere lengten aanwezig zijn. De methode in de Leidraad kunstwerken [TAW, 2003] is ook van toepassing op deze kunstwerken zolang er geen sprake is van ondiepe voorlanden met sterke golfbreking tot gevolg. Indien dit wel het geval is, geeft de methode conservatieve resultaten.

De verwachting is dat het brondocument, de Leidraad Kunstwerken [TAW, 2003], in de komende jaren (deels) herschreven wordt. De overstromingskansbenadering wordt in de nieuwe Leidraad opgenomen, wat tot aanpassingen van met name de toelaatbare faalkansruimte en wellicht ook het faal criterium zal leiden. De basisfilosofie omtrent het faalmechanisme *overslag en overloop* verandert hierdoor ook, waarbij overgestapt wordt van een overbelastingsbenadering naar een benadering waarin van overstromingsgevolgen wordt uitgegaan. Daarnaast wordt naar verwachting de EurOtop-manual [EurOtop-2007] opgenomen in de nieuwe Leidraad, waarmee voor samengestelde constructies met sterke golfbreking nauwkeuriger het overslag- en overloopdebiet bepaald kan worden.

4.2 Fenomenologische beschrijving

4.2.1 Beschrijving op hoofdlijnen

Falen als gevolg van tekort aan hoogte vindt plaats indien er door golfoverslag en/of overloop zoveel water over het hoogwaterkerend gesloten kunstwerk of aansluitconstructie gaat, dat het faal criterium (overstromingsgevolgen) wordt overschreden. Dit kan enerzijds optreden bij een standzeker kunstwerk, waar door overschrijding van het bergend vermogen aan de binnenzijde van het kunstwerk significante gevolgen ontstaan. Anderzijds kan het kunstwerk zelf bezwijken als gevolg van bezwijken van de bodembescherming aan de binnenzijde van het kunstwerk, waarna erosie van de ondergrond optreedt en een ontgrondingskuil ontstaat. Hierdoor kan het kunstwerk als geheel bezwijken, met als gevolg een bres in de waterkering.

4.2.2 Gedetailleerde beschrijving van het faalproces

Belasting

De belasting op het kunstwerk wordt gevormd door een combinatie van waterstand en golfhoogte. Bij toenemende waterstand en/of toenemende golfhoogte gaat er in eerste instantie door golfoverslag steeds meer water over de keermiddelen van het gesloten kunstwerk. Zolang de buitenwaterstand lager is dan de kerende hoogte van het kunstwerk is sprake van een overslagsituatie. Dat wordt anders als de waterstand verder stijgt en hoger wordt dan de kerende hoogte van het kunstwerk. Er is dan sprake van overloop, waarbij de belasting bestaat uit een overstortende straal in combinatie met overslaande golven over de keermiddelen van het gesloten kunstwerk.

Sterkte

De sterkte van het kunstwerk omvat de volgende aspecten: de kerende hoogte en breedte van het kunstwerk in combinatie met de achter het kunstwerk gelegen bodembescherming, de constructieve sterkte van het kunstwerk en het kombergend vermogen van het achterland. De sterkte van het kunstwerk dient altijd in de beschouwing te worden betrokken, het kombergend vermogen van het achterland alleen als de situatie daar aanleiding toe geeft.

De sterkte van het kunstwerk zelf wordt in eerste instantie gevormd door de mate waarin de keermiddelen bestand zijn tegen overslag en overlopend water. Bij zeer grote overslag-/overloopdebieten kunnen dynamische trillingen optreden, die leiden tot het bezwijken van de keermiddelen. Het ligt echter meer voor de hand om dit als belastingssituatie te beschouwen bij falen waterkering door gebrek aan sterkte van het kunstwerk (toetsspoor Sterkte en Stabiliteit van kunstwerken). Het maatgevende onderdeel is echter veelal de sterkte van de bodembescherming achter het kunstwerk. Deze bodembescherming wordt in toenemende mate belast naarmate het overslag-/overloopdebet toeneemt.

Het kombergend vermogen van het achterland is relevant omdat het inkomende debiet als gevolg van overslag en/of overloop niet mag leiden tot significante gevolgen in het achterland. Hiervan is bijvoorbeeld sprake als achterliggende regionale keringen bezwijken of overlopen, hetgeen leidt tot significante gevolgen in het achterliggende gebied.

Op welk moment gevolgen wel of niet significant zijn, is in enige mate subjectief. Voor komberging bij kunstwerken wordt binnen het WTI de volgende definitie van 'significante gevolgen' gehanteerd: meer dan 10 miljoen euro schade en/of tenminste 1 slachtoffer. In de schematiseringshandleiding worden praktische aanwijzingen gegeven hoe hiermee om te gaan.

Het proces van initiatie tot falen

Het debiet dat via overslag en/of overloop over de keermiddelen stroomt, neemt toe bij toenemende waterstanden en/of golfhoogten. Dit inkomende debiet moet via het kunstwerk worden afgevoerd naar het binnendijkse watersysteem. De bodembescherming achter het kunstwerk is nagenoeg altijd het kritieke onderdeel op de weg van keermiddel naar het achterliggend watersysteem. Bij toenemende overslag-/overloopdebieten neemt de stroomsnelheid boven de bodembescherming toe. Dit leidt tot falen van de bodembescherming als de kritieke stroomsnelheid van de bodembescherming wordt overschreden. In de praktijk is dit veelal het begin van een geleidelijk erosieproces, waarbij bij toenemende stroomsnelheid steeds grotere schade aan de bodembescherming ontstaat en uiteindelijk de ondergrond onder de bodembescherming bloot komt te liggen. In dat geval faalt de bodembescherming en kan transport van bodemmateriaal uit de ondergrond onder de bodembescherming plaatsvinden. Dit leidt tot ontgrondingskuilen direct achter het kunstwerk. Deze ontgrondingskuilen worden groter en dieper naarmate de ondergrond langer belast wordt door de stroming als gevolg van het overslag-/overloopdebet. Uiteindelijk kunnen deze ontgrondingskuilen dermate groot en diep worden dat dit leidt tot overall instabiliteit en hiermee bezwijken van het kunstwerk.

Ook als het kunstwerk zelf niet bezwijkt, moet het overslag-/overloopdebet na passage van het kunstwerk in het achterliggende gebied veilig kunnen worden geborgen. Als het inkomend debiet groter is dan het kombergend vermogen, leidt dit tot significante overstromingsgevolgen. Dan is eveneens sprake van falen van het kunstwerk. Overschrijding van het kombergend vermogen leidt direct tot significante gevolgen als bijvoorbeeld de waterstand in

het binnendijkse watersysteem zover stijgt dat regionale keringen bezwijken⁵, waarna het binnendijkse watersysteem leegloopt in het achterliggende gebied. Hierbij dient het wel te gaan om een watersysteem van enige omvang. Bij sommige constructietypes (bijvoorbeeld coupures) is geen sprake van een achterliggend binnenwatersysteem. Bij deze constructies moet op andere gronden een inschatting worden gemaakt van het overslag-/overloopdebiet dat nog net niet leidt tot significante gevolgen aan de binnenkant van de kering. In de schematiseringshandleidingen van de verschillende toetssporen bij kunstwerken worden hiertoe praktische aanwijzingen gegeven.

4.2.3 Te toetsen deelfaalmechanismen

Zoals uit de voorgaande paragraaf kan worden afgeleid worden de volgende deelfaalmechanismen onderscheiden:

- Z_{11} Bezwijken bodembescherming
Bezwijken van de bodembescherming achter het kunstwerk als gevolg van het overslaande of overlopende water, wat uiteindelijk leidt tot het ontstaan van erosiekuilen.
- Z_{12} Kans bezwijken kunstwerk als gevolg van erosie bodem
Kans dat het kunstwerk als geheel bezwijkt (onderuit gaat) door erosie van de ondergrond nadat bezwijken van de bodembescherming heeft plaatsgevonden. Heeft betrekking op het eroderen van de onbeschermde bodem, het ontstaan van ontgrondingskuilen en hiermee op de reststerkte van het kunstwerk na bezwijken bodembescherming.
- Z_{13} Overschrijden bergend vermogen
Falen van het kunstwerk als gevolg van onvoldoende waterbergend vermogen in het achterland doordat er te veel water overslaat/overloopt gedurende een hoogwatergolf.

Deze faalmechanismen worden meegenomen in de toetsing (zie paragraaf 4.4).

4.2.4 Reststerkte

Bij reststerkte gaat het over de sterkte die niet direct wordt beschreven met de aanwezige modellen, maar die er wel voor kan zorgen dat er nog niet direct sprake is van falen. Bij het faalmechanisme *overslag en overloop* kan worden gesteld dat sprake is van reststerkte na het moment van bezwijken van de bodembescherming. Deze reststerkte zit opgesloten in het deelmechanisme Z_{12} *Bezwijken kunstwerk als gevolg van erosie bodem*. Middels dit mechanisme kan de kans worden meegenomen dat het kunstwerk als geheel bezwijkt (onderuit gaat) door erosie van de ondergrond nadat bezwijken van de bodembescherming heeft plaatsgevonden.

In [DLT-dfk 2015] is hierop ingegaan. Het volgende stuk tekst is overgenomen uit deze memo.

Binnen WTI is het uitgangspunt dat in eerste instantie naar normfalen gekeken wordt. Onderstaand is het uitgangspunt binnen het WTI met betrekking tot falen en normfalen weergegeven.

Falen wordt gedefinieerd als het overschrijden van de grenstoestand, waarbij sprake is van het verlies van waterkerend vermogen. In de praktische uitwerking wordt een strengere grenstoestand gehanteerd als de kennis nog ontoereikend is om de grenstoestand bij doorbraak te bepalen. Veelal is onvoldoende inzicht in reststerkte

⁵ Voor het bezwijkproces van de achterliggende regionale keringen als gevolg van toenemende binnenwaterstanden wordt verwezen naar de beschrijving van het faalproces bij dijken.

processen beschikbaar waardoor falen wordt vertaald met het optreden van een initiërend mechanisme. In dat geval kan worden gesproken over normfalen.

Inmiddels wordt de term normfalen in het kader van het WTI2017 niet meer gehanteerd. Falen in het kader van het WTI2017 is nu gekoppeld aan faalcriteria.

Vanuit de definitie van falen uit het uitgangspuntendocument van het WTI2017 en de daarbij gegeven opmerking ten aanzien van normfalen kunnen de volgende elementen worden gedestilleerd die behoefte hebben aan een scherpe definitie.

I. Falen.

Het overschrijden van de uiterste grenstoestand, ofwel het verlies van waterkerend vermogen resulterend in dusdanige gevolgen dat deze als significante gevolgen worden aangemerkt. Voor komberging bij kunstwerken wordt binnen het WTI de volgende definitie van 'significante gevolgen' gehanteerd: meer dan 10 miljoen euro schade en/of tenminste 1 slachtoffer.

II. Faal criterium:

Het overschrijden van de gemodelleerde (beschouwde) sterkte door de belasting. Wanneer het faal criterium wordt bereikt treedt er dus rekenkundig falen op.

III. Reststerkte.

Dit is het gat tussen de uiterste grenstoestand (moment dat daadwerkelijk falen optreedt) en het overschrijden van het faal criterium. Het betreft sterkte die niet in de modellen wordt meegenomen, maar die bij nadere beschouwingen kan worden aangewend om scherper te toetsen en daarmee dichterbij de uiterste grenstoestand te komen. Reststerkte is met name een aspect dat bij de toets op maat (toetsniveau 3) kan worden ingezet.

In formulevorm komt het op het volgende neer.

$$\begin{aligned} \text{Sterkte} &= \text{Beschouwde sterkte} + \text{Reststerkte} \\ \text{Falen} &= \text{Belasting} > \text{Sterkte} \\ \text{Faal criterium} &= \text{Belasting} > \text{Beschouwde sterkte} \\ \text{Faal criterium} &= \text{Belasting} > (\text{Sterkte} - \text{Reststerkte}) \end{aligned}$$

De reststerkte bij het faalmechanisme *overslag en/of overloop* betreft de situatie die ontstaat nadat de bodembescherming is bezweken en/of het kombergend vermogen niet meer toereikend is. Op beide wordt onderstaand nader ingegaan.

Reststerkte na bezwijken bodembescherming

Het bezwijken van de bodembescherming (Z_{11}) bestaat uit het optreden van doorgaande erosie van (onderdelen van) de bodembescherming als gevolg van de optredende stroomsnelheden van het instromende water. Hierdoor kan vervolgens erosie van het onderliggende bodemmateriaal optreden. De reststerkte die dan nog aanwezig is betreft de sterkte die ervoor zorgt dat het kunstwerk na bezwijken van de bodembescherming niet onderuit gaat en er geen bres optreedt (verlies van waterkerend vermogen). Deze reststerkte zit opgesloten in het deelfaalmechanisme Z_{12} *Kans bezwijken kunstwerk als gevolg van erosie bodem*. Middels dit deelfaalmechanisme kan de kans worden meegenomen dat het

kunstwerk als geheel bezwijkt (onderuit gaat) door erosie van de ondergrond nadat bezwijken van de bodembescherming heeft plaatsgevonden.

Voordat er een bres optreedt nadat het kunstwerk als geheel bezweken is na het bezwijken van de bodembescherming moet een aantal vervolprocessen optreden:

- Optreden van erosie van de onbeschermd bodem als gevolg van de optredende stroomsnelheden. Dit proces leidt uiteindelijk tot het optreden van ontgrondingskuilen.
- Vervolgens moet een afschuiving optreden aan de rand van deze ontgrondingskuil, waarvan de inscharing het kunstwerk moet bereiken.
- Afmetingen (diepte, breedte) van de ontgrondingen ter plaatse van het kunstwerk zijn dusdanig dat dit leidt tot instabiliteit (kantelen, verschuiven) van het kunstwerk. Dit kan optreden door het wegvallen van de passieve gronddruk aan de binnenzijde, maar ook het uitspoelen van gronddeeltjes onder de binnenzijde van het kunstwerk is mogelijk. Dit kan leiden tot een proces waarbij (delen van) het kunstwerk steeds verder vervormen danwel verplaatsen.
- Het totale kunstwerk faalt als gevolg van kantelen en/of verschuiven van het geheel of het opeenvolgend bezwijken van onderdelen van de constructie.

De reststerkte van het kunstwerk na bezwijken van de bodembescherming is dus afhankelijk van een groot aantal factoren. De belangrijkste zijn:

- Erosiebestendigheid van de bodem onder de bodembescherming
De vorming van een ontgrondingskuil gaat in zandige grond veel sneller dan in cohesieve grond (klei).
- Fundatie van het kunstwerk
Een kunstwerk dat op palen staat zal minder snel (deels) bezwijken dan een kunstwerk dat op staal gefundeerd is.
- Geometrie van het kunstwerk
Een kort kunstwerk (waarbij de lengte wordt gemeten loodrecht op de dijk) zal sneller kantelen of afschuiven dan een lang kunstwerk.

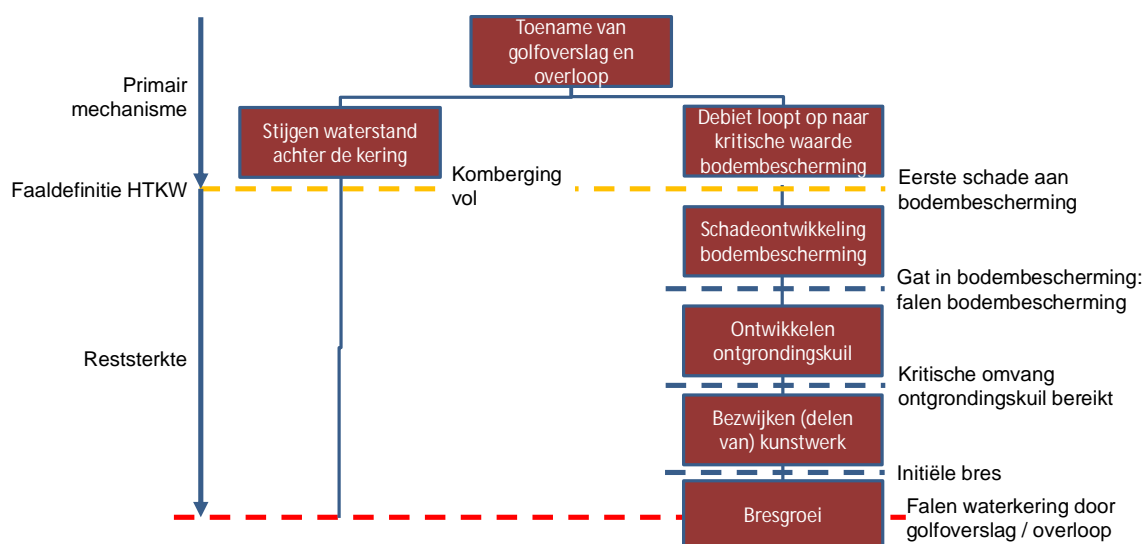
Nadat de bodembescherming is bezweken moet er dus nog het nodige gebeuren voordat het kunstwerk als geheel bezwijkt. Dit kan in rekening worden gebracht via het deelfaalmechanisme Z_{12} *Kans bezwijken kunstwerk als gevolg van erosie bodem*. Het is zeer lastig de reststerkte te kwantificeren en uit te drukken in een concrete kans op bezwijken van het kunstwerk als geheel nadat bezwijken van de bodembescherming is opgetreden. Concrete aanwijzingen hiervoor ontbreken, waardoor in de praktijk reststerkte niet wordt meegenomen en de kans op bezwijken van de bodembescherming de faalkans van het kunstwerk als geheel bepaalt. Het moge duidelijk zijn dat er na bezwijken van de bodembescherming nog een aanzienlijke mate van reststerkte aanwezig is.

Reststerkte na overschrijding kombergend vermogen

Het overschrijden van het kombergend vermogen (Z_{13}) bestaat uit het instromen van dusdanig veel water dat het niet meer kan worden geborgen in het achterliggende gebied, zodanig dat dit leidt tot significante gevolgen in het achterliggende gebied. Feitelijk is er geen sprake van reststerkte na overschrijding van het kombergend vermogen. Er zijn immers geen faalprocessen die nog gekwantificeerd kunnen worden.

4.3 Schematisch overzicht van het faalproces

In onderstaande figuur is een schematisch overzicht van het proces van falen van het kunstwerk als gevolg van overslag en/of overloop gegeven.



Figuur 4.1 Gebeurtenissen leidend tot falen van de waterkering door overslag en/of overloop van het kunstwerk

4.4 Beknopte beschrijving van de te toetsen deelfaalmechanismen

In de toetsing worden de volgende deelfaalmechanismen onderscheiden:

- Z₁₁ Bezwijken bodembescherming.
- Z₁₂ Kans bezwijken kunstwerk als gevolg van erosie bodem.
- Z₁₃ Overschrijden bergend vermogen.

Z₁₁ Bezwijken bodembescherming

Dit deelfaalmechanisme betreft het bezwijken van de bodembescherming achter het kunstwerk. Dit kan optreden door hoge stroomsnelheden boven de bodembescherming als gevolg van het overslaande of overlopende water of doordat de bodembescherming rechtstreeks door de overstortende straal wordt belast. Onder bezwijken wordt in dit geval verstaan het ontstaan van een zodanige schade aan de bodembescherming dat zodanig materiaaltransport uit de ondergrond plaats kan vinden dat dit leidt tot het ontstaan van erosiekuilen. De kritieke stroomsnelheid waarbij bezwijken van de bodembescherming optreedt, verschilt per type bodembescherming. Zo is een bodembescherming bestaande uit beton, asfalt of gezette steen doorgaans bestand tegen hogere stroomsnelheden dan een bodembescherming bestaande uit losgestorte steen. De kritieke stroomsnelheid wordt buiten Ringtoets om bepaald met vigerende ontwerpregels, die per type bodembescherming kunnen verschillen. In de schematiseringshandleiding worden hiervoor aanwijzingen gegeven.

Z₁₂ Kans bezwijken kunstwerk als gevolg van erosie bodem

Dit deelfaalmechanisme betreft de kans dat het kunstwerk als geheel bezwijkt (onderuit gaat) door erosie van de onbeschermd bodem nadat bezwijken van de bodembescherming heeft plaatsgevonden. Hierdoor ontstaan ontgrondingskuilen, die een dusdanige afmeting kunnen krijgen dat een afschuiving kan optreden aan de rand van deze ontgrondingskuil. Als vervolgens een instabiliteit van deze ontgrondingskuil optreedt waarvan de inscharing het

kunstwerk bereikt, kan de overall-stabiliteit van het kunstwerk onvoldoende worden. Dit kan gebeuren door kantelen of afschuiven van het hele kunstwerk, of door een proces waarbij successievelijk delen van het kunstwerk constructief bezwijken met het bezwijken van het totale kunstwerk als uiteindelijke gevolg. Dit kan leiden tot een bres in de waterkering, met bresgroei tot gevolg: de waterkering faalt.

Dit faalmechanisme behandelt dus in feite de aanwezige reststerkte na bezwijken van de bodembescherming. Zoals in paragraaf 4.2.4 is uitgelegd ontbreken handvatten om deze reststerkte te kwantificeren.

Z₁₃ Overschrijden bergend vermogen

Dit faalmechanisme betreft het falen van het kunstwerk als gevolg van onvoldoende waterbergend vermogen in het achterland doordat er te veel water overslaat/overloopt over het hoogwaterkerend gesloten kunstwerk gedurende een hoogwatergolf. Hierbij moet sprake zijn van significante overstromingsgevolgen. In de schematiseringshandleiding worden hiervoor handvatten gegeven.

Bij het deelfaalmechanisme Z_{13} is geen sprake van bezwijken van het kunstwerk, met bresgroei tot gevolg. In theorie zouden situaties voor kunnen komen waarbij overschrijding van het kombergend vermogen leidt tot bezwijken van het kunstwerk. Hierbij is sprake van een situatie waarbij na het bezwijken van een regionale kering instantaan een dusdanig verval over het kunstwerk ontstaat, dat de keermiddelen bezwijken of de waterdiepte zo klein wordt dat de kritieke stroomsnelheid voor de bodembescherming wordt overschreden. In de praktijk komen deze situaties echter nauwelijks voor.

Voor dit mechanisme wordt een kombergingsberekening uitgevoerd. Het instromend debiet volgt, afhankelijk van de waterstand ten opzichte van het niveau van het kunstwerk of keermiddelen, uit een golfoverslag berekening danwel uit een overlaatformule (overlopen). Dit debiet gedeeld door het bergend oppervlak van het achter de kering gelegen watersysteem bepaalt de snelheid waarmee de waterspiegel achter de kering stijgt. De waterspiegel stijging tijdens de duur van de maatgevende storm mag niet leiden tot significante overstromingsgevolgen. In de schematiseringshandleiding worden daarvoor handvatten gegeven.

4.5 Historie van het faalmechanisme

De vigerende kennisbasis, die in paragraaf 4.6 nader wordt toegelicht, is vastgelegd in de Leidraad Kunstwerken [TAW, 2003]. Het faalmechanisme *overslag en overloop* is conform [TAW, 2003] één van de drie hoofdfaalmechanismen die bij kunstwerken van toepassing zijn. Dit betreffen naast *overslag en overloop* ook de faalmechanismen *niet sluiten* en *sterkte en stabiliteit*. Deze laatste wordt in de praktijk opgedeeld in bezwijken constructieonderdelen, instabiliteit constructie en grondlichaam en onder- en achterloopsheid.

Uitgangspunt in [TAW, 2003] is de overbelastingsbenadering. Voor *overslag en overloop* is deze gedefinieerd als overschrijding van een toelaatbare hoeveelheid water die over het gesloten kunstwerk komt als gevolg van golfoverslag en overloop.

[TAW, 2003] is eerder als groene versie gepubliceerd. In [TAW-WKBC 1997] is voor het faalmechanisme *overslag en overloop* sprake van twee methoden om de benodigde kerende hoogte te bepalen. Bij de eerste methode wordt uitgegaan van een gegeven, door beheerder en ontwerper vast te stellen, maximum overslagdebiet tijdens maatgevende omstandigheden. Bij de tweede methode wordt uitgegaan van het beschikbaar bergend vermogen achter het

kunstwerk. Beide methoden zijn complementair: bij toepassing van de methode “maximum debiet tijdens maatgevende omstandigheden” moet worden gecontroleerd of de komberging voldoende is. Bij toepassing van de kombergingsmethode moet worden gecontroleerd of het maximum debiet tijdens maatgevende omstandigheden geen erosie veroorzaakt.

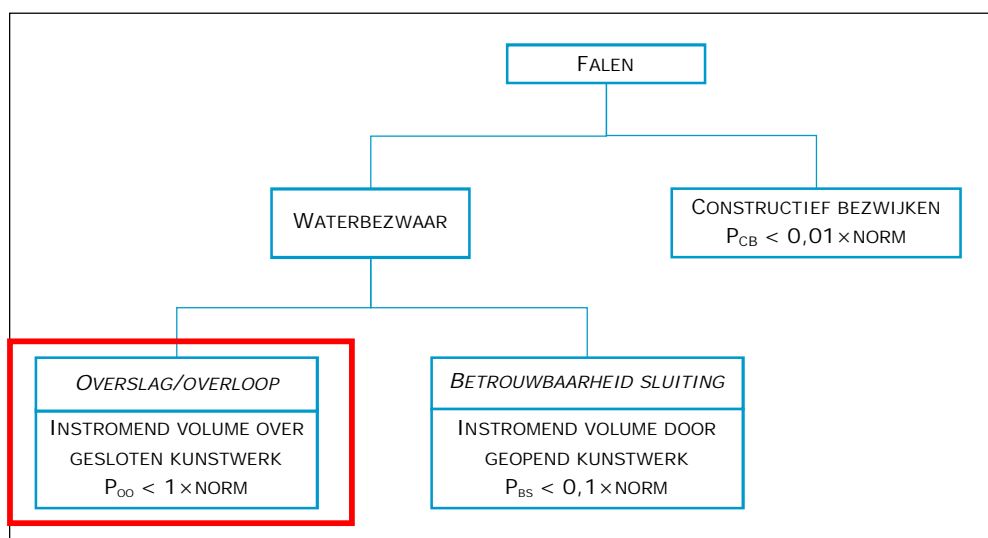
De voorloper van [TAW-WKBC 1997] is [TAW-LCVW 1976]. In [TAW-LCVW 1976] wordt geen aandacht besteed aan *overslag en overloop*.

In de wettelijke toetsingen tot en met de derde toetsronde is in de toetsvoorschriften (o.a. [DWW-VTV06 2007]) zoveel mogelijk aangesloten op [TAW, 2003]. Na het verschijnen van [TAW-LK 2003] en [DWW-VTV06 2007] is voor het faalmechanisme *overslag en overloop* nader onderzoek gedaan naar het optredend overslag- en overloopdebiet bij samengestelde constructies. Het resultaat is vastgelegd in de EurOtop-manual [EurOtop-2007], die naar verwachting wordt opgenomen in de nieuwe Leidraad Kunstwerken.

4.6 Vigerende veiligheidsfilosofie en huidig toetsinstrumentarium (VTV2006)

4.6.1 Vigerende veiligheidsfilosofie

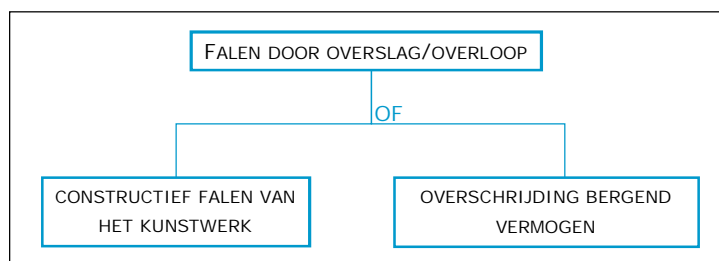
De vigerende veiligheidsfilosofie is opgenomen in de Leidraad Kunstwerken [TAW, 2003]. In deze veiligheidsfilosofie wordt het falen van een kunstwerk opgedeeld in een tak ‘waterbezwaar’ en een tak ‘constructief bezwijken’ (Figuur 4.2). Bij de laatste tak wordt verondersteld dat dit altijd tot ten minste 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 oplossingen mogelijk zijn. De eerste tak geeft weliswaar aanleiding tot (grote) problemen, maar de situatie hoeft niet direct onbeheersbaar te zijn.



Figuur 4.2 Faalboom kunstwerk Leidraad Kunstwerken [TAW, 2003]

Uitgangspunt in de Leidraad Kunstwerken [TAW, 2003] is de overbelastingsbenadering. Voor *overslag en overloop* is deze gedefinieerd als overschrijding van een toelaatbare hoeveelheid instromend water door de geopende kering als gevolg van het falen van de sluiting van een object. Hierbij dient wel geverifieerd te worden of de constructie bestand is tegen het optredende overslag-/overloopdebiet dat hoort bij de toelaatbare hoeveelheid instromend water vanuit het oogpunt van komberging. Feitelijk komt het bij *overslag en overloop* erop

neer dat de kans op falen bestaat uit de kans dat over het kunstwerk een ontoelaatbare hoeveelheid water stroomt die ofwel leidt tot constructief falen van het kunstwerk dan wel een ontoelaatbare situatie in het achterland tot gevolg heeft.



Figuur 4.3 Falen door niet sluiten

Conform de huidige Leidraad Kunstwerken [TAW, 2003] wordt aan het faalmechanisme voldaan wanneer de faalkans kleiner is dan de veiligheidsnorm zoals vastgelegd in de huidige waterwet. In formulevorm is dit:

$$P_{f,oo} < 1 \times norm$$

4-1

In de Leidraad Kunstwerken [TAW, 2003] is het vertrekpunt bij het faalmechanisme *overslag en overloop* het kombergend vermogen⁶. Dit wordt bepaald door de voor waterberging beschikbare oppervlakte aan de binnenzijde van de waterkering en de toelaatbare peilstijging voor deze oppervlakte. Deze twee samen definiëren het gedurende een hoogwatergolf toelaatbare instroomvolume over het hoogwaterkerend gesloten kunstwerk. Randvoorwaarde hierbij is de maximaal toelaatbare schade die ontstaat bij een bepaalde binnenwaterstand.

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 de Leidraad Kunstwerken. Onderscheid is gemaakt in overslag en overloop. In geval van overloop wordt direct doorgedaan naar een toetsing op standzekerheid en beheersmatige gevolgen. In geval van overslag wordt onderscheid gemaakt naar het gemiddelde overslagdebiet. Bij zeer kleine overslagdebieten (<0,1 l/s/m) vindt geen toets op standzekerheid plaats, bij grotere overslagdebieten (> 0,1 l/s/m) wel. Bij debieten groter dan 10 l/s/m vindt naast de toets op standzekerheid ook een toets op de beheersmatige gevolgen plaats. Daarnaast vindt in alle gevallen bij kleine waakhogten (kleiner dan 0,30 m) een geavanceerde beoordeling plaats, die gericht is op de onzekerheden in de maatgevende waterstand. Dit is van belang omdat vanaf het moment van optreden van overloop het instromende debiet zeer snel toeneemt.

Bij de toets op beheersmatige gevolgen wordt de komberging betrokken op het optreden van waterbezwaar. Daarnaast kunnen bereikbaarheid, begaanbaarheid en het niet vol mogen lopen van bedieningskelders een rol spelen. De kans op overschrijding van de komberging is uiteindelijk enerzijds afhankelijk van de randvoorwaarden die worden opgelegd door het watersysteem waarin het kunstwerk zich bevindt en anderzijds van eigenschappen van het kunstwerk zelf. Randvoorwaarden van het watersysteem zijn met name de frequentieverdeling van de hoge buitenwaterstanden en het verloop in de tijd van de buitenwaterstand gedurende een hoogwatergolf en de toelaatbare binnenwaterstand. De

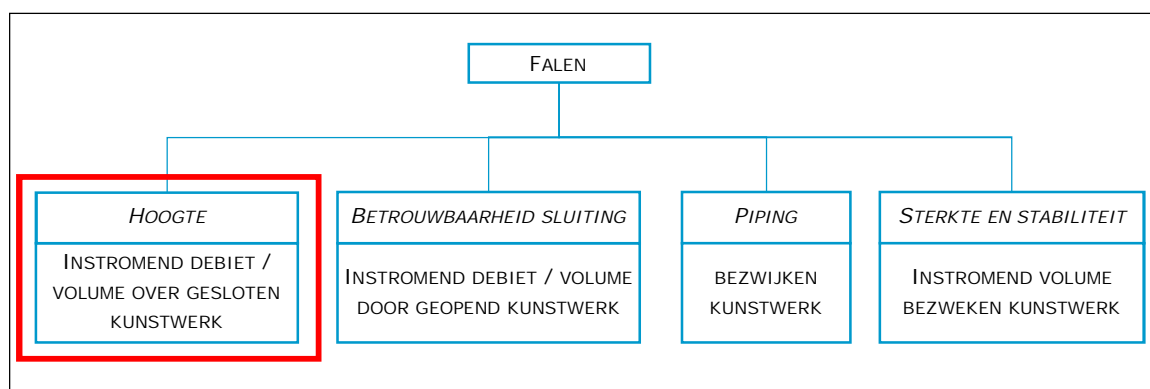
⁶ Kombergend vermogen is het waterbergend vermogen van het achter de waterkering gelegen (water)systeem.

enige eigenschappen van het kunstwerk die van invloed zijn op de hoeveelheid instromend water, zijn de kerende hoogte en de breedte van het kunstwerk.

4.7 WTI2017

4.7.1 Wijzigingen in het WTI2017

In het WTI2017 wordt grotendeels aangesloten op de huidige wijze van toetsen. Het gaat nu echter om het beschouwen van overstromingsrisico's en daarmee over grotere gevolgen. Het optreden van wateroverlast wordt niet meer als het primaire criterium gezien, maar het optreden van grote gevolgen is nu de randvoorwaarde. Dit kan worden vertaald naar het primaire uitgangspunt dat de kans op bresgroei niet aanwezig of verwaarloosbaar klein is. Daarnaast kan het instroomvolume ook in het achterland leiden tot overstromingsgevolgen. Hiermee worden komberging en instroombestendigheid van de constructie beide bekeken. Door de overstromingskansbenadering verandert Figuur 4.2 in onderstaande Figuur 4.4.



Figuur 4.4 Faalboom kunstwerken WTI2017

4.7.2 Omgang met 2a-1 semi-probabilistisch versus 2a-2 probabilistisch

In het WTI2017 is het noodzakelijk om voor alle kunstwerken een faalkans uit te rekenen voor het toetsspoor *hoogte*. Dit omdat de uitkomst van het toetsspoor *hoogte* mee draait in de beoordeling op niveau 2b van het toetsspoor *hoogte* in het dijken spoor. Hierdoor is een beoordeling op niveau 2a-2 (volledig probabilistisch) noodzakelijk. Bovendien vergt de gedetailleerde toets voor het toetsspoor *hoogte* bij kunstwerken een beperkte inspanning. Dit maakt dat een semi-probabilistische beoordeling voor het toetsspoor *hoogte* bij kunstwerken geen meerwaarde biedt en daarom ook niet wordt aangeboden.

4.8 Referenties

[DLT-dfk 2015]

Definitie falen bij kunstwerken

Deltares, R. Delhez, B. van Bree, kenmerk 1220087-006-GEO-0004, versie 03, 9 november 2015

[DWW-VTV06 2007]

Voorschrift Toetsen op Veiligheid primaire waterkering 2006 (VTV2006),

Dienst Weg- en Waterbouwkunde (RWS), ISBN 978-90-369-5762-5, september 2007;

[EurOtop-2007]

EurOtop wave overtopping of sea defences and related structures: assessment manual,

Environment Agency/Expertise Netwerk Waterkeren/Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, augustus 2007;

[TAW, 2003]

Leidraad Kunstwerken,

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

[TAW-bWKBC 1997]

Basisrapport Waterkerende Kunstwerken en Bijzondere Constructies,

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 1997;

[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-WKBC 1997]

Leidraad Waterkerende Kunstwerken en Bijzondere Constructies,

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 1997;

5 Beschrijving deelfaalmechanisme Z_{11} : Bezwijken bodembescherming

5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een beschrijving gegeven van de faalmechanismemodellen die horen bij het deelfaalmechanisme Z_{11} : *Bezwijken bodembescherming*. Begonnen wordt met de definitie van falen in paragraaf 5.2. Paragraaf 5.3 geeft een beschrijving van de vigerende kennisbasis en de van toepassing zijnde modellen aan de belastingenkant. Tevens wordt in deze paragraaf ingegaan op nieuwe ontwikkelingen en wordt een keuze gemaakt welke modellen in het WTI2017 gebruikt worden. Paragraaf 5.4 beschrijft vervolgens de vigerende kennisbasis en de van toepassing zijnde modellen (paragraaf 5.3) aan de sterktekant. Ook hier wordt een onderbouwde keuze gemaakt voor het te hanteren model binnen het WTI2017.

In essentie bestaat de toetsing met dit faalmechanisme uit het vergelijken van de optredende stroomsnelheid nabij de bodembescherming met de voor de bodembescherming kritieke stroomsnelheid. Indien deze kritieke stroomsnelheid wordt overschreden, treedt erosie van de bodembescherming op. Het over de keermiddelen stromende debiet als gevolg van overloop/overslag is eenvoudig te bepalen. De optredende stroomsnelheid ter plaatse van de bodembescherming wordt vervolgens bepaald door het instromende debiet te delen door het natte oppervlak ter plaatse van de bodembescherming (stroomvoerende breedte achterliggende watergang ter plaatse van bodembescherming vermenigvuldigd met de waterdiepte).

Bovenstaande betekent dat een direct vergelijk van het overslag-/overloopdebiet met de kritieke stroomsnelheid voor de bodembescherming niet mogelijk is. Om dit op te lossen wordt het overslag-/overloopdebiet per strekkende meter vermenigvuldigd met de breedte van het kunstwerk teneinde het totale inkomende debiet te bepalen. Daarnaast wordt de kritieke stroomsnelheid met betrekking tot de bodembescherming vermenigvuldigd met de waterdiepte en de stroomvoerende breedte ter plaatse van de bodembescherming. Dit leidt dan tot een kritiek debiet. De beide debieten kunnen met elkaar worden vergeleken. Op deze wijze wordt het bezwijken van de bodembescherming geanalyseerd.

Voor het beschrijvende model (de Z-functie) voor het deelfaalmechanisme Z_{11} : *Bezwijken bodembescherming* wordt verwezen naar paragraaf 3.4.1.

5.2 Definitie

Bezwijken van de bodembescherming in relatie tot *overslag/overloop* treedt op zodra het overslag-/overloopdebiet leidt tot dusdanige stroomsnelheden ter plaatse van de binnendijkse bodembescherming dat deze bezwijkt en er erosiekuilen gaan ontstaan leidend tot bezwijken van het kunstwerk. Falen is hierbij gedefinieerd als het overschrijden van de grenstoestand, waarbij sprake is van het verlies van waterkerend vermogen. Hieraan is gekoppeld dat er dusdanige gevolgen (schade en slachtoffers) optreden dat dit (maatschappelijk) niet acceptabel is. Deze definitie bevat zowel de gemodelleerde sterkte als de reststerkte die nog niet in modellen in het instrumentarium van WTI2017 kan worden vervat.

Voor de reststerkte (niet gemodelleerde sterkte) die gekoppeld is aan bezwijken van de bodembescherming is in het instrumentarium van het WTI2017 een deelfaalmechanisme gekoppeld. Dit betreft deelfaalmechanisme Z_{12} *Bezwijken kunstwerk a.g.v. erosie* wat in

hoofdstuk 6 wordt beschreven. Dit deelfaalmechanisme bestaat uit slechts één parameter waarmee via expert judgement een inschatting gedaan kan worden van de reststerkte.

In het WTI2017 wordt in eerste instantie gekeken naar faalcriteria die definiëren wanneer het kunstwerk als gefaald wordt beschouwd. Dit is nader uitgewerkt in [DLT-dfk 2015]. Voor het deelfaalmechanisme Z_{11} *Bezwijken bodembescherming* wordt de volgende faaldefinitie gehanteerd:

Het faal criterium wordt overschreden als er dusdanige stroomsnelheden ter plaatse van de bodembescherming ontstaan dat doorgaande erosie van de bodembescherming optreedt.

De basis van het deelfaalmechanisme Z_{11} ligt met name bij de modellen waarmee het optredende overslag-/overloopdebiet kan worden ingebracht en de modellen waarmee de sterkte van een bodembescherming worden beschreven. In de volgende paragrafen wordt de kennisbasis verder uitgewerkt, waarbij eerst gekeken wordt naar de 'belasting' (inkomende debiet bij overslag/overloop) en vervolgens naar de 'sterkte' (bodembescherming).

5.3 Historie en kennisbasis belastingmodellen

5.3.1 Historie en recente kennisontwikkeling

Voor kunstwerken is [TAW-LCVW 1976] lange tijd vigerend geweest. Hierin wordt echter geen aandacht besteed aan het bepalen van de benodigde kerende hoogte van een kunstwerk. In 1997 wordt [TAW-WKBC 1997] uitgebracht als groene versie van de Leidraad Kunstwerken [TAW, 2003]. Hierin wordt dezelfde ontwerpfilosofie gehanteerd als in [TAW, 2003], maar wordt de benodigde kerende hoogte met een andere formule bepaald. Aansluitend is in de tweede helft van de jaren 90 onderzoek verricht door WL|Delft Hydraulics, hetgeen heeft geleid tot de formules die uiteindelijk in de Leidraad Kunstwerken [TAW, 2003] terecht zijn gekomen. Deze formules vormen de vigerende kennisbasis voor de toetsing van kunstwerken met verticale keermiddelen (coupures, (keer)sluizen) voor het toetspooor *hoogte* bij kunstwerken in het WTI2017. Opgemerkt wordt dat voor kunstwerken waarbij de kerende hoogte wordt verzorgd door het dijklichaam (denk aan duikers, persleidingen van gemalen) de hoogtetoets onderdeel is van de beoordeling van het toetspooor *hoogte* in het dijkenpooor.

In 2007 is de EurOtop-manual [EurOtop 2007] verschenen. Met de EurOtop-manual is het mogelijk samengestelde constructies met verticale delen nauwkeuriger te berekenen. In 2014 zijn nieuwe inzichten gepubliceerd in [Meer e.a. 2014]. Uiteindelijk moet dit resulteren in een update van [EurOtop 2007], die naar verwachting in 2015 of 2016 verschijnt. De inzichten die in [Meer e.a. 2014] zijn gepubliceerd hebben echter nog niet de status 'definitief'; op sommige punten is de verwachting dat de resultaten uit [Meer e.a. 2014] nog worden aangescherpt in de EurOtop 2015.

5.3.2 Vastlegging vigerende kennisbasis en keuze WTI

De vigerende kennisbasis is vastgelegd in het *Achtergrondrapport modellering optredend overslag-/overloopdebiet bij hoogtetoets kunstwerken* [DLT-ookw 2015]. Hierin is tevens vastgelegd dat binnen het WTI2017 is gekozen voor de modellering zoals in de Leidraad Kunstwerken [TAW, 2003] wordt gehanteerd. De redenen voor deze keuze zijn eveneens in [DLT-ookw 2015] te vinden. Onderstaand zijn de modellen opgenomen die binnen het WTI2017 worden gehanteerd.

Voor het berekenen van het overslaande / overlopende debiet over het hoogwaterkerend gesloten kunstwerk worden drie modellen gebruikt, alle afkomstig uit [TAW, 2003]:

- I. Buitenwaterstand is lager of gelijk dan de kerende hoogte van het kunstwerk. In dit geval is alleen sprake van golfoverslag
- II. Buitenwaterstand is hoger dan de kerende hoogte van het kunstwerk en er zijn geen of afluende golven. In dit geval is er sprake van een overloopsituatie
- III. Buitenwaterstand is hoger dan de kerende hoogte van het kunstwerk en er zijn golven. In deze situatie wordt het instromende debiet met een combinatieformule bepaald.

Met het overslag-/overloopdebiet wordt bedoeld: het debiet dat over de harde constructie van het kunstwerk stroomt (bijvoorbeeld sluisdeuren). In deze situatie is er geen direct contact tussen binnen- en buitenwater. Het binnenwater heeft dan ook geen invloed op de grootte van het instromende debiet. Alle overloopformules ([5-5] en [5-6]) zijn daarom ook afgeleid van een situatie met een volkomen overlaat, waarbij het binnenwater geen invloed heeft op het instromende debiet.

Alle drie de modellen zijn afgeleid voor verticale wanden met relatief diep water aan de buitenwaterzijde van de constructie. Relatief diep water wil zeggen dat de golfhogte klein is ten opzichte van de waterdiepte, of meer concreet, als de inkomende golfhogte vlak voor de constructie niet groter is dan ongeveer 1/3 van de waterdiepte.

Indien wel sprake is van zwaar golfbreken – bijvoorbeeld bij keerwanden of muren op een kade, waarbij veel breken van golven op de ondergelopen kade zelf wordt verwacht – wordt verwezen naar [WL-gkvw 1998].

Bij constructies die meer onderdeel van een dijk zijn dan een constructie die apart moet worden beschouwd – bijvoorbeeld hooggelegen coupures – wordt voor de kennisbasis omtrent de bepaling van het optredende overslag-/overloopdebiet verwezen naar [TAW-GG 2002]. Dergelijke situaties zijn geen onderdeel van het toetsinstrumentarium dat wordt ontwikkeld voor de eenvoudige of gedetailleerde toets. Dergelijke afwijkende omstandigheden moeten in de Toets op Maat beschouwd worden.

5.3.2.1 *Situatie I: instromend debiet bij golfoverslag*

De formule voor het instromende debiet als gevolg van golfoverslag is (zie formule B2.4 uit [TAW, 2003]):

$$q_{os} = m_{os} \cdot \sqrt{g \cdot (H_s)^3} \cdot e^{\left(-3,0 \frac{h_{kh} - h}{H_s} \frac{1}{\gamma_\beta \cdot \gamma_n} \right)} \quad h_{kh} \geq h_{buit} \quad 5-1$$

met:

$$\gamma_\beta \Rightarrow \begin{cases} \beta \leq 20^\circ & \Rightarrow \gamma_\beta = 1 \\ 20^\circ < \beta < 90^\circ & \Rightarrow \gamma_\beta = \max\{\cos(\beta - 20); 0,7\} \\ \beta \geq 90^\circ & \Rightarrow \gamma_\beta = 0 \end{cases} \quad 5-2$$

$$\gamma_n \Rightarrow \begin{cases} \frac{h_{kh} - h}{H_s} \leq 0,5 & \Rightarrow \gamma_n = 1 \\ 0,5 < \frac{h_{kh} - h}{H_s} \leq 1 & \Rightarrow \gamma_n = 1,3 - 0,6 \cdot \frac{h_{kh} - h}{H_s} \\ \frac{h_{kh} - h}{H_s} > 1 & \Rightarrow \gamma_n = 0,7 \end{cases} \quad 5-3$$

Hierin is:

q_{os}	[m ³ /s/m ¹]	Gemiddeld overslagdebiet over een verticale wand
m_{os}	[-]	Modelfactor voor overslagdebiet. Voor deterministische berekeningen geldt $m_{os}=0,13$. Voor probabilistische analyses geldt voor m_{os} een lognormale verdeling met gemiddelde $\mu=0,09$ en een spreiding $\sigma=0,06$ ⁷ .
g	[m/s ²]	Gravatieversnelling ($g=9,81$ m/s ²)
H_s	[m]	Significante golfhoogte
h	[mNAP]	Lokale buitenwaterstand
h_{kh}	[mNAP]	Kerende hoogte kunstwerk
β	[°]	Hoek van golfaanval. Dit is de hoek tussen de golfrichting en de normaal van het kunstwerk
γ_n	[-]	Invloedsfactor neusconstructie (minimale afmetingen neusconstructie te bepalen met [TAW-LZM 1999a] Figuur 5.7.1
γ_β	[-]	Invloedsfactor scheve golfaanval

Het gemiddeld overslagdebiet is een rekengrootheid. In werkelijkheid is er geen constant debiet, maar gaat er nu en dan bij een hoge golf een grote hoeveelheid water over de constructie heen en dan weer een lange tijd niets. Deze overslaghoeveelheden per golf hangen af van de golfhoogte en de afstand tussen de waterstand (stilwaterlijn) en de kruinhoogte. Hoe groter de golfhoogte hoe groter de hoeveelheden in een hoge overslag kunnen zijn, overigens bij eenzelfde gemiddeld overslagdebiet. Een paar grote overslaande golven kunnen immers eenzelfde debiet geven als vele kleine golfjes.

In de Leidraad Kunstwerken [TAW, 2003] wordt nog gesproken over het toepassen van een aanvullende windfactor indien er kleine overslagdebieten optreden ($q_{os} \leq 10$ l/s/m). Deze factor brengt het debiet in rekening, dat door de wind over de kering wordt geblazen op het moment dat vanuit een golf opgestuwd water tegen een verticale wand boven de kruin uitkomt [WL-khk 2000]). Deze factor is alleen van toepassing in situaties met relatief ondiep water en een relatief grote waakhoogte (de kerende hoogte van het kunstwerk ligt dus ruim boven de stilwaterstand). Een dergelijke situatie kan zich voordoen bij lage coupures⁸. Bij bijvoorbeeld keersluizen en schutsluizen komt dit niet voor. Hieronder is voor de volledigheid in formulevorm de aanpassing van het debiet aangegeven:

$$q_{os,w} = \gamma_w \cdot q_{os}$$

$$\gamma_w \Rightarrow \begin{cases} q_{os} < 1 \text{ l/s/m} & \Rightarrow \gamma_w = 3 \\ 1 \leq q_{os} \leq 10 \text{ l/s/m} & \Rightarrow \gamma_w = -\frac{2}{9} \cdot q_{os} + 3\frac{2}{9} \\ q_{os} > 10 \text{ l/s/m} & \Rightarrow \gamma_w = 1 \end{cases} \quad 5-4$$

⁷ Opgemerkt wordt dat dit andere waarden zijn dan in de Leidraad Kunstwerken staat aangegeven. De waarden die in de Leidraad Kunstwerken staan weergegeven zijn niet correct. Voor meer informatie wordt verwezen naar [PAO-LKW08 2007]

⁸ Bijvoorbeeld coupures op een kade, waar direct voor de coupure het water op de kade staat en dus sprake is van een relatief lage waterstand.

Opgemerkt wordt dat kleine golfoverslagdebieten ($q_{os} \leq 10 \text{ l/s/m}^1$) geen rol spelen bij zowel het deelfaalmechanisme sterkte bodembescherming als het deelfaalmechanisme komberging. De factor γ_w is daarom ook niet meegenomen in de modellering binnen PC-Ring en HydraRing.

Geldigheidsgebied

De formule is geldig:

- Voor verticale wanden.
- Als de inkomende golfhoogte vlak voor de constructie niet groter is dan ongeveer 1/3 van de waterdiepte.
- Als de buitenwaterstand kleiner of gelijk is aan de kerende hoogte van het kunstwerk.
- Onder voorwaarde dat geen zwaar golfbreken vlak voor de constructie plaatsvindt.

Bij waterstanden hoger dan de kerende hoogte van het kunstwerk mag formule 5-1 niet gebruikt worden en moeten de formules uit de volgende paragrafen worden toegepast. Indien zwaar golfbreken optreedt vlak voor het kunstwerk dan kan formule 5-1 eventueel wel gebruikt worden maar geeft een overschatting van het optredende overslagdebiet.

Voor constructiedelen die niet verticaal lopen wordt het overslagdebiet juist onderschat bij gebruik van formule 5-1. Hiervoor zijn diverse andere formules uit onderzoek naar golfoverslag bij dijken beschikbaar. Omdat deze situatie bij kunstwerken nauwelijks voorkomt, wordt hier niet nader op ingegaan.

5.3.2.2 Situatie II: instromend debiet bij overloop

De formule voor het instromende debiet als gevolg van overloop (bovenkant kunstwerk is lager dan buitenwaterstand en er zijn geen golven) is (zie formule B2.16 uit [TAW, 2003]):

$$q_{ol} = m_{ol} \cdot 0,55 \cdot \sqrt{-g \cdot (h_{kh} - h)^3} \quad h_{kh} < h \quad 5-5$$

Hierin is:

q_{ol}	[m ³ /s/m ¹]	Overloopdebiet over een verticale wand
m_{ol}	[-]	Modelfactor voor overloopdebiet afhankelijk van verhouding tussen straal van de kruin en de overloophoogte (veelal wordt aangehouden $m_{ol} = 1,1$, de waarde kan variëren tussen 1 en 1,3)
g	[m/s ²]	Gravatieversnelling ($g=9,81 \text{ m/s}^2$)
h	[mNAP]	Lokale buitenwaterstand
h_{kh}	[mNAP]	Kerende hoogte kunstwerk

Geldigheidsgebied

De formule is geldig:

- Voor verticale wanden.
- Als de buitenwaterstand groter is dan de kerende hoogte van het kunstwerk.
- Als er geen of aflandige golven zijn.
- Als er sprake is van een rechthoekig aanstroomkanaal. Voor de situaties bij waterkerende kunstwerken is dit nagenoeg altijd het geval.

Bij waterstanden kleiner of gelijk aan de kerende hoogte van het kunstwerk mag formule 5-5 niet gebruikt worden en moet formule 5-1 worden toegepast. Indien wel sprake is van golven dan moet formule 5-6 gebruikt worden.

Voor constructiedelen die niet verticaal lopen zijn diverse andere formules uit onderzoek naar overloop bij dijken beschikbaar. Omdat deze situatie bij kunstwerken eigenlijk nooit voorkomt, wordt hier niet nader op ingegaan.

5.3.2.3 *Situatie III: instromend debiet bij zowel golfoverslag als overloop*

De formule voor het instromende debiet als gevolg van zowel golfoverslag als overloop is (zie formule B2.17 uit [TAW, 2003]):

$$q_{os/ol} = m_{ol} \cdot 0,55 \cdot \sqrt{-g \cdot (h_{kh} - h)^3} + m_{os} \cdot \sqrt{g \cdot (H_s)^3} \quad h_{kh} < h \quad 5-6$$

Hierin is:

$q_{os/ol}$	[m ³ /s/m ¹]	Gemiddeld overslag/overloopdebiet over een verticale wand
m_{ol}	[-]	Modelfactor voor overloopdebiet afhankelijk van verhouding tussen straal van de kruin en de overloophoogte (algemeen geldt $m_{ol} = 1,1$)
m_{os}	[-]	Modelfactor voor overslagdebiet. Voor deterministische berekeningen geldt $m_{os}=0,13$. Voor probabilistische analyses geldt voor m_{os} een lognormale verdeling met gemiddelde $\mu=0,09$ en een spreiding $\sigma=0,06$ ⁹ .
g	[m/s ²]	Gravatieversnelling ($g=9,81$ m/s ²)
h	[mNAP]	Lokale buitenwaterstand
h_{kh}	[mNAP]	Kerende hoogte kunstwerk
H_s	[m]	Significante golfhoogte

Geldigheidsgebied

De formule is geldig:

- Voor verticale wanden.
- Als de inkomende golfhoogte vlak voor de constructie niet groter is dan ongeveer 1/3 van de waterdiepte.
- Als de buitenwaterstand groter is dan de kerende hoogte van het kunstwerk.
- Als er golven zijn, onder voorwaarde dat geen zwaar golfbreken vlak voor de constructie plaatsvindt.
- Als er sprake is van een rechthoekig aanstroomkanaal. Voor de situaties bij waterkerende kunstwerken is dit nagenoeg altijd het geval.

Voor opmerkingen hoe om te gaan met situaties buiten het geldigheidsgebied wordt verwezen naar de vorige paragrafen.

5.3.2.4 *Samenvattende formule overslag-/overloopdebiet*

Bovenstaande kan worden samengevat in de volgende formule:

$$q_{os/ol} = ALS(h \leq h_{kr}; q_{os}; ALS(H_s = 0; q_{ol}; q_{os+ol})) \quad 5-7$$

5.4 Historie en kennisbasis sterktemodellen

5.4.1 Historie en recente kennisontwikkeling

Al in de jaren dertig van de vorige eeuw zijn door Shields en Izbash belangrijke stabiliteitsrelaties afgeleid voor de stabiliteit van loskorrelige (granulaire) materialen onder

⁹ Opgemerkt wordt dat dit andere waarden zijn dan in de Leidraad Kunstwerken staat aangegeven. De waarden die daarin staan weergegeven zijn niet correct. Voor meer informatie wordt verwezen naar [PAO-LKW08 2007]

stroming. Deze relaties hebben de basis gevormd voor nader onderzoek door andere onderzoekers. Dit heeft geleid tot nadere verfijningen van de relaties door Shields en Izbash. De (in Nederland meest gebruikte) formule van Pilarczyk, die in de jaren negentig is gepubliceerd, is hier een voorbeeld van. In [CIRIA-C683 2007] en zijn voorlopers zijn deze relaties in de loop der tijd gepubliceerd.

Naar de stabiliteit van loskorrelige (granulaire) materialen onder stroming is in de loop der jaren veel onderzoek gedaan. Overige bodembeschermingstypen (denk aan blokkenmatten, steenasfaltmatten, mastiek, gepenetreerde materialen et cetera) zijn veel minder intensief beproefd. Met name in de jaren zeventig en tachtig is in Nederland onderzoek verricht naar de bodembeschermingstypen die men bij de Oosterscheldekering wilde toepassen (blokkenmatten, steenasfaltmatten, mastiek). Grootschalig, fundamenteel onderzoek ontbreekt echter. Binnen het SBW / WTI-programma heeft op dit vlak geen kennisontwikkeling plaatsgevonden.

5.4.2 Kennisbasis sterkte bodembescherming

De sterkte van een bodembescherming wordt uitgelegd op de maximaal optredende stroomsnelheden die ter plaatse van de bodembescherming optreden. Al naar gelang het stromingsbeeld wordt deze bodembescherming over een bepaalde lengte uitgelegd.

Zoals in de inleiding van dit hoofdstuk aangegeven, vindt een vergelijking van de optredende stroomsnelheid ter plaatse van de bodembescherming met de kritieke stroomsnelheid op indirecte wijze via de natuurkundige eenheid 'debiet' plaats. Dat betekent dat de sterkte van de bodembescherming uiteindelijk ook uitgedrukt wordt in een debiet; het kritieke debiet. Dit kritieke debiet kan worden bepaald middels de volgende formule:

$$Q_c = u_c \cdot (h_{bi} - h_{dr}) \cdot B_{sv} \quad 5-8$$

Hierin is:

Q_c	Kritiek instromend debiet met betrekking tot bezwijken bodembescherming [m ³ /s/m].
u_c	Gemiddelde kritieke stroomsnelheid met betrekking tot de bodembescherming [m/s].
h_{bi}	Gemiddelde binnenwaterstand [m NAP].
h_{dr}	Hoogte bovenkant bodembescherming (vaak is dit gelijk aan hoogte drempel) [mNAP].
B_{sv}	Stroomvoerende breedte ter plaatse van de bodembescherming [m].

De diverse onderdelen van de bovenstaande formule worden in de volgende subparagrafen nader toegelicht.

5.4.2.1 Kritieke stroomsnelheid bodembescherming

Een bodembescherming wordt specifiek ontworpen op een bepaalde maximaal optredende stroomsnelheid. Deze stroomsnelheid wordt bijna altijd bepaald door de primaire functie van het kunstwerk. Bij een schutsluis zijn bijvoorbeeld de schroefstraalbelastingen van de passerende schepen vaak maatgevend voor de bodembescherming. Op een overslag-/overloopdebiet van betekenis wordt zelden een bodembescherming specifiek uitgelegd.

De kritieke stroomsnelheid met betrekking tot de bodembescherming is afhankelijk van de opbouw van de bodembescherming. Ter bepaling hiervan zijn meerdere modellen beschikbaar die allemaal hun eigen specifieke eigenschappen en randvoorwaarden kennen. De vigerende kennisbasis is vastgelegd in het *Achtergrondrapport bepaling kritiek overslag-*

/overloop-/instroomdebiet bij kunstwerken [DLT-kdkw 2015]. Hierin wordt onderscheid gemaakt naar twee belastingsituaties:

- Bodembescherming belast door stroming.
- Bodembescherming belast door een overstortende straal.

Bodembescherming belast door stroming

In deze situatie zijn de nodige stabiliteitsrelaties beschikbaar (onder andere Izbash, Shields en Pilarczyk), die echter hoofdzakelijk zijn afgeleid voor granulaire materialen. Voor andere bodembeschermingstypen is de beschikbare informatie veel schaarser. Aanbevolen wordt voor de toetsing bij voorkeur de formules van Pilarczyk te hanteren, tenzij het naar de mening van de toetsers in een specifieke situatie beter is een andere relatie te hanteren.

Bodembescherming belast door een overstortende straal

Indien de bodembescherming wordt belast door een overstortende straal dan zijn er echter nauwelijks bruikbare stabiliteitsrelaties beschikbaar. In [DLT-kdkw 2015] is een eerste aanzet gedaan tot nadere kennisontwikkeling; deze aanzet heeft echter voor het WTI2017 nog geen concreet bruikbare toepassing opgeleverd. In deze situatie kan met de volgende generieke kentallen gewerkt worden:

- Voor coupures geldt $q_c > 0,1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ als voldaan wordt aan de volgende voorwaarden:
 - De coupures zijn gesloten.
 - Aan de binnenzijde van een coupure kan het water direct weglopen of worden afgevoerd.
 - De bodem aan de binnenzijde van een coupure bestaat uit een dicht rijdek en/of bestrating. In de praktijk werd hierbij vaak onderscheid gemaakt in een asfaltbestrating en een elementbestrating (klinkers, tegels), waarbij voor een elementbestrating $q_c = 0,05 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ (50 l/s/m) werd aangehouden.
- Voor sluizen en gemalen geldt $q_c > 1,0 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ als voldaan wordt aan de volgende voorwaarden:
 - De sluizen en gemalen zijn gesloten.
 - De bodem aan de binnenzijde van een sluis en/of gemaal moet zijn beschermd door een laag stortsteen.
 - Aan de binnenzijde van de sluis is een binnenwater (geul, kom, havenbekken, kanaal e.d.) aanwezig, zodat de overstortende straal niet direct op de bodem(bescherming) stort.

Lokale versus dieptegemiddelde stroomsnelheid

De stromingssnelheid in een open watergang kent een parabolisch verloop over de diepte, waarbij de stroomsnelheid aan de bodem nul is als gevolg van wrijving met de bodem. Aan het vrije wateroppervlak is de stroomsnelheid het grootste. Bij bepaling van de bodembescherming wordt vaak gewerkt met de gemiddelde stroomsnelheid (zie bv modellen van Izbash, Shields en Pilarczyk). In de formules van betreffende modellen is de coëfficiënt van Chézy opgenomen, waarmee onder andere de gemiddelde stroomsnelheid wordt omgerekend naar de stroomsnelheid nabij de bodem.

Conditie bodembescherming

Ten slotte wordt opgemerkt dat de conditie van de bodembescherming uiteraard van belang is voor de op te voeren kritieke stroomsnelheid. Indien een bestaande bodembescherming wordt getoetst is het van belang te weten of deze bodembescherming nog intact is. Middels

inspecties en/of lodingen kan hier in veel gevallen een uitspraak over worden gedaan. Hierbij geldt dat een onderwaterinspectie nauwkeurigere gegevens oplevert dan een loding.

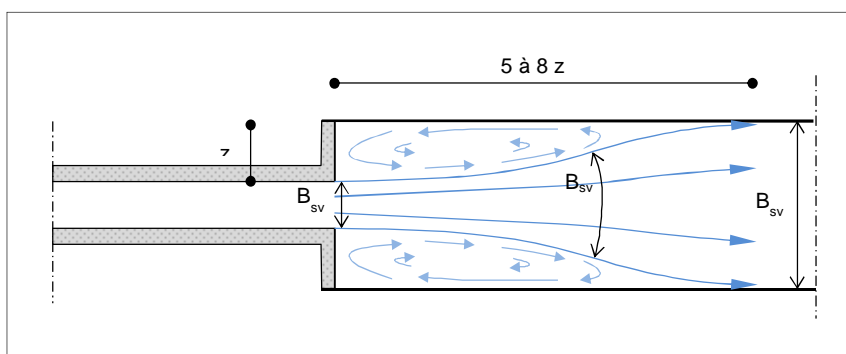
5.4.2.2 Waterdiepte boven bodembescherming

Aangezien de analyse met betrekking tot de bodembescherming wordt uitgevoerd op het niveau van debieten, dient de kritieke stroomsnelheid te worden vermenigvuldigd met het doorstroomoppervlak ter plaatse van de bodembescherming. Hierbij is de waterdiepte één van de dimensies die dit doorstroomoppervlak bepalen.

De waterdiepte kan worden bepaald door het niveau van de bovenkant van de bodembescherming af te trekken van het niveau van de vrije waterspiegel. Aangezien de bodembescherming aan de binnenzijde van de waterkering wordt beschouwd, wordt hierbij gesproken over binnenwaterstand. Het niveau van de bodembescherming is vaak gelijk aan het niveau van de bovenkant van de bodem van het kunstwerk. Het kan echter voorkomen dat hierin een verschil aanwezig is.

5.4.2.3 Stroomvoerende breedte

De breedte van het doorstroomoppervlak ter plaatse van de bodembescherming wordt aangeduid als stroomvoerende breedte. Deze breedte is afhankelijk van de locatie waar de bodembescherming wordt beschouwd en de aanwezigheid van eventuele neren die ontstaan bij het uitstromen van het water uit het kunstwerk.



Figuur 5.1 Stroomvoerende breedte per locatie bij aanwezigheid neren

5.4.3 Keuze model WTI2017

Voor het WTI2017 wordt het model zoals toegepast in VNK2 ook gebruikt. De enige wijziging die wordt aangebracht is dat het in het WTI2017 niet meer mogelijk is om gebruik te maken van een ingebouwd Shields-model. Dit is verwijderd omdat het nagenoeg niet werd toegepast. Daarvoor was de benodigde informatie vaak niet voorhanden of week de stromingssituatie te veel af van het model.

In het WTI2017 dient men buiten het instrumentarium om een inschatting te maken van de kritieke gemiddelde stroomsnelheid met betrekking tot de bodembescherming. Deze waarde dient vervolgens in de preprocessing te worden vermenigvuldigd met de waterdiepte, zodat een waarde voor q_c [$\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$] ontstaat. Deze waarde kan worden ingevuld in het instrumentarium. Daarnaast dient de stroomvoerende breedte te worden ingevuld.

5.5 Referenties

[CIRIA-C683 2007]

The Rock Manual – The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition),
CIRIA, CUR, CETMEF, 2013;

[DLT-dfk 2015]

Definitie falen bij kunstwerken

Deltares, R. Delhez, B. van Bree, kenmerk 1220087-006-GEO-0004, versie 03, 9 november
2015

[DLT-kdkw 2015]

WTI 2017 Kunstwerken - Achtergrondrapport toetsspoor Hoogte II - Bepaling kritiek overslag-
/overloopdebiet

Deltares, 1220087-001-GEO-0011, Versie D1, 22 december 2015, definitief

[DLT-ookw 2015]

Kennisbasis instromend debiet bij overslag en/of overloop over het gesloten kunstwerk

Deltares, kenmerk 1220087-001-GEO-0004 definitief, augustus 2015

[EurOtop 2007]

EurOtop wave overtopping of sea defences and related structures: assessment manual,
Environment Agency/Expertise Netwerk Waterkeren/Kuratorium für Forschung im
Küsteningenieurwesen, augustus 2007;

[Meer e.a. 2014]

EurOtop revisited. Part 1: sloping structures & Part 2: Vertical Structures
Meer et al, 2014

[PAO-LKW08 2007]

LKW08 Oefening controle op kerende hoogte

R. Gajadhar, PAO-cursus Leidraad Kunstwerken, 2007

[TAW, 2003]

Leidraad Kunstwerken,

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

[TAW-GG 2002]

Technisch Rapport Golfoploop en golfoverslag bij dijken,

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, mei 2002

[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-LZM 1999a]

Leidraad Zee- en Meerdijken

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, december 1999

[TAW-WKBC 1997]

Leidraad Waterkerende Kunstwerken en Bijzondere Constructies,
Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 1997;

[TAW-bWKBC 1997]

Basisrapport Waterkerende Kunstwerken en Bijzondere Constructies,
Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 1997;

[WL-gkw 1998]

Golfoverslag en krachten op verticale waterkeringsconstructies

WL|Delft Hydraulics, kenmerk H2014, F. den Heijer, 1998

[WL-khk 2000]

Kerende hoogte kunstwerken (methodiek)

WL | Delft Hydraulics, J.W. van der Meer, rapport nr. i336, 2000

6 Beschrijving deelfaalmechanisme Z_{12} : Kans bezwijken kunstwerk als gevolg van erosie bodem

6.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt het deelfaalmechanisme Z_{12} : *Kans bezwijken kunstwerk als gevolg van erosie bodem* nader beschreven. Hierbij wordt eerst de historie en kennisbasis vastgelegd, waarna wordt ingegaan op eventuele nieuwe ontwikkelingen. Er wordt een onderbouwde keuze gemaakt voor het te hanteren model binnen het WTI2017.

Het model voor dit deelfaalmechanisme bestaat uit een schatting voor de kans op bezwijken (kantelen, ernstig verzakken etc) van het kunstwerk nadat er erosie van de bodembescherming is opgetreden. Voor de Z-functie wordt verwezen naar paragraaf 3.5.

6.2 Historie en kennisbasis

Het deelfaalmechanisme is in de toetsingen tot 2017 [DWW-VTV01 2004], [DWW-VTV06 2007] niet expliciet genoemd. Wel wordt bij *betrouwbaarheid sluiting* in de gedetailleerde en geavanceerde toets gesproken over het aantonen dat de kans op bresgroei bij geopende keermiddelen klein moet zijn. Bij *hoogte* wordt gesproken over standzekerheid van het kunstwerk bij bepaalde overslag/overloopdebieten.

Er worden geen concrete handvatten gegeven voor het bepalen van de bresgroei danwel standzekerheid. Als gevolg hiervan is in de praktijk weinig gebruik gemaakt van deze aspecten. Indien hiervan wel gebruik gemaakt werd, bleek kwantificering niet altijd even gemakkelijk.

Er is geen sprake van specifieke kennis omtrent het faalmechanisme. Een beschrijving van het geheel bezwijken van een kunstwerk als gevolg van erosie van de bodembescherming is momenteel niet voorhanden. Wel zijn enkele modellen bekend die een deel van dit proces beschrijven. Hierbij valt met name te denken aan het ontstaan van erosiekuilen.

6.3 Beschrijving van het model

Het model dat binnen VNK2 voorhanden was en ook in het WTI2017 wordt gebruikt bestaat uit het onderbouwd schatten van een kans op bezwijken als gevolg van het eroderen van de bodembescherming (zie formule 3-17 in paragraaf 3.5.2).

Voor het schatten van een kans voor het deelfaalmechanisme Z_{12} *Kans bezwijken kunstwerk a.g.v. erosie bodem* zijn de volgende fasen van belang:

1. Eroderen van de bodembescherming.
2. Optreden van dusdanige erosie van de bodem dat de fundatie van het kunstwerk ernstig verzwakt raakt. Een algemeen beeld hierbij is het ontstaan van erosiekuilen direct achter de constructie. Ook is het mogelijk dat overslaand/overlopend water over het gesloten kunstwerk leidt tot erosie van de aansluitende grondconstructies.
3. Instabiel worden van de constructie.
4. Geheel bezwijken van de constructie.

Onder het geheel bezwijken van de constructie wordt in deze context verstaan:

Het dusdanig verzakken of kantelen van de constructie dat er sprake is van een onbeheersbare situatie, waardoor een zodanige hoeveelheid water het achterland in kan stromen dat sprake is van significante gevolgen¹⁰.

- Ad 1. Het eroderen van de bodembescherming onder instroming van water door overslag en/of overloop over het gesloten kunstwerk, wordt beschreven door het deelfaalmecanisme Z_{11} *Bezwijken bodembescherming achter het kunstwerk* (zie hoofdstuk 5).
- Ad 2. Er zijn modellen beschikbaar waarmee afmetingen (lengte, breedte en diepte) van ontgrondingskuilen kunnen worden bepaald, zie onder andere hoofdstuk 16 van Handboek Ontwerpen van Schutsluizen [RWS-OS 2000]. Hierbij wordt opgemerkt dat deze modellen alleen van toepassing zijn op niet-cohessieve gronden.
- Ad 3. Het instabiel worden van de constructie vindt plaats doordat er dusdanige erosiekuilen optreden dat de horizontale, verticale en/of kantelstabiliteit van het kunstwerk in gevaar komt.
- Ad 4. Indien de constructie instabiel wordt, ontstaat een daadwerkelijke kans op bezwijken van de constructie. Of dit plaatsvindt is afhankelijk van de vervorming van het kunstwerk en de mogelijkheden tot het ontstaan van een onbeheersbare situatie (met bijvoorbeeld bresgroei tot gevolg).

In het verleden is bij het uitvoeren van de wettelijke toetsing van kunstwerken slechts zelden aandacht besteed aan dit deelfaalmecanisme. Debet hieraan is:

- In beginsel werd voornamelijk getoetst op wateroverlast als criterium. Het optreden van substantiële overstromingsgevolgen werd nagenoeg niet meegenomen.
- Het onderbouwd een waarde toekennen van een kans op bezwijken als gevolg van erosie vergt de nodige berekeningen en schattingen. Zelfs indien de benodigde gegevens voorhanden zijn (wat vaak niet het geval is) ontbreekt een onderbouwde methodiek.

Binnen VNK2 is het deelfaalmecanisme expliciet opgenomen in de modellen. Handreikingen en/of modellen, waarmee een kans kan worden ingeschat, zijn echter niet gegeven. Als gevolg hiervan is binnen VNK2 nagenoeg altijd ervan uitgegaan dat een kunstwerk (uiteindelijk) bezwijkt als erosie van de bodembescherming is opgetreden.

Mogelijkheden om een inschatting van een waarde voor het deelfaalmecanisme te maken zijn het hanteren van berekeningen voor ontgrondingskuilen en het analyseren van de opbouw van de constructie. Voor de berekening van ontgrondingskuilen zijn meerdere formules voorhanden [RWS-OS 2000]. Belangrijk bij deze berekeningen is de diepte van de ontgrondingskuil in relatie tot de opbouw van de constructie. Een methode om gegeven de diepte van een ontgrondingskuil een kans op bezwijken in te schatten ontbreekt echter.

6.4 Nieuwe kennis

Op het gebied van het ontstaan van ontgrondingskuilen en de diepte hiervan zijn de laatste jaren meerdere onderzoeken beschikbaar gekomen. Hieruit blijkt dat het goed voorspellen van deze ontgrondingskuilen een relatief ontoegankelijk formulepark kent. Daarbij benodigd is

¹⁰ Voor instroming bij kunstwerken wordt binnen het WTI de volgende definitie van 'significante gevolgen' gehanteerd: meer dan 10 miljoen euro schade en/of tenminste 1 slachtoffer.

uiteraard een goed inzicht in de materiaalopbouw van de bodem ter plaatse van het kunstwerk. Naar de relatie tussen de ontgrondingskuildiepte en de kans op bezwijken van een kunstwerk is echter geen onderzoek beschikbaar. Binnen het WTI heeft op dit vlak ook geen kennisontwikkeling plaatsgevonden.

Niet nieuw maar wel een belangrijke eerste stap kan worden gezet door in eerste instantie alleen naar de constructieopbouw te kijken en te beschouwen of een ontgrondingskuil invloed zou kunnen hebben op de stabiliteit van het kunstwerk.

6.5 Keuze model WTI2017

Er wordt voor gekozen om het model zoals dat binnen VNK2 is gebruikt te handhaven, waardoor de mogelijkheid wordt geboden om de faalkans voor *overslag / overloop* aan te scherpen. Dit betekent dat door de gebruiker een kans op bezwijken kunstwerk gegeven erosie van de bodem kan worden ingevoerd, welke buiten het instrumentarium om onderbouwd moet worden. Er is niet gekozen voor het verder implementeren van faalmodellen die het bezwijken beschrijven. Hiertoe is besloten op basis van de volgende gronden:

- De beschikbare modellen voor het bepalen van ontgrondingskuilen zijn over het algemeen niet erg toegankelijk.
- Ten einde modellen van ontgrondingskuilen te kunnen gebruiken zijn bepaalde gegevens nodig die vaak geheel niet of niet actueel voor handen zijn.
- Niet alleen de aanwezigheid en afmetingen van ontgrondingskuilen speelt een rol, maar ook de constructieopbouw (en met name de fundering) van het kunstwerk is van belang. Een eenvoudige methode om een kans op bezwijken in te schatten als de diepte van een ontgrondingskuil en de opbouw van het kunstwerk bekend is ontbreekt.

In eerste instantie worden de objecten getoetst aan het faalcriterium, wat in het geval van *overslag/overloop* betekent dat getoetst wordt op het overslaan/overlopen van dusdanig veel water over het gesloten kunstwerk dat significante gevolgen in het achterland optreden, danwel dat de bodembescherming achter het kunstwerk erodeert. Het meenemen van reststerkte is de overstap van overschrijden van het faalcriterium naar daadwerkelijk bezwijken van de waterkering. Deze overstap zit feitelijk in toetslaag 3 (toets op maat).

6.6 Referenties

[DWW-VTV01 2004]

De veiligheid van de primaire waterkeringen in Nederland, Voorschrift toetsen op veiligheid voor de tweede toetsronde 2001-2006 (VTV),
Dienst Weg- en Waterbouwkunde (RWS), ISBN 90-369-5558-0, januari 2004;

[DWW-VTV06 2007]

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

[RWS-OS 2000]

Ontwerp van schutsluizen
Rijkswaterstaat, Bouwdienst, ISBN 90-369-3306-4, juni 2000

7 Beschrijving deelfaalmechanisme Z_{13} : Onvoldoende bergend vermogen

7.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt het deelfaalmechanisme Z_{13} : *Onvoldoende bergend vermogen* nader beschreven. Hierbij wordt eerst de historie en kennisbasis vastgelegd, waarna wordt ingegaan op eventuele nieuwe ontwikkelingen. Er wordt een onderbouwde keuze gemaakt voor het te hanteren model binnen het WTI2017.

Het model voor dit deelfaalmechanisme bestaat uit een vergelijking van het kombergend vermogen met de hoeveelheid water die bij een niet-gesloten kunstwerk gedurende een hoogwatergolf naar binnen stroomt. Voor de Z-functie wordt verwezen naar paragraaf 3.6.

7.2 Definitie en historie

7.2.1 Definitie

Het kombergend vermogen in relatie tot *overslag/overloop* is het kritieke volume water dat gedurende een hoogwaterperiode over een of meerdere kunstwerk(en) mag stromen zonder dat dit leidt tot significante gevolgen in het achterliggende watersysteem dan wel gebied.

Binnen het WTI is de term 'significante gevolgen' gedefinieerd als een schade van minimaal 10 miljoen euro en/of tenminste 1 slachtoffer. Hoewel dit een eenduidig en helder gedefinieerd criterium is, is het in de praktijk bewerkelijk om hieraan te toetsen. Daarom wordt in toetslaag 2 een praktische werkwijze gevolgd, waarbij wordt aangehouden dat significante gevolgen optreden als:

- Het normpeil van het regionale watersysteem wordt overschreden (indien het watersysteem van de komberging is omringd door 'zachte' kades).
- Bij 0,3 m water op straat/maaiveld (indien het watersysteem van de komberging is omringd door kades die niet door kunnen breken of als achter de kering geen regionaal watersysteem aanwezig is).

In bijlage C wordt hierop een nadere toelichting gegeven, alsmede aanknopingspunten voor een nadere uitwerking in toetslaag 3.

7.2.2 Historie

De basis van het deelfaalmechanisme wordt beschreven in de Leidraad Kunstwerken (bijlage B2 uit [TAW, 2003]). Hierin wordt een eenvoudige benadering van het aanwezige kombergend vermogen uitgewerkt. Met betrekking tot het instromende volume aan water geldt dat de formules voor het optredend debiet uit paragraaf 5.3 kunnen worden toegepast. In de afgelopen wettelijk toetsronden is sporadisch gebruik gemaakt van het kombergend vermogen bij de gedetailleerde dan wel geavanceerde methode. In VNK heeft komberging meer aandacht gekregen, omdat er ook een model voor beschikbaar was.

In de volgende paragrafen wordt de kennisbasis verder uitgewerkt, waarbij eerst gekeken wordt naar de aanwezige 'belasting' (instromende volume bij *overslag/overloop*) en vervolgens naar de 'sterkte' (aanwezige komberging).

7.3 Kennisbasis instromend volume (belasting)

Het instromende volume wordt bepaald door een sommatie van het tijdsafhankelijke instromende debiet. Deze tijdsafhankelijkheid wordt veroorzaakt door de veranderende buitenwaterstand gedurende een hoogwatergolf en de variatie in de binnenwaterstand mede als gevolg van het instromende volume. Dit beïnvloed uiteindelijk de drijvende kracht achter de instroming zijnde het verval tussen buiten en binnen.

In eerste instantie wordt gekeken naar de modellen waarmee het instromende debiet per tijdseenheid kan worden bepaald. De relatie met de tijdsafhankelijkheid komt daarna nog aan bod.

7.3.1 Modellen instromend debiet

De vigerende kennisbasis is vastgelegd in het *Achtergrondrapport modellering optredend overslag-/overloopdebiet bij hoogtetoets kunstwerken* [DLT-ookw 2015]. In dit document wordt beschreven met welke modellen het instromende debiet over het hoogwaterkerend gesloten kunstwerk wordt beschreven. In paragraaf 5.3.2 worden deze modellen nogmaals gepresenteerd.

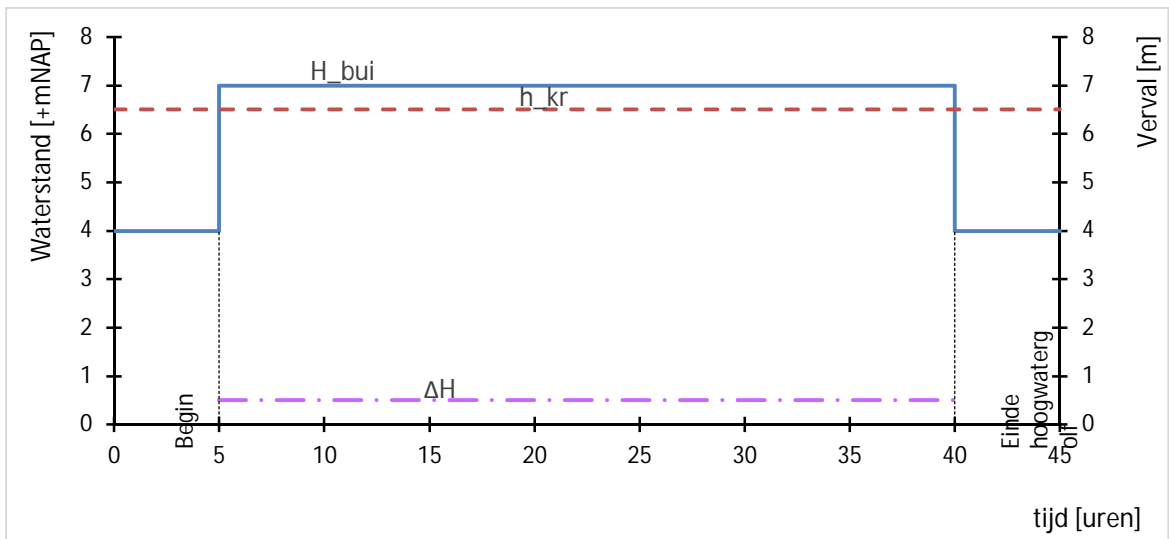
7.3.2 Bepaling instromend volume

Het kritieke volume water dat gedurende een hoogwaterperiode over het gesloten kunstwerk mag stromen is gelijk aan het kombergend vermogen van de achterliggende watergang. Dit impliceert dat het toelaatbaar is dat water gedurende een hoogwaterperiode over het gesloten kunstwerk stroomt, zolang dat een bepaalde hoeveelheid niet overschrijdt. De hoeveelheid water die gedurende een hoogwaterperiode over het gesloten kunstwerk stroomt, is afhankelijk van het verloop van de buitenwaterstand en de optredende golven.

De drijvende kracht achter het overslaande/overlopende debiet is het verschil tussen bovenkant constructie en buitenwaterstand in combinatie met de optredende golven. De buitenwaterstand bepaalt dus hoe groot het instromende debiet is. In de volgende paragrafen worden de diverse situaties besproken die hierbij kunnen optreden.

7.3.2.1 *Constante buitenwaterstand*

In het hypothetische geval dat de buitenwaterstand gedurende een hoogwater constant in de tijd is (voorbeeld zie Figuur 7.1) kunnen de formules uit [DLT-ookw 2015] en hoofdstuk 3 direct worden toegepast, omdat de waterstanden die hierin worden benoemd een constante waarde hebben. Het verval over het kunstwerk zorgt hiermee gedurende de hoogwaterperiode voor een constante instroming in de tijd.

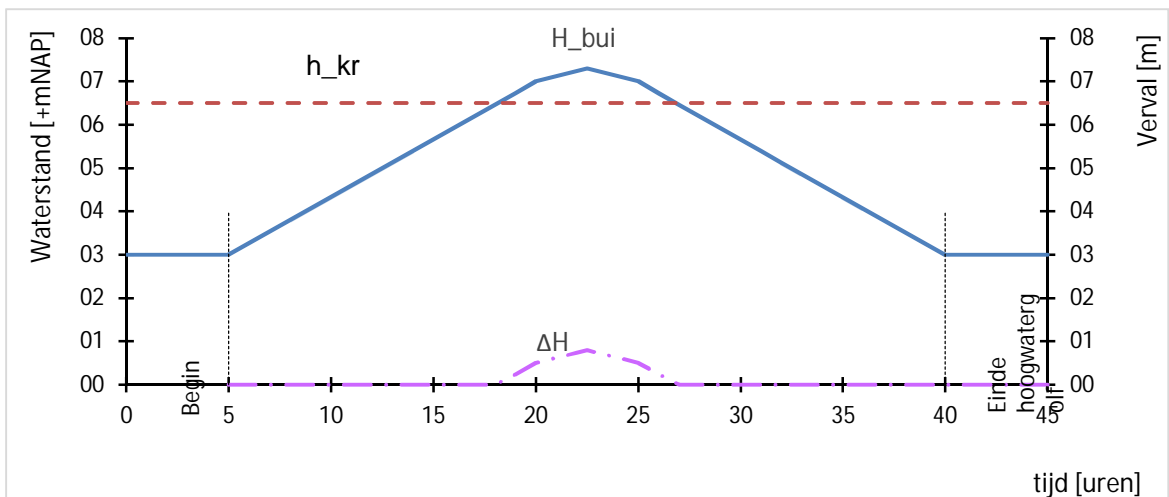


Figuur 7.1 Constant verval bij constant verloop hoogwatergolf

Als gevolg van het constante debiet dat binnenstroomt, neemt het totale debiet gedurende de hoogwatergolf lineair toe.

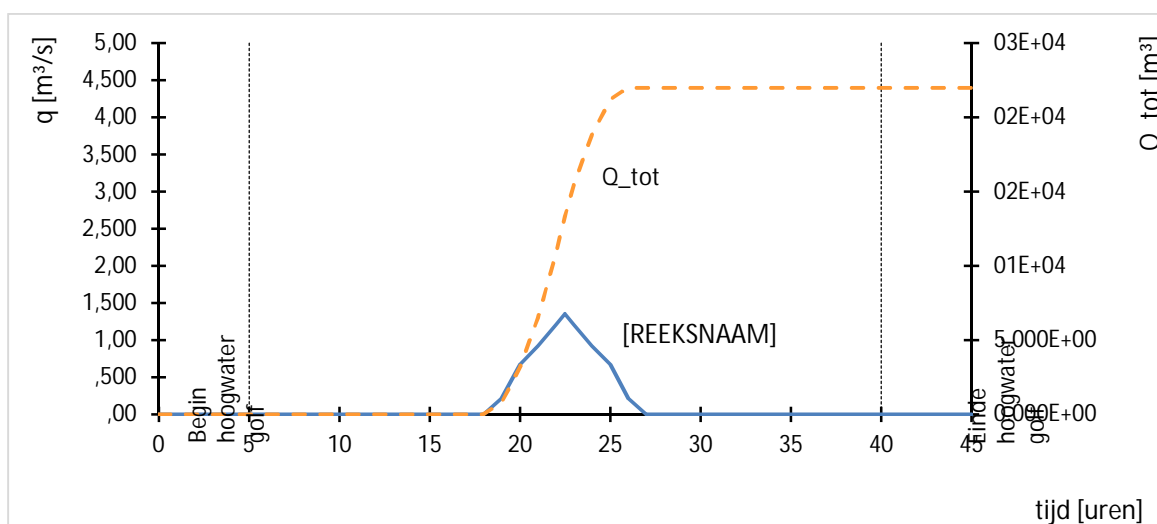
7.3.2.2 Variërende buitenwaterstand

In het geval dat de buitenwaterstand varieert als gevolg van de hoogwatergolf is het verval over de kering aan verandering onderhevig. In Figuur 7.2 is het verloop van het verval over de kering gegeven.



Figuur 7.2 Variërend verval bij variërende buitenwaterstand en constante binnenwaterstand

Het instromende debiet varieert hierbij in de loop van de tijd. In Figuur 7.3 is het instromende debiet gegeven, uitgaande van een overloopsituatie bij afwezigheid van golven.



Figuur 7.3 Instromende debiet bij variërende buitenwaterstand en constante binnenwaterstand

Bovenstaande resultaten kunnen middels integraalberekeningen van het instromende debiet, waarbij de buitenwaterstand varieert in de tijd, worden berekend. Eenvoudige benaderingen kunnen met behulp van bijvoorbeeld Excel worden gemaakt.

7.3.3 Geavanceerde modellen ter bepaling instromend volume

Er zijn ook eindige elementen pakketten waarmee stromingen tot in detail kunnen worden berekend. Deze worden toegepast wanneer het stromingsbeeld sterk beïnvloed wordt door 3D-effecten.

Als gevolg van de toegenomen rekenkracht is men tegenwoordig in staat modellen steeds groter en gedetailleerder te maken. Voor zeer complexe situaties kan dit worden toegepast, waarbij modelonderzoek ook van wezenlijk belang kan zijn. Voor het overgrote deel van de kunstwerken volstaat echter het gebruik van de formules zoals in hoofdstuk 3 gepresenteerd.

7.4 Kennisbasis kombergend vermogen (sterkte)

Het kritieke volume water dat gedurende een hoogwaterperiode over het kunstwerk mag slaan/lopen, het kombergend vermogen, wordt bepaald door de karakteristieken van het achterliggende watersysteem. Het betreft de toelaatbare peilstijging van dit watersysteem in combinatie met het oppervlak waarover deze peilstijging mag plaatsvinden. Indien het instromende volume het kombergend vermogen overschrijdt, treden substantiële gevolgen op, zoals het ontstaan van een bres in de kaden van het kombergende watersysteem, waardoor water het achterland in kan stromen en de watergang wellicht leegstroomt. Dit leegstromen van de binnendijkse watergang kan ook andere (deel)faalmechanismen initiëren als de binnenwaterstand zover daalt dat het verval over het kunstwerk sterk toeneemt. Denk hierbij aan bezwijken van de bodembescherming als gevolg van een toegenomen stroomsnelheid of bezwijken van constructie-onderdelen als gevolg van een toegenomen verval.

In deze paragraaf wordt ingegaan op de aanwezige kennis met betrekking tot bepaling van het kombergend vermogen en waarmee hierbij rekening moet worden gehouden.

7.4.1 Basisformulering

In de Leidraad Kunstwerken [TAW, 2003] worden enkele basisformules gegeven met betrekking tot het kombergend vermogen en het terugrekenen hiervan naar een kritiek debiet.

Voor het kombergend vermogen geldt de volgende basisformule die van toepassing is op het totale kombergend vermogen van een binnendijsks gelegen watersysteem:

$$K = A \cdot \Delta h_{bi;toel}$$

7-1

Hierin is:

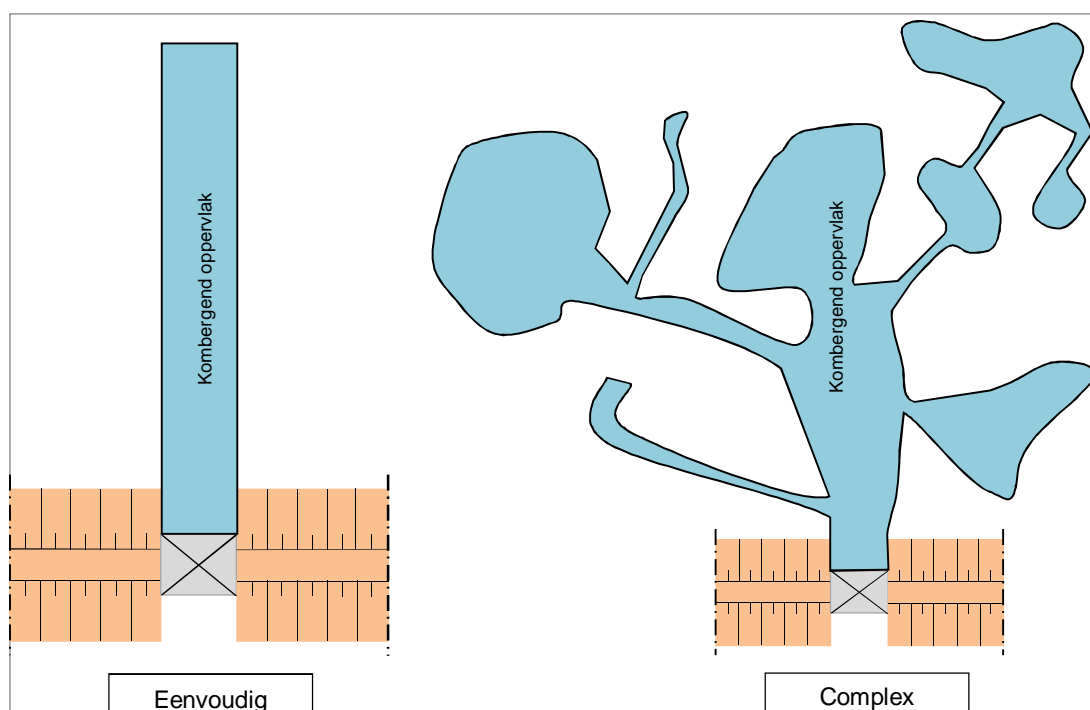
K	[m ³]	Kombergend vermogen
A	[m ²]	Het oppervlak van het open binnenwater dat met het kunstwerk verbonden is
$\Delta h_{bi;toel}$	[m]	Toelaatbare peilverhoging op het binnenwater

De parameters die in deze eenvoudige formule zijn verwerkt worden in de volgende paragrafen toegelicht.

7.4.2 Het kombergend oppervlakte

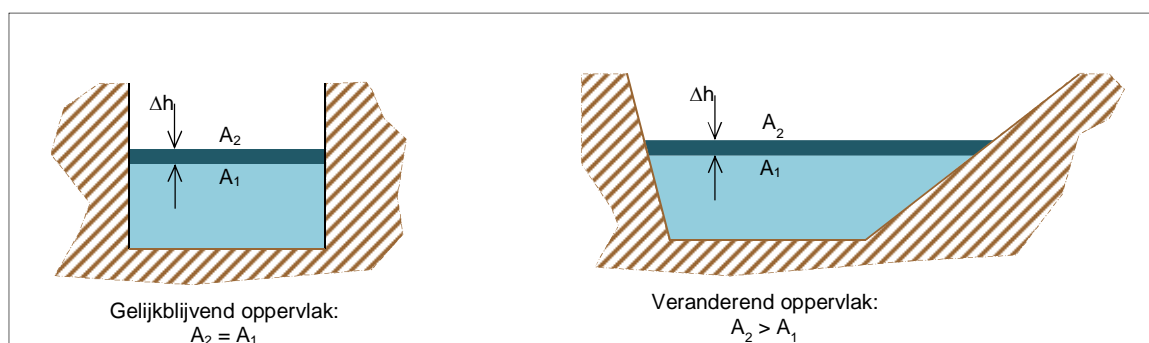
Het kombergend oppervlak is het oppervlak van het open water waarin instromend buitenwater geborgen kan worden. Deze formulering past niet bij alle denkbare situaties, aangezien er ook situaties kunnen zijn waarbij geen sprake is van open water achter kunstwerken. Afhankelijk van de specifieke situatie is een coupure de daadwerkelijke uitzondering. Bij coupures in het open veld, waarbij instromend water in eerste instantie nog geborgen kan worden in het achterliggende weiland, is nog sprake van een soort van komberging. Bij coupures die zich in een stad bevinden en waarbij bij instroming direct water op de straat staat, is sprake van een afwijkende situatie. Komberging dient dan toch enigszins anders (specifiek) benaderd te worden.

Het kombergend oppervlak zoals gedefinieerd in formule 7-1 kan zowel heel eenvoudig als heel uitgebreid en complex van vorm zijn. In onderstaande figuur is hiervan schematisch een beeld gegeven.



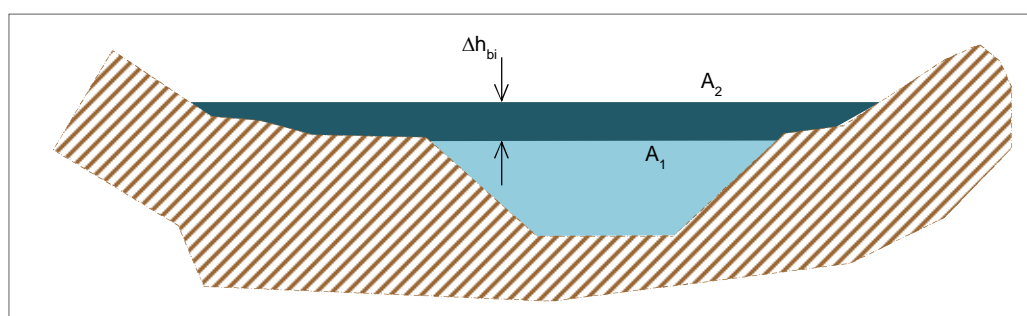
Figuur 7.4 Schematische voorbeelden vormgeving kombergend oppervlak

Voor het kombergend vermogen is niet alleen de vorm van het oppervlak benodigd dat aan het begin van de hoogwaterperiode aanwezig is. Ook het verloop van dit oppervlak gedurende een hoogwater is van belang. In Figuur 7.5 is dit, wederom schematisch, weergegeven.



Figuur 7.5 Schematische weergave verandering kombergend oppervlak bij stijging binnenpeil

In de rechter figuur neemt bij een stijgende binnenwaterstand het oppervlak toe, terwijl dit in de linker figuur gelijk blijft. Een nog treffender voorbeeld van verschil in wateroppervlak bij stijgende waterstand treft men aan daar waar natuurvriendelijk oevers zijn toegepast. In Figuur 7.6 is dit weergegeven.



Figuur 7.6 Veranderend wateroppervlak bij stijgende waterstand in geval van natuurvriendelijke oevers

7.4.3 Toelaatbare peilverhoging

Naast het kombergend oppervlak speelt ook de toelaatbare peilstijging een rol. Deze peilstijging is direct gerelateerd aan het kritieke peil en het streefpeil in het kombergende gebied. In formulevorm:

$$\Delta h_{bi;toel} = h_{bi;toel} - h_{bi;streef} \quad 7-2$$

Hierin is:

$\Delta h_{bi;toel}$	[m]	Toelaatbare peilverhoging van het open binnenwater
$h_{bi;toel}$	[mNAP]	Toelaatbare (kritieke) peil op het open binnenwater
$h_{bi;streef}$	[mNAP]	Streefpeil of gemiddeld peil op het open binnenwater

Het verschil tussen kritiek peil en streefpeil bepaalt de waterstijging die in het achterland mag plaatsvinden, voordat significante gevolgen¹¹ optreden. Met het oog hierop betreft het kritieke

¹¹ Voor instroming bij kunstwerken wordt binnen het WTI de volgende definitie van 'significante gevolgen' gehanteerd: meer dan 10 miljoen euro schade en/of tenminste 1 slachtoffer.

binnenpeil die waterstand die leidt tot significante gevolgen in het achterliggende watersysteem dan wel gebied óf leidt tot het initiëren van andere (deel)faalmechanismen (zie paragraaf 7.2.1). Opgemerkt wordt dat het, als het gaat om doorbraak van ‘zachte’ keringen langs de komberging, in de praktijk vaak voorkomt dat er geen uitgebreide veiligheidsanalyse beschikbaar is van deze keringen. In dat geval moet een onderbouwde schatting van dit peil worden gemaakt. In toetslaag 2 wordt hierbij in principe uitgegaan van de waterstanden die horen bij de normering van de kades (normpeilen). Dit kan echter alleen worden toegepast als die achterliggende kades hier ook daadwerkelijk op zijn getoetst. Indien dit niet het geval is, kan het gebeuren dat er geen correct beeld van de veiligheid ontstaat. De kades kunnen immers wel genormeerd zijn met een bijbehorende waterstand, maar als ze hierop niet getoetst zijn, zegt deze normering niets over de daadwerkelijk aanwezige sterkte van deze kades.

Het streefpeil is het peil dat onder normale omstandigheden gehandhaafd wordt op het open binnenwater. Afhankelijk van het seizoen kan dit een ander peil zijn. Een specifieke aanpassing van het streefpeil is mogelijk indien bewust voorafgaand aan een hoogwater afgemaald wordt naar een lager peil, zodat er meer kombergend vermogen aanwezig is. Opgemerkt wordt hierbij dat dit vaak plaatsvindt indien men verwacht dat aanvoer van water vanuit het achterland substantieel kan zijn gedurende een hoogwater.

Benadrukt wordt dat bovenstaande formulering uitgaat van een standaard situatie, zonder overige invloeden. De op deze wijze toelaatbare peilstijging geldt hiermee voor een standaard situatie en bepaald hiermee de standaard aanwezige komberging zijnde een volume aan water dat geborgen kan worden. In de volgende paragraaf wordt deze standaard aanwezige komberging specifiek gemaakt voor een kunstwerk.

7.4.4 Kombergend vermogen per kunstwerk

Het kombergend vermogen kan door het meenemen van de diverse invloedsfactoren specifiek gemaakt worden voor één kunstwerk. Deze factoren kunnen voor het merendeel worden uitgedrukt in een volume die de beschikbare komberging per kunstwerk positief dan wel negatief beïnvloeden. Hieronder is dat in de formule 7-3 toegevoegd, waardoor deze formule specifiek wordt gemaakt voor één kunstwerk.

$$K_{kw} = A \cdot \Delta h_{bi;toel} - \sum_{i=1}^{i=n} V_{kw,i} - V_{achterland} + V_{pomper} \quad 7-3$$

Hierin is:

K	[m ³]	Kombergend vermogen
A	[m ²]	Het oppervlak van het open binnenwater dat met het kunstwerk verbonden is
$\Delta h_{bi;toel}$	[m]	Toelaatbare peilverhoging op het binnenwater
$V_{kw,i}$	[m ³]	Instromend volume door of over kunstwerk 'i' dat aansluit op hetzelfde kombergende vermogen
n	[-]	Aantal kunstwerken buiten het beschouwde kunstwerk dat op dezelfde komberging uitkomt
$V_{achterland}$	[m ³]	Instromend volume als gevolg van aanvoer vanuit het achterland, bv door regen. Dit kan al voorafgaand aan het daadwerkelijke hoogwater deels plaatsvinden.
V_{pomper}	[m ³]	Volume dat gedurende een hoogwater kan worden weggepompt door inzet van bv aanwezige gemalen of mobiele pompen.

Indien meerdere kunstwerken uitkomen op hetzelfde kombergend vermogen, dient de invloed hiervan te worden meegenomen bij de bepaling van het kombergend vermogen per kunstwerk.

De aanvoer van water vanuit het achterland (binnenland) naar de komberging kan van grote invloed zijn op het kombergend vermogen. Deze aanvoer kan via normale afstroming plaatsvinden, maar ook gemalen in de polder die uitslaan op het kombergend oppervlak kunnen voor aanvoer zorgen. Vanuit die optiek kan het gewenst zijn om in de protocollen vast te leggen dat deze gemalen gedurende een hoogwater niet of slechts deels ingezet mogen worden.

Indien er gemalen of pompen zijn die water vanuit de komberging kunnen uitslaan op het buitenwater, kan hiervan gebruik worden gemaakt bij het beperken van het totale instromende volume.

Naast de genoemde factoren kunnen nog andere aspecten een rol spelen, kijkend naar het kombergend vermogen per kunstwerk. Hierbij kan worden gedacht aan onder andere de volgende punten:

- Af-/opwaaiing van binnenwater. Door wind kan het peil direct achter een kunstwerk worden beïnvloed, wat lokaal ervoor kan zorgen dat het toelaatbare peil reeds eerder of later wordt bereikt dan verwacht.
- Opstuwung van instromend water. Door de vorm van de komberging is het mogelijk dat bij substantiele hoeveelheden instromend water, er opstuwung optreedt waardoor lokaal de binnenwaterstand stijgt.

Bovenstaande punten zijn niet uit te drukken in volumes, maar komen naar voren bij een nadere analyse van de (vormgeving) van de komberging.

7.5 Nieuwe kennis

Ten aanzien van komberging geldt dat er de laatste jaren geen nieuwe kennis is bijgekomen. De principes van komberging zijn eenvoudig en algemeen geldend, er is geen specifiek toepassingsgebied.

Ontwikkelingen die indirect met het kombergend vermogen te maken hebben, zijn wel te benoemen.

1. Meer inzicht in sterkte van kaden van komberging.
Door het uitvoeren van toetsen op primaire c-keringen en regionale keringen is er meer inzicht gekomen in de sterkte, en daarmee kritieke waterstanden van de kaden van de komberging.
2. Invoering van de overstromingsbenadering.
Vigerend is momenteel nog de overbelastingsbenadering, waarbij wateroverlast vaak als criterium wordt gehanteerd ten aanzien van de komberging. In de toekomst kan hier een verschuiving plaats gaan vinden, waarbij het criterium bijvoorbeeld gelinkt wordt aan het daadwerkelijk bezwijken van de kaden van de komberging. In bepaalde gevallen kan dit direct leiden tot gevolgen groter dan wateroverlast.
3. Nauwkeurigere modellering van het kombergend vermogen.
Met behulp van steeds meer geavanceerde data en modellen is het mogelijk om het volume dat beschikbaar is voor komberging en de stromingen door het kombergende gebied beter in kaart te brengen en ook de diverse invloedsfactoren mee te nemen in de beschouwingen.

Bovengenoemde ontwikkelingen zorgen ervoor dat er meer inzicht in het kombergend vermogen ontstaat en hoe dit ingezet kan worden. Aandachtspunt hierbij is dat bij gebruik van

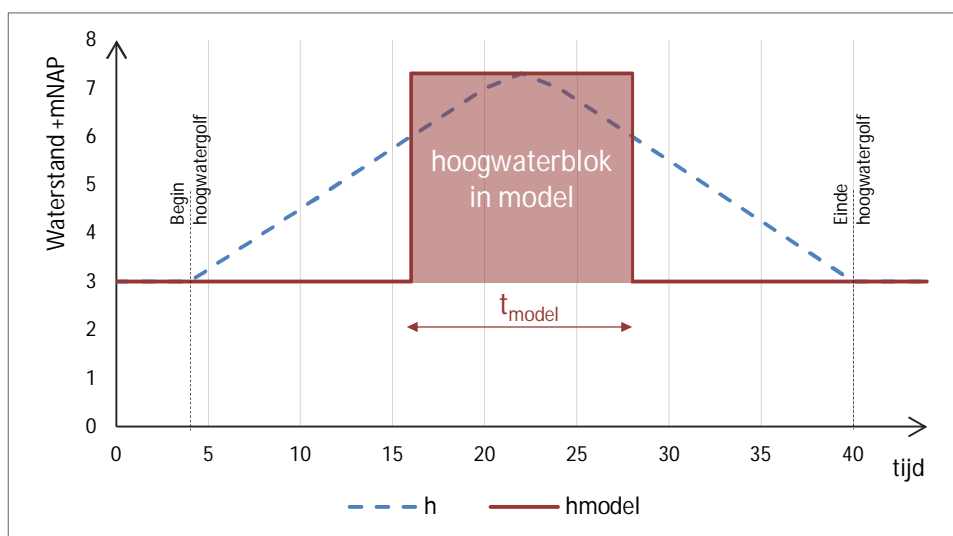
dergelijke geavanceerde tools (met name bovenstaande punt 3), de actualiteit van de gebruikte gegevens telkens gecontroleerd dient te worden. Daarnaast geldt dat een uitgebreide modelverfijning van het kombergend vermogen alleen van toegevoegde waarde is als ook het instromende debiet nauwkeurig kan worden berekend.

7.6 Keuze model WTI2017

Het model dat binnen VNK2 voorhanden was, wordt ook in het WTI2017 toegepast.

Voor het instromende debiet worden de formules zoals gegeven in [DLT-ookw 2015] en paragraaf 3.3 gebruikt.

Het verloop van de hoogwatergolf en het daardoor instromende debiet wordt sterk versimpeld gemodelleerd. Dit komt met name door het feit dat de tijdsverlopen van de hoogwatergolven zelf niet in Hydra-Ring geprogrammeerd zijn. In het WTI2017 is de hoogwatergolf geschematiseerd als rechthoekig blok, waarbij de piek van de hoogwatergolf (wat uit de sommen als de ontwerpwaarde van de buitenwaterstand naar voren komt) gedurende een in te geven periode aanwezig is. Buiten deze periode is er dus geen sprake van hoogwater.



Figuur 7.7 Geschematiseerd hoogwaterverloop

Het kombergend vermogen wordt in het WTI2017 ingevoerd door het opgeven van een kombergend oppervlak en een toegestane peilverhoging. Hiermee sluit dit direct aan op de formulering van formule 7-1.

7.7 Referenties

[DLT-ookw 2015]

Kennisbasis instromend debiet bij overslag en/of overloop over het gesloten kunstwerk Deltares, kenmerk 1220087-001-GEO-0004 definitief, augustus 2015

[TAW, 2003]

Leidraad Kunstwerken,

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

8 Schematiseringshandleiding

8.1 Invulling van de schematiseringshandleiding

De schematiseringshandleiding is opgenomen in een apart document:
Schematiseringshandleiding faalmechanisme overslag en/of overloop [DLT-shoo 2015].

8.2 Referenties

[DLT-shoo 2015]

Schematiseringshandleiding faalmechanisme overslag en/of overloop
Deltares rapport, kenmerk 1220087-001-GEO-001, oktober 2015

9 Toets op Maat

9.1 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 *hoogte* bij kunstwerken. In paragraaf 9.2 wordt ingegaan op de redenen om een toets op maat uit te voeren. Indien hiertoe besloten wordt, dan worden in paragraaf 9.3 aanwijzingen gegeven hoe deze toets op maat uitgevoerd kan worden.

9.2 Aanleiding voor de Toets op maat

Indien de gedetailleerde toets een score 'voldoet niet' oplevert, maar ingeschat wordt dat met een geavanceerde beoordeling een score 'voldoet' mogelijk is, kan worden besloten een toets op maat uit te voeren. 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.

9.3 Invulling van de Toets op maat

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.
- De kosten van de te treffen verbetermaatregel hoog zijn in verhouding met de kosten van de toets op maat.

Indien wordt besloten tot het uitvoeren van een toets op maat dan zijn de volgende aanscherpingen ten opzichte van de gedetailleerde toets mogelijk:

- Nadere bepaling van het optredende overslag-/overloopdebiet.
- Nadere inschatting van het kritieke debiet.
- Nadere inschatting kombergend vermogen (instromend volume, kombergend oppervlak, toelaatbare peilstijging of combinatie van deze zaken).
- Kwantificering van de aanwezige reststerkte:
 - inschatten kans op bezwijken van het kunstwerk en hierdoor ontstaan van een bres als gevolg van het ontstaan van ontgrondingskuilen na bezwijken van de bodembescherming.

Op deze aspecten wordt in de volgende paragrafen nader ingegaan.

9.3.1 Nadere bepaling optredend overslag-/overloopdebiet

Indien er slechts een beperkt hoogtetekort wordt berekend in de gedetailleerde toetsing dan kan met behulp van de EurOtop-manual ([EurOtop 2007], aan een update wordt momenteel gewerkt) een meer nauwkeurige inschatting van het optredende overslag-/overloopdebiet worden bepaald. Met name bij constructies met voorlanden en samengestelde constructies kan met de formules uit [EurOtop 2007] een kleiner overslag-/overloopdebiet worden berekend. Dit kleinere overslag-/overloopdebiet kan vervolgens middels een correctie van de kruinhoogte (fictief hogere kruinhoogte) van het kunstwerk weer in de gedetailleerde toets worden ingevoerd. In paragraaf 6.1.4.3 van de Schematiseringshandleiding [DLT-shoo 2015] worden hiervoor aanknopingspunten gegeven.

9.3.2 Nadere inschatting van het kritieke debiet

Indien de faalkans voor *overslag en/of overloop* gedomineerd wordt door het bezwijken van de bodembescherming kan een nadere analyse worden uitgevoerd naar het gehanteerde kritieke debiet in de berekening. Met name indien in de gedetailleerde toets gebruik is gemaakt van richtwaarden voor het kritieke debiet kan het kritieke debiet in de toets op maat worden aangescherpt. Dit geldt met name voor bodembeschermingsconstructies die rechtstreeks worden belast door een overstortende straal. Dit vergt maatwerk waarvoor specialistische kennis omtrent bodembeschermingen vereist is.

9.3.3 Nadere bepaling kombergend vermogen

Indien uit de analyse naar voren komt dat het kombergend vermogen de faalkans bepaalt, kan een nadere analyse van dit kombergend vermogen worden uitgevoerd. Deze nadere analyse kan betrekking hebben op:

- Het inkomend volume als gevolg van overslag en/of overloop.
- Het totale oppervlak dat voor komberging beschikbaar is.
- De toelaatbare peilstijging op het kombergend oppervlak.

Een combinatie van deze zaken is uiteraard ook mogelijk.

Met behulp van de tool Waterstandsverloop 2.0 ([HKV-Wzzw 2014]) kan het verloop van de waterstand nader worden bekeken, zodat een betere bepaling van de stormduur kan worden gemaakt. Een reductie van de gehanteerde stormduur leidt tot een vermindering van het totale volume dat over het gesloten kunstwerk naar binnen komt gedurende een hoogwaterperiode.

Ten aanzien van het kombergend oppervlak kan een nadere analyse de nodige tijd vergen, wanneer deze oppervlakte bestaat uit meerdere watergangen/waterpartijen. Met name wanneer de doorsnede van dergelijke watergangen/waterpartijen substantieel varieert met het stijgen van de binnenwaterstand.

Met betrekking tot de toelaatbare peilstijging geldt dat hiervoor in toetslaag 2 in principe wordt uitgegaan van het normpeil. Indien de achterliggende kades niet zijn genormeerd (of om andere redenen geen normpeil beschikbaar is) dan wordt de toelaatbare peilstijging ingeschat, hetgeen zoveel mogelijk onderbouwd wordt met feiten. Indien echter een duidelijk veiligheidsbeeld van de keringen langs de kom ontbreekt dan kan het nodig zijn deze keringen nader te onderzoeken. Een dergelijke inspanning kan zeer omvangrijk zijn. Dit is dus een voorbeeld van een situatie waarin mogelijk beter een verbetermaatregel kan worden getroffen.

Indien het watersysteem van de komberging is omringd door kades die praktisch niet door kunnen breken of als achter de kering geen regionaal watersysteem aanwezig is, dan is sprake van falen bij dusdanig veel overslag/overloop over het kunstwerk dat dit leidt tot een schade van minimaal 10 miljoen euro en/of tenminste 1 slachtoffer. In toetslaag 2 wordt hiervoor een praktisch criterium van 0,3 m water op straat/maaiveld gehanteerd. In toetslaag 3 kan hier door de beheerder van worden afgeweken, als de beheerder op basis van de specifieke kenmerken van zijn gebied inschat dat bij een hogere of lagere waterdiepte achter een kunstwerk minimaal 10 miljoen euro schade optreedt en/of tenminste 1 slachtoffer valt.

Bij een klein achterliggend watersysteem dat wordt omringd door 'zachte' kades is in toetslaag 2 uitgegaan van de bijbehorende kleine komberging. Als overschrijding van dit kleine kombergende vermogen naar verwachting niet leidt tot significante gevolgen dan is in toetslaag 3 wellicht een aanscherping van de analyse mogelijk. Dit is het geval als falen van de 'zachte' kade niet leidt tot het initiëren van andere deelfaalmechanismen. In dat geval kan het kombergend volume zodanig verruimd worden dat dit leidt tot significante gevolgen (praktische uitwerking: dat in het achter de kom gelegen gebied 0,30 m water op straat/maaiveld komt te staan). Als falen van de 'zachte' kade wél leidt tot het initiëren van andere deelfaalmechanismen dan kan het kombergend volume niet worden vergroot en is aanscherping dus niet mogelijk. In bijlage C is dit nader uitgewerkt.

9.3.4 Kwantificering van de aanwezige reststerkte

Alleen bij het deelfaalmechanisme bezwijken bodembescherming is sprake van reststerkte. Bij het deelfaalmechanisme Onvoldoende bergend vermogen is geen sprake van reststerkte (zie paragraaf 4.2.4).

Indien de faalkans voor *overslag en/of overloop* gedomineerd wordt door het bezwijken van de bodembescherming en het vervolgens bezwijken van het kunstwerk als gevolg van het ontstaan van ontgrondingskuilen kan een nadere analyse worden uitgevoerd. De laatste stap, de kans op het bezwijken van het kunstwerk als gevolg van het ontstaan van ontgrondingskuilen, kent nauwelijks handvatten om deze goed te onderbouwen en wordt dan ook in het WTI2017 als reststerkte gezien. Ontgrondingskuilen kunnen globaal berekend worden, maar de gevolgen van deze ontgrondingskuilen zijn lastiger in te schatten. Standaard wordt hier dan ook geen uitspraak over gedaan. Middels kwantitatieve (bepaling ontgrondingskuilen) en kwalitatieve analyses kan worden getracht een onderbouwing te vinden voor het meenemen van deze reststerkte. Feitelijk is dit een nadere invulling van de kans op bezwijken van het kunstwerk gegeven erosie van de bodembescherming ($P_{f,kw|erosie\ bodem}$). Handvatten hiervoor zijn gegeven in paragraaf 6.2 van de schematiseringshandleiding [DLT-shoo 2015].

9.4 Referenties

[DLT-shoo 2015]

Schematiseringshandleiding faalmechanisme overslag en/of overloop
Deltares, kenmerk 1220087-001-GEO-001, oktober 2015

[EurOtop 2007]

EurOtop wave overtopping of sea defences and related structures: assessment manual, Environment Agency/Expertise Netwerk Waterkeren/Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, augustus 2007;

[HKV-Wzzw 2014]

Waterstandsverlopen zoete en zoute wateren,
HKV, PR2803, april 2014

[TAW, 2003]

Leidraad kunstwerken, mei 2003, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen

[Deltares, 2015]

WTI 2017 Cluster Toetsregels Kunstwerken - Handreiking aansluitconstructies (product 6.0F)
Deltares rapport 1220087-006-GEO-0002, Versie D1, 6 juli 2015, definitief

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.

C Definitie falen komberging

Binnen het WTI2017 wordt het volgende faalcriterium met betrekking tot komberging gehanteerd:

Het kombergend vermogen wordt overschreden als het instromende water leidt tot significante gevolgen in het achterliggende watersysteem dan wel gebied.

In toetslaag 2 wordt ervan uitgegaan dat significante gevolgen optreden als:

- Het normpeil van het regionale watersysteem wordt overschreden (indien het watersysteem van de komberging is omringd door 'zachte' kades).
- Bij 0,3 m water op straat/maaiveld (indien het watersysteem van de komberging is omringd door kades die niet door kunnen breken of als achter de kering geen regionaal watersysteem aanwezig is).

Toelichting:

Komberging is in feite een beschikbaar volume dat gevuld kan worden met water zonder dat dit tot significante gevolgen leidt. Er is dan wel behoefte aan een heldere definitie van de term 'significante gevolgen'.

Gevolgen kunnen worden uitgedrukt in schade en slachtoffers. Aangesloten zou kunnen worden bij de schade en slachtofferaantallen die aan de vaststelling van de norm ten grondslag hebben gelegen. Daar is immers ook de norm op gebaseerd waaraan het kunstwerk dient te voldoen. Het is echter bestuurlijk niet uit te leggen dat het kunstwerk niet als gefaald wordt beschouwd, terwijl het kombergend vermogen zodanig wordt overschreden dat substantiële schades en slachtofferaantallen worden bereikt. Daarom is het noodzakelijk een milder faalcriterium te kiezen, hetgeen een subjectieve en daarmee politiek/bestuurlijke keuze is.

Binnen het WTI wordt de term 'significante gevolgen' daarom gedefinieerd als een schade van minimaal 10 miljoen euro en/of tenminste 1 slachtoffer. Hoewel dit een eenduidig en helder gedefinieerd criterium is, is het in de praktijk bewerkelijk om hieraan te toetsen. Dit komt doordat schade en slachtofferfuncties gebiedsafhankelijk zijn. Het zou per kunstwerk een achterlandstudie inclusief overstromingssimulatie vergen om vast te stellen of het faalcriterium wordt overschreden. Daarom wordt een pragmatische werkwijze voorgesteld waarin wordt gewerkt met een bepaalde toelaatbare waterdiepte. Ten behoeve van de toetsing in toetslaag 2 wordt voorgesteld voor deze toelaatbare waterdiepte in eerste instantie 0,30 m te hanteren voor zowel bebouwd als landelijk gebied. Uiteraard kan hier door de beheerder van worden afgeweken, als de beheerder op basis van de specifieke kenmerken van zijn gebied inschat dat bij een hogere of lagere waterdiepte achter een kunstwerk minimaal 10 miljoen euro schade optreedt en/of tenminste 1 slachtoffer valt. Dit kan in toetslaag 3 gebeuren.

Het kombierend vermogen kan op drie wijzen worden overschreden zodanig dat significante gevolgen optreden:

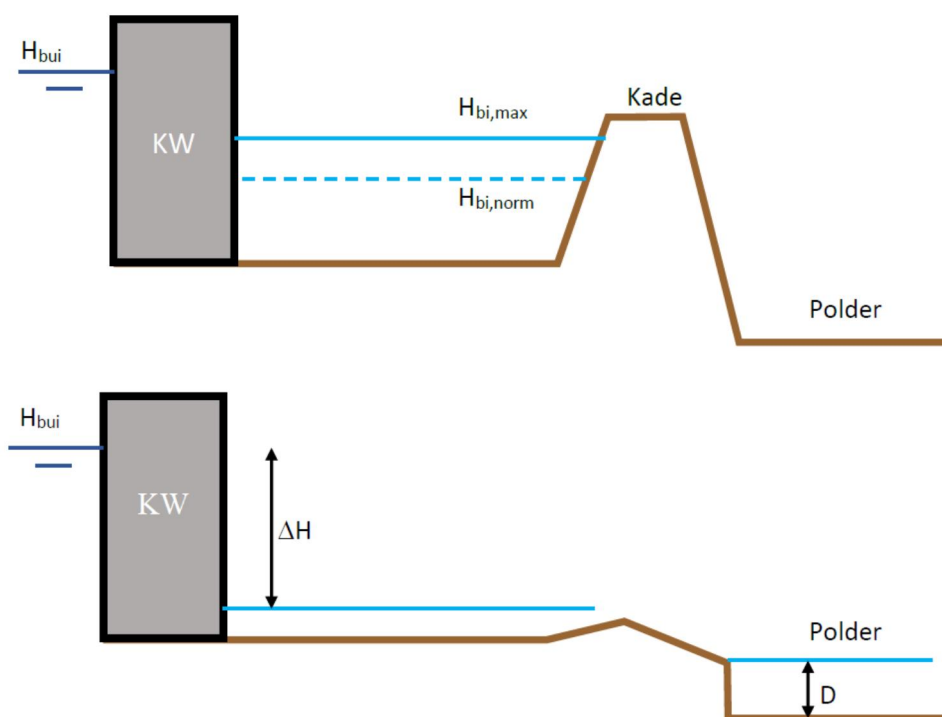
1. Het achterliggend watersysteem wordt omringd met zachte kades (grondlichamen). Hier is sprake van significante gevolgen als de kades bezwijken of overlopen, waarna (een deel van) het watersysteem leeg loopt in het achterliggende gebied. Hierbij moet het in principe gaan om een zodanig watervolume dat dit leidt tot een schade van minimaal 10 miljoen euro en/of tenminste 1 slachtoffer. Ook hierbij kan de praktische maat van 0,30 m water op straat of in landelijk gebied gehanteerd worden. In toetslaag 2 beperkt de toetsing zich tot het bezwijken van de kades en worden de gevolgen die daarna optreden nog niet beschouwd. Dat vindt plaats in toetslaag 3. Voor de waterstand waarbij bezwijken van de kades optreedt wordt in toetslaag 2 in principe uitgegaan van het normpeil. Indien de achterliggende kades niet zijn genormeerd (of om andere redenen geen normpeil beschikbaar is) dan wordt de toelaatbare peilstijging ingeschat, waarbij in de praktijk vaak wordt uitgegaan van een waterstand waarbij een initiërend faalmechanisme bij de achterliggende kades optreedt.
2. Het achterliggend watersysteem wordt omringd door kades die praktisch niet kunnen doorbreken. Bijvoorbeeld doordat sprake is van harde kades bij een haven of doordat de boorden van de watergang op of beneden het maaiveld gelegen zijn. In dat geval is pas sprake van falen als de kades dusdanig overlopen dat dit leidt tot een schade van minimaal 10 miljoen euro en/of tenminste 1 slachtoffer. In toetslaag 2 wordt een pragmatische werkwijze gehanteerd waarin wordt gesteld dat bij een waterdiepte van 0,30 m dit schade-/slachtoffercriterium wordt overschreden. Hierbij wordt geen onderscheid gemaakt tussen landelijk en stedelijk gebied.
3. Achter het kunstwerk is geen watergang aanwezig. Dit komt bij coupures veel voor. Er vindt dan direct inundatie van het achterliggende gebied plaats. Ook in deze situatie moet het gaan om een dusdanig volume als gevolg van overslag/overloop dat dit leidt tot een schade van minimaal 10 miljoen euro en/of tenminste 1 slachtoffer. Ook hier kan in toetslaag 2 de praktische maat van 0,30 m water op straat of in landelijk gebied gehanteerd worden.

Indien een achterliggend watersysteem wordt omringd door 'zachte' kades is in sommige gevallen aanscherping mogelijk in toetslaag 3. Aanscherping van het toetsoordeel is mogelijk als sprake is van kleine watersystemen waarbij falen op zich niet leidt tot significante gevolgen (doordat het volume dat dan het achterliggende gebied in stroomt klein is). In deze situatie moet beschouwd worden of falen van de 'zachte' kade ook andere (deel)faalmechanismen kan initiëren.

Andere (deel)faalmechanismen kunnen in gang gezet worden als ná falen van de kades de binnenwaterstand zover daalt dat het verval over het kunstwerk sterk toeneemt. Hierbij kunnen drie gevolgsituaties worden onderscheiden:

1. Het kunstwerk staat hoogwaterkerend gesloten. Als gevolg van het overslag-/overloopdebiet neemt de binnenwaterstand eerst zodanig toe dat de kades achter de primaire kering falen. De binnenwaterstand daalt hierdoor tot onder de normale binnenwaterstand. Hierdoor neemt de stroomsnelheid ter plaatse van de bodembescherming achter het kunstwerk zodanig toe, dat het faalcriterium met betrekking tot erosie bodembescherming wordt overschreden.

2. Idem als bij 1, waarbij het toegenomen verval over het kunstwerk leidt tot bezwijken van waterkerende constructie-onderdelen of overall-instabiliteit van het kunstwerk.
3. De sluiting van het kunstwerk is gefaald. Als gevolg van het instromende debiet neemt de binnenwaterstand eerst zodanig toe dat de kades achter de primaire kering falen. De binnenwaterstand daalt hierdoor en het verval over het kunstwerk neemt toe. Hierdoor neemt het instromende debiet zodanig toe dat het faalcriterium met betrekking tot erosie bodembescherming wordt overschreden.



Figuur C.1 Voorbeeld van situatie waarin verval over het kunstwerk sterk toeneemt na bezwijken van de kades rond de komberging (boven: situatie vóór bezwijken kades, onder: situatie ná bezwijken kades komberging)

Bij een klein achterliggend watersysteem dat wordt omringd door 'zachte' kades is aanscherping mogelijk in toetslaag 3 als falen van de 'zachte' kade niet leidt tot het initiëren van andere (deel)faalmechanismen van het kunstwerk in de primaire waterkering. In dat geval kan het kombergend volume zodanig verruimd worden dat dit leidt tot significante gevolgen (praktische uitwerking: dat in het achter de kom gelegen gebied 0,30 m water op straat/maaiveld komt te staan). Als falen van de 'zachte' kade wél leidt tot het initiëren van andere (deel)faalmechanismen dan kan het kombergend volume niet worden vergroot en is aanscherping dus niet mogelijk.

Samengevat wordt in toetslaag 2 aangehouden dat significante gevolgen optreden als:

- Het normpeil van het regionale watersysteem wordt overschreden (indien het watersysteem van de komberging is omringd door 'zachte' kades).
- 0,3 m water op straat/maaiveld staat (indien het watersysteem van de komberging is omringd door kades die niet door kunnen breken of als achter de kering geen regionaal watersysteem aanwezig is).

Aanscherping kan plaats vinden in toetslaag 3, als falen van de zachte kade niet leidt tot het initiëren van andere (deel)faalmechanismen van het kunstwerk in de primaire waterkering. In dat geval kan het kombergend volume zodanig verruimd worden dat in het achter de kom gelegen gebied 0,30 m water op straat/maaiveld komt te staan.