

WTI 2017 Kunstwerken

Toetsspoorrapport Betrouwbaarheid Sluiting

Rob Delhez

1220087-002

Titel
WTI 2017 Kunstwerken

Opdrachtgever RWS WVL	Project 1220087-002	Kenmerk 1220087-002-GEO-0009	Pagina's 80
---------------------------------	-------------------------------	--	-----------------------

Trefwoorden

WTI2017, schematisering, toetsspoorrapport, kunstwerken, betrouwbaarheid sluiten, niet sluiten, Ringtoets, Hydra-ring

Keywords

'WTI2017', schematisation, level of review, hydraulic structures, reliability of closure, non-closure, 'Ringtoets', 'hydra-ring'

Samenvatting

Dit toetsspoorrapport bevat de basiselementen van het faalmechanisme betrouwbaarheid sluiting bij kunstwerken. Deze basiselementen bestaan uit het toetsschema voor de eenvoudige toets (toetslaag 1) en de gedetailleerde toets (toetslaag 2), de beschrijving van de fenomenologie en het faalmechanisme en de beschrijving van de deelfaalmechanismen. De geschiedenis van het faalmechanisme wordt beschreven alsmede de theoretische uitwerking hiervan in het WTI2017. De keuzes die hierbij worden gemaakt zijn onderbouwd. Tenslotte wordt verwezen naar de schematiseringshandleiding en wordt ingegaan op de toets op maat (toetslaag 3).

Summary

This report is focusing on one specific failure mechanism of water retaining hydraulic structures, being reliability of closure. The report has been set up in the framework of the research programme WTI2017 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.

Referenties

WTI2017

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
D1	dec. 2015	ir. R.C.M. Delhez		ir. D. Pereboom		dr.ir. M.S. Sule	

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
2	Toetsschema betrouwbaarheid sluiting	7
2.1	Algemene toetsschema	7
2.2	Eenvoudige toets (toetslaag 1)	8
2.3	Gedetailleerde toets (toetslaag 2)	10
2.4	Onderbouwing eenvoudige beslisregels	11
3	Factsheet gedetailleerde toets	13
3.1	Faalboom	13
3.2	Deelfaalmechanisme Z_{12} : Bezwijken kunstwerk als gevolg van erosie bodem	14
3.2.1	Z-functie	14
3.2.2	Model	14
3.3	Deelfaalmechanisme Z_{21} : Onvoldoende bergend vermogen	14
3.3.1	Z-functie	15
3.3.2	Sterktemodel	15
3.3.3	Belastingmodellen	15
3.4	Deelfaalmechanisme Z_{22} : Bezwijken bodembescherming achter kunstwerk	17
3.4.1	Z-functie	17
3.4.2	Sterktemodel	17
3.4.3	Belastingmodel	17
3.5	Deelfaalmechanisme Z_{23} : Falen van het sluitproces	17
3.5.1	Z-functie	17
3.5.2	Model	18
3.6	Deelfaalmechanisme Z_{24} : Falen van herstel van het sluitproces	18
3.6.1	Z-functie	18
3.6.2	Model	18
4	Beschrijving faalmechanisme <i>niet sluiten</i>	19
4.1	Inleiding	19
4.2	Fenomenologische beschrijving	19
4.2.1	Beschrijving op hoofdlijnen	19
4.2.2	Gedetailleerde beschrijving van het faalproces	20
4.2.3	Te toetsen deelfaalmechanismen	25
4.2.4	Reststerkte	26
4.3	Schematisch overzicht van het faalproces	26
4.4	Beknopte beschrijving van de te toetsen deelfaalmechanismen	28
4.4.1	Deelfaalmechanisme Z_{12} : Bezwijken kunstwerk als gevolg van erosie bodem	28
4.4.2	Deelfaalmechanisme Z_{21} : Onvoldoende bergend vermogen	28

4.4.3	Deelfaalmechanisme Z_{22} : Bezwijken bodembescherming achter kunstwerk	28
4.4.4	Deelfaalmechanisme Z_{23} : Falen van het sluitproces	29
4.4.5	Deelfaalmechanisme Z_{24} : Falen van herstel van het sluitproces	29
4.5	Historie van het faalmechanisme	29
4.6	Vigerende veiligheidsfilosofie en huidig toetsinstrumentarium (VTV2006)	30
4.6.1	Vigerende veiligheidsfilosofie	30
4.6.2	Wettelijk toetsinstrumentarium tot op heden	31
4.7	Wettelijk Toetsinstrumentarium 2017	32
4.7.1	Wijzigingen in het WTI 2017	32
4.7.2	Omgang met 2a-1 semi-probabilistisch versus 2a-2 probabilistisch	34
5	Deelfaalmechanisme Z_{12} bezwijken kunstwerk a.g.v. erosie	35
5.1	Historie en kennisbasis	35
5.2	Beschrijving van het model	35
5.3	Nieuwe kennis	36
5.4	Keuze model WTI2017	36
6	Deelfaalmechanisme Z_{21}, onvoldoende bergend vermogen	39
6.1	Definitie en historie	39
6.2	Kennisbasis Instromend volume (belasting)	39
6.2.1	Modellen instromend debiet	39
6.2.2	Eenvoudig model verticale wand	40
6.2.3	Eenvoudig model lage drempel	43
6.2.4	Eenvoudig model verdrongen koker	45
6.2.5	Geavanceerde modellen instromend debiet	45
6.2.6	Invloed verval op instromend debiet	45
6.3	Kennisbasis kombergend vermogen	50
6.3.1	Basisformulering	50
6.3.2	Het kombergend oppervlakte	51
6.3.3	Toelaatbare peilverhoging	52
6.3.4	Kombergend vermogen per kunstwerk	53
6.4	Nieuwe kennis	54
6.5	Keuze model WTI2017	55
7	Deelfaalmechanisme Z_{22}, bezwijken bodembescherming	57
7.1	Inleiding	57
7.2	Definitie	57
7.3	Kennisbasis Instromend debiet (belasting)	58
7.4	Kennisbasis sterkte bodembescherming	58
7.4.1	Kritieke stroomsnelheid bodembescherming	59
7.4.2	Waterdiepte boven bodembescherming	60
7.4.3	Stroomvoerende breedte	60
7.5	Nieuwe kennis	60
7.6	Keuze model WTI2017	60
8	Deelfaalmechanisme Z_{23}, Falen sluitproces	62
8.1	Definitie en historie	62
8.2	Kennisbasis kans op open staan	62
8.2.1	Uitgangspunten en aandachtspunten	63
8.2.2	Het model voor P_{open}	64
8.3	Kennisbasis kans op falen van de sluiting	66

8.3.1	Uitgangspunten	66
8.3.2	Het model voor P_{ns}	66
8.4	Nieuwe kennis	68
8.5	Keuze model WTI2017	68
9	Deelfaalmechanisme Z24, falen herstel sluitproces	69
9.1	Definitie en historie	69
9.2	Beschrijving van het model	70
9.3	Nieuwe kennis	73
9.4	Keuze model WTI2017	73
10	Schematiseringshandleiding	75
11	Toets op Maat	77
11.1	Inleiding	77
11.2	Aanleiding voor de Toets op maat	77
11.3	Invulling van de Toets op maat	77
11.3.1	Nadere bepaling van de kans op falen van het sluitproces	78
11.3.2	Nadere bepaling komberging	79
11.3.3	Kwantificering van de aanwezige reststerkte	80
	Bijlage(n)	
A	Begrippenlijst	A-1
B	Parameterlijsten	B-1
C	Definitie falen komberging	C-1

1 Inleiding

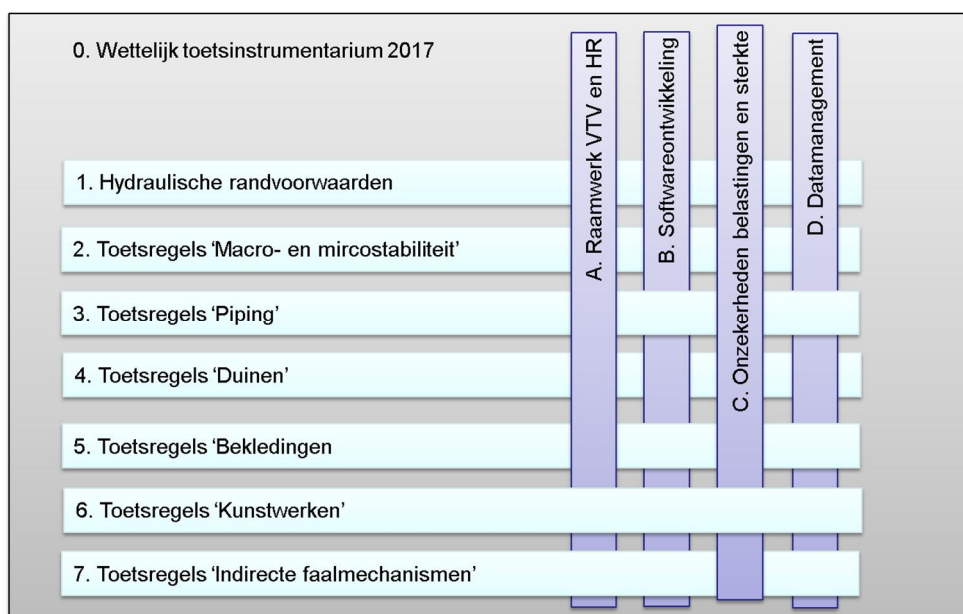
1.1 Algemeen

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 voor het faalmechanisme *betrouwbaarheid sluiting*. 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

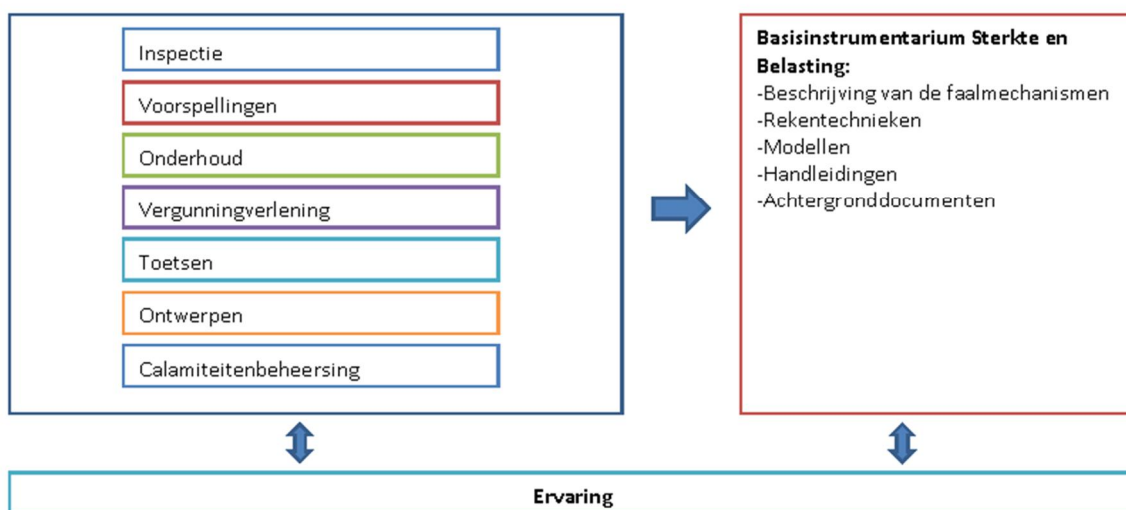
In deze paragraaf wordt aangegeven welke plaats Cluster Toetsregels Kunstwerken heeft in het modulaire instrumentarium en hoe haar uitwerking past in de documentatiestructuur. Voor een volledig overzicht van het modulaire instrumentarium zie het document uitgangspunten WTI 2017.

1.3.1 Modulair Instrumentarium en bouwstenen

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

Procesinstrumentarium

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



Figuur 1.2 Modulair instrumentarium: Procesinstrumentarium en Basisinstrumentarium Sterkte en Belasting

De veiligheid van de waterkering wordt bepaald door de sterkte van de kering in relatie tot de belasting op de kering. Het is dan ook belangrijk dat alle processen die gericht zijn op het behouden van de veiligheid van de kering, op een uniforme manier de sterkte van en de belasting op de waterkering bepalen.

Het mag niet voorkomen met het toetsinstrumentarium wordt geconcludeerd dat een kering niet voldoet aan de norm en er volgens op basis van het ontwerpinstrumentarium wordt geconcludeerd dat er geen maatregelen nodig zijn.

Daarom is het streven dat voor alle processen hetzelfde basisinstrumentarium 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 achtergrondrapport):

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

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

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

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

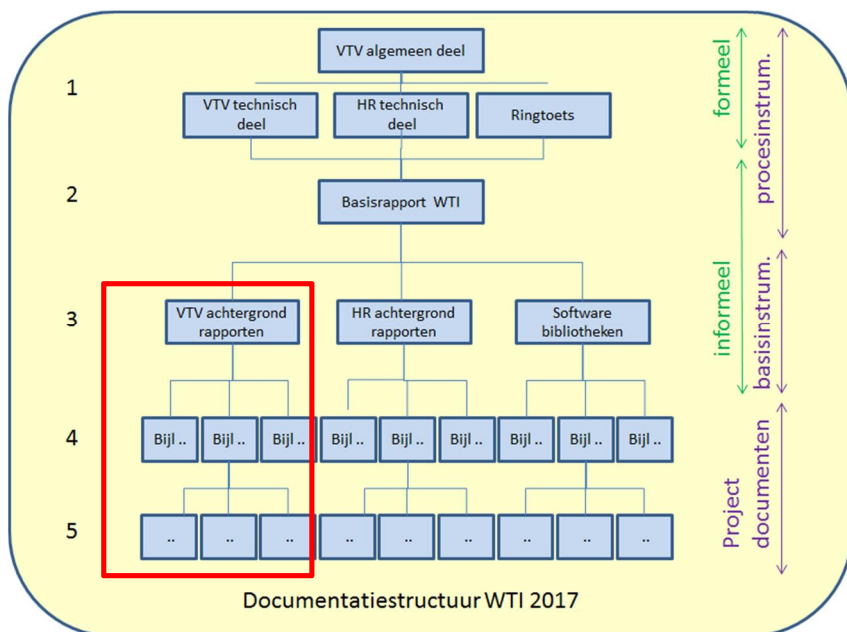
1.3.2 Documentatiestructuur WTI2017

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

1. Bouwstenen die zijn samengevoegd tot VTV-achtergrondrapporten, zoals voorliggend achtergrondrapport, 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.



Figuur 1.3 Documentatiestructuur en locatie documentatie WTI CTK

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

De verschillende 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 langconstructies kan een (semi-)probabilistische toets voor een mechanisme alleen op vakniveau worden uitgevoerd. Hieruit volgt dat het toetsinstrumentarium voor kunstwerken alleen op niveau 2a kan worden ingevuld.

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

[#] deze semi probabilistische 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 ST-p [#]	2b-1 n.v.t.
probabilistisch	2a-2 HT _{kw} , BS, ST-p (PI _{kw})	2b-2 HT _{kw} , BS, ST-p

Toetslaag 2 ondersteund door Ringtoets/HvdraRing

[#] 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 achtergrondrapport betreft het faalmechanisme *niet sluiten* en is een bundeling van verschillende bouwstenen. Hieronder is in Tabel 1.2 aangegeven hoe de samenhang binnen dit rapport is in relatie tot de WTI bouwstenen.

Hfst	Titel	WTI 2017 bouwsteen
1	Inleiding	-
2	Toetsschema	Toetsschema
3	Factsheet gedetailleerde toets	Modelbeschrijving(en)
4	Beschrijving faalmechanisme <i>niet sluiten</i>	Faalmechanismebeschrijving
5	Deelfaalmechanisme Z12, Bezwijken kunstwerk agv erosie	Deelfaalmechanismebeschrijving
6	Deelfaalmechanisme Z21, Onvoldoende kombergend vermogen	
7	Deelfaalmechanisme Z22, Bezwijken bodembescherming	
8	Deelfaalmechanisme Z23, Falen sluitproces	
9	Deelfaalmechanisme Z24, Falen herstel sluitproces	
10	Schematiseringshandleiding	Schematiseringshandleiding
11	Handreiking toets op maat	Handreiking toets op maat

Tabel 1.2 leeswijzer achtergrondrapport betrouwbaarheid sluiten

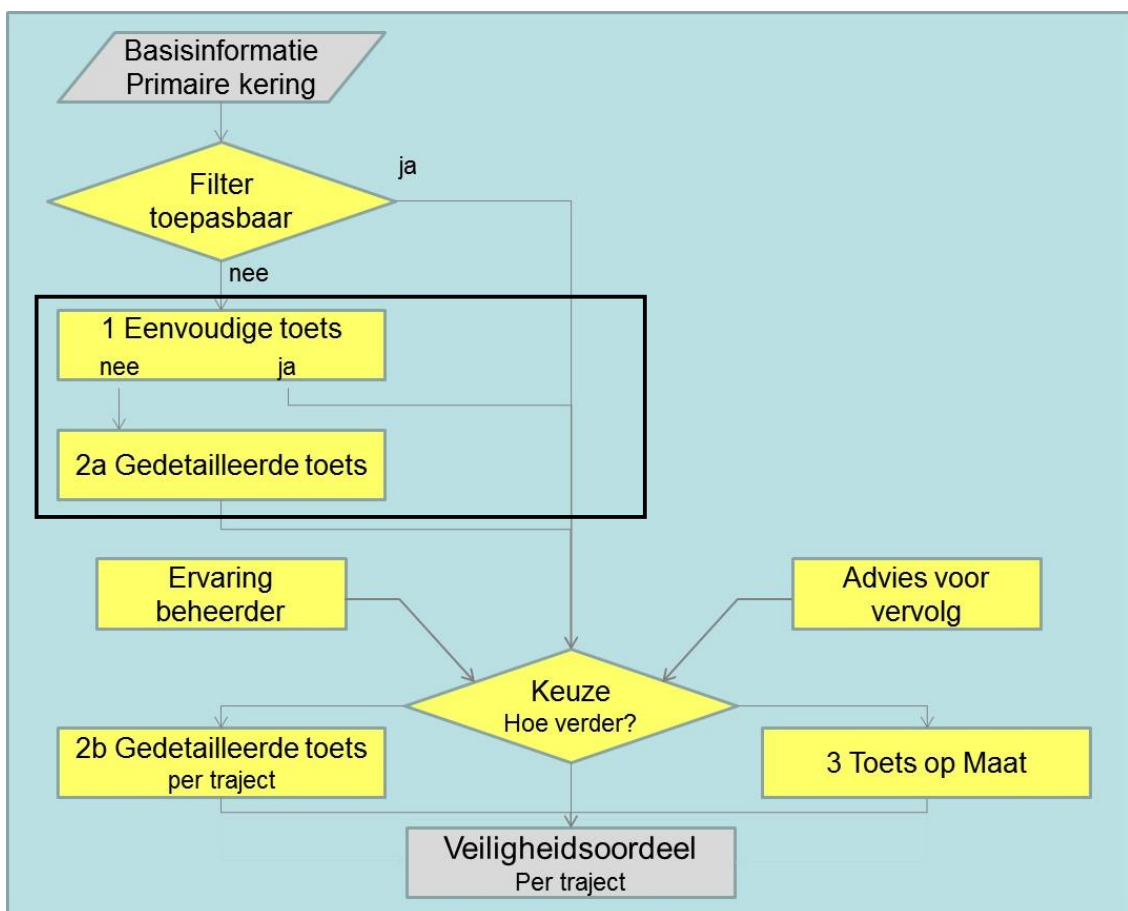
2 Toetsschema betrouwbaarheid sluiting

In dit hoofdstuk wordt het toetsschema met betrekking tot *betrouwbaarheid sluiting* 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 WTI 2017.

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

2.1 Algemene toetsschema

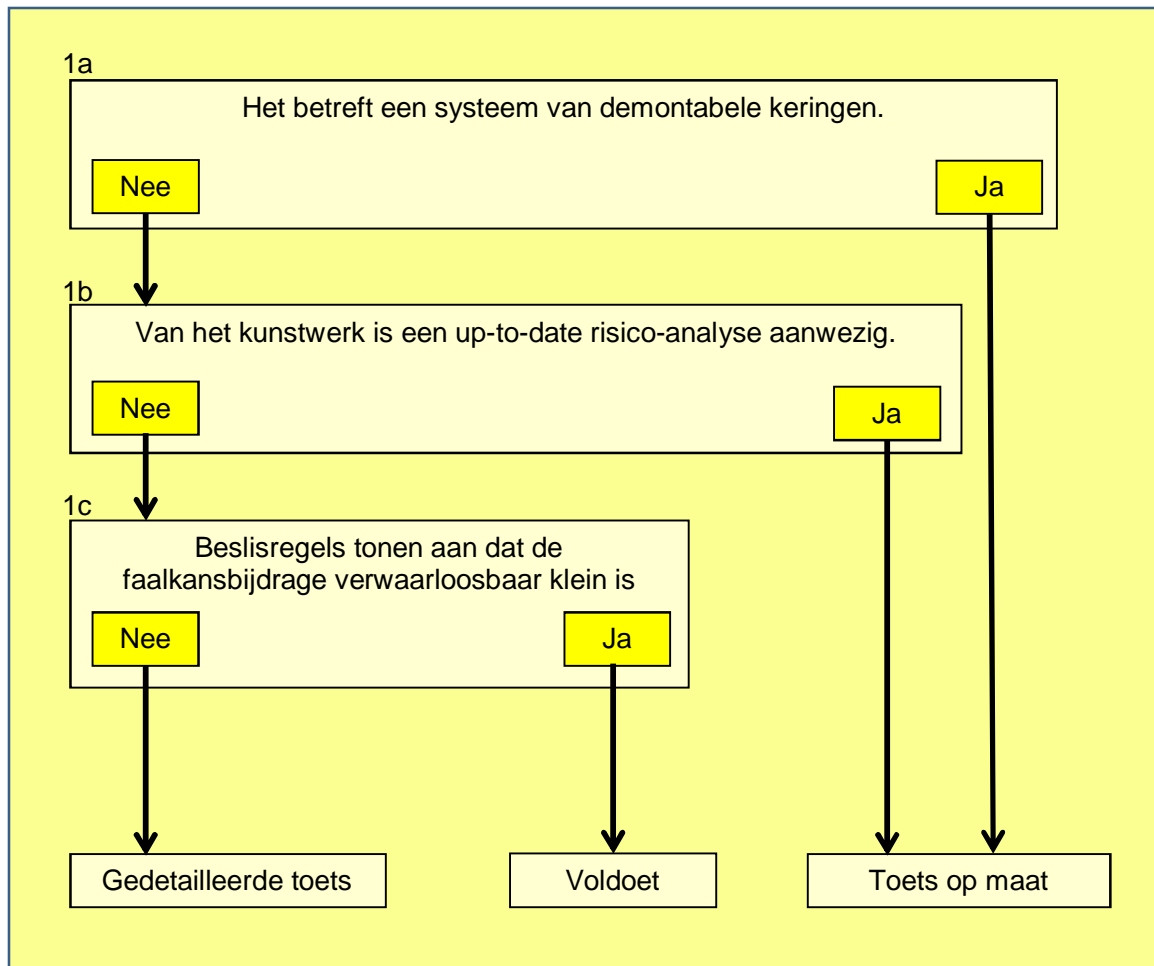
In onderstaande Figuur 2-1 is het algemene toetsschema gegeven waarmee binnen het WTI 2017 gewerkt wordt. Middels het zwarte kader is tevens aangegeven waarop de in dit hoofdstuk gepresenteerde toetsschema's betrekking hebben.



Figuur 2-1 Algemeen toetsschema WTI2017

2.2 Eenvoudige toets (toetslaag 1)

Hieronder is in Figuur 2-2 het toetsschema voor de eenvoudige toets van *betrouwbaarheid sluiting* voor het WTI2017 weergegeven.



Figuur 2-2 Toetsschema eenvoudige toets (toetslaag 1) voor betrouwbaarheid sluiting

Het toetsschema voor de eenvoudige toets (toetslaag 1) van *betrouwbaarheid sluiting* in het WTI 2017 is deels overgenomen uit het WTI 2011. De aanpassingen zijn:

- De opmaak van het schema is aangepast aan de huisstijl van het WTI 2017.
- In het WTI 2011:
 - ...wordt bij stap 1a.1 specifiek naar de demontabele keringen van de Maaskaden verwezen. Dat is in stap 1a van WTI 2017 verwijderd, omdat er ook op andere plekken demontabele keringen zijn, met vergelijkbare problematiek. Ook biedt dit de mogelijkheid om alle demontabele keringen op een zelfde wijze te beoordelen.
 - ...staat bij stap 1a.2 "Specificaties conform Leidraad Kunstwerken voor gebruik en beheer". Het gaat er hierbij om dat deze specificaties zijn toegepast en worden gehandhaafd. In de praktijk is dit een lastige stap, mede omdat het niet precies duidelijk is wat hier onder valt. Deze stap wordt dan ook zelden toegepast. Daarom is er in WTI 2017 voor gekozen deze stap te verwijderen.

- ...wordt onder stap 1b.1 nog een apart toetschema doorlopen, waarbij enkele bedieningskenmerken beoordeeld moeten worden. Dat spoor is nu losgelaten en vervangen door eenvoudige beslisregels in stap 1c van WTI 2017.
- Binnen het WTI 2017 wordt in stap 1b gecontroleerd of er een up-to-date risico-analyse aanwezig is. Indien dit het geval is, dan kan in de Toets op maat worden vastgesteld of deze risico-analyse aantoont dat het kunstwerk al dan niet voldoet. In feite is een risico-analyse immers een geavanceerde toetsing (Toets op maat) en is de verwachting dat een gedetailleerde toets niet tot een gunstiger beeld zal leiden.
- Binnen het WTI 2017 wordt in stap 1c een concrete invulling gegeven. Hieronder staan voorwaarden waarbij een object als voldoende wordt beoordeeld ten aanzien van *betrouwbaarheid sluiting*. In paragraaf 2.4 worden deze beslisregels herhaald en wordt een toelichting hierop gegeven.

Stap 1a: Het betreft een systeem van demontabele keringen.

Een systeem van demontabele waterkeringen is een mobiele kering van het type langsconstructie waarvan een deel van de constructie alleen bij dreigend hoogwater wordt opgebouwd en waarvan onder normale omstandigheden slechts een beperkt deel van de constructie (zoals funderingsbalken, kwelschermen, of aansluitingen op bestaande constructies) achterblijft op het waterkeringstracé. Indien het kunstwerk bestaat uit een systeem van demontabele keringen, dan dient verder gegaan te worden met de Toets op maat. Als het kunstwerk geen systeem van demontabele keringen betreft wordt de toets voortgezet met Stap 1b.

Stap 1b: Er is een up-to-date risico-analyse aanwezig.

Als er een risico-analyse van de actuele situatie aanwezig is, dan kan dit een efficiënte route naar een oordeel 'Voldoet' opleveren; in de Toets op maat moet worden vastgesteld of deze risico-analyse aantoont dat het kunstwerk al dan niet voldoet. Is er geen risico-analyse aanwezig, dan wordt de toets voortgezet met Stap 1c.

Stap 1.3: Beslisregels tonen aan dat de faalkansbijdrage verwaarloosbaar klein is.

Indien een kunstwerk in stap 1c van WTI 2017 (zie Figuur 2) aan een of meer van de volgende beslisregels voldoet, dan kan het oordeel 'voldoet' voor *betrouwbaarheid sluiting* aan dit kunstwerk worden toegekend:

- A. **Gemaal:** Het gemaal is van twee hoogwaterkerende keermiddelen voorzien die met het pompbedrijf zijn gekoppeld.
- B. **Gemaal en in- en uitwateringssluis:** Het kunstwerk beschikt over één watervoerende leiding door de waterkering met minimaal één hoogwaterkerend keermiddel en deze leiding heeft een diameter kleiner of gelijk aan 0,5 m.
- C. **Gemaal:** Het gemaal is voorzien van leidingen met een diameter kleiner of gelijk aan 1,0 m, welke beschikken over minimaal één hoogwaterkerend keermiddel en het binnendijkse instroomhoofd ligt buiten de invloedzone van de waterkering.
- D. **Schutsluis:** De fysiek kerende hoogte van de hoogwaterkerende keermiddelen in het binnen- en buitenhoofd en van de kolk van de schutsluis is aan elkaar gelijk. Aanvullend geldt dat de schutsluis geen situaties kent waarbij deze helemaal geopend staat. Nooit mogen alle schutdeuren open staan om:

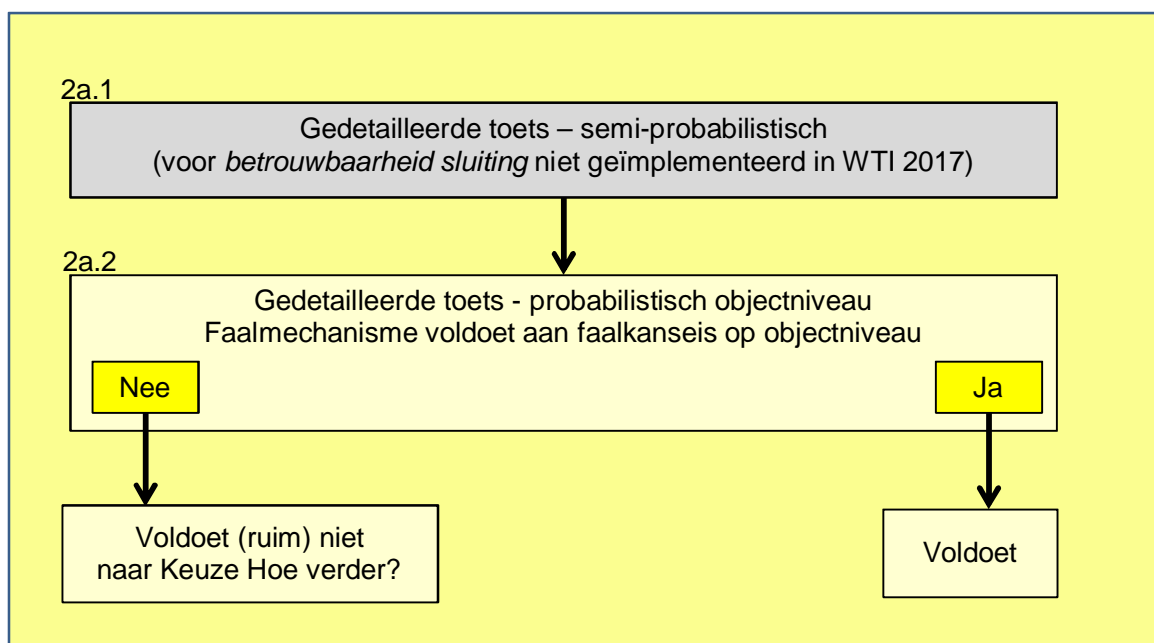
- De scheepvaart vrije doorvaart te geven als er geen verval is.
- Water in dan wel uit de polder te laten.

E. **Uitwateringssluis:** De uitwateringssluis of vrij verval rioolleiding/riooloverstortleidingen (duikers), uitgerust met minimaal één hoogwaterkerend keermiddel komt binnendijks buiten de invloedszone van de waterkering uit in een inspectieput, waarvan de toegang minimaal op het niveau van het maaiveld ligt.

In de overige gevallen wordt de beoordeling vervolgd met de Gedetailleerde toets (toetslaag 2).

2.3 Gedetailleerde toets (toetslaag 2)

In Figuur 2-3 is het toetsschema voor de gedetailleerde toets van *betrouwbaarheid sluiting* voor het WTI 2017 weergegeven.



Figuur 2-3 Toetsschema gedetailleerde toets voor betrouwbaarheid sluiting

Voor het toetsspoor *betrouwbaarheid sluiting* wordt in het WTI 2017 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 herleidbaarheid en overzichtelijkheid is de toetsstap wel in de bovenstaande figuur weergegeven, maar dan grijs gearceerd.

Voor de Gedetailleerde toets van betrouwbaarheid sluiting wordt in het WTI 2017 een probabilistische toets met een faalkanseis op objectniveau uitgevoerd met behulp van de door het WTI programma beschikbaar gestelde software (de toets in stap 2a.2 van WTI 2017 wordt uitgevoerd met behulp van het programma Ringtoets). De mechanismes zijn beschreven in de fenomenologische beschrijvingen in paragraaf 4.2. De schematisatie wordt opgesteld conform de schematiseringshandleiding [DLT-shbs 2015]. In Figuur 3-1 is de modellering van het toetsspoor betrouwbaarheid sluiting in de vorm van een faalboom weergegeven.

2.4 Onderbouwing eenvoudige beslisregels

In deze paragraaf worden de eenvoudige beslisregels herhaald en worden de gedachten die hierbij ten grondslag liggen bijgevoegd. De bedoeling van deze paragraaf is dat die niet wordt opgenomen in de hoofdrapporten van het WTI 2017, maar wel zichtbaar blijft in de achtergrondrapporten, zodat de onderbouwing van deze beslisregels vast ligt. Bij elke beslisregel is in blauwe tekst aangegeven wat de grondslag hiervan is.

Hieronder staan voorwaarden waarbij een object als voldoende wordt beoordeeld ten aanzien van betrouwbaarheid sluiting:

- A. **Gemaal:** Het gemaal is van twee hoogwaterkerende keermiddelen voorzien die met het pompbedrijf zijn gekoppeld. Een dergelijk gemaal is buiten bediende¹ tijd altijd gesloten. En als de keermiddelen zijn gefaald, dan is er nog de pomp die voor weerstand zorgt bij instroming. In geval van meerdere pompen kan het door de falende maalgang instromende water wellicht weer (deels) worden weggepompt via een niet falende maalgang. In de praktijk is het meestal onmogelijk een pomp tegen een waterstroming in op te starten.
- B. **Gemaal en in- en uitwateringssluis:** Het kunstwerk beschikt over één watervoerende leiding door de waterkering met minimaal één hoogwaterkerend keermiddel en deze leiding heeft een diameter kleiner of gelijk aan 0,5 m. Bij dergelijke kleine afmetingen zijn de gevolgen van niet sluiten zeer beperkt (geen grote schade en slachtoffers) en treedt er geen bres op in de waterkering. Handsommen tonen aan dat zelfs een verval van meerdere meters de instromende hoeveelheid water dusdanig beperkt is, dat deze altijd opgevangen kan worden.
- C. **Gemaal:** Het gemaal is voorzien van leidingen met een diameter kleiner of gelijk aan 1,0 m, welke beschikken over minimaal één hoogwaterkerend keermiddel en het binnendijkse instroomhoofd ligt buiten de invloedszone van de waterkering. In dit geval stroomt er bij het niet gesloten zijn van het object wel water naar binnen, maar dit leidt dan niet tot een bres in de waterkering en daarmee tot grote gevolgen. Het wordt daarnaast reëel geacht dat het gedurende een hoogwaterperiode op korte termijn mogelijk moet zijn om een dergelijke leiding alsnog provisorisch te sluiten. Indien meerdere maalgangen aanwezig zijn, dan is het wellicht ook nog mogelijk om het ongewenste instromende water door een maalgang weer uit te slaan met behulp van een andere maalgang. Dit is onder meer afhankelijk van de opvoerhoogte van de pompen.
- D. **Schutsluis:** De fysiek kerende hoogte van de hoogwaterkerende keermiddelen in binnen- en buitenhoofd en de kolk van de schutsluis is aan elkaar gelijk. Aanvullend geldt dat de schutsluis geen situaties kent waarbij deze helemaal geopend staat, omdat er geen verval aanwezig is of omdat er water ingelaten dan wel uitgelaten wordt door het openzetten van de schutdeuren. In dit geval zal de sluis ook tijdens het schutproces de benodigde kerende hoogte hebben. En daarmee is het sluiten van de keermiddelen niet direct meer van belang. Randvoorwaarde is dat de sluis niet gedurende langere periode helemaal open staat, omdat er bv geen verval is of omdat er met de schutsluis ook in- of uitgelaten wordt. De sluis moet dus altijd gesteld staan in de schutfunctie.

¹ Met bediende tijd wordt bedoeld, de tijd waarin het gemaal zijn waterbeheersingsfunctie vervuld.

Bovenstaande gaat ervan uit dat fouten in de bediening, zoals het openen van het ene hoofd terwijl ook het andere hoofd geopend is, niet plaats vinden. Bij puntdeuren betekent dit immers dat de keermiddelen tegen de waterdruk in geopend moeten worden. Daarnaast geldt dat verwacht mag worden dat een fout in de bediening ook afgedekt is.

- E. **Uitwateringssluis:** De uitwateringssluis of vrij verval rioolleiding/riooloverstortleidingen (duikers), uitgerust met minimaal één hoogwaterkerend keermiddel komt binnendijks buiten de invloedzone van de waterkering uit in een inspectieput, waarvan de toegang minimaal op het niveau van het maaiveld ligt. Doordat de duikers uitkomen in een inspectieput is het ontstaan van ontgrondingen en daarmee het ontstaan van een bres met grote gevolgen uitgesloten.

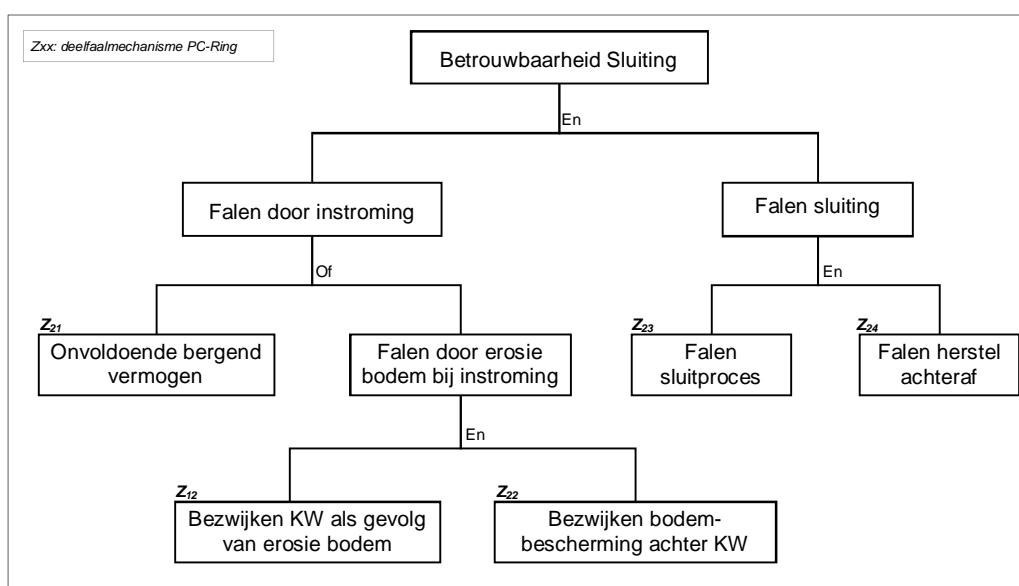
3 Factsheet gedetailleerde toets

Dit hoofdstuk dient als overzicht voor de totale kennisbasis van het toetsspoor *betrouwbaarheid sluiting* van kunstwerken (BS). De factsheet beschrijft het faalmechanisme van faalboom tot aan geschematiseerde parameters. 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 beknopte samenvatting van enkele bouwstenen waaruit de complete beschrijving van het faalmechanisme bestaat. Het is een samenstelling van het toetsschema (bouwsteen B-TS, zie hoofdstuk 2) de faalmechanismebeschrijving (bouwsteen B-FMB, zie hoofdstuk 4 tot en met 9) en de schematiseringshandleiding (bouwsteen B-SH, zie [DLT-shbs 2015])

3.1 Faalboom

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



Figuur 3-1 Modellering toetsspoor *betrouwbaarheid sluiting*

Falen ten gevolge van *betrouwbaarheid sluiting*² treedt op indien zoveel water door het niet gesloten kunstwerk gaat, dat dit tot dusdanige gevolgen aan de binnenzijde van de waterkering leidt, dat significante gevolgen³ optreden. Voorafgaand aan de instroming van water is de sluiting van het kunstwerk gefaald.

² Initiatie van een hoogwatersluiting vindt plaats middels de buitenwaterstand. De kans dat een kunstwerk gesloten moet worden is afhankelijk van de frequentie van overschrijding van de maximaal toelaatbare buitenwaterstand met betrekking tot komberging van het achterland en erosie van de bodembescherming. De frequentie van benodigde sluitingen wordt in de modellering meegenomen.

³ Wat significante gevolgen zijn is niet vast gedefinieerd. In het WTI is dit daarom nader uitgewerkt volgens bijlage C, in het besef dat de beleidsmatige discussie hierover momenteel wordt gevoerd en bijlage C dus mogelijk nog wijzigt.

De volgende deelfaalmechanismen zijn aanwezig:

- Z₁₂ Kans dat het kunstwerk als geheel bezwijkt (onderuit gaat) gegeven het feit dat 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.
- Z₂₁ Falen van het kunstwerk als gevolg van onvoldoende waterbergend vermogen in het achterland, doordat er te veel water instroomt gedurende een hoogwatergolf.
- Z₂₂ Bezwijken van de bodembescherming achter het kunstwerk als gevolg van het instromende water.
- Z₂₃ Falen van het sluitproces van de (hoog)waterkerende keermiddelen, waardoor het kunstwerk niet gesloten is.
- Z₂₄ Falen van het herstel van een falende sluiting.

3.2 Deelfaalmechanisme Z₁₂: Bezwijken kunstwerk als gevolg van erosie bodem

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

3.2.1 Z-functie

$$Z_{12} = \beta_{kw|erosie\ bodem} - u \quad 3-1$$

Hierin is:

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

3.2.2 Model

$$\beta_{kw|erosie\ bodem} = -\Phi^{-1}\left(P_{f,kw|erosie\ bodem}\right) \quad \Phi^{-1}: \text{inverse van de standaard normale verdeling} \quad 3-2$$

Hierin is

	eenheid	betreft	geldigheidsgebied	type	Parameters Verdeling		Ruimtelijke spreiding		Variatie in de tijd	
					μ	V/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
$P_{f,kw erosie\ bodem}$	[-]	Faalkans kunstwerk gegeven bezwijken bodembescherming en optreden van erosie bodem	$0 \leq P_{f,kw erosie\ bodem} \leq 1$	det	Invoer	-	-	-	-	-
u	[-]	Hulpparameter probabilistische som		nor	0	$\sigma=1,0$	-	-	-	-

3.3 Deelfaalmechanisme Z₂₁: Onvoldoende bergend vermogen

Dit deelfaalmechanisme beschrijft de kans dat het aanwezige bergend vermogen niet toereikend is om het totale instromende volume als gevolg van niet sluiten tijdens een hoogwatergolf te bergen in het achterliggende systeem, zonder dat dit tot significante gevolgen leidt.

3.3.1 Z-functie

$$Z_{21} = V_c - V_{instroom} \quad 3-3$$

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

$V_{instroom}$ [m³] Instromend volume door het geopende kunstwerk gedurende een hoogwaterperiode. Dit is de belasting van het achterland

3.3.2 Sterktemodel

$$V_c = m_{kom} \cdot A_{kom} \cdot \Delta h_{kom} \quad \text{Kombergend volume achterland} \quad 3-4$$

	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	-	logn	1,0	$\sigma=0,20$	KW	0	-	1
A_{kom}	[m ²]	Kombergend oppervlak	$A_{kom} > 0$	logn	invoer	$V_r=0,10$	KW	0	-	1
Δh_{kom}	[m]	Kritieke peilverhoging komberging	$\Delta h_{kom} > 0$	logn	invoer	$\sigma=0,10$	KW	0	-	1

3.3.3 Belastingmodellen

$$V_{instroom} = m_{in} \cdot f_{ts|open} \cdot t_s \cdot Q_{in|open} \quad \text{Instromend volume achterland} \quad 3-5$$

	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	1,0	-	-	-	-	-
$f_{ts open}$	[-]	Factor voor stormduur hoogwater gegeven geopend kunstwerk	$0 < f_{ts open} < 1$	det	invoer	-	-	-	-	-
t_s	[uur]	stormduur	$t_s > 0$	logn	7,5	$V_r=0,25$	-	1	12 u	0
$Q_{in open}$	[m ³ /s]	Instromend debiet door kunstwerk gegeven geopend kunstwerk								

Voor het instromende debiet bij een geopend kunstwerk zijn een aantal modellen beschikbaar:

Overslag/overloopdebet verticale wand

$$Q_{in|open} = B \cdot m_{OL} \cdot 0,55 \cdot \sqrt{-g \cdot (h_{kr,NS} - h)^3} + B \cdot m_{os} \cdot \sqrt{g \cdot (H_{s,HR})^3} \quad \begin{matrix} h > h_{kr,NS} \\ \text{aanlandige wind}^4 \end{matrix} \quad 3-6$$

Onvolkomen stroming over lage drempel

$$Q_{in|open} = B \cdot m_{onv} \cdot (h_{bi} - h_{ok}) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h - h_{bi})} \quad h < {}^{3/2}h_{bi} - {}^{1/2}h_{ok} \quad 3-7$$

Volkomen stroming over lage drempel

$$Q_{in|open} = B \cdot m_{OL} \cdot 0,55 \cdot \sqrt{g \cdot (h - h_{ok})^3} \quad h \geq {}^{3/2}h_{bi} - {}^{1/2}h_{ok} \quad 3-8$$

⁴ Bij een aflagige wind vervalt de laatste term met daarin de golfhoogte in de formule en blijft alleen het overloopgedeelte over.

Stroming door verdronken koker

$$Q_{in|open} = \mu \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h - h_{bi})} \quad 3-9$$

Ten aanzien van de golfcondities wordt nog een aanpassing van de significante golfhoogte (H_s in formule 3-6) doorgevoerd op het moment dat er sprake is van scheve golfinval. Hierbij wordt aangesloten bij hetgeen ook bij het beoordelingsspoor *hoogte* is ingevoerd.

De hoek van golfinval β is als volgt gedefinieerd:

$$\begin{aligned} |\theta - \Psi_{kw}| \leq 180 &\Rightarrow \beta = |\theta - \Psi_{kw}| \\ |\theta - \Psi_{kw}| > 180 &\Rightarrow |(\theta - \Psi_{kw}) - 360| \end{aligned} \quad 3-10$$

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:

$$H_s = \gamma_s \cdot H_{s,HR} \quad 3-11$$

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:

$$\begin{aligned} 0 < \beta \leq 80 &\Rightarrow \gamma_s = 1,0 \\ 80 < \beta \leq 110 &\Rightarrow \gamma_s = (110 - \beta)/30 \\ 110 < \beta \leq 180 &\Rightarrow \gamma_s = 0,0 \end{aligned} \quad 3-12$$

Of kortweg:

$$\gamma_s = \max\{0,0; \min\{1,0; (110 - \beta)/30\}\} \quad 3-13$$

	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 doorstroomopening(en)	$B > 0$	nor	invoer	$\sigma=0,05$	KW	0	-	1
m_{OL}	[-]	Modelfactor overloopdebiet volkomen overlaat	$0,6 \leq m_{OL} \leq 1,20$	nor	1,1	$\sigma=0,03$	KW	0	-	1
m_{onv}	[-]	Modelfactor voor onvolkomen stroming	$0,7 \leq m_{onv} \leq 2,0$	nor	1,0	$V_r=0,10$	KW	0	-	1
m_{os}	[-]	Modelfactor voor overslagdebiet	-	logn	0,09	$\sigma=0,06$	KW	0	-	1
μ	[-]	Afvoercoëfficiënt	$1,0 \leq \mu \leq 2,0$	nor	1,0	$\sigma=0,20$	KW	0	-	1
A	[m ²]	Doorstroomoppervlak doorstroomopening(en)	$A \geq 0$	logn	invoer	$\sigma=0,01$	KW	0	-	1
$h_{kr,NS}$	[+mNAP]	Niveau kruin bij niet gesloten maximaal kerende keermiddelen	$-10 \leq h_{kr,NS} \leq 50$	nor	invoer	$\sigma=0,05$	KW	0	-	1
h_{bi}	[+mNAP]	binnenwaterstand	$-10 \leq h_{bi} \leq 50$	nor	invoer	$\sigma=0,10$	KW	1	12 u	0
h_{dr}	[+mNAP]	Drempelhoogte niet gesloten kering	$-10 \leq h_{ok} \leq 50$	nor	invoer	$\sigma=0,10$	KW	0	-	1
ψ_{kw}	[°]	Oriëntatie normaal van kunstwerk	$0^\circ < \psi_{kw} \leq 360^\circ$	det	invoer	-	-	-	-	-
g	[m/s ²]	Gravitatieversnelling	9,81	det	9,81	-	-	-	-	-
h	[+mNAP]	Lokale buitenwaterstand	-	-	Wordt gegenereerd door Hydra-Ring					
θ	[°]	Golfrichting	$0^\circ < \theta \leq 360^\circ$	-	Wordt gegenereerd door Hydra-Ring					
φ	[°]	Hoek windrichting	-	-	Wordt gegenereerd door Hydra-Ring					
$H_{s,HR}$	[m]	Significante golfhoogte zoals gegenereerd door Hydra-Ring	-	-	Wordt gegenereerd door Hydra-Ring					

	eenheid	betreft	geldigheidsgebied	type	Parameters Verdeling		Ruimtelijke spreiding		Variatie in de tijd	
					μ	V_r/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
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						

3.4 Deelfaalmecanisme Z_{22} : Bezwijkten bodembescherming achter kunstwerk

Dit deelfaalmecanisme beschrijft de kans op het bezwijken van de bodembescherming achter het kunstwerk als gevolg van instromende water door het geopende kunstwerk, wat uiteindelijk leidt tot het ontstaan van erosiekuilen.

3.4.1 Z-functie

$$Z_{22} = Q_c - Q_{in|open} \quad 3-14$$

Hierin is:

Q_c [m³/s] Kritiek debiet waarbij de bodembescherming bezwijkt.

$Q_{in|open}$ [m³/s] Instromend debiet door kunstwerk gegeven geopend kunstwerk

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.

$$Q_c = q_c \cdot B_{sv} \quad 3-15$$

	eenheid	betreft	geldigheidsgebied	type	Parameters Verdeling		Ruimtelijke spreiding		Variatie in de tijd	
					μ	V_r/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
q_c	[m ³ /s/m]	Kritieke instromend debiet	$q_c \geq 0$	logn	invoer	$V_r=0,15$	KW	0	-	1
B_{sv}	[m]	Stroomvoerende breedte bodembescherming	$B_{sv} \geq 0$	logn	invoer	$\sigma=0,05$	KW	0	-	1

3.4.3 Belastingmodel

Voor de belastingmodellen met betrekking tot het instromende debiet wordt verwezen naar §3.3.3.

3.5 Deelfaalmecanisme Z_{23} : Falen van het sluitproces

Dit deelfaalmecanisme beschrijft de kans per vraag dat sluiting van de hoogwaterkerende keermiddelen van een kunstwerk faalt, waardoor ongewenste instroming van water kan plaatsvinden.

3.5.1 Z-functie

$$Z_{23} = \beta_{ns} - u \quad 3-16$$

Hierin is:

β_{ns} [-] Betrouwbaarheidsindex van de faalkans van sluiting

u [-] Standaard normaal verdeelde variabele als hulpmiddel voor de probabilistische som

3.5.2 Model

$$P_{f,sluitproces} = n \cdot P_{ns} \cdot P_{open} \quad 3-17$$

$$\beta_{ns} = -\Phi^{-1}(P_{f,sluitproces}) \quad \Phi^{-1}: \text{inverse van de standaard normale verdeling} \quad 3-18$$

Hierin is

	eenheid	betreft	geldigheidsgebied	type	Parameters Verdeling		Ruimtelijke spreiding		Variatie in de tijd	
					μ	V_f/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
$P_{f,sluitproces}$	[-]	Faalkans van sluiting	$0 < P_{sluitproces} \leq 1$	-	-	-	-	-	-	-
n	[-]	Aantal identieke doorstroomopeningen	$n \geq 1$	det	invoer	-	-	-	-	-
P_{ns}	[1/vraag]	Kans op mislukken sluiting van geopend kunstwerk	$0 < P_{ns} \leq 1$	det	invoer	-	-	-	-	-
P_{open}	[-]	Kans op open staan bij naderend hoogwater	$0 < P_{open} \leq 1$	det	invoer	-	-	-	-	-
u	[-]	Hulpparameter probabilistische som		nor	0	$\sigma=1,0$	-	-	-	-

3.6 Deelfaalmechanisme Z_{24} : Falen van herstel van het sluitproces

Dit deelfaalmechanisme beschrijft de kans dat na een gefaalde sluiting van de hoogwater kerende keermiddelen het herstel van deze mislukte sluiting faalt.

3.6.1 Z-functie

$$Z_{24} = \beta_{f,herstel} - u \quad 3-19$$

Hierin is:

$\beta_{f,herstel}$ [-] Betrouwbaarheidsindex van de faalkans van herstel van de faalsituatie
 u [-] Standaard normaal verdeelde variabele, representeert de intrinsieke onzekerheid van het model.

3.6.2 Model

$$\beta_{f,herstel} = -\Phi^{-1}(P_{f,herstel}) \quad \Phi^{-1}: \text{inverse van de standaard normale verdeling} \quad 3-20$$

Hierin is

	eenheid	betreft	geldigheidsgebied	type	Parameters Verdeling		Ruimtelijke spreiding		Variatie in de tijd	
					μ	V_f/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
$P_{f,herstel}$	[-]	Faalkans herstel van gefaalde situatie (niet sluiten)	$0 < P_{f,herstel} \leq 1$	-	-	-	-	-	-	-
u	[-]	Hulpparameter probabilistische som		nor	0	$\sigma=1,0$	-	-	-	-

4 Beschrijving faalmechanisme *niet sluiten*

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een beschrijving gegeven van het faalmechanisme *niet sluiten* van hoogwaterkerende kunstwerken behorende bij het toetsspoor *betrouwbaarheid sluiting*. Deze beschrijving is grotendeels geënt op hetgeen hierover staat beschreven in de [TAW-LK 2003].

Het faalmechanisme *betrouwbaarheid sluiting* kan zowel bij hoogwaterkerende punt⁵ als langsconstructies een rol spelen. In het laatstgenoemde geval gaat het om demontabele keringen die over grote lengten aanwezig zijn. De methode in de [TAW-LK 2003] is niet op dergelijke constructies ingericht, maar geeft wel handvatten voor een eerste verkenning hiervan. Het toetsspoor *betrouwbaarheid sluiting* voor langsconstructies wordt overigens in een apart document uitgewerkt. Hier vindt de uitwerking voor de puntconstructies plaats.

De verwachting is dat het brondocument [TAW-LK 2003] in de komende jaren (deels) wordt herschreven. In de nieuwe leidraad wordt de overstromingskansbenadering opgenomen, wat tot aanpassingen van met name de toelaatbare faalkansruimte, en wellicht ook het faal criterium zal leiden. De basisfilosofie omtrent het faalmechanisme *niet sluiten* verandert naar alle waarschijnlijkheid niet.

4.2 Fenomenologische beschrijving

4.2.1 Beschrijving op hoofdlijnen

Kunstwerken in waterkeringen worden aangelegd met als doel om water, mensen, voer- en vaartuigen en/of goederen een waterkering te laten passeren. In feite is dat de primaire functie van deze kunstwerken. Om dit passeren mogelijk te maken zijn in de kunstwerken openingen aanwezig, die de waterkerende functie van de kering ondermijnen. Dit wordt ondervangen door deze openingen afsluitbaar te maken middels één of meerdere keermiddelen. Hiermee wordt de functie van waterkeren bij de kunstwerken gerealiseerd.

De aanwezigheid van afsluitbare openingen in een waterkering brengt met zich mee dat er een kans is dat deze openingen niet zijn afgesloten op momenten dat dit vanuit het oogpunt van waterveiligheid wordt verlangd. Het faalmechanisme *niet sluiten*, behorende bij het toetsspoor *betrouwbaarheid sluiting*, heeft betrekking op het bepalen van deze kans.

Bij het sluiten van de keermiddelen is er altijd een kans dat deze sluiting mislukt. Wanneer dit gebeurt, en op dat moment doet zich een waterstand aan de buitenzijde van de waterkering voor die dusdanig hoog is dat er ongewenst water door de openingen van buiten naar binnen stroomt, dan ontstaat een kans op falen van de waterkering.

Daadwerkelijk falen als gevolg van *niet sluiten* treedt op indien:

- De hoeveelheid instromend water per tijdseenheid door het niet gesloten kunstwerk een bepaald kritiek debiet overschrijdt of

⁵ onder puntconstructies worden waterkerende kunstwerken verstaan die in de richting van de as van de waterkering een dusdanig beperkte lengte hebben dat een eventueel lengte-effect verwaarloosbaar is;

- De totale hoeveelheid instromend water een bepaald kritiek volume overschrijdt waarbij er substantiële⁶ (overstromings)gevolgen aan de binnenzijde van de waterkering optreden.

De grondslag voor het kritieke debiet of het kritieke instromende volume is afhankelijk van specifieke sterkte-eigenschappen van een kunstwerk en de kenmerken van het achterliggende watersysteem. Bij dit laatste wordt bedoeld op het vermogen van het achterliggende watersysteem om een bepaalde hoeveelheid instromend water te bergen (komberging) zonder dat dit tot grote gevolgen leidt. Bij de sterkte-eigenschappen speelt met name de sterkte van de binnendijks aanwezige bodembescherming een rol. Indien deze bodembescherming de optredende stroomsnelheden niet kan weerstaan – op dit moment wordt de kritieke stroomsnelheid overschreden – ontstaat erosie van de bodembescherming. Dit kan leiden tot ontgrondingen, en daarmee uiteindelijk tot instabiliteit van het kunstwerk als geheel. Tussen het overschrijden van het kritieke debiet en het geheel bezwijken van het kunstwerk bevindt zich nog een bepaalde reststerkte. Deze kan in de bepaling van de faalkans (bezwijkkans) worden meegenomen.

4.2.2 Gedetailleerde beschrijving van het faalproces

4.2.2.1 Belasting

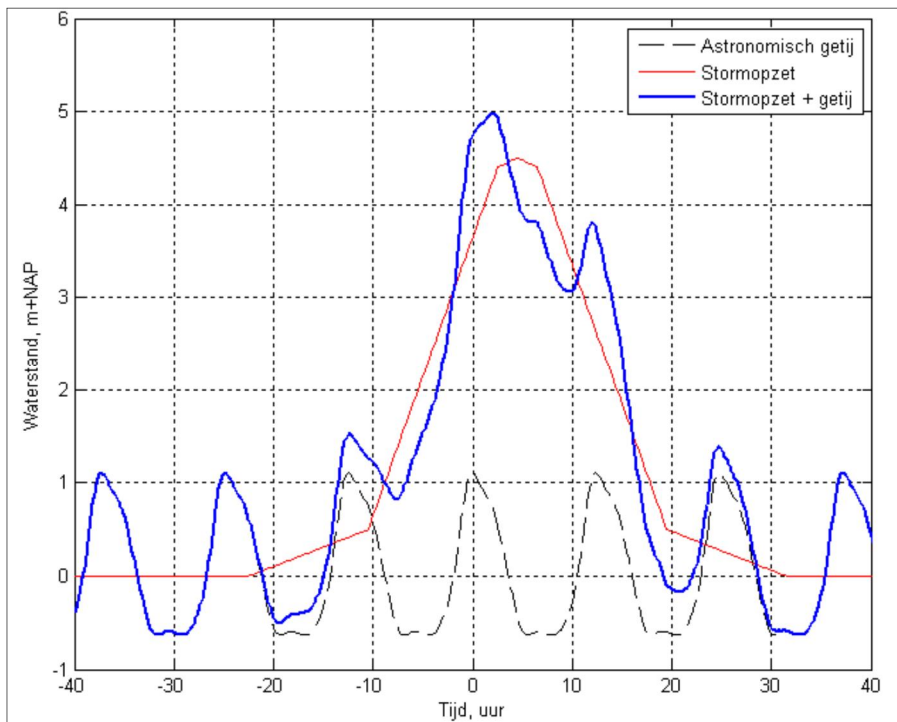
De hydraulische belasting bestaat uit water dat door het niet hoogwaterkerend gesloten kunstwerk naar binnen stroomt. Dit vindt plaats op het moment dat de buitenwaterstand hoger is dan de drempel van het niet hoogwaterkerend gesloten kunstwerk of de binnenwaterstand achter het kunstwerk. Het instromende water vormt de belasting op het achterliggende watersysteem (komberging) en de bodembescherming (erosie) aan de binnenzijde van het kunstwerk.

De hydraulische belasting worden gevormd door de buitenwaterstand en de golven. In combinatie met het watersysteem-afhankelijke verloop van een hoogwatergolf bepaalt deze belasting in een gegeven situatie mede de totale hoeveelheid instromend water. Eigenschappen van het kunstwerk, zoals afmetingen van de doorstroomopeningen en de hoogte van de drempel van het niet gesloten kunstwerk, zijn ook van invloed op het instromende volume.

Het verloop van een hoogwater is afhankelijk van het watersysteem waarvan het kunstwerk deel uitmaakt. Zo is het verloop van een hoogwatergolf in het benedenrivierengebied anders dan dat van een hoogwatergolf langs de kust. In Figuur 4-1 is het waterstandsverloop in de tijd voor een locatie in het benedenrivierengebied gegeven.

De afmetingen van de doorstroomopening(en) en hoogteligging van de drempel van het niet hoogwaterkerende gesloten kunstwerk zijn van invloed op het instromende debiet dat bij een bepaalde waterstand optreedt. Hiermee bepalen deze factoren, samen met de buitenwaterstand, de belastingen op het kunstwerk en de bijbehorende komberging. In de basis zijn er drie situaties mogelijk:

⁶ In de overstromingsrisicobenadering zoals die binnen het WT1 2017 geldt, wordt de grondslag voor het kritieke instromende volume gekoppeld aan substantiële gevolgen. In bijlage C wordt hier nader op ingegaan.



Figuur 4-1 Waterstandsverloop in de tijd voor een locatie in het benedenrivierengebied (bron: [HKV-Wzzw 2014])

1. *Verticale wand of hoge drempel (bv coupure)*

In dit geval is bij het niet hoogwaterkerend gesloten zijn van het kunstwerk een element in het kunstwerk aanwezig, dat zorgt voor een drempel waar het water via golfoverslag en/of overloop overheen moet stromen. 'Hoge' heeft hier betrekking op het feit dat de hoeveelheid instromend water geen invloed ondervindt van eventueel aanwezig binnenwater.

2. *Lage drempel (bv coupure)*

Hierbij is bij het niet hoogwaterkerend gesloten zijn van het kunstwerk direct contact tussen buiten- en binnenwater, waardoor het debiet aan instromend water beïnvloed wordt door de binnenwaterstand.

3. *Verdronken koker*

Water stroomt bij het niet hoogwaterkerend gesloten zijn van het kunstwerk via een buis of koker naar binnen, waarbij er direct contact is tussen binnen- en buitenwater en waarbij de constructie geheel onder water ligt. In tegenstelling tot de lage drempel zijn de afmetingen van de doorstroombopening hierbij fysiek beperkt.

Voor deze drie situaties zijn algemeen geldende hydraulica formules beschikbaar, die kunnen worden gevonden in betreffende vakliteratuur ([Nortier-tvm 1996], [TUD-vmB70 1990]). Zie ook de schematiseringshandleiding [DLT-shbs 2015].

4.2.2.1. *Sterkte*

De sterkte van het kunstwerk bestaat in feite uit de betrouwbaarheid van het sluitingsproces van de keermiddelen in combinatie met de volgende twee componenten: de sterkte van het kunstwerk zelf en het kombergend vermogen van het achterland.

De sterkte van het kunstwerk zelf, tot uiting gebracht in de sterkte van de binnendijks aanwezige bodembescherming, 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 de binnendijks aanwezige bodembescherming is veelal maatgevend ten opzichte van het kombergend vermogen. De bodembescherming wordt in toenemende mate belast naarmate het instromend debiet toeneemt.

De betrouwbaarheid van het sluitingsproces van de keermiddelen in een kunstwerk gegeven een sluitvraag kan in een kans op falen van het sluiten gegeven hoogwater worden uitgedrukt. Hierbij zijn de volgende gegevens van belang:

- a. procedure en technische uitvoering sluiting hoogwaterkerende keermiddelen;
- b. het (dagelijks) gebruik van het kunstwerk (i.e. hoogwaterkerende keermiddelen);
- c. mogelijkheden om een falende sluiting te herstellen.

ad a. Het aantal en type (inclusief aandrijving) hoogwaterkerende keermiddelen is primair van belang bij het sluitproces. Er zijn keermiddelen die uit zichzelf sluiten onder invloed van de zwaartekracht (terugslagkleppen), maar er zijn ook keermiddelen die met de hand geplaatst moeten worden (schothalken). Kunstwerken worden daarnaast ook vaak uitgerust met meerdere hoogwaterkerende keermiddelen ten einde een bepaalde betrouwbaarheid van sluiting na te streven.

Naast de fysieke uitvoering van het sluiten van de keermiddelen, is het ook van belang dat de procedure omtrent het sluiten goed is georganiseerd. Alarmering, mobilisatie en bediening zijn hierbij van wezenlijk belang. Om de faalkans van het sluiten van de hoogwaterkerende keermiddelen in te schatten zijn in [TAW-LK 2003] twee hulpmiddelen voor handen. Voor hoogwaterkerende keermiddelen die niet vanuit hun primaire functie worden gesloten zijn er vier scoretabellen aanwezig, op basis waarvan (door het beantwoorden van specifieke vragen) een faalkans van sluiting kan worden bepaald:

- Tabel B3.2 (voor falen hoogwateralarmeringssysteem).
- Tabel B3.3 (voor falen mobilisatie).
- Tabel B3.4 (voor falen bediening).
- Tabel B3.5 (voor falen bedrijfsvoering als gevolg van een technische storing).

Verder is er voor hoogwaterkerende keermiddelen die vanuit hun primaire functie meerdere keren per jaar gesloten worden in [TAW-LK 2003] een zestal tabellen met standaard faalkansen voor verschillende soorten componenten en rubrieken aanwezig:

- Tabel B3.7 (electrische/electronische componenten).
- Tabel B3.8 (electromechanische componenten).
- Tabel B3.9 (hydraulische, mechanische en pneumatische componenten).
- Tabel B3.10 (operationele belemmeringen).
- Tabel B3.11 (menselijk falen).
- Tabel B3.12 (enkele geïntegreerde systemen).

Deze standaard faalkansen zijn afgeleid uit specifieke literatuur omtrent faalfrequenties.

ad b. Het (dagelijks) gebruik van hoogwaterkerende keermiddelen vanuit een andere functie dan waterkeren is van invloed op de kans, dat een kunstwerk niet hoogwaterkerend

gesloten staat op het moment dat een hoogwatergolf zich voordoet. Daarnaast heeft het ook invloed op de kans dat het sluiten succesvol plaatsvindt. Met het sluiten van de keermiddelen wordt immers (vanuit de andere functie) routine met het fysieke sluitingsproces opgedaan. In beginsel worden er dan ook vier verschillende hoofdtypen kunstwerken in relatie tot dagelijks gebruik onderscheiden:

- A. *Altijd hoogwaterkerend gesloten kunstwerken*
De keermiddelen in dit type kunstwerken zijn zo geconfigureerd, dat (behoudens een calamiteit) de primaire functie kan worden vervuld met instandhouding van de hoogwaterkerende functie.
- B. *Op aanvraag te openen kunstwerken*
De keermiddelen in dit type kunstwerken zijn in beginsel altijd hoogwaterkerend gesloten en worden alleen op aanvraag geopend om zijn primaire functie uit te oefenen. Na afloop hiervan wordt het kunstwerk weer hoogwaterkerend gesloten.
- C. *Bij hoogwater te sluiten kunstwerken*
De keermiddelen in dit type kunstwerken staan (vanuit de primaire functie) altijd geopend en wordt bij een naderend hoogwater gesloten.
- D. *Bij calamiteit te sluiten kunstwerken*
Sluiting van de keermiddelen in dit type kunstwerken is alleen benodigd als zich een calamiteit voordoet waardoor het waterkerend vermogen wordt aangetast.

Het is evident dat een altijd hoogwaterkerend gesloten kunstwerk (i.e. type A) bij het beschouwen van falen door *niet sluiten* anders benaderd wordt dan een kunstwerk dat in beginsel geopend staat (i.e. type C of type D).

- N.B. 1) Er zijn ook nog kunstwerken waarvan de keermiddelen een bepaald deel van het jaar standaard gesloten staan, omdat de primaire functie gekoppeld is aan een bepaalde tijdsperiode in jaar. Een voorbeeld hiervan is een keersluis voor een recreantenhaven, die alleen in de zomer geopend staat.
- 2) Er zijn ook kunstwerken waarvan de keermiddelen, in verband met hun primaire functie (waterbeheer), pas hoogwaterkerend sluiten bij een bepaalde buitenwaterstand (bv in- en uitwateringssluis). Bij dit specifieke type kan tijdens de opbouw van de hoogwatergolf de hoeveelheid instromend water (per tijdseenheid) door het nog niet gesloten kunstwerk toenemen.

ad c. Indien het sluiten van een keermiddel faalt, dan is het in sommige situaties nog mogelijk om dit te herstellen. In [TAW-LK 2003] wordt dan bedoeld op situaties waarin er al water door het geopende kunstwerk naar binnenstroomt (hetgeen dus sowieso tot een waterbezwaar als gevolg van *niet sluiten* leidt), maar dit vóór het herstel nog niet tot problemen in het achterland leidt. In feite gaat dit dus over een reductie van het waterbezwaar als gevolg van *niet sluiten*. Dit is afhankelijk van de beschikbare tijd tussen het tijdstip van sluiten en het tijdstip dat er daadwerkelijk zoveel water door het geopende kunstwerk stroomt, dat een (alternatieve) sluiting niet meer mogelijk is. Daarnaast zijn de oorzaak van het falen en de afmetingen en bereikbaarheid van de te sluiten doorstroomopening(en) van belang.

In feite kan een beschikbare tijdsperiode na een falende sluiting gebruikt worden voor twee opties, te weten:

1. Herstellen van de opgetreden fout(en) bij het sluitproces. Een voorbeeld hiervan is een schuif die niet gesloten kan worden doordat er een obstakel aanwezig is. Als dit obstakel bereikbaar is, dan kan het met bv een kraan op een vrachtwagen worden verwijderd, zodat de schuif alsnog kan worden gesloten.
2. Toepassen van een alternatief keermiddel. Een voorbeeld hiervan is het toepassen van big bags als de schotbalken van een coupure niet meer blijken te passen.

Het kombergend vermogen is het totale volume aan instromend water dat aan de binnenzijde van de waterkering kan worden geborgen zonder dat dit tot substantiële problemen leidt. Basis voor dit volume vormt het kritieke binnenpeil en het oppervlak waarover komberging plaats mag vinden. De daadwerkelijk aanwezige komberging is onder andere afhankelijk van:

- de aanvoer van water vanuit het achterland;
- de aanwezigheid van meerdere kunstwerken die op hetzelfde binnenwater uitkomen;
- de aanwezigheid van gemalen die eventueel instromend water ook weer (gedeeltelijk) terug kunnen pompen;
- het peilregime van de binnenwaterstand dat voorafgaande een hoogwater wordt uitgevoerd, zoals het afmalen naar een lager peil.

Bij de bepaling van het kombergend vermogen speelt de Open Keerhoogte (OKH) een rol. Deze geeft aan welke waterstand aan de binnenzijde vanuit het systeem maximaal toelaatbaar is. In het geval van een lage drempel van het kunstwerk is dit bijvoorbeeld de kerende hoogte van de achterliggende kaden. Bij een hoge drempel (bv de drempelhoogte van een coupure in stedelijk gebied) kan dit de kerende hoogte van deze drempel zijn. De OKH wordt dus alleen bepaald door fysiek aanwezige elementen en niet door instromende debieten.

Als het kombergend vermogen bekend is, dan kan deze met het verloop van de buitenwaterstand, gegevens van de constructie en de binnenwaterstand naar een kritieke buitenwaterstand worden teruggerekend. Deze kritieke buitenwaterstand, die correspondeert met het kritieke instromende volume gedurende een hoogwatergolf, wordt aangeduid met de term Open Keerpeil (OKP). De overschrijdingsfrequentie van het OKP is gelijk aan de vanuit waterveiligheid benodigde sluitfrequentie van het kunstwerk.

De relatie tussen de OKH en het OKP is gelegen in het toelaten van instromende debieten, waardoor in het geval van toetsen het OKP bijna altijd groter is dan het OKH. Alleen in gevallen, waarbij bijvoorbeeld grote buistoten kunnen zorgen voor een verhoging van de waterstand, kan het OKP lager zijn dan de OKH. Dit omdat buistoten niet verdisconteerd zijn in de hydraulische randvoorwaarden.

Een kombergend vermogen is meestal alleen aanwezig in het geval het kunstwerk een binnendijks water verbindt met het buitenwater, zoals dat het geval is bij sluisen, gemalen en inlaat- en uitwateringsduikers. Bij een coupure zal instromend water vaak snel ontoelaatbare overlast veroorzaken, bijvoorbeeld omdat de riolering overbelast raakt.

4.2.2.1. *Het faalproces van initiatiefase tot bezwijkfase (falen)*

Het faalmechanisme *niet sluiten* is alleen van belang op het moment dat een kunstwerk niet hoogwaterkerend gesloten is als een hoogwater zich voordoet (initiatiefase).

Dat is het geval als tijdens de opbouw van hoogwater één van de onderdelen van de procedure en technische uitvoering van het sluitingsproces van de keermiddelen faalt: het hoogwateralarmeringssysteem, de mobilisatie, de bediening of de bedrijfsvoering. Daarnaast dient ook nog het herstel van een falende sluiting mislukken. Onder die condities neemt de hoeveelheid instromend water (per tijdseenheid) door het niet gesloten kunstwerk toe bij toenemende waterstanden en/of golfhoogten. Dit inkomende debiet moet via het kunstwerk worden afgevoerd naar het binnendijkse watersysteem.

Bij een toenemend instroomdebiet neemt de stroomsnelheid boven de bodembescherming toe. Indien de kritieke stroomsnelheid (behorende bij het kritieke debiet) van de bodembescherming wordt overschreden, leidt dit tot het falen van de bodembescherming. In de praktijk zal dit een geleidelijk proces zijn, waarbij bij toenemende stroomsnelheid steeds grotere schade aan de bodembescherming ontstaat en uiteindelijk de ondergrond onder de bodembescherming bloot komt te liggen. In dat laatste geval wordt de bodembescherming als bezweken beschouwd 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 instromende debiet. Uiteindelijk kunnen deze ontgrondingskuilen dermate groot en diep worden, dat dit leidt tot overall instabiliteit en hiermee bezwijken van het kunstwerk.

Het instromende debiet als gevolg van *niet sluiten* van het kunstwerk mag ook niet leiden tot significante gevolgen in het achterland. Hiervan is sprake als achterliggende regionale keringen bezwijken, waarna het watersysteem leegloopt in het achterliggende gebied, of er kortsluiting ontstaat tussen achterliggend gebied en buitenwater. In theorie zou daarna instantaan een dusdanig verval over het kunstwerk kunnen ontstaan, dat de keermiddelen bezwijken of de waterdiepte zo klein wordt dat de kritieke stroomsnelheid voor de bodembescherming wordt overschreden. Waardoor achter het kunstwerk ontgroning plaats kan vinden, dat uiteindelijk tot bresgroei leidt. Voor het bezwijkproces van de achterliggende regionale keringen als gevolg van toenemende binnenwaterstanden wordt verwezen naar de procesbeschrijving in het toetsspoor *hoogte* bij dijken.

4.2.3 Te toetsen deelfaalmechanismen

Zoals uit de voorgaande paragraaf en de factsheet gedetailleerde toets (zie hoofdstuk 3 en Figuur 3-1) kan worden afgeleid, worden binnen het toetsspoor *betrouwbaarheid sluiting* de volgende deelfaalmechanismen onderscheiden:

- Falen van het sluitproces van de (hoog)waterkerende keermiddelen, waardoor het kunstwerk niet gesloten is als een hoogwater zich voordoet (Z_{23}).
- Falen van het herstel van een falend sluitingsproces (Z_{24}).
- Bezwijken van de binnendijks aanwezige bodembescherming als gevolg van het instromende water door het niet gesloten kunstwerk (Z_{22}).
- Kans dat het kunstwerk als geheel bezwijkt (onderuit gaat) gegeven het feit dat 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 van de bodem) (Z_{12}).
- Falen van het kunstwerk als gevolg van het overschrijden van het waterbergend vermogen in het achterland, doordat er door het niet gesloten kunstwerk teveel water het achterland instroomt gedurende een hoogwatergolf (Z_{21}).

Deze deelfaalmechanismen worden meegenomen in de toetsing (zie paragraaf 5.4).

4.2.4 Reststerkte

Bij het faalmechanisme *niet sluiten* is sprake van reststerkte na het moment van bezwijken van de bodembescherming. Deze reststerkte zit opgesloten in het deelfaalmechanisme *bezwijken kunstwerk als geheel* (Z_{12}). 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 na bezwijken van de bodembescherming het kunstwerk als geheel bezwijkt, moet een aantal vervolprocessen zijn beslag krijgen. Allereerst moet in de nabijheid van het kunstwerk een ontgrondingskuil van voldoende omvang ontstaan. Vervolgens moet een afschuiving aan de rand van deze ontgrondingskuil optreden, waarvan de inscharing het kunstwerk bereikt. Als gevolg van het wegvallen van de passieve gronddruk aan de binnenzijde van het kunstwerk moet vervolgens de overall-stabiliteit van het kunstwerk onvoldoende worden, waarna kantelen of afschuiven van het hele kunstwerk optreedt. Ook kan na het wegvallen van de passieve gronddruk een proces in gang worden gezet waarbij successievelijk (onder)delen van het kunstwerk constructief bezwijken, met het bezwijken van het totale kunstwerk als uiteindelijke gevolg.

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

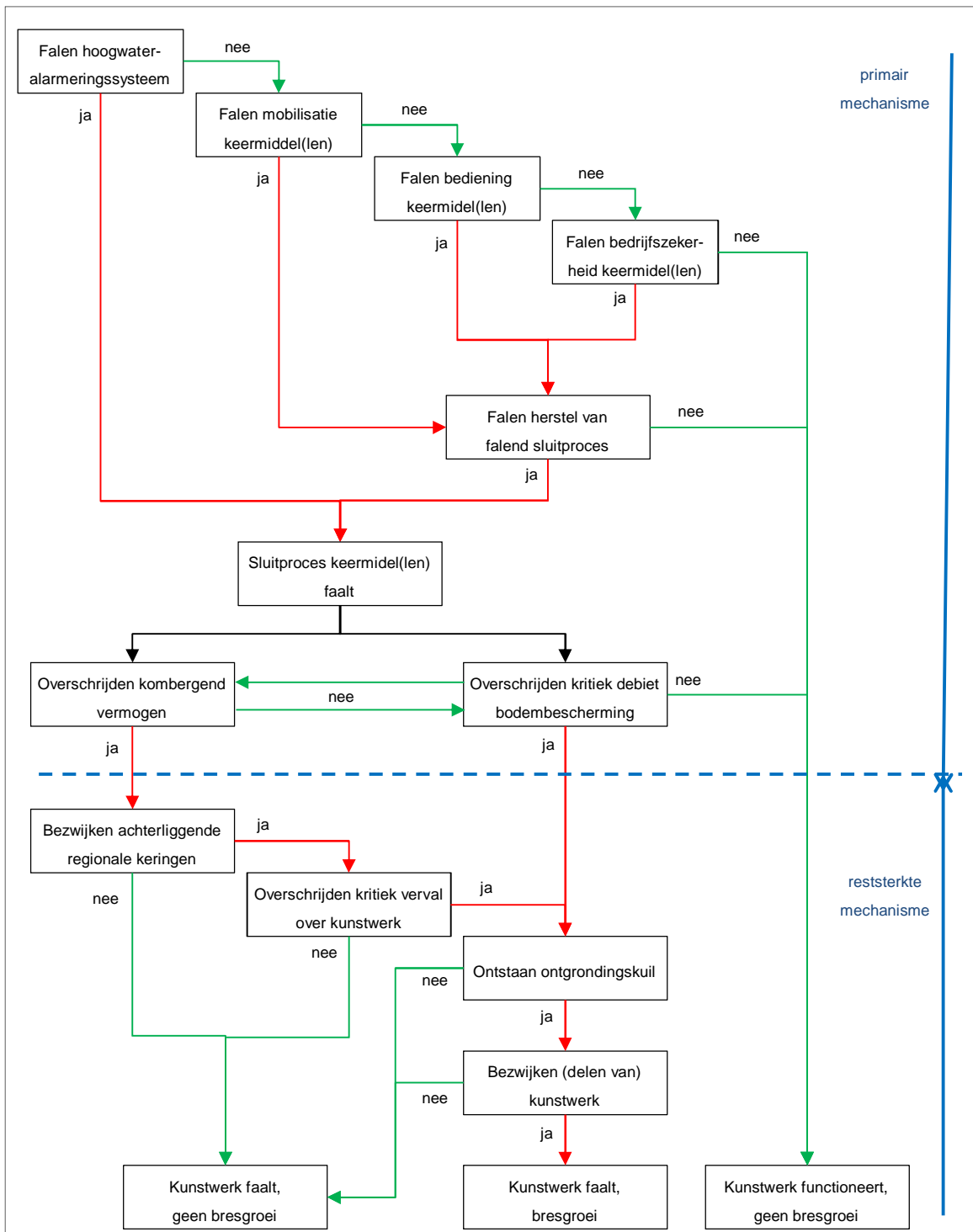
- *Grondslag onder de bodembescherming en met name de erosiebestendigheid van deze grondslag.*
De vorming van een ontgrondingskuil gaat in een zandige ondergrond veel sneller dan in een cohesieve ondergrond (klei).
- *Fundatie van het kunstwerk.*
Een kunstwerk dat op palen is gefundeerd zal minder snel (deels) bezwijken dan een kunstwerk dat op staal is gefundeerd.
- *Geometrie van het kunstwerk.*
Indien de as van het kunstwerk (dus niet de as van de waterkering) wordt beschouwd, dan zal een kort kunstwerk 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. Helaas is het zeer lastig de reststerkte te kwantificeren en uit te drukken in een concrete kans op bezwijken van het kunstwerk als geheel nadat 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 dan nog een aanzienlijke mate van reststerkte aanwezig is.

4.3 Schematisch overzicht van het faalproces

In Figuur 4-2 is een schematisch overzicht van het proces van falen van het kunstwerk als gevolg van niet sluiten van de hoogwaterkerende keermiddelen voorafgaand aan een hoogwater gegeven.

Het eindresultaat van het schema is dat het kunstwerk faalt of dat het functioneert. Wanneer het faalt (niet sluit) maar dit leidt niet tot (gevolgen van) een bres, dan is nog steeds geen sprake van overstromingsgevolgen. In dat geval voldoet het kunstwerk nog aan de eisen.



Figuur 4-2 Schematisch overzicht proces falen door niet sluiten

4.4 Beknopte beschrijving van de te toetsen deelfaalmechanismen

4.4.1 Deelfaalmechanisme Z_{12} :

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.

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.

4.4.2 Deelfaalmechanisme Z_{21} : Onvoldoende bergend vermogen

Dit deelfaalmechanisme betreft het falen van het kunstwerk als gevolg van onvoldoende kombergend vermogen in het achterland doordat er te veel water door het niet gesloten kunstwerk het achterland instroomt gedurende een hoogwatergolf. Hierbij moet sprake zijn van significante overstromingsgevolgen. Een harde definitie van significante gevolgen is echter niet te geven, maar er zal aanzienlijke economische schade optreden en/of er zullen één of meerdere slachtoffers vallen. Zie voor verdere duiding hieromtrent bijlage C.

In theorie zouden situaties kunnen voorkomen 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 niet of nauwelijks voor.

4.4.3 Deelfaalmechanisme Z_{22} : Bezwijken bodembescherming achter kunstwerk

Dit deelfaalmechanisme betreft het bezwijken van de aan de binnenzijde aanwezige bodembescherming. Dit kan optreden door hoge stroomsnelheden boven de bodembescherming als gevolg van het instromende water. Onder bezwijken wordt in dit geval verstaan het ontstaan van een zodanige schade aan de bodembescherming, dat de ondergrond wordt blootgesteld aan de hoge stroomsnelheden van het water.

De kritieke stroomsnelheid, waarbij bezwijken van de bodembescherming optreedt, verschilt per type bodembescherming. Zo is een bodembescherming van 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 (zie [DLT-shbs 2015]) worden hiervoor aanwijzingen gegeven. Het kritiek debiet is het product van de stroomvoerende breedte van de bodembescherming en de kritieke stroomsnelheid.

4.4.4 Deelfaalmecanisme Z_{23} : Falen van het sluitproces

Dit deelfaalmecanisme betreft het falen van het sluitproces van de (hoog)waterkerende keermiddelen, waardoor het kunstwerk niet gesloten is als een hoogwater zich voordoet. Dat is het geval als voor het optreden van het hoge water één van de onderdelen van de procedure en technische uitvoering van het sluitingsproces van de keermiddelen faalt. Daarbij wordt bedoeld op het falen van:

- het hoogwateralarmeringssysteem,
- de mobilisatie,
- de bediening
- de bedrijfsvoering.

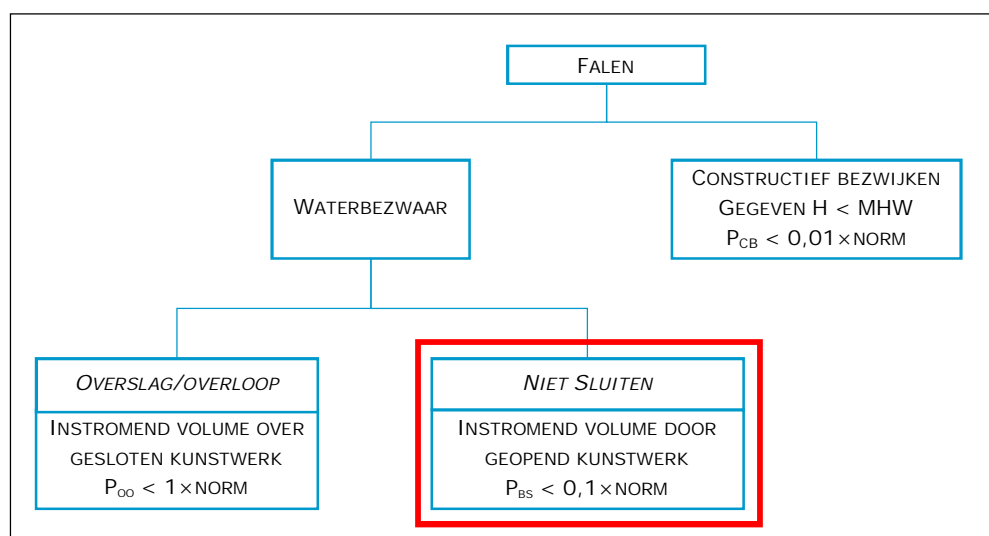
4.4.5 Deelfaalmecanisme Z_{24} : Falen van herstel van het sluitproces

Er zijn situaties onder hoogwatercondities denkbaar dat er, ondanks één of meer fouten in de procedure en technische uitvoering van het sluitproces van de keermiddelen, tijdens het instromen van water door het geopende kunstwerk toch sluiting kan plaatsvinden. Door de fout(en) in het sluitproces te herstellen of een alternatief keermiddel aan te wenden. Echter, het sluiten van keermiddelen bij het optreden van stroming door een kunstwerk is niet altijd even eenvoudig.

De mogelijkheden hiertoe zijn afhankelijk van de beperkt beschikbare tijd tussen het tijdstip van gefaalde sluiting en het tijdstip dat er water door het niet gesloten kunstwerk dreigt te gaan stromen, waardoor een (alternatieve) sluiting niet meer mogelijk wordt geacht. Dit deelfaalmecanisme beschrijft de kans dat, na een gefaalde sluiting van de hoogwaterkerende keermiddelen onder hoogwatercondities, het herstel van deze mislukte sluiting faalt.

4.5 Historie van het faalmecanisme

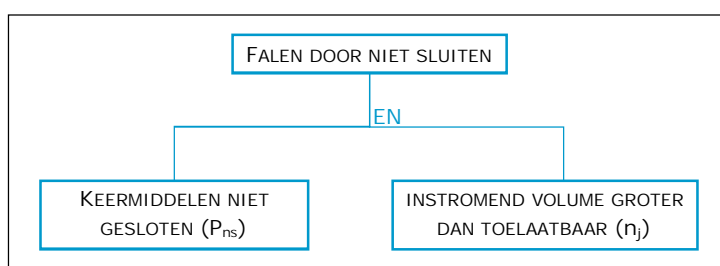
In het rapport Grondslagen voor Waterkeren [TAW-GW 1998] wordt voor het faalmecanisme *niet sluiten* verwezen naar de Leidraad Kunstwerken [TAW-LK 2003]. Hierin wordt het toetsen van het falen van een kunstwerk opgedeeld in een toetsspoor *waterbezwaar* – hierin dienen de faalmecanismen *overschrijding kritiek overslag en/of overloopdebiet* en *niet sluiten* te worden beschouwd – en een toetsspoor *constructief falen*, zie Figuur 4-3.



Figuur 4-3 Faalboom kunstwerk volgens [TAW-LK 2003]

In Figuur 4-3 zijn de eisen vermeld die in [TAW-LK 2003] aan de faalmechanismen worden gesteld. Uitgangspunt is de overbelastingsbenadering, die wat betreft *waterbezwaar* primair eisen stelt aan de kans op overschrijding van een toelaatbaar instromend volume buitenwater via het gesloten of het geopende kunstwerk. Aanvullend hierop is een eis gesteld aan de kans op *constructief falen*, gegeven dat normomstandigheden⁷ niet worden overschreden.

In [TAW-LK 2003] is een basismodel voor de faalkans op *niet sluiten* geformuleerd, die afhangt van de kans op het niet sluiten van de keermiddelen en het vervolgens overschrijden van het toelaatbaar instromend volume (zie Figuur 4-4). Hierbij is het instromende volume gekoppeld aan het kombergend vermogen van het achterliggende water(kerings)stelsel.



Figuur 4-4 Falen door niet sluiten

Conform de [TAW-LK 2003] kunnen er bij het gebruik van het basismodel drie niveaus worden onderscheiden, waarop de toetsing kan worden uitgevoerd:

- Eenvoudige methode (§B3.3 van [TAW-LK 2003]).
- Gedetailleerde methode (§B3.4 van [TAW-LK 2003]).
- Geavanceerde methode, in WTI 2011 toets op maat (§B3.5 van [TAW-LK 2003]).

Komberging is in de eenvoudige beoordeling de primaire randvoorwaarde voor het faalmechanisme, waarbij deze komberging wordt betrokken op het optreden van waterbezwaar. Grote gevolgen worden hierbij nog niet beschouwd. Bij de stappen 'gedetailleerd' en 'geavanceerd' wordt het naast een uitgebreidere beschouwing van de komberging ook van belang om de sterkte/stabiliteit van de constructie onder instromend water mee te nemen in de beschouwingen. Het gaat dan om grotere instromende debieten. Hierbij moet gedacht worden aan sterkte van met name de bodembescherming onder instromend water.

4.6 Vigerende veiligheidsfilosofie en huidig toetsinstrumentarium (VTV2006)

4.6.1 Vigerende veiligheidsfilosofie

De veiligheidsfilosofie in de [TAW-LK 2003] is op de overbelastingsbenadering gebaseerd. Specifiek voor het mechanisme *niet sluiten* is deze benadering gedefinieerd als overschrijding van een toelaatbare hoeveelheid instromend water door de geopende kering als gevolg van het falende sluitproces onder hoogwatercondities. Hierbij wordt conform Figuur 5-4 expliciet naar het beschikbare bergend vermogen van het achterliggende water(kerings)stelsel gekeken. Zodra binnenkeringen (kaden) dreigen te overstromen of te bezwijken, dan is het maximaal kombergend vermogen bereikt.

Conform [TAW-LK 2003] wordt aan het faalmechanisme voldaan als de faalkans kleiner is dan 10% van de veiligheidsnorm, zoals vastgelegd in de huidige Waterwet.

⁷ Waterstand inclusief bijbehorend golfregime met een overschrijdingsfrequentie per jaar gelijk aan de normfrequentie per jaar van de dijkkring waartoe een kunstwerk behoort.

In formulevorm:

$$P_{fa} < 0,1 \times norm$$

Voor de tak van de faalboom in Figuur 4-3 die leidt naar het faalmechanisme *constructief bezwijken* geldt dat wanneer dit optreedt, de gevolgen veelal een orde ernstiger zijn. Debet hieraan is met name het substantiële verval dat aanwezig is bij het bezwijken van (onderdelen van) het kunstwerk. Hierdoor treden direct na bezwijken grote stroomsnelheden op, wat snel tot ontgrondingen kan leiden. Daarnaast stromen grote debieten het achterland binnen en is er snel sprake van een oncontroleerbare situatie. Mede naar aanleiding hiervan is de eis die in [TAW-LK 2003] wordt gesteld ten aanzien van *constructief bezwijken* een orde strenger dan die voor *niet sluiten*.

4.6.2 Wettelijk toetsinstrumentarium tot op heden

De wettelijke toetsing aan de eisen in de Waterwet is het afgelopen decennium ook met het basismodel uit [TAW-LK 2003] uitgevoerd, zie [DWW-VTV06 2007]. En het maakt ook deel uit van het niet uitgeleverde WTI 2011 [MVW-vtvT 2011]. Conform [TAW-LK 2003] is hierbij het gebruik van het basismodel op drie (toets)niveaus mogelijk. Op deze plaats wordt er iets dieper ingegaan op deze verschillende niveaus.

Eenvoudige methode

Bij de eenvoudige methode wordt naar het gebruik van de hoogwaterkerende keermiddelen en het kunstwerk gekeken. Indien het OKP minder dan 1 keer per 10 jaar wordt overschreden, dan kan de eenvoudige methode (of zelfs de gereduceerde eenvoudige methode) worden toegepast. Dit betekent dat een aantal vragen omtrent alarmering, mobilisatie, bediening en bedrijfszekerheid die bij deze methode horen, positief moeten worden beantwoord. De uitkomst is niet zozeer een faalkans voor *betrouwbaarheid sluiting*, maar meer een oordeel dat wel of niet wordt voldaan aan de eis dat de faalkans voor *niet sluiten* kleiner is dan 0,1x normfrequentie van de dijkkring. Dit komt door de conservatieve benadering van deze methode.

Gedetailleerde methode

Bij de gedetailleerde methode wordt een faalkans afgeschat met behulp van het OKP, de kans op *niet sluiten*, de kans dat het kunstwerk niet hoogwaterkerend gesloten staat en de mogelijkheid tot herstel van een gefaalde sluiting. In principe wordt hierbij met name gebruik gemaakt van de scoretabellen uit [TAW-LK 2003] om de kans op *niet sluiten* te bepalen. Hierbij wordt meer in detail gekeken naar de vier sluitfasen als bij de eenvoudige methode. Het bepalen van het OKP kan heel eenvoudig (conservatief), maar daarnaast ook heel uitgebreid plaatsvinden (meer realistisch). Er worden geen specifieke grenzen aan toepassing van de gedetailleerde methode gesteld.

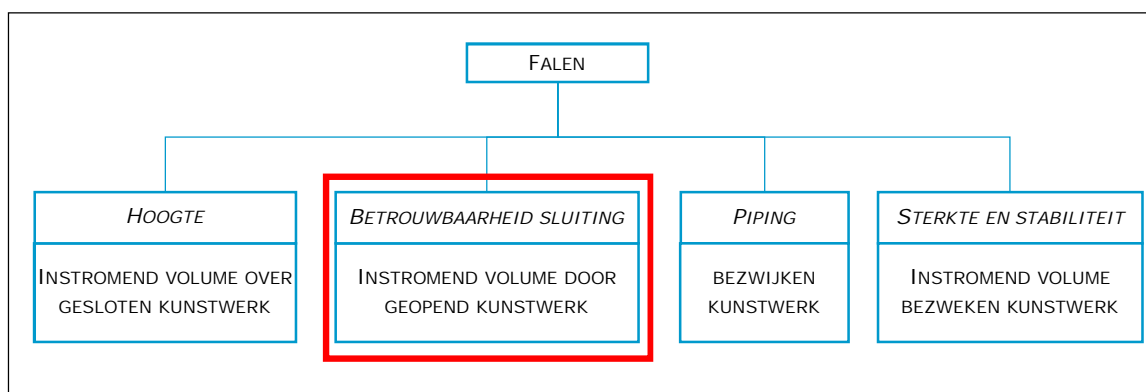
Geavanceerde methode

Bij de laatste stap is het mogelijk de geavanceerde methode toe te passen. Ten opzichte van de gedetailleerde methode is het verschil dat er nu een volledige betrouwbaarheidsanalyse van de sluiting van de keermiddelen wordt gemaakt. Dit kan leiden tot een kleinere faalkans voor sluiting van de keermiddelen. Bij deze methode wordt onder andere gebruik gemaakt van de tabellen met standaard faalkansen uit [TAW-LK 2003]. Specifieke randvoorwaarden voor toepassing van de methode zijn er niet. Opgemerkt wordt dat deze methode vaak van toepassing is bij bijzondere objecten, zoals verbindende waterkeringen. Dit komt met name omdat dergelijke constructies zijn uitgerust met 'slechts' één keermiddel en waarbij de gevolgen van niet sluiten substantieel kunnen zijn.

4.7 Wettelijk Toetsinstrumentarium 2017

4.7.1 Wijzigingen in het WTI 2017

In het WTI2017 wordt grotendeels aangesloten op de huidige wijze van toetsen. Het gaat nu echter om het beschouwen van overstromingsrisico's en daarmee 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 uitgangspunt dat de kans op bresgroei niet aanwezig of verwaarloosbaar klein is. Hiermee worden komberging en instroombestendigheid van de constructie beide bekeken. Door de overstromingsbenadering verandert Figuur 4-3 in onderstaande Figuur 4-5.



Figuur 4-5 Faalboom kunstwerken WTI 2017

In de voorgaande drie wettelijke toetsronden en het project VNK2 is uitgebreide ervaring opgedaan met het basismodel voor *niet sluiten* en de toepassing hiervan. Deze ervaringen zijn vertaald naar aandachtspunten, die in het WTI 2017 worden opgepakt.

Actualiteit model

Het basismodel voor *niet sluiten* is nog steeds geldig. Wel is gebleken dat onderdelen van dit model aan een update toe zijn. Hierbij wordt met name gerefereerd aan de scoretabellen in [TAW-LK 2003] waarmee een waarde voor de kans op *niet sluiten* kan worden geschat. In de huidige tijd, waarbij volop gebruik gemaakt wordt van moderne communicatiemiddelen (internet, radio, TV, mobiele telefoons etc.), lijkt bijvoorbeeld de alarmeringsfase nauwelijks meer risico's te kennen. Ook de tabellen voor de overige aspecten zijnde mobilisatie, bediening en bedrijfszekerheid zijn voor bepaalde aspecten niet actueel meer. Bij de actualisatie wordt aangesloten bij de actuele methodiek van bv PROBO⁸ binnen Rijkswaterstaat.

Een ander aandachtspunt met betrekking tot actualiteit is de overgang van overschrijdingskansbenadering naar overstromingskansbenadering. In de toekomst wordt deze laatste vigerend. Dit betekent met name dat er voor *niet sluiten* niet alleen gekeken wordt naar wateroverlast maar juist naar overstromingsgevolgen. Bij een kunstwerk treden deze vooral op als het kunstwerk geheel bezwijkt en er sprake is van een bres (en bresgroei). Dit betekent dat erosie van de binnendijkse bodembescherming en het ontstaan van ontgrondingen een belangrijke rol gaan spelen bij de beoordeling van de kunstwerken.

⁸ PROBO is PRObabilistisch Beheer en Onderhoud. Het huidige model van PROBO is met name gericht op hele grote bijzondere kunstwerken zoals de stormvloedkering in de Nieuwe Waterweg.

Het model zoals beschreven in [TAW-LK 2003] is vooral geënt op kunstwerken die standaard open staan en bij een hoogwater gesloten moeten worden. Objecten die alleen op aanvraag openen, waarbij zelfs gedurende een hoogwater de primaire functie kan worden vervuld, zijn met de beschikbare omschrijvingen niet altijd eenduidig in te passen. Hierbij kan worden gedacht aan gemalen die juist tijdens hoogwater uitmalen. Aanvullende aandacht zal dan ook worden geschonken aan het eenduidig toepasbaar maken van de methodiek voor alle kunstwerken, dus ook voor kunstwerken die alleen op aanvraag geopend worden.

Het model in [TAW-LK 2003] is niet toepasbaar voor demontabele keringen over langere strekkingen. De laatste 10 jaar zijn deze echter wel veelvuldig toegepast. Een goede ontwerp- en toetsmethode ten aanzien van *niet sluiten* ontbreekt op dit moment voor dit type constructies. Binnen WTI 2017 wordt dan ook een apart spoor uitgewerkt met betrekking tot sluiting van demontabele keringen.

Beschrijving model

De beschrijving van het model in [TAW-LK 2003] en de exacte toepassing daarvan vindt op meerdere wijzen plaats. Een geheel consistente toepassing binnen Nederland is nog niet aanwezig. Voorbeelden hiervan zijn:

- Aspecten binnen de scoretabellen voor bepaling van de kans op niet sluiten worden op verschillende wijze geïnterpreteerd. De toelichting op de vragen binnen de tabellen blijkt niet specifiek genoeg te zijn.
- Voor het vullen van de tabellen uit [TAW-LK 2003] zijn meerdere (in eigen beheer ontwikkelde) spreadsheets voorhanden, die niet allemaal hetzelfde resultaat geven.
- Er zijn geen handvatten beschikbaar om de faalkans van herstel na een mislukte sluiting in te schatten. Vanuit VNK is er een figuur aanwezig, waarin afhankelijk van de beschikbare tijd een kans op herstel kan worden ingeschat. Dit figuur is echter niet opgenomen in Leidraden of richtlijnen en de onderbouwing ervan is ook niet vastgelegd.
- De standaard faalkansen voor keermiddelen uit [TAW-LK 2003] lijken nauwelijks onderbouwd en zijn vermoedelijk voor sommige onderdelen aan de conservatieve kant. Daarnaast is de omschrijving van de onderdelen niet altijd duidelijk genoeg. Zo wordt gesproken over een terugslagklep in tabel B3.9, maar gaat het vermoedelijk niet om een terugslagklep aan het uiteinde van bv een uitwateringssluis, maar over een terugslagklepje in een machine/bewegingswerk.
- De onderbouwing van het kombergend vermogen is niet altijd even duidelijk. Mede debet hieraan is het ontbreken van een voorbeeld voor de wijze waarop dit kan worden uitgevoerd.
- Niet expliciet wordt gemaakt dat voor het faalmechanisme *niet sluiten* ook buiten het stormseizoen falen mogelijk is. Dit wordt onder meer veroorzaakt door het feit dat de hydraulische randvoorwaarden alleen voor het stormhalfjaar beschikbaar zijn. Bij beheerders blijkt voor de zomerperiode ook een verminderde aandacht voor betrouwbaarheid sluiting te zijn. Ten slotte is ook geconstateerd dat objecten die standaard in het stormseizoen gesloten zijn vaak niet meer worden beschouwd op *niet sluiten*.

In WTI 2017 worden hiertoe beschrijvingen verduidelijkt, voorbeelden van toepassing van het model beschikbaar gemaakt, een handreiking gegeven voor de bepaling van de kans op herstel van een falende sluiting en getracht om zoveel mogelijk standaard faalkansen te onderbouwen.

Benodigde gegevens

Voor de toetsing op *niet sluiten* zijn harde (aantal en type keermiddelen) maar ook zachte gegevens nodig, zoals het gebruik van het kunstwerk. Ervaringen bij met name VNK2 wijzen erop dat de feitelijke werking van kunstwerken en het gebruik in de tijd niet altijd bij de beheerders toegankelijk dan wel bekend is. Dit kan leiden tot het niet correct toepassen van het model, met als gevolg dat van een kunstwerk een onjuist beeld ontstaat wat betreft *niet sluiten*.

In enkele gevallen blijken ook de harde gegevens niet voorhanden en zijn de exacte keermiddelen niet bekend. In WTI 2017 worden randvoorwaarden gesteld aan de minimaal benodigde informatie om überhaupt een toetsing uit te kunnen voeren. Op deze wijze wordt getracht de benodigde kennis bij de beheerders te ontsluiten.

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

Binnen het beoordelingsspoor *betrouwbaarheid sluiting* is geen semi-probabilistische toets (niveau 2a-1) voorzien, zodat er ook geen semi-probabilistisch toetsvoorschrift noodzakelijk is. Daarmee is de consistentie tussen de probabilistische en semi-probabilistische toets geen aandachtspunt.

5 Deelfaalmechanisme Z_{12} bezwijken kunstwerk a.g.v. erosie

In dit hoofdstuk wordt het deelfaalmechanisme Z_{12} , *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 zie §3.2.1.

5.1 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.

5.2 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 3-2 in §3.2.2

Voor het schatten van een kans voor het deelfaalmechanisme " Z_{12} , *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 instromend water door het niet 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 substantiële hoeveelheid water het achterland in kan stromen.

- Ad 1. Het eroderen van de bodembescherming onder instroming van water door het niet gesloten kunstwerk, wordt beschreven door het deelfaalmechanisme Z_{22} 'Bezwijken bodembescherming achter het kunstwerk' (zie §3.4).
- 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-cohesieve 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 deelfaalmechanisme. 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, waarbij de benodigde gegevens niet altijd voorhanden zijn.

Binnen VNK2 is het deelfaalmechanisme 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 deelfaalmechanisme 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.

5.3 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 uiteraard een goed inzicht in de materiaalopbouw van de bodem ter plaatse van het kunstwerk. Een eenvoudige beoordeling van de invloed van een ontgrondingskuil op de stabiliteit is niet voorhanden. Met programma's zoals Plaxis zijn wel analyses mogelijk om de stabiliteit nader te beschouwen. Dit is voor een toetsing echter niet wenselijk.

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

5.4 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 *betrouwbaarheid sluiting* aan te scherpen.

Dit betekent dat door de gebruiker een kans op bezwijken kunstwerk gegeven erosie kan worden ingevoerd, welke buiten het instrumentarium om onderbouwd moet worden. Er is niet gekozen voor het verder implementeren van faalmodellen die het bezwijken kunnen 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 eenvoudig toepasbare methode om een kans op bezwijken in te schatten als de diepte van een ontgrondingskuil en de opbouw van het kunstwerk bekend is ontbreekt.

6 Deelfaalmechanisme Z_{21} , onvoldoende bergend vermogen

In dit hoofdstuk wordt het deelfaalmechanisme Z_{21} , *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 het volume water die bij een niet-gesloten kunstwerk gedurende een hoogwatergolf naar binnen stroomt. Voor de Z-functie zie §3.3.1.

6.1 Definitie en historie

Het kombergend vermogen in relatie tot *betrouwbaarheid sluiting* is het kritieke volume water dat gedurende een hoogwaterperiode door een of meerdere kunstwerk(en) mag stromen zonder dat dit leidt tot falen van de waterkering. 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. In het WTI2017 is de definitie van substantiële gevolgen nader bekeken. In bijlage C is dit nader verwoord.

De basis van het deelfaalmechanisme wordt beschreven in de Leidraad Kunstwerken (bijlage B2 uit [TAW-LK 2003]). Hierin wordt een eenvoudige benadering van het aanwezige kombergend vermogen uitgewerkt. Met betrekking tot het instromende volume aan water geldt dat reguliere formuleringen uit de hydraulica (bv [Nortier-tvm 1996]) 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 niet sluiten) en vervolgens naar de 'sterkte' (aanwezige komberging).

6.2 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.

6.2.1 Modellen instromend debiet

Afhankelijk van de situatie zijn er een drietal eenvoudige modellen voorhanden om het instromende debiet te berekenen.

Deze modellen zijn:

1. Verticale wand of hoge drempel. Voorbeelden zijn coupures en keer- en schutsluizen in gesloten toestand.
2. Lage drempel (overlaat). Voorbeelden zijn coupures en keersluizen in geopende toestand.
3. Verdrongen koker. Voorbeelden zijn in- en uitwateringsduikers en perskokers van gemalen.

6.2.2 Eenvoudig model verticale wand

In deze situatie is er geen direct contact tussen binnen- en buitenwater. Dit model wordt dan ook vaak toegepast bij het toetsspoor *hoogte*, waarbij ervan uitgegaan wordt dat het kunstwerk lokaal de kerende hoogte verzorgt en hoogwaterkerend gesloten staat. Binnen dit model zijn drie situaties te onderkennen:

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

6.2.2.1. Situatie I: instromend debiet bij golfoverslag

De formule voor het instromende debiet als gevolg van golfoverslag (bovenkant kunstwerk is hoger dan buitenwaterstand) is (zie formule B2.4 uit [TAW-LK 2003]):

$$q_{os} = m_{os} \cdot \sqrt{g \cdot (H_s)^3} \cdot e^{\left(-3,0 \cdot \frac{h_{kh} - h}{H_s} \cdot \frac{1}{\gamma_\beta \cdot \gamma_n}\right)} \quad h_{kh} \geq h_{buit} \quad 6-1$$

met:

$$\gamma_\beta \Rightarrow \begin{cases} \beta \leq 20^\circ & \Rightarrow \gamma_\beta = 1 \\ 20^\circ < \beta < 90^\circ & \Rightarrow \gamma_\beta = \max\{\cos(\beta - 20); 0,7\} \\ \beta \geq 90^\circ & \Rightarrow \gamma_\beta = 0 \end{cases} \quad 6-2$$

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

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 $\sigma=0,06^9$.
g	[m/s ²]	Gravitatieversnelling ($g=9,81$ 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 (waarden hiervoor kunnen worden berekend met
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-LK 2003] wordt nog gesproken over het toepassen van een aanvullende windfactor, indien er kleine overslagdebieten optreden ($q_{os} \leq 10$ l/s/m¹). 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. Deze factor is alleen van toepassing in situaties met relatief ondiep water en een relatief groot verschil tussen de kerende hoogte en de waterstand. Een dergelijke situatie kan zich voordoen bij lage coupures¹⁰. Bij bijvoorbeeld keersluizen en schutsluizen komt dit niet voor. Hieronder is voor de volledigheid in formulevorm de aanpassing van het debiet aangegeven:

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

$$\gamma_w \Rightarrow \begin{cases} q_{os} < 1 \text{ l/s/m} & \Rightarrow \gamma_w = 3 \\ 1 \leq q_{os} \leq 10 \text{ l/s/m} & \Rightarrow \gamma_w = -\frac{2}{9} \cdot q_{os} + \frac{3}{9} \\ q_{os} > 10 \text{ l/s/m} & \Rightarrow \gamma_w = 1 \end{cases} \quad 6-4$$

Opgemerkt wordt dat kleine debieten ($q_{os} \leq 10$ l/s/m¹) geen rol spelen bij het deelfaalmecanisme komberging in het WT12017.

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.

⁹ Opgemerkt wordt dat dit andere waarden zijn dan in de Leidraad Kunstwerken staat aangegeven. De waarden die daarin staan weergegeven zijn niet correct.

¹⁰ 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.

Indien zwaar golfbreken optreedt vlak voor het kunstwerk dan kan formule 6-1 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 6-1. Hiervoor zijn diverse andere formules uit onderzoek naar golfoverslag bij dijken beschikbaar. Omdat deze situatie bij kunstwerken eigenlijk nooit voorkomt, wordt hier niet nader op ingegaan.

6.2.2.1. 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-LK 2003]):

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

Hierin is:

q_{ol}	[m ³ /s/m ¹]	Gemiddeld 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 ($g=9,81$ 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.

6.2.2.1. 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-LK 2003]):

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

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 $\sigma=0,06^{11}$.
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

¹¹ Opgemerkt wordt dat dit andere waarden zijn dan in de Leidraad Kunstwerken staat aangegeven. De waarden die daarin staan weergegeven zijn niet correct.

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 elk van de situaties worden in de volgende subparagrafen de basisformules gegeven.

Het toelaatbare volume water dat gedurende een hoogwaterperiode door het niet-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 door een geopende kunstwerk stroomt, zolang dat een bepaalde hoeveelheid niet overschrijdt. De hoeveelheid water die gedurende een hoogwaterperiode door het geopende kunstwerk stroomt, is afhankelijk van het verloop van de buitenwaterstand, de optredende golven en de karakteristieken van de doorstroomopening(en) van het niet-gesloten kunstwerk.

Het toelaatbare volume water dat gedurende een hoogwaterperiode naar binnen mag stromen, het kombergend vermogen, wordt bepaald door karakteristieken van de achterliggende watergang. Het betreft de toelaatbare peilstijging van dit water in combinatie met het oppervlak waarover deze peilstijging mag plaatsvinden.

Indien het kombergend vermogen wordt overschreden, treden substantiële gevolgen op, zoals het ontstaan van een bres in de kaden van de kombergende watergang, waardoor water het achterland in kan stromen en de watergang wellicht leegstroomt. Een eventueel vervolg hierop is dat door het (deels) leegstromen van de watergang er een dusdanig verval over het kunstwerk ontstaat dat de stroomsnelheden door het kunstwerk zo hoog worden dat de bodembescherming van het kunstwerk erodeert. Hierdoor ontstaat dan een kans op het geheel bezwijken van het kunstwerk.

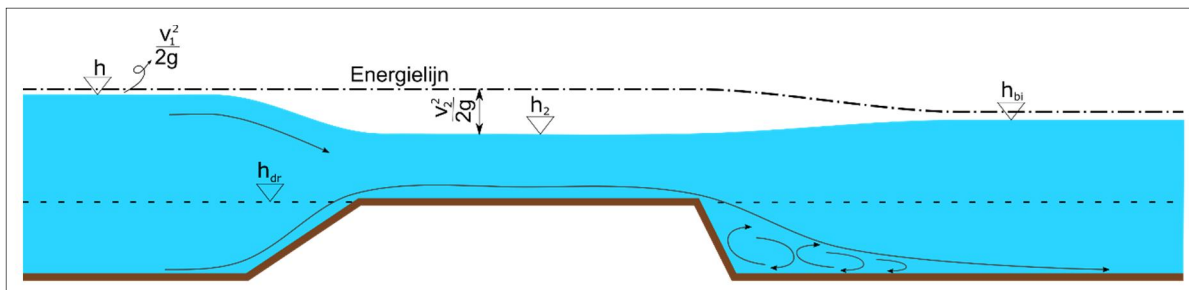
6.2.3 Eenvoudig model lage drempel

In het geval van een lage drempel is er sprake van direct contact tussen binnen- en buitenwater. Afhankelijk van de verhouding tussen de binnen- en de buitenwaterstand is er sprake van een volkomen of een onvolkomen overlaat (stroming). In de eerste situatie beïnvloedt de binnenwaterstand het instromende debiet niet, terwijl dit in de tweede situatie wel het geval is.

De basis van de formules voor de hier besproken gevallen kunnen worden gevonden in onder andere [Nortier-tvm 1996].

6.2.3.1. *Onvolkomen stroming (overlaat)*

Hieronder is de afleiding van het debiet bij een onvolkomen stroming weergegeven. Deze afleiding dient ter ondersteuning van het begrip van de formule die uiteindelijk binnen het instrumentarium van het WTI2017 wordt toegepast. De afleiding is deels afkomstig uit [Nortier-tvm 1996]. Onderstaande afbeelding vormt het uitgangspunt bij de afleiding.



Figuur 6-1 Overlaatconstructie

Wet van Bernoulli

$$H = (h - h_{ok}) + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = (h_2 - h_{dr}) + \frac{v_2^2}{2 \cdot g}$$

$$v_1 \approx 0 \Rightarrow v_2 = \sqrt{2 \cdot g \cdot (h - h_2)}$$

$$Q_{in} = v_2 \cdot A = v_2 \cdot (h_2 - h_{dr}) \cdot B$$

$$Q_{in} = (h_2 - h_{dr}) \cdot B \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h - h_2)}$$

Praktisch gezien is h_2 niet bekend, maar h_{bi} is wel vaak een bekend gegeven. Het verschil tussen beide waarden is circa 10% [Nortier-tvm 1996]. h_{bi} invullen ipv h_2 levert:

$$Q_{in, onvolk} = m_{onv} \cdot B \cdot (h_{bi} - h_{dr}) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h - h_{bi})} \quad (h_{bi} - h_{dr}) > \frac{2}{3} \cdot (h - h_{dr}) \quad 6-7$$

Hierin is:

$Q_{in, onvolk}$	[m ³ /s]	Gemiddeld instromend debiet bij onvolkomen overlaat
m_{onv}	[-]	Modelfactor (afvoercoëfficiënt) voor onvolkomen overlaat (waarde tussen 0,7 en 1,4)
g	[m/s ²]	Gravitatieversnelling
h	[mNAP]	Lokale buitenwaterstand
h_{bi}	[mNAP]	Lokale binnenwaterstand
h_{dr}	[mNAP]	Hoogte drempel waterkering (kunstwerk)
B	[m]	Doorstroombreedte van het kunstwerk

Het geldigheidsgebied van formule 6-7 is achter de formule vermeld $(h_{bi} - h_{ok}) > \frac{2}{3} \cdot (h - h_{ok})$. Uit bovenstaande afleiding blijkt dat de modelfactor voor onvolkomen stroming (m_{onv} = afvoercoëfficiënt) niet alleen betrekking heeft op energieverlies door wrijving en vormgeving van het kunstwerk. De fout om gebruik te maken van h_{bi} ipv h_{dr} wordt hiermee ook afgedekt. De waarde voor m_{onv} ligt in de praktijk tussen 0,7 en 1,4.

6.2.3.1. Volkomen stroming

Er is sprake van volkomen stroming als geldt: $(h_{bi} - h_{ok}) \leq \frac{2}{3} \cdot (h - h_{ok})$.

De formule voor een volkomen stroming is grotendeels gelijk aan de formule voor overloop bij verticale wanden (zie formule 6-5).

$$Q_{in, volk} = m_{ol} \cdot 0,55 \cdot B \cdot \sqrt{g \cdot (h - h_{dr})^3} \quad (h_{bi} - h_{ok}) \leq \frac{2}{3} \cdot (h - h_{ok}) \quad 6-8$$

Hierin is:

$Q_{in,volk}$	[m ³ /s]	Gemiddeld instromend debiet bij volkomen overlaat
m_{ol}	[-]	Modelfactor voor overloopdebiet volkomen overlaat (algemeen geldt $m_{ol} = 1,1$)
g	[m/s ²]	Gravatieversnelling
h	[mNAP]	Lokale buitenwaterstand
h_{dr}	[mNAP]	Hoogte drempel waterkering (kunstwerk)
B	[m]	Doorstroombreedte van het kunstwerk

6.2.3.1. Lange en korte overlaten

Naast onvolkomen en volkomen overlaten, kan ook een onderscheid worden gemaakt in lange en korte overlaten. Hierbij zijn lange overlaten dusdanig lang dat de stroomlijnen boven de drempel rechtlijnig zijn, waardoor de druk daar ook hydrostatisch is. Bij korte overlaten zijn de stroomlijnen gekromd en is geen sprake van hydrostatische druk. In feite zijn de formules voor lange overlaten, zoals weergegeven in de paragrafen 6.2.3.1 en 6.2.3.1 (bv schutsluis) ook van toepassing op korte overlaten (bv coupure). Het verschil tussen beide wordt tot uitdrukking gebracht in de waarde van de afvoercoëfficiënt. Die is voor korte overlaten maximaal circa 40% hoger.

6.2.4 Eenvoudig model verdrongen koker

Het model voor de verdrongen koker heeft betrekking op situaties waarbij het watervoerende element geheel onder water zit. Hierbij is het verval de drijvende kracht achter het instromende debiet.

$$Q_{in,koker} = \mu \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h - h_{bi})} \quad 6-9$$

Hierin is:

$Q_{in,koker}$	[m ³ /s]	Gemiddeld instromend debiet door een verdrongen koker
μ	[-]	Afvoercoëfficiënt (waarde tussen 0,6 en 1)
g	[m/s ²]	Gravatieversnelling
h	[mNAP]	Lokale buitenwaterstand
h_{bi}	[mNAP]	Lokale binnenwaterstand
A	[m]	Kleinste waarde van de oppervlakte van de doorstroomopening(en)

Bovenstaande formule 6-9 is nagenoeg gelijk aan formule 6-7, alleen de modelfactor is anders.

6.2.5 Geavanceerde modellen instromend debiet

Met behulp van rekensoftware en modelonderzoek zijn geavanceerdere modellen voor het instromende debiet af te leiden. Een voorbeeld van een computerprogramma dat vaak wordt gebruikt is Duflow. 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 dit hoofdstuk gepresenteerd.

6.2.6 Invloed verval op instromend debiet

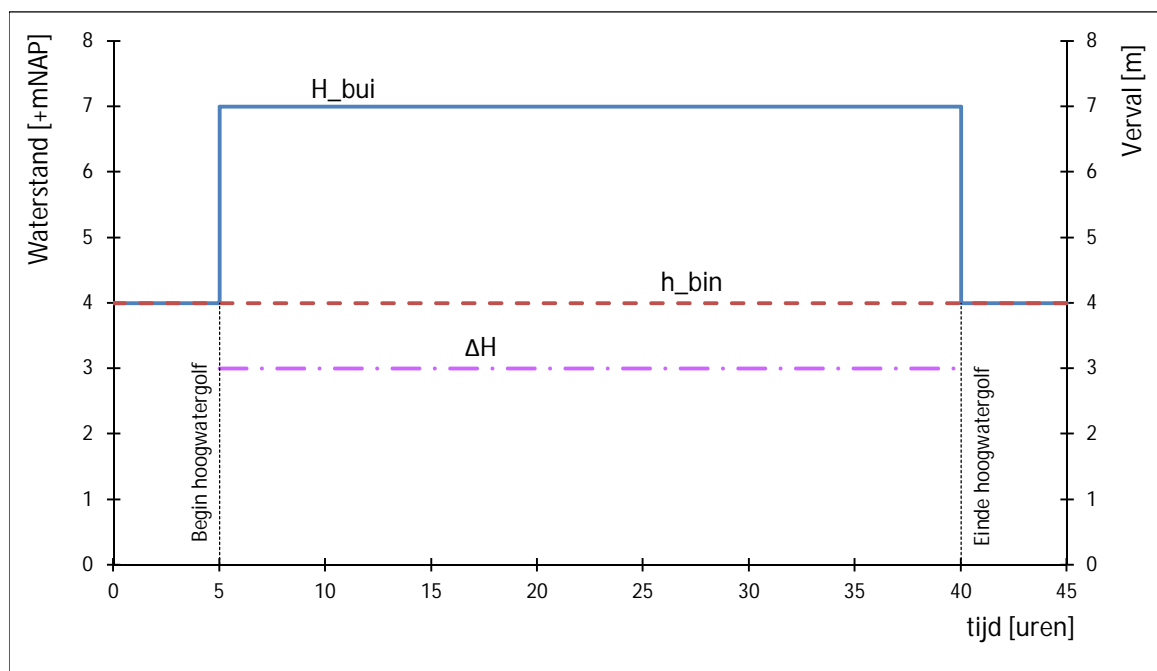
De drijvende kracht achter het instromende debiet is voor de modellen lage drempel en verdrongen koker het waterstandsverschil tussen binnen- en buitenwaterstand. Alleen bij het model verticale wand heeft de binnenwaterstand geen directe invloed op het instromende

debiet. In dat geval is de drijvende kracht achter het instromende debiet afhankelijk van het verschil tussen bovenkant constructie en buitenwaterstand in combinatie met de optredende golven.

Voor de situaties waarbij direct contact is tussen binnen- en buitenwater, bepaalt het verval over de constructie het instromende debiet. In de volgende paragrafen worden de diverse situaties besproken die hierbij kunnen optreden.

6.2.6.1. Constante binnen- en buitenwaterstand

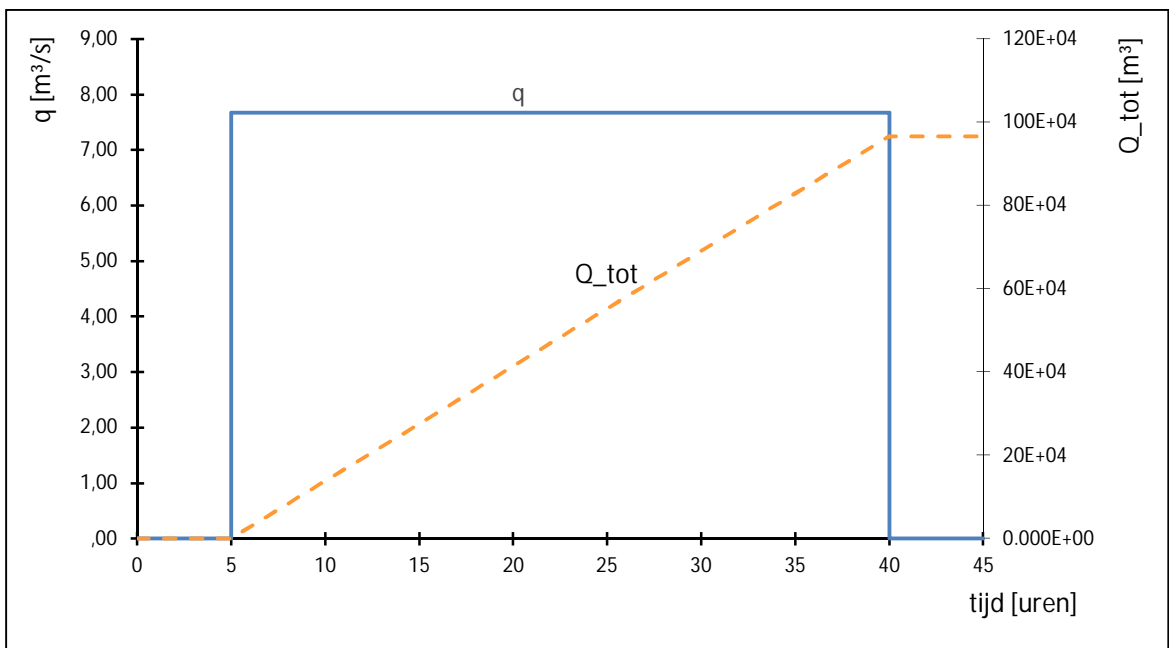
Dit is voornamelijk het geval indien zowel de binnen- als de buitenwaterstand constant in de tijd zijn (voorbeeld zie Figuur 6-2). Op dat moment kunnen de formules uit voorgaande paragrafen direct worden toegepast, omdat de waterstanden die hierin worden benoemd een constante waarde hebben. Het verval zorgt hiermee gedurende een hoogwaterperiode voor een constante instroming in de tijd.



Figuur 6-2 Constant verval bij constant verloop hoogwatergolf

Bovenstaande situatie is een hypothetisch geval, waarbij de hoogwatergolf ineens ontstaat en verdwijnt. Het feit dat de binnenwaterstand (nagenoeg) constant blijft is praktisch gezien wel mogelijk in het geval van een grote kom en/of een klein watervoerend element.

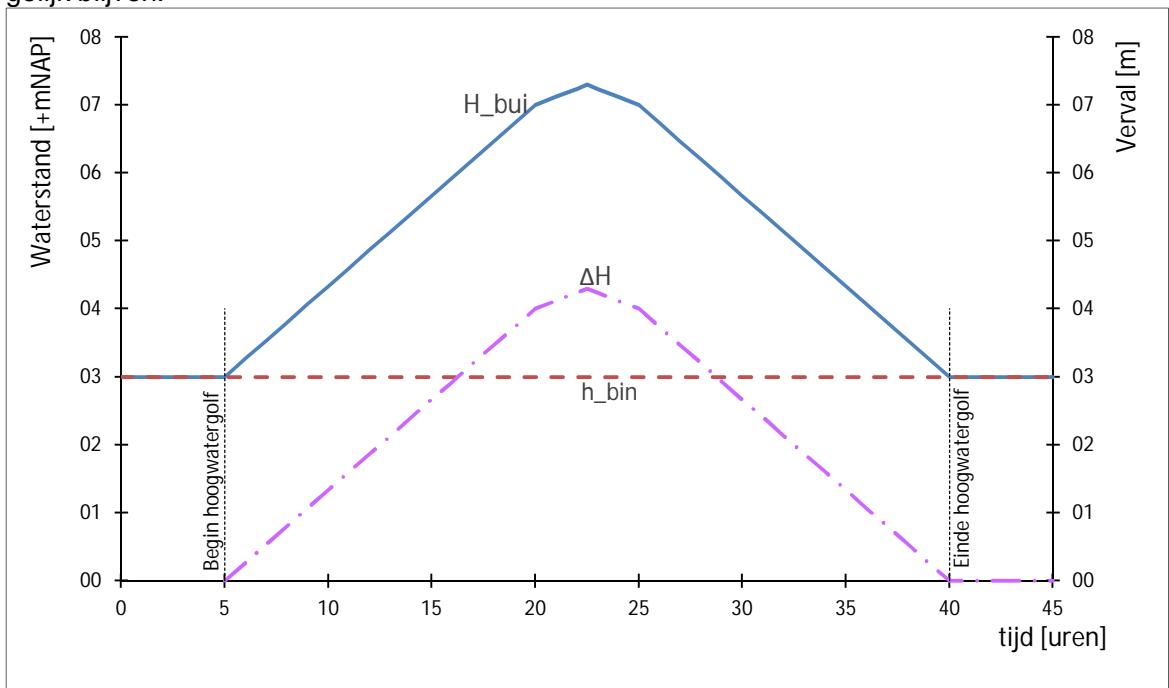
In dit geval zal komberging geen bepalende invloed hebben op de faalkans van het beschouwde faalmechanisme. Aangezien de binnenwaterstand niet stijgt, is het waterbergende systeem achter het kunstwerk in staat om het instromende water gedurende een hoogwater te bergen. Voor de volledigheid is in Figuur 6-3 nog de grafiek van het instromende debiet gegeven ervan uitgaande dat het watervoerende element van het kunstwerk een verdrongen koker met bepaalde eigenschappen betreft.



Figuur 6-3 Verloop instromend debiet verdrongen koker bij constant verval (constant verloop hoogwatergolf)

6.2.6.1. Variërende buitenwaterstand met constante binnenwaterstand

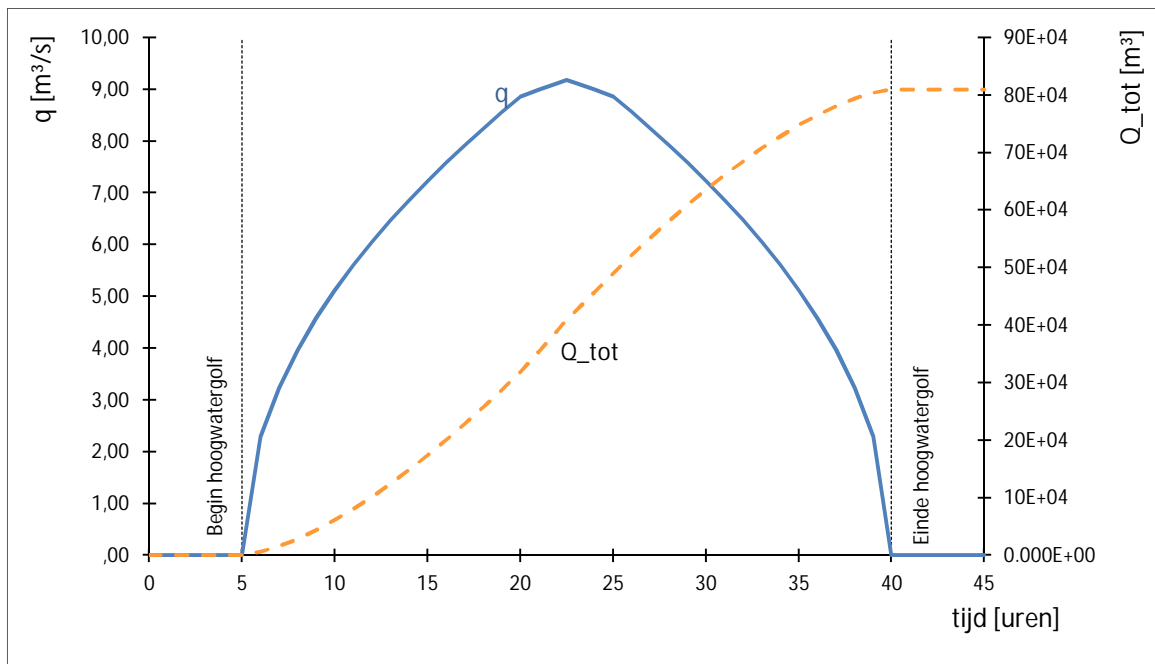
In het geval dat de buitenwaterstand varieert als gevolg van de hoogwatergolf is het verval over de kering constant aan verandering onderhevig. Als daarnaast de komberging zeer groot is en/of het watervoerende element is (zeer) klein, dan zal de binnenwaterstand nagenoeg gelijk blijven.



Figuur 6-4 Variërend verval bij variërende buitenwaterstand en constante binnenwaterstand

In Figuur 6-4 is het verloop van het verval over de kering gegeven.

Indien dit wordt vertaald naar instromende debieten voor een verdronken koker wordt onderstaande Figuur 6-5 gevonden, waarin het verloop van instromende debiet per tijdseenheid (q op linker y-as) en het totale instromende debiet (Q_{tot} op rechter y-as) is weergegeven.

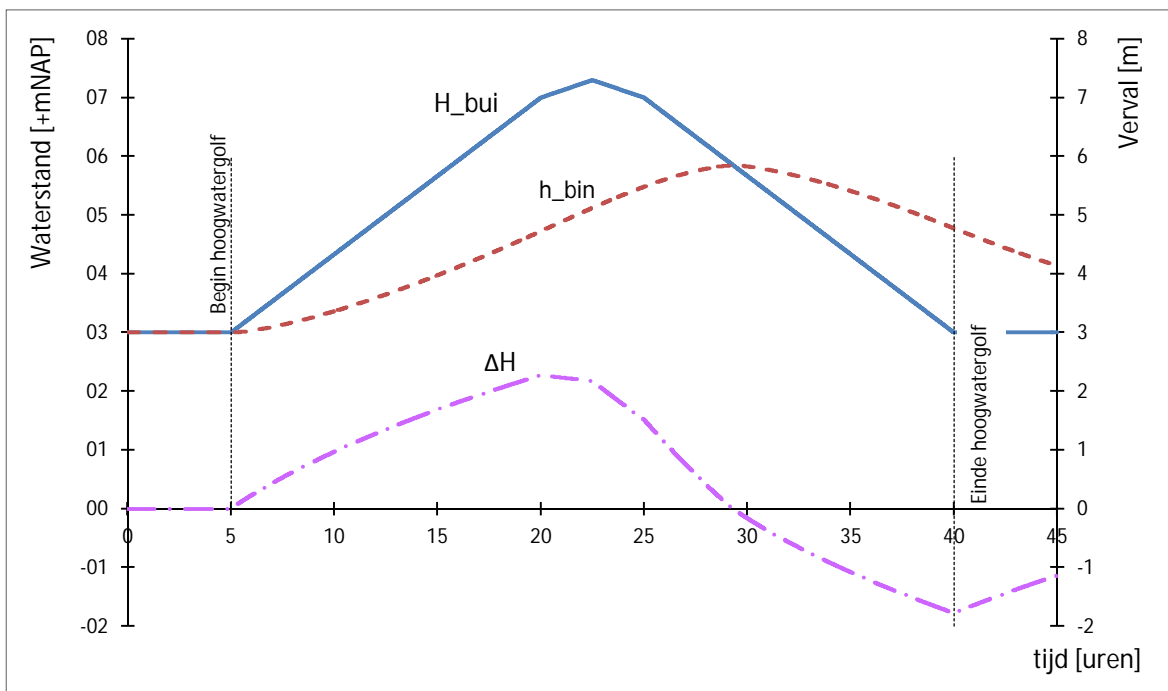


Figuur 6-5 Instromende debiet bij variërende buitenwaterstand en constante binnenwaterstand (verdronken koker)

Bovenstaande resultaten kunnen middels integraalberekeningen van het instromende debiet worden berekend, waarbij de buitenwaterstand in de tijd varieert. De hier beschouwde situatie is reëel voor situaties met een hele grote kom en/of kleine watervoerende element(en).

6.2.6.1. Variërende buitenwaterstand met beïnvloeding van binnenwaterstand

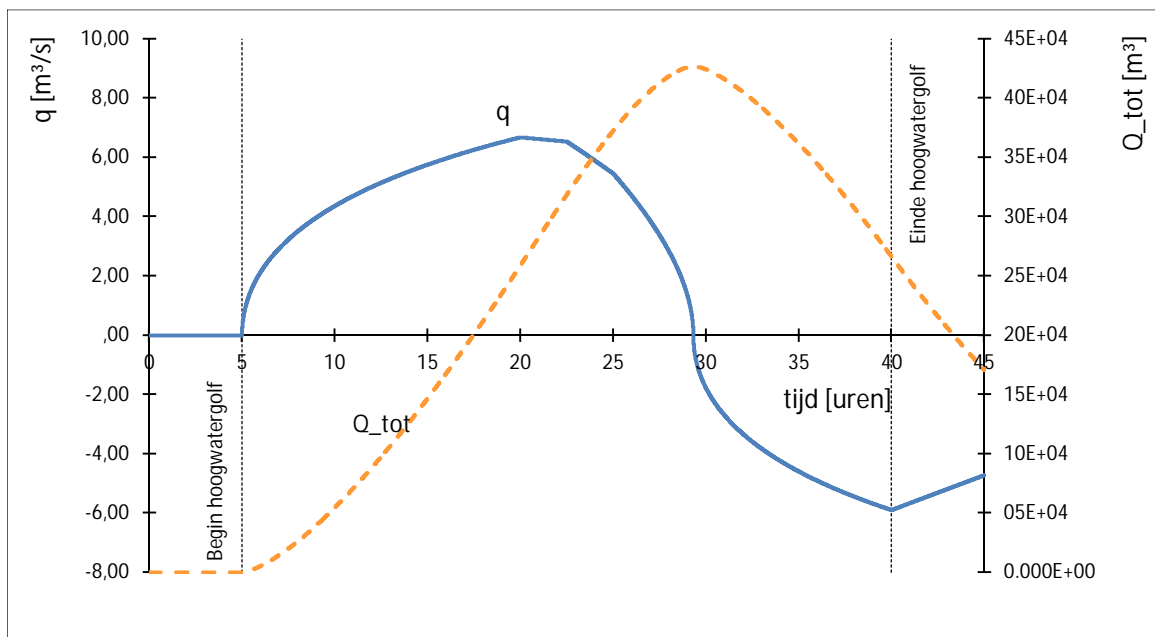
In het geval dat de buitenwaterstand varieert en er een relatief kleine kom aanwezig is, gaat de binnenwaterstand het instromende debiet beïnvloeden. Het verval over de koring is dan ook constant aan verandering onderhevig.



Figuur 6-6 Variërend verval bij verlopende buitenwaterstand en meelopende binnenwaterstand

In bovenstaande Figuur 6-6 is een voorbeeld gegeven van een situatie waarbij de komberging voldoende groot is en op een gegeven moment de binnenwaterstand als gevolg van het instromende debiet en de weer dalende buitenwaterstand deze buitenwaterstand 'inhaalt'. Het verval over de kering wordt op een gegeven moment dan ook negatief, zodat er water naar buiten stroomt.

Het verloop van het instromende debiet, dat een basis is voor Figuur 6-6, is in Figuur 6-7 weergegeven.



Figuur 6-7 Instromend debiet bij variërende buitenwaterstand en meelopende binnenwaterstand (verdrongen koker)

Indien de komberging een limiet kent, omdat bijvoorbeeld de achterliggende keringen de binnenwaterstand niet meer kunnen keren, dan zal de binnenwaterstand niet meer stijgen, maar vrij gaan dalen, doordat er een doorbraak plaatsvindt van de kaden van de kom.

Bovenstaande berekeningen vergt de hulp van computerprogramma's. Eenvoudige benaderingen kunnen met behulp van bv Excel worden gemaakt.

6.2.6.1. Variërende buiten- en binnenwaterstand

In het geval dat de buitenwaterstand varieert en de binnenwaterstand onafhankelijk van het instromende debiet door of over het desbetreffende kunstwerk ook niet constant is, wordt de situatie nog complexer. Zo kan de binnenwaterstand beïnvloed worden door toestroming vanuit het achterland, terwijl er ook instroming van buitenaf plaats vindt. Ook kan het zijn dat een gemaal tijdens een hoogwaterperiode water uit de kom slaat en op het buitenwater loost. Het is duidelijk dat het verloop van de waterstanden en de instromende debieten dan een computerprogramma vereisen om een berekening van de komberging te maken. Een benadering kan relatief eenvoudig met behulp van bijvoorbeeld Excel worden gemaakt.

6.3 Kennisbasis kombergend vermogen

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

6.3.1 Basisformulering

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

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

$$K = A \cdot \Delta h_{kom}$$

6-10

Hierin is:

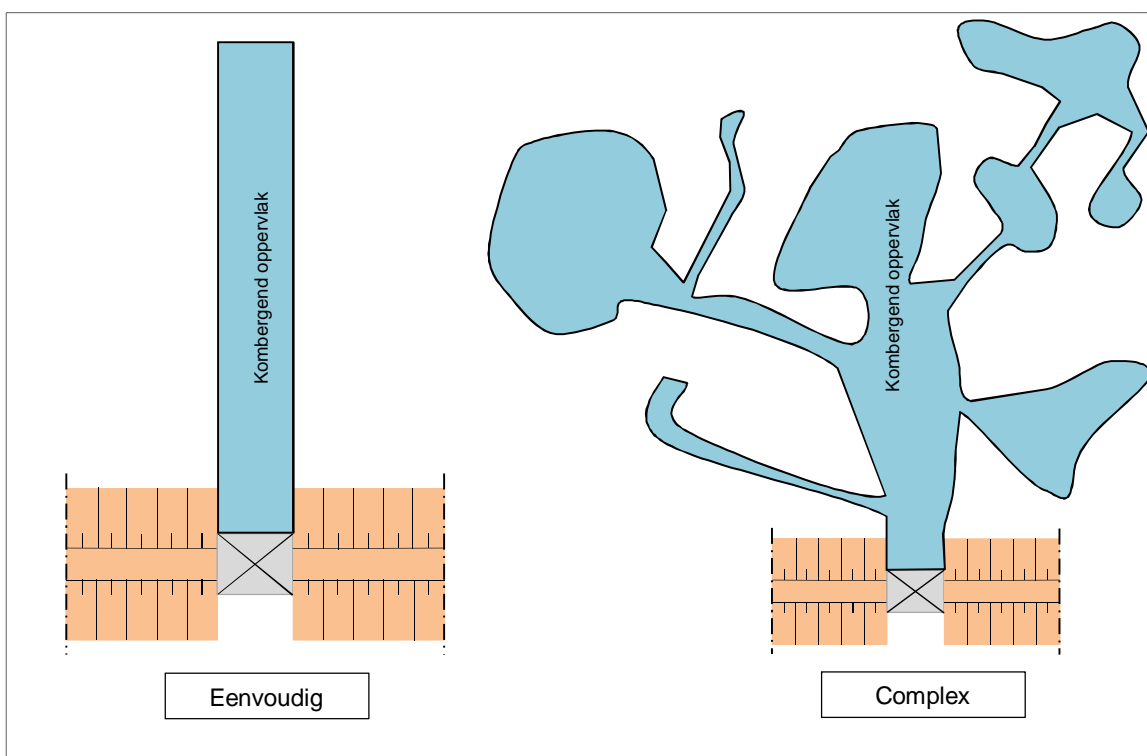
K	[m ³]	Kombergend vermogen
A	[m ²]	Het oppervlak van het open binnenwater dat met het kunstwerk verbonden is
Δh_{kom}	[m]	Toelaatbare peilverhoging op het binnenwater

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

6.3.2 Het kombergend oppervlakte

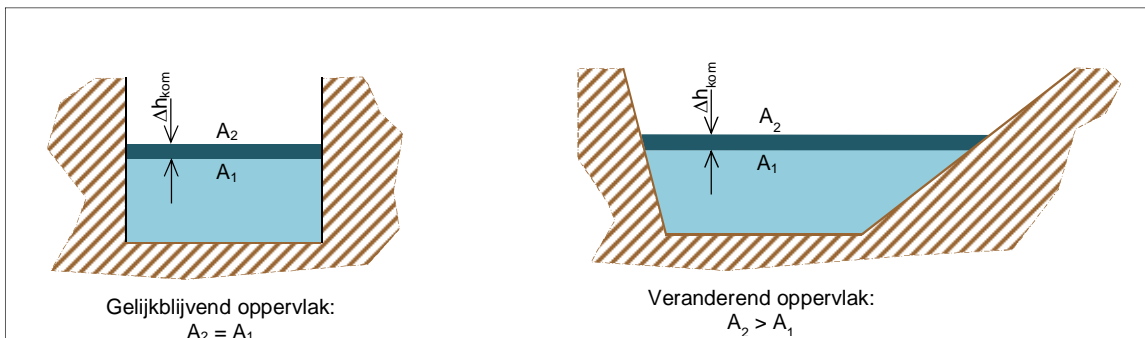
Het kombergend oppervlak is het oppervlak van het open water waarin instromend buitenwater geborgen kan worden. Deze formulering past niet bij alle denkbare situaties, aangezien er ook situaties kunnen zijn waarbij geen sprake is van open water achter kunstwerken. Afhankelijk van de specifieke situatie 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 6-10 kan zowel heel eenvoudig als heel uitgebreid en complex van vorm zijn. In onderstaande figuur is hiervan schematisch een beeld gegeven.



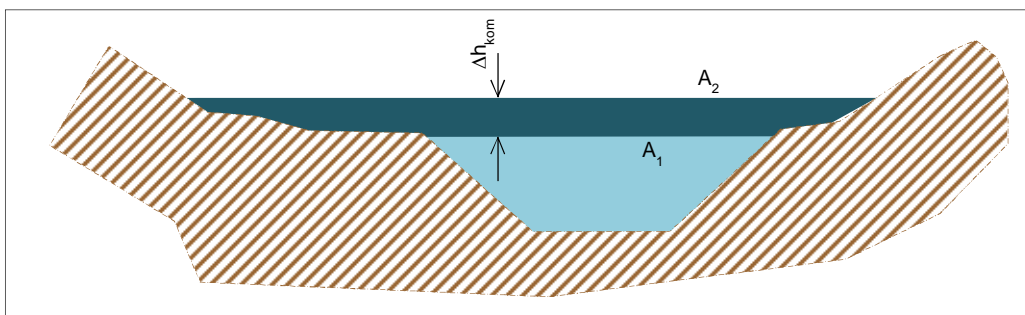
Figuur 6-8 Schematische voorbeelden vormgeving kombergend oppervlak

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 6-9 is dit, wederom schematisch, weergegeven.



Figuur 6-9 Schematische weergave verandering kombergend oppervlak bij stijging binnenpeil

In de rechterfiguur neemt bij een stijgende binnenwaterstand het oppervlak toe, terwijl dit in het 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 6-10 is dit weergegeven.



Figuur 6-10 veranderend wateroppervlak bij stijgende waterstand in geval van natuurvriendelijke oevers

6.3.3 Toelaatbare peilverhoging

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

$$\Delta h_{kom} = h_{bi;toel} - h_{bi;streef}$$

6-11

Hierin is:

Δh_{kom}	[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 toelaatbare peil wordt bepaald door de uitgangspunten die bij de beschouwingen worden toegepast. Indien wateroverlast¹² als criterium wordt gebruikt, kan dit leiden tot een ander toelaatbaar¹³ peil dan wanneer het bezwijken van een kade van de komberging als criterium wordt gehanteerd.

¹² Bijvoorbeeld het onderlopen van kelders

¹³ Indien daadwerkelijk grote gevolgen als uitgangspunt gehanteerd worden, is het beter om te spreken van kritiek peil. In die situaties leidt namelijk het overschrijden van dit peil tot een gevaarlijke situatie, terwijl in een overlast situatie er nog mogelijkheden zijn om een hoger peil toe te laten. Toelaatbare is in deze optie een minder strikt begrip.

Binnen het WTI2017 is het uitgangspunt om voor het toelaatbare binnenpeil uit te gaan van dat waterniveau waarbij sterkte reducerende schade aan de kades optreedt of dat er water op straat staat in bebouwd gebied (zie ook inleiding hoofdstuk 6).

Een uitgangspunt kan ook zijn om voor het binnenpeil die waterstand aan te houden die past bij de norming van de kades. Echter dit kan 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 norming 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.

6.3.4 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 6-12 toegevoegd, waardoor deze formule specifiek wordt gemaakt voor één kunstwerk.

$$V_{c,kw} = A \cdot \Delta h_{kom} - \sum_{i=1}^{i=n} V_{kw,i} - V_{achterland} + V_{pompen} \quad 6-12$$

Hierin is:

$V_{c,kw}$	[m ³]	Kombergend vermogen (volume) beschikbaar voor het beschouwde kunstwerk
A	[m ²]	Het oppervlak van het open binnenwater dat met het kunstwerk verbonden is
Δh_{kom}	[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_{pompen}	[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.

6.4 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 de komberging 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.

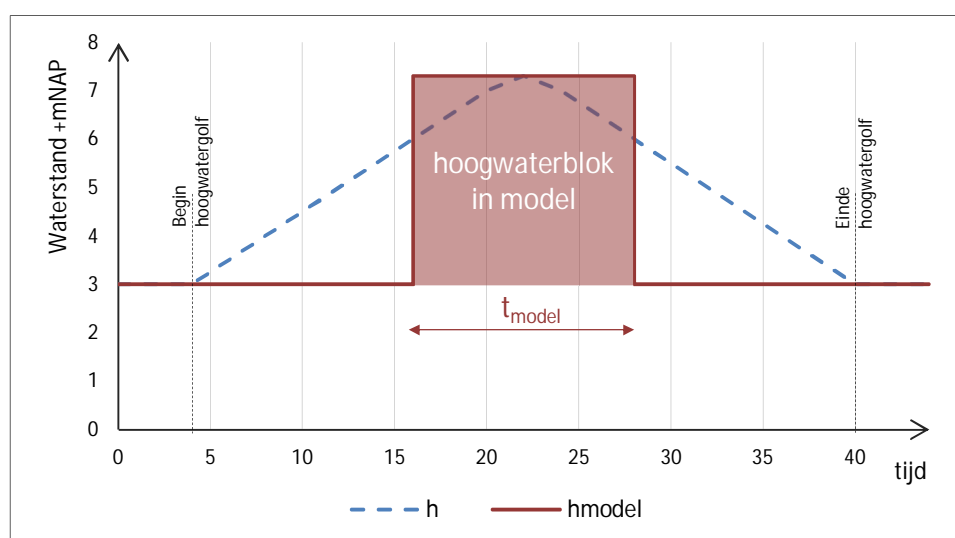
6.5 Keuze model WTI2017

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

Voor het instromende debiet worden de formules zoals gegeven in §6.2 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 zijn de volgende versimpelingen aangebracht:

1. De hoogwatergolf is 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 6-11 Geschematiseerd hoogwaterverloop

2. De binnenwaterstand is constant verondersteld gedurende de berekeningen en is gelijk aan een door de gebruiker in te geven waarde. Dit is voor de situatie van instroming door een kunstwerk in feite een conservatieve benadering, omdat een stijgende binnenwaterstand bij een gelijkblijvende buitenwaterstand het instromende debiet doet afnemen.

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 6-10.

Bij het modelleren van de komberging dienen door de gebruiker de volgende aspecten in acht te worden genomen, omdat deze niet rechtstreeks in de modellen ingebracht kunnen worden:

- 1 Toestroming van water vanuit het binnenland kan niet specifiek gemodelleerd worden. Bij het ingeven van het beschikbare kombergend vermogen, dient de gebruiker hiermee rekening te houden.
- 2 Bij de berekeningen wordt geen rekening gehouden met de aanwezigheid van nog één of meer kunstwerken die op dezelfde komberging uitkomen. Bij het ingeven van het beschikbare kombergend vermogen, dient de gebruiker hiermee rekening te houden.

- 3 Bij de berekeningen wordt er geen rekening mee gehouden dat een kombergend gebied de rol van komberging voor meerdere dijktrajecten kan vervullen. Bij bepaling van de beschikbare komberging dient hier rekening mee gehouden te worden.
Het gebruik van één of meer gemalen gedurende de hoogwaterperiode worden niet automatisch door het instrumentarium meegenomen. Bij het ingeven van het beschikbare kombergend vermogen, dient de gebruiker hiermee rekening te houden.

7 Deelfaalmechanisme Z_{22} , bezwijken bodembescherming

7.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een beschrijving gegeven van de faalmechanismemodellen die horen bij het deelfaalmechanisme Z_{22} : *Bezwijken bodembescherming*. Begonnen wordt met de definitie van falen in paragraaf 7.2. Paragraaf 7.3 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 7.4 beschrijft vervolgens de vigerende kennisbasis en de van toepassing zijnde modellen aan de sterktekant. Ook hier wordt een onderbouwde keuze gemaakt voor het te hanteren model binnen het WTI2017..

In essentie bestaat het model 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. De stroomsnelheid van het water als gevolg van een verval 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 stroomsnelheid als gevolg van verval met de kritieke stroomsnelheid voor de bodembescherming niet mogelijk is. Teneinde dit op te lossen wordt de optredende stroomsnelheid als gevolg van het verval vertaald naar een instromend debiet door vermenigvuldiging met de van belang zijnde afmetingen van het kunstwerk. Daarnaast wordt de kritieke stroomsnelheid met betrekking tot bodembescherming vermenigvuldigd met 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 bezwijken bodembescherming wordt verwezen naar paragraaf 3.4.1.

7.2 Definitie

Bezwijken van de bodembescherming in relatie tot *betrouwbaarheid sluiting* treedt op zodra het instromende debiet leidt tot dusdanige stroomsnelheden ter plaatse van de binnendijkse bodembescherming dat deze bezwijkt en er erosiekuilen gaan ontstaan leidend tot falen van de waterkering. 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 5 is 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_{22} *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_{22} ligt met name bij de modellen waarmee het optredende instromende debiet 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).

7.3 Kennisbasis Instromend debiet (belasting)

Het instromende debiet leidend tot bepaalde stroomsnelheden ter plaatse van de bodembescherming wordt bepaald door de configuratie van het kunstwerk (de doorstroomopening(en)) en het verval over het kunstwerk. De modellen hiervoor zijn reeds beschreven in hoofdstuk 6, paragraaf 6.2.

7.4 Kennisbasis sterkte bodembescherming

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 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.

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:

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

7-1

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 [mNAP].
- 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.

7.4.1 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. Met betrekking tot de situatie die ontstaat bij niet sluiten, 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 nauwelijks bruikbare stabiliteitsrelaties beschikbaar. In [DLT-kdkw 2015] is een eerste aanzet gedaan tot nadere kennisontwikkeling.

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 bovenstaande 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.

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.

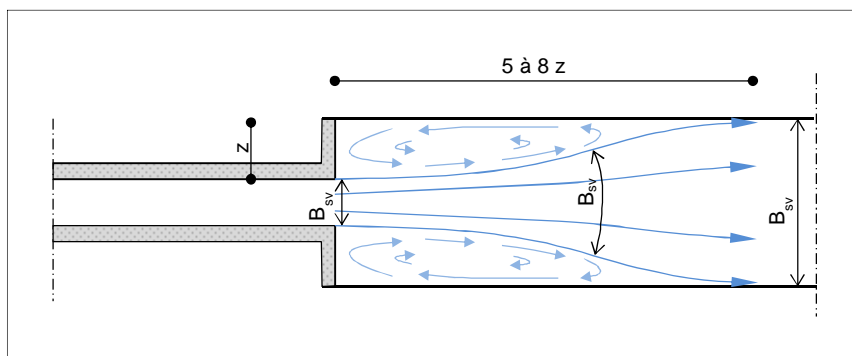
7.4.2 Waterdiepte boven bodembescherming

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.

7.4.3 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 7-1 Stroomvoerende breedte per locatie bij aanwezigheid neren

7.5 Nieuwe kennis

Ten aanzien van bepaling van de kritieke stroomsnelheid zijn en worden er in de loop van tijd wel nieuwe benaderingen opgesteld. Deze borduren vaak voort op voorgaande modellen en zijn vaak bedoeld om nog nauwkeuriger de bodembescherming te bepalen.

Uitgebreidere stromingsmodellen ter bepaling van het instromende debiet zijn via programma's als DUFLOW beschikbaar. Dit programma is echter geen onderdeel van het instrumentarium van het WTI2017. Wel kunnen dergelijke programma's worden gebruikt om bv weerstandsparementen te bepalen en deze via de modelfactoren in te brengen in de modellen van WTI2017.

7.6 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 gebruikt 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 ($m^3/s/m$) ontstaat. Deze waarde kan worden ingevuld in het instrumentarium. Daarnaast dient de stroomvoerende breedte te worden ingevuld.

8 Deelfaalmechanisme Z23, Falen sluitproces

In dit hoofdstuk wordt het deelfaalmechanisme Z_{23} , falen sluitproces, 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 het bepalen van de kans op falen van een hoogwatersluiting van het kunstwerk. Voor de Z-functie zie §3.5.1.

8.1 Definitie en historie

Falen van het sluitproces treedt op wanneer de (hoog)waterkerende keermiddelen niet gesloten kunnen worden en er als gevolg hiervan ongewenst water naar binnen komt stromen dat uiteindelijk kan leiden tot het ontstaan van een bres. Dit laatste kan dan optreden door een tekort aan kombergend vermogen (zie hoofdstuk 6) of het bezwijken van de bodembescherming (zie hoofdstuk 7) en het ontstaan van substantiële ontgrondingskuilen die leiden tot instabiliteit van het kunstwerk (zie hoofdstuk 5). Met betrekking tot het toetsspoor *betrouwbaarheid sluiting* is het van belang om de kans op falen van het sluitproces te bepalen.

De kans op falen van het sluitproces bestaat uit een tweetal onderdelen:

1. De kans op het niet hoogwater gesloten zijn van het kunstwerk op het moment dat een willekeurig hoogwater zich aandient (P_{open}).
2. De kans dat het sluiten van het kunstwerk faalt (P_{ns}).

Afhankelijk van het type kunstwerk en/of het gebruik van het kunstwerk is het standaard (buiten het vervullen van zijn primaire functie) wel of niet hoogwaterkerend gesloten. Indien het standaard wel gesloten is, is een hoogwatersluiting alleen van belang op het moment dat dit hoogwater zich aandient tijdens het uitvoeren van de primaire functie van het kunstwerk (bv het inlaten van water). Staat het kunstwerk standaard altijd open voor het vervullen van zijn primaire functie (bv een coupure), dan is P_{open} gelijk aan 1.

De basis voor het falen van de sluiting zelf (P_{ns}) wordt beschreven in de Leidraad Kunstwerken (bijlage B3 uit [TAW-LK 2003]). Hierin wordt aangegeven, dat op verschillende niveaus de kans op falen van het sluitproces kan worden bepaald. Naast het eenvoudige niveau kan er ook gebruik worden gemaakt van de gedetailleerde methode en de geavanceerde methode. Hierbij betreft de laatste het uitvoeren van een risicoanalyse. De gedetailleerde methode is het uitvoeren van een standaard risicoanalyse, waarbij middels vragenlijsten scores worden toegekend aan de diverse risico's. De eenvoudige methode betreft het beantwoorden van een beperkt aantal vragen, waarbij een voorwaarde met betrekking tot de toelaatbare waterstand bij niet sluiten wordt gesteld. Alleen als aan deze voorwaarde wordt voldaan, mag gebruik gemaakt worden van de eenvoudige methode.

In de volgende paragrafen wordt de kennisbasis verder uitgewerkt.

8.2 Kennisbasis kans op open staan

De kans op open staan van de hoogwaterkerende keermiddelen is van belang, omdat dit de noodzaak tot een sluiting bepaald in het geval zich een hoogwater aandient.

Indien een kunstwerk al gesloten staat bij een naderend hoogwater is sluiting uiteraard niet meer van belang.

De kans op open staan wordt in de Leidraad Kunstwerken [TAW-LK 2003] wel genoemd maar slechts beperkt behandeld. In het project VNK2 is ook gebruik gemaakt van de parameter en is getracht hier al wat meer handen en voeten aan te geven. In het WTI2017 is er nog meer aandacht aan besteedt opdat er eenduidige regels voor toepassing van de parameter ontstaan.

8.2.1 Uitgangspunten en aandachtspunten

De kans op open staan van de hoogwaterkerende keermiddelen op het moment dat een willekeurig hoogwater zich aandient, kent een drietal aandachtspunten.

Ten eerste is het van belang om vast te stellen wat onder hoogwaterkerend wordt verstaan. De volgende definitie wordt aangehouden;

Hoogwaterkerend gesloten: Het gesloten zijn van die keermiddelen, waarbij de fysieke kruinhoogte van de waterkering ter plaatse van het kunstwerk maximaal is en een eventueel instromend debiet bepaald wordt door de kerende hoogte en sterkte en stabiliteit van onderdelen van het kunstwerk.

De definitie impliceert dat hoogwaterkerend refereert aan die keermiddelen van een kunstwerk die de grootste kerende hoogte hebben. Indien deze gesloten zijn, is een grotere kerende hoogte niet realiseerbaar en wordt falen als gevolg van *overslag/overloop* dan wel *sterkte en stabiliteit* van belang.

Een tweede aandachtspunt betreft het gebruik van de hoogwaterkerende keermiddelen bij het uitoefenen van de primaire functie van het kunstwerk. In beginsel wordt er een viertal typen onderscheiden:

- A. Altijd hoogwaterkerend gesloten kunstwerken. De keermiddelen zijn zo geconfigureerd dat, behoudens een calamiteit, de primaire functie wordt vervuld met instandhouding van de waterkerende functie.
- B. Te openen op aanvraag. Het kunstwerk staat in beginsel altijd hoogwaterkerend gesloten en wordt alleen op aanvraag geopend om zijn primaire functie uit te oefenen. Na afloop hiervan wordt het kunstwerk weer hoogwaterkerend gesloten.
- C. Te sluiten bij hoogwater. Het kunstwerk staat vanuit zijn primaire functie altijd geopend (niet hoogwaterkerend gesloten) en wordt bij een naderend hoogwater gesloten.
- D. Te sluiten bij een calamiteit. De keermiddelen staan in beginsel ook tijdens een hoogwater niet gesloten. Sluiting van deze kunstwerken is alleen benodigd indien zich een calamiteit voordoet waardoor het waterkerend vermogen wordt aangetast. Het gaat hierbij om objecten die geen directe verbinding met het buitenwater hebben. Een voorbeeld van een dergelijk object is een tunnel¹⁴.

Het is evident dat een altijd hoogwaterkerend gesloten kunstwerk anders benaderd wordt dan een kunstwerk dat in beginsel geopend staat.

Een derde item, dat een sterke relatie heeft met de typering van de kunstwerken, is de afhankelijkheid van uitvoering van de primaire functie in een bepaalde periode.

¹⁴ Aangezien doorgaande leidingen vallen onder de noemer 'niet-waterkerende kunstwerken' valt deze groep objecten buiten deze categorie. Voor doorgaande leidingen zijn in Leidraad Kunstwerken [TAW-LK 2003] en de vigerende normen (o.a. [NEN-3651 2012]) richtlijnen gegeven omtrent de toepassing van keer/afsluitmiddelen.

Er zijn kunstwerken die gedurende een bepaalde vaste periode altijd gesloten zijn. Een inwateringssluis die alleen gebruikt wordt om water in te laten waarmee akkerland besproeit kan worden, staat in de winterperiode standaard hoogwaterkerend gesloten. Schut- en keersluizen voor recreantenhavens worden in de winter dikwijls niet bediend en staan dan hoogwaterkerend gesloten. Daarnaast zijn er ook objecten die met name tijdens een hoogwater in bedrijf zijn. Sommige gemalen zijn hiervan een voorbeeld.

8.2.2 Het model voor P_{open}

In de formule voor het faalmechanisme *niet sluiten* is een parameter opgenomen voor de kans op open staan van de keermiddelen. In de volgende formule voor het faalmechanisme is de parameter expliciet aanwezig.

$$P_{fa,ns} = P\{V_{open} > V_{toel}\} = P_{ns} \cdot N\{h_{bu} > OKP\} \cdot P_{open} \cdot P_{f,herstel} \quad 8-1$$

Hierin is:

$P_{fa,ns}$	[1/jaar]	Kans op falen van het kunstwerk ten gevolge van falende afsluitmiddelen [1/jaar]
$P\{V_{open} > V_{toel}\}$	[1/jaar]	Kans van overschrijding van het toelaatbaar instroomvolume als gevolg van falende afsluitmiddelen [1/jaar]
P_{ns}	[1/vraag]	Kans dat de sluiting van het kunstwerk faalt
$N\{h_{bu} > OKP\}$	[vragen/jaar]	Gemiddeld aantal keer per jaar dat een hoogwatergolf passeert met een maximale buitenwaterstand hoger dan de toelaatbare buitenwaterstand bij een niet gesloten kunstwerk (resultierend in een sluitvraag bij open kunstwerk)
P_{open}	[-]	Kans dat het kunstwerk vanuit de optiek van waterkeren open staat
$P_{f,herstel}$	[-]	Kans dat een eventueel benodigd herstel faalt

In § 8.2.1 zijn de aspecten benoemd die invloed hebben op de P_{open} . Hieruit blijkt dat het van belang is te bepalen wat de tijdsduur per jaar is waarover een kunstwerk niet hoogwaterkerend gesloten kan staan. Dit is afhankelijk van:

- Frequentie van openen/sluiten. Aantal keren per jaar dat het kunstwerk vanuit zijn primaire functie wordt geopend en weer gesloten (N_{open}).
- De gemiddelde openingsduur per keer (T_{open}) dat een kunstwerk vanuit zijn primaire functie open staat (niet waterkerend gesloten).
- De benodigde tijd om een falende sluiting vanuit de primaire functie met gereede zekerheid te herstellen (T_{rep}). Deze parameter is onder meer afhankelijk van signalering van falen, de faaloorzaak en eigenschappen van het kunstwerk.

De kans dat een kunstwerk gedurende uitoefening van zijn functie open staat is voor bepaalde periode gelijk aan:

$$P_{open;functie} = N_{open} \cdot T_{open} \quad 8-2$$

Hierin is:

N_{open}	[1/jaar]	Aantal keren dat het kunstwerk vanuit zijn primaire functie wordt geopend en weer gesloten
T_{open}	[jaar]	Gemiddelde tijdsduur per keer dat een kunstwerk vanuit zijn primaire functie open staat

De kans op falen voor de specifieke tijdsduur is hiermee gelijk aan:

$$P_{fa,ns} = P_{ns} \cdot N\{h_{bu} > OKP\} \cdot P_{open;functie} \cdot P_{f;herstel} = P_{ns} \cdot N\{h_{bu} > OKP\} \cdot N_{open} \cdot T_{open} \cdot P_{f;herstel} \quad 8-3$$

Op het moment dat het kunstwerk in functie is en er komt een hoogwater aan, zal er gesloten moeten worden.

Hierbij wordt dan gebruik gemaakt van een sluitpeil en indien er voldoende tijd beschikbaar is, kan een herstel van een dan falende sluiting wellicht nog worden uitgevoerd. Voor objecten, zoals gemalen, is het goed mogelijk dat zolang het kunstwerk in functie is, het uitmalen van water, er geen sprake is van een niet hoogwaterkerend kunstwerk. Immers instroming is bij voldoende opvoerhoogte van de pomp(en) niet mogelijk. In dat geval gaat het alleen om het moment van sluiten, waarop het fout kan gaan.

De kans dat de keermiddelen in gefaalde toestand staan (dus zich in een reparatieperiode bevinden) is voor een jaar gelijk aan:

$$P_{open;reparatie} = N_{open} \cdot P_{ns} \cdot T_{rep} \quad 8-4$$

Hierin is:

- N_{open} Aantal keren dat het kunstwerk vanuit zijn primaire functie wordt geopend en weer gesloten [-/jaar].
- P_{ns} Kans dat de sluiting van het kunstwerk faalt [1/vraag]
- T_{rep} Gemiddelde reparatieduur bij een falende sluiting als gevolg waarvan het kunstwerk open staat [jaar].

Hierin is:

- N_{open} [-/jaar] Aantal keren dat het kunstwerk vanuit zijn primaire functie wordt geopend en weer gesloten
- P_{ns} [1/vraag] Kans dat de sluiting van het kunstwerk faalt
- T_{rep} [jaar] Gemiddelde reparatieduur bij een falende sluiting als gevolg waarvan het kunstwerk open staat

In bovenstaande formule is zichtbaar dat de faalkans van sluiting verwerkt zit in de kans dat het kunstwerk in gefaalde toestand (niet hoogwaterkerend gesloten) staat. Sluiting is niet mogelijk zolang het kunstwerk in reparatie staat. De kans op falen van het herstel van de sluiting kan nog worden meegenomen, indien alternatieve sluitingswijzen mogelijk zijn. De kans op falen als gevolg van het feit dat de keermiddelen in een reparatieperiode zit is gelijk aan:

$$P_{fa,ns} = N\{h_{bu} > OKP\} \cdot P_{open;reparatie} \cdot P_{f;herstel} = N\{h_{bu} > OKP\} \cdot N_{open} \cdot P_{ns} \cdot T_{rep} \cdot P_{f;herstel} \quad 8-5$$

Wanneer de bijdragen van formule 8-3 en 8-5 worden samengevoegd ontstaat de volgende uitdrukking:

$$P_{fa,ns} = P_{ns} \cdot N\{h_{bu} > OKP\} \cdot N_{open} \cdot (T_{open} + T_{rep}) \cdot P_{f;herstel} \quad 8-6$$

Vergelijking van formule 8-1 en 8-6 laat zien dat voor de kans op open staan van het kunstwerk de volgende uitdrukking kan worden gehanteerd:

$$P_{open} = N_{open} \cdot (T_{open} + T_{rep}) \quad 8-7$$

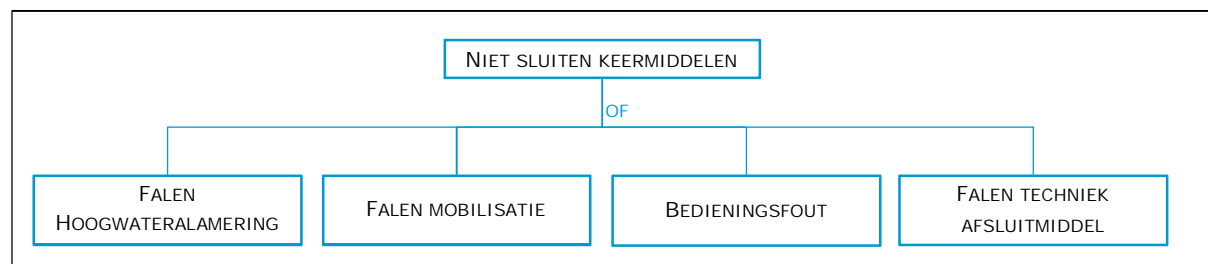
Opgemerkt wordt dat voor zowel T_{open} al T_{rep} gebruik wordt gemaakt van dezelfde P_{ns} . Strikt gezien is dit niet correct omdat in de kans op niet sluiten (P_{ns}) zich ook aspecten aangaande signalering en mobilisatie bevinden. Echter bij kunstwerken waarbij sprake is van meerdere sluiting per jaar vanuit een primaire functie, is de verwachting dat deze aspecten niet dominant zullen zijn.

8.3 Kennisbasis kans op falen van de sluiting

De kans dat sluiting faalt gegeven dat het kunstwerk open staat is afhankelijk van meerdere aspecten. Deze aspecten komen terug in de risicoanalyse die van de sluitingsoperatie opgesteld kan worden. Deze risicoanalyse kan op verschillende niveaus plaatsvinden, van eenvoudig tot geavanceerd. Op het hoogste niveau kan een complete risicoanalyse met behulp van een volledige decompositie van het kunstwerk opgesteld worden. Per onderdeel dat gerelateerd is aan de sluitingsoperatie kan vervolgens een faalkans worden bepaald. Uiteindelijk leidt dit tot een faalkans van het gehele systeem. Een dergelijke analyse wordt momenteel in Nederland al uitgevoerd voor enkele stormvloedkeringen. Het gaat hierbij om Probabilistisch Beheer en Onderhoud (PROBO), waarmee met name het onderhoud van dergelijke grote systemen gemonitord kunnen worden. Voor de meeste waterkerende kunstwerken wordt vanwege hun eenvoud een sterke vereenvoudiging doorgevoerd wanneer het gaat om het analyseren van de kans op niet sluiten.

8.3.1 Uitgangspunten

In de Leidraad Kunstwerken [TAW-LK 2003] worden handvatten gegeven voor het bepalen van de kans op niet sluiten. Basis is dat de kans op het mislukken van de sluiting afhangt van een viertal subsystemen (zie Figuur 8-1), welke in principe in na elkaar plaatsvinden.



Figuur 8-1 Subsystemen kans mislukken sluiting

Per subsysteem dient een analyse te worden gemaakt. Het subsysteem met de grootste faalkans dicteert uiteindelijk de faalkans van het kunstwerk. Hierbij is het uitgangspunt dat falen van één van de subsystemen ook inhoudt dat de sluiting faalt. Tussen de subsystemen is sprake van enige afhankelijkheid, omdat het gehele sluitingsproces niet perfect te scheiden is in de vier genoemde aspecten.

Bij het bepalen van de kans op niet sluiten dient ook rekening gehouden te worden met het aantal doorgangen dat aanwezig is in een kunstwerk (bv een gemaal met meerdere perskokers). Om de analyse juist uit te voeren, dient per doorgang de kans op het mislukken van de sluiting te worden bepaald. Vervolgens moet een afweging worden gemaakt of de faalkans per doorgang opgeteld moeten worden, of dat de grootste faalkans maatgevend is. Een en ander heeft te maken met afhankelijkheden tussen de verschillende doorgangen.

8.3.2 Het model voor P_{ns}

De basis voor het model voor de kans op het mislukken van de sluiting is relatief eenvoudig. De kans dat het kunstwerk niet compleet gesloten is, dus één van de doorgangen staat open bij een optredend hoogwater, kan worden bepaald middels de volgende formule. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat de kansen op mislukken van de sluiting per doorgang onafhankelijk zijn:

$$P_{ns,tot} = 1 - \{(1 - P_{ns,1}) \cdot (1 - P_{ns,2}) \cdot \dots \cdot (1 - P_{ns,n})\} \quad 8-8$$

Hierin is:

P_{ns}	[1/vraag]	Kans dat de sluiting van het kunstwerk faalt
$P_{ns,i}$	[1/vraag]	Kans dat de sluiting van de doorgang 'i' faalt bij aanwezigheid van meerdere doorgangen in het kunstwerk.
n	[-]	Aantal doorgangen in het kunstwerk.

Bovenstaande formule impliceert dat per doorgang een kans op niet sluiten wordt vastgesteld, waarna deze kansen middels een bepaalde bewerking worden samengesteld tot één kans voor het gehele kunstwerk. Hierbij wordt uitgegaan van onafhankelijkheid.

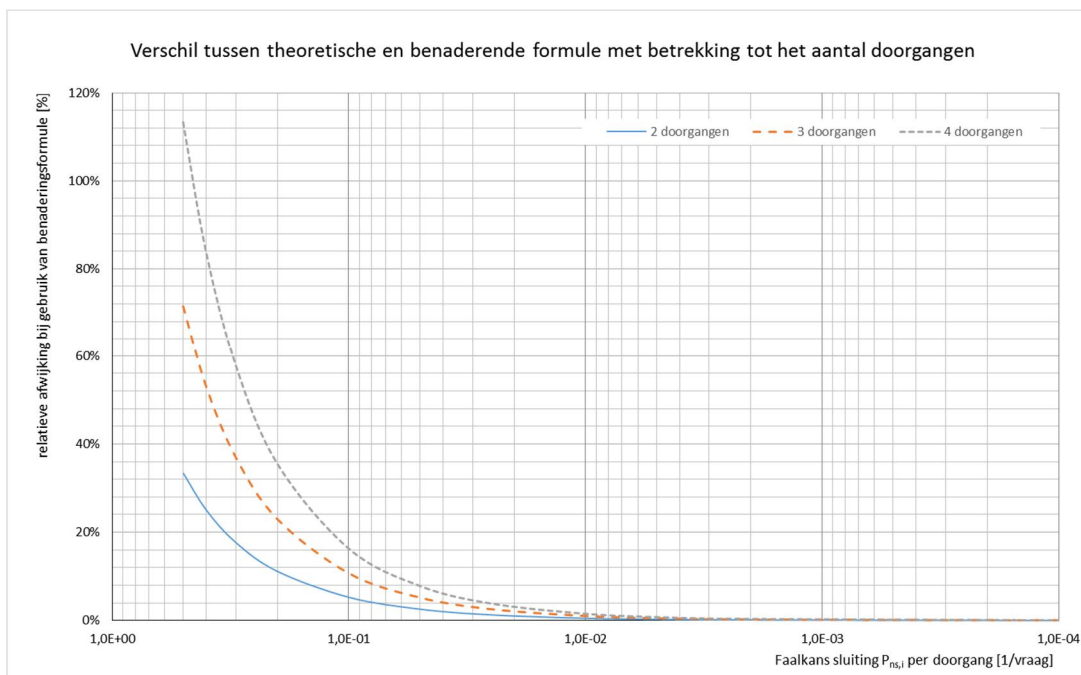
Aangezien bij meerdere doorgangen deze vaak zijn voorzien van dezelfde configuratie van keermiddelen en dus eenzelfde kans van falen van de sluiting hebben, kan bovenstaande formule ook worden genoteerd als:

$$P_{ns,tot} = 1 - (1 - P_{ns})^n \quad 8-9$$

Deze formule kan worden benaderd met:

$$P_{ns,tot} = n \cdot P_{ns} \quad 8-10$$

Wanneer een vergelijking tussen de benadering en de daadwerkelijke exacte uitkomst wordt gemaakt ontstaat onderstaand Figuur 8-2.



Figuur 8-2 vergelijking tussen benadering en exacte uitkomst m.b.t. het aantal doorgangen

Uit de grafiek kan worden afgelezen dat met de benaderingsformule 8-10 in het geval van drie identieke doorstroomopeningen en een kans op falen van de sluiting van 0,1 [1/vraag] per opening, er een totale faalkans voor het kunstwerk wordt gevonden die circa 10% hoger is dan die met de theoretische formule 8-9 wordt berekend. Bij een faalkans van sluiting van 0,01 [1/vraag] per opening is dit al gereduceerd tot 1%.

Aangezien de faalkansen van sluiting in veruit de meeste gevallen kleine of gelijk zijn dan 0,01 [1/vraag] zijn de 'fouten' die met formule 8-10 gemaakt worden beperkt en toelaatbaar.

Aangezien in de praktijk de faalkansen van de diverse doorstroomopeningen zelden helemaal onafhankelijk zijn, levert de bovenstaande benadering een conservatief beeld op van de faalkans van sluiten.

De waarde voor de faalkans per vraag, P_{ns} , dient via een risicoanalyse te worden bepaald. De risicoanalyse kan worden uitgevoerd op verschillende niveaus. Hierbij kan gebruik worden gemaakt van de hulpmiddelen uit de Leidraad Kunstwerken [TAW-LK 2003]. Aandacht dient hierbij te worden geschonken aan het verschil tussen keermiddelen die vanuit hun primaire (dagelijkse) functie regelmatig worden gesloten en keermiddelen die alleen bij een naderend hoogwater sluiten. De scoretabellen conform de gedetailleerde methode uit de Leidraad Kunstwerken ([TAW-LK 2003, bijlage B, paragraaf 3.4) zijn specifiek bedoeld voor keermiddelen die alleen vanuit hoogwaterkeren gesloten worden.

8.4 Nieuwe kennis

Er wordt geen nieuwe specifieke kennis ontwikkeld ten aanzien van het faalproces. Alleen op het niveau van volledige faalkansanalyse worden de modellen verder geoptimaliseerd. Dit vindt plaats vanuit de PROBO-gedachte. Een afgeleide hiervan is een paar jaar geleden toegepast toen het project RINK¹⁵ is uitgevoerd. Hierin is naar de beschikbaarheid van RWS-kunstwerken gekeken met betrekking tot de scheepvaart en waterbeheer. Gebruik is gemaakt van uitgebreide faalkansanalyses van de kunstwerken.

Bovenstaande 'nieuwe kennis' kan worden gebruikt bij de analyse voor de kans op het mislukken van de sluiting.

8.5 Keuze model WTI2017

Het model dat binnen VNK2 voorhanden was, wordt ook in het WTI2017 toegepast. Met name in de schematiseringshandleidingen wordt nadrukkelijker stilgestaan bij de wijze waarop het model toegepast kan worden. Dit gaat dan om de kans op open staan (P_{open}) en de wijze waarop omgegaan kan worden met meerdere doorgangen in een kunstwerk.

Ten aanzien van de onderbouwing van een waarde van P_{ns} wordt grotendeels aangesloten op wat vermeldt staat in de Leidraad Kunstwerken [TAW-LK 2003]. Getracht wordt om middels een praktijkonderzoek naar het gebruik van de scoretabellen uit de Leidraad Kunstwerken), deze scoretabellen van een update te voorzien.

Het uitvoeren van een volledige risicoanalyse per kunstwerk ten einde de kans op het mislukken van de sluiting (P_{ns}) te bepalen, is voor het overgrote deel van de te toetsen kunstwerken te geavanceerd en wordt daarom ook niet standaard binnen het WTI2017 ingevoerd. In veel gevallen kan worden volstaan met een vereenvoudigde benadering waarmee de kans op sluiting kan worden bepaald.

¹⁵ Risico Inventarisatie Natte Kunstwerken

9 Deelfaalmechanisme Z24, falen herstel sluitproces

In dit hoofdstuk wordt het deelfaalmechanisme Z₂₄, falen herstel sluitproces, 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 WT12017.

Het model voor dit deelfaalmechanisme bestaat uit het bepalen van de faalkans van herstel van een gefaalde reguliere hoogwater sluiting. Voor de Z-functie zie §3.6.1.

9.1 Definitie en historie

Falen van het herstel van de sluiting is van belang als de reguliere (normale) hoogwater sluiting is gefaald en als gevolg hiervan het kunstwerk nog steeds geopend is. Op dat moment kan worden bekeken of het kunstwerk alsnog op alternatieve wijze, of middels het herstellen van gefaalde componenten, alsnog gesloten kan worden voordat aan de binnenzijde (grote) gevolgen optreden. Aangezien falen van herstel behoort bij de bepaling van de kans dat een kunstwerk niet hoogwaterkerend gesloten is, wordt er feitelijk niet gesproken over de kans dat herstel van een gefaalde sluiting lukt. Het verband tussen beide is eenvoudig.

$$P_{f,herstel} = 1 - P_{herstel\ lukt}$$

In de Leidraad Kunstwerken [TAW-LK 2003] wordt ook gesproken over de mogelijkheden van herstel van een gefaalde sluiting. Onderstaand citaat is hieruit afkomstig.

Uitgangspunt van de gedetailleerde methode is dat het alsnog sluiten van een geopend kunstwerk na de overschrijding van het OKP niet meer lukt. Afhankelijk van onder meer de bergingscapaciteit van het achterliggend systeem, zal er echter na het aanvankelijk falen van het sluitingsproces ook na overschrijding van het OKP nog een zekere tijd beschikbaar zijn tot het moment dat het maximaal te bergen volume wordt overschreden. In die periode zal normaliter, ook buiten de van tevoren vastgelegde procedures om, van alles worden geprobeerd om het kunstwerk alsnog gesloten te krijgen. Het in rekening brengen van de kans dat dit niet tijdig lukt, levert een extra reductie op van de kans op waterbezwaar ten gevolge van niet sluiten. Als deze kans wordt genoteerd als $P_{f,herstel}$, dan bedraagt de werkelijke kans op waterbezwaar ten gevolge van falende sluiting:

$$P\{V_{geopend} > V_{toelaatbaar}\} = n_j \cdot P_{ns} \cdot P_{f,herstel} \quad (B3.5)$$

De waarde van deze reductiefactor $P_{f,herstel}$ zal afhankelijk van de specifieke situatie sterk verschillen. Een algemeen toepasbare methode om hier een schatting van te maken bestaat er (nog) niet. Belangrijke factoren zullen in ieder geval zijn de nog beschikbare tijd om wat te doen, alsmede de mate waarin de afsluitmiddelen geschikt zijn voor het sluiten in stroming bij groter verval.

Voor de kans op falen van herstel wordt conform bovenstaande tekst gekeken naar het moment dat er reeds water naar binnen stroomt (overschrijding van het Open Keerpeil (OKP)). Het gaat dan om het alsnog sluiten van het kunstwerk in stromend water.

Sluiting van het kunstwerk met de normale keermiddelen is gefaald, maar met behulp van de inventiviteit van de betrokken mensen is wellicht toch nog een sluiting te realiseren.

Sluiting van herstel van een gefaalde sluiting is conform het citaat uit de Leidraad Kunstwerken direct gekoppeld aan de beschikbare tijd die rest om een (alternatieve) sluiting alsnog te realiseren voordat sprake is van de nodige gevolgen (schade en slachtoffers).

Herstel van een gefaalde sluiting lijkt in eerste instantie alleen betrekking te hebben op het niet geplaatst/dichtkrijgen van de keermiddelen. Een kans op herstel kan echter ook betrekking hebben op een andere fase in het sluitingsproces, zoals het falen van de mobilisatie. In hoeverre dat ook bedoeld is in de Leidraad Kunstwerken is niet duidelijk. In de praktijk wordt met name gekeken naar herstel van het technisch falen van de sluiting (feitelijke plaatsing keermiddelen) dan wel bediening van de keermiddelen. In voorliggend document wordt hierbij aangesloten. Herstel van falen van alarmering en mobilisatie zit grotendeels als in de scoretabellen van de gedetailleerde methode uit de Leidraad kunstwerken verwerkt. Daarnaast zijn dit twee aspecten die in de praktijk vaak niet maatgevend blijken te zijn.

Zoals aangegeven in de Leidraad Kunstwerken ontbreken er momenteel nog handvatten in leidraden, normen en voorschriften over de omgang met de faalkans van herstel. In de praktijk tot nu toe wordt de kans op herstel van een falende sluiting dan ook op diverse wijze meegenomen, waarbij het vaak voorkomt dat deze kans op herstel niet in de toetsing wordt betrokken.

9.2 Beschrijving van het model

Het model dat momenteel beschikbaar is betreft het model dat ook in VNK2 gehanteerd is. Dit eenvoudige model geeft enige richtlijnen met betrekking tot de faalkans van herstel. Andere eenvoudige tools ontbreken momenteel nog. In het instrumentarium van het WTI2017 is, evenals in VNK2, voor de faalkans van herstel een parameter in het model opgenomen.

Middels onderstaande formulering [TAW-LK 2003] wordt de faalkans met betrekking tot *niet* sluiten beschreven.

$$P_{fa;ns} = P\{V_{open} > V_{toel}\} = P_{ns} \cdot N\{h_{bu} > OKP\} \cdot P_{open} \cdot P_{f,herstel} \quad (9-1)$$

Hierin is:

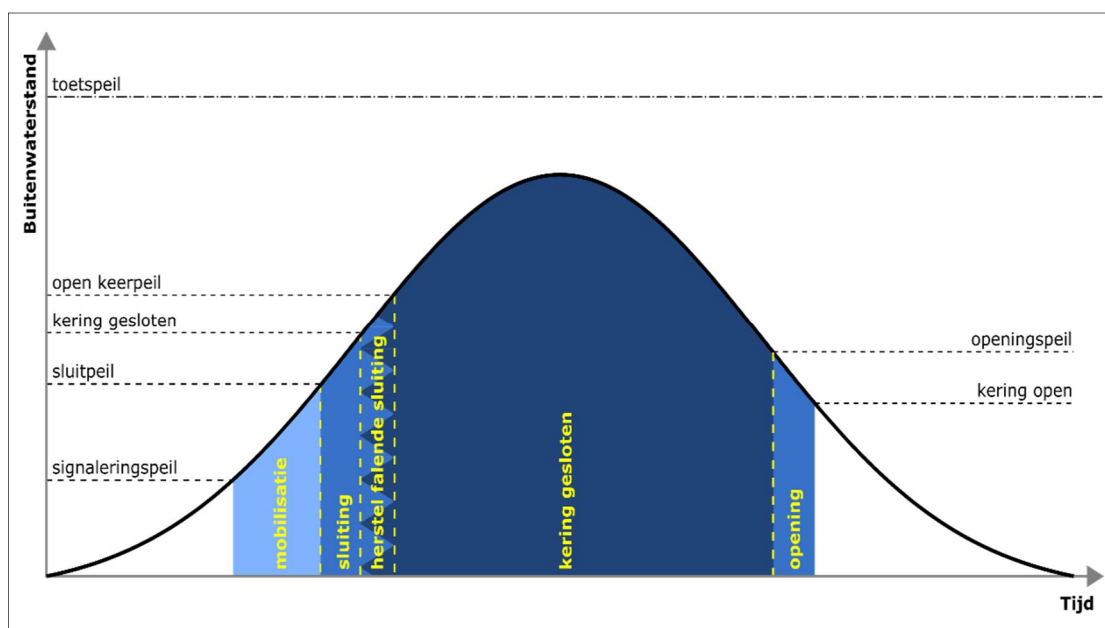
$P_{fa;ns}$	Kans op falen van het kunstwerk ten gevolge van falende afsluitmiddelen [1/jaar].
$P\{V_{open} > V_{toel}\}$	Kans van overschrijding van het toelaatbaar instroomvolume als gevolg van falende afsluitmiddelen [1/jaar].
P_{ns}	Kans dat de sluiting van het kunstwerk faalt [1/vraag].
$N\{h_{bu} > OKP\}$	gemiddeld aantal keer per jaar dat een hoogwatergolf passeert met een maximale buitenwaterstand hoger dan OKP (resultierend in een sluitvraag bij open kunstwerk) [vragen/jaar].
P_{open}	Kans dat het kunstwerk vanuit de optiek van waterkeren open staat [-]
$P_{f,herstel}$	Kans dat een eventueel benodigd herstel van een falende sluiting faalt [-]

Bovenstaande formulering laat direct de parameter $P_{f,herstel}$ zien, waarmee de faalkans van herstel van de sluiting kan worden meegenomen.

Het meenemen van de faalkans van herstel kan alleen plaatsvinden onder bepaalde voorwaarden. Hieronder volgt een opsomming van de belangrijkste aandachtspunten:

1. De beschikbare tijd tussen het moment dat geconstateerd wordt dat de reguliere sluiting faalt en het moment dat sluiting van het kunstwerk door instromend water niet meer uitgevoerd kan worden.
2. De bereikbaarheid van het kunstwerk.
3. De afmetingen van het kunstwerk.
4. Het te keren verval over het kunstwerk.
5. De oorzaken van falen van de reguliere sluiting.

ad 1. Voor een niet gesloten kunstwerk is de waterstand die maximaal gekeerd kan worden, die waterstand waarbij dusdanig veel water instroomt dat dit net niet leidt tot het falen¹⁶ van de waterkering. Een dergelijke waterstand wordt het Open KeerPeil (OKP¹⁷) genoemd. Het OKP kan zowel onder als boven de Open KeerHoogte liggen. Dit laatste is de fysiek kerende hoogte van een kunstwerk wanneer het niet gesloten is, zoals de drempel van een coupure of de kerende hoogte van achterliggende boezemkaden. Het sluitproces van een kunstwerk dient feitelijk te worden georganiseerd om de waarde van het OKP heen, waarbij het verloop van de hoogwatergolf in de tijd wordt meegenomen. In onderstaande Figuur 9-1 is een en ander schematisch weergegeven. Hierbij is ervan uitgegaan dat het kunstwerk in open toestand staat op het moment dat de hoogwatergolf aankomt.



Figuur 9-1 Schematisch verloop sluitingsprocedure bij een hoogwatergolf

Toelichting bij Figuur 9-1:

In eerste instantie wordt een komende hoogwatergolf gesignaleerd via metingen en voorspellingen. Hierop volgt een mobilisatie ten einde de kering te kunnen sluiten. Bij het bereiken van het sluitpeil dient daadwerkelijk tot sluiting overgegaan te worden.

¹⁶ Falen is hierbij nog niet vast gedefinieerd. Het maakt hier nog niet uit of het nu over wateroverlast gaat of over bresvorming en overstromingsrisico's

¹⁷ Open KeerPeil is die buitenwaterstand waarbij aan de binnenzijde van het kunstwerk problemen optreden (waterbezwaar dan wel overstromingsgevolgen) indien het niet is gesloten.

Indien er voldoende tijd is tussen het sluitpeil en het bereiken van het kritieke peil (OKP), en de mogelijkheden zijn aanwezig, kunnen bij een falende sluitingsprocedure nog herstelpogingen worden gedaan om alsnog te sluiten. Wanneer dit succesvol is, is de kering alsnog hoogwaterkerend gesloten. Als de buitenwaterstand nu weer daalt, wordt op een gegeven moment de kering weer geopend.

De beschikbare tijd tussen het uitvoeren van de reguliere sluitingsprocedure en het overschrijden van die waterstand waarbij geen enkele sluiting meer mogelijk is, is van belang bij bepaling van de faalkans van herstel. In het rivierengebied kan deze tijd oplopen tot 24 uur en langer. Dit betekent dat in die gevallen na het falen van de reguliere sluiting er nog een dag of meer beschikbaar is om het kunstwerk alsnog te sluiten.

In bovenstaande figuur is het OKP genoemd als maatgevende waterstand waarbij het kunstwerk gesloten moet zijn. Deze term past goed bij de vigerende overbelastingsbenadering, waarbij een kunstwerk al als gefaald wordt beschouwd bij het optreden van wateroverlast aan de binnenzijde van de kering. In de nieuwe overstromingskansbenadering speelt het OKP een veel kleinere rol en gaat het uiteindelijk over de waterstand die aan de binnenzijde maximaal toelaatbaar is. Middels instroommodellen wordt deze kritieke binnenwaterstand vertaald naar een buitenwaterstand met daaraan gekoppeld verloop en duur van het hoogwater. Theoretisch gezien treden er pas overstromingsproblemen op, op het moment dat dit peil wordt overschreden. Gerealiseerd moet echter worden dat het alsnog sluiten van een kunstwerk na een gefaalde reguliere sluiting, waarbij er water door het kunstwerk stroomt, vaak een zeer onzekere handeling is. Dus ook voordat het OKP wordt bereikt, kan het al niet meer mogelijk zijn het kunstwerk alsnog te sluiten nadat de sluiting in eerste instantie gefaald is.

- ad 2. De bereikbaarheid van een kunstwerk, nadat de sluiting is gefaald, is ook van belang. Indien materiaal en/of materieel, dat benodigd is voor een alternatieve sluiting, het kunstwerk niet (tijdig) kan bereiken, is een herstel ook niet mogelijk. Daarnaast kan het ook nog mogelijk zijn dat het kunstwerk wel bereikt kan worden, maar het watervoerende element alsnog niet kan worden bereikt om een alternatieve sluiting te realiseren. Gedacht kan worden aan kokers door dijklichamen, waarbij de inspectieschacht afgesloten is of onder water staat.
- ad 3. Kunstwerken met kleinere afmetingen laten zich gemakkelijker op een alternatieve wijze sluiten dan kunstwerken met grotere afmetingen.
- ad 4. Indien door het kunstwerk onder hoogwateromstandigheden een groot verval gekeerd moet worden, dient te worden beschouwd of een alternatief keermiddel in staat is dit verval te keren.
- ad 5. De oorzaak van falen van de reguliere sluiting kan van invloed zijn op de kans van herstel. Wanneer een sluiting faalt doordat het kunstwerk een constructief gebrek vertoont, is het de vraag of een alternatieve sluiting dit constructieve gebrek kan overbruggen.

Een waarde voor $p_{f,herstel}$ kan met behulp van bovenstaande aandachtspunten worden afgeleid. Deze waarde kan direct in het model voor *niet sluiten* worden ingevoerd

9.3 Nieuwe kennis

Ten aanzien van de faalkans van herstel is niet direct nieuwe kennis voorhanden.

9.4 Keuze model WTI2017

In het WTI2017 is een parameter $P_{f,herstel}$ aanwezig, waarvan de waarde buiten het model in de pre-processing bepaald dient te worden.

Ten behoeve van deze pre-processing worden in de schematiseringshandleiding een aantal handreikingen gegeven. Deze hebben betrekking op het tijdsaspect, de afmetingen van het object en de oorzaak van falen van de reguliere hoogwater sluiting. Indien deze handreikingen niet toereikend zijn in een bepaald geval kan hiervan worden afgeweken, of hierop worden aangevuld, mits dit wordt onderbouwd.

10 Schematiseringshandleiding

De schematiseringshandleiding is opgenomen in een apart document:
Schematiseringshandleiding faalmechanisme betrouwbaarheid sluiting [DLT-shbs 2015].

11 Toets op Maat

11.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een beschrijving gegeven van de mogelijkheden die een toets op maat biedt voor het toetsspoor *betrouwbaarheid sluiting* bij kunstwerken. 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 paragraaf 11.2 wordt ingegaan op de redenen om een toets op maat uit te voeren. Indien hiertoe besloten wordt, dan worden in paragraaf 11.3 aanwijzingen gegeven hoe deze toets op maat uitgevoerd kan worden. Afhankelijk van het dominante deelfaalmecanisme zijn verschillende nadere analyses mogelijk:

Aanscherping kans op falen van het sluitproces (altijd in het kritieke pad):

- Analyse kans op niet sluiten (foutenboomanalyse)
- Analyse faalkans herstel van sluiting (foutenboomanalyse)
- Nadere bepaling kans op open staan bij naderend hoogwater (gebruiksanalyse)

Aanscherping komberging:

- Meenemen daadwerkelijk verloop van hoogwater (locatie specifiek waterstandsverloop)
- Nadere bepaling kritieke waterstand achterliggende waterkeringen (sterkteanalyse achterliggende waterkeringen)
- Nadere bepaling kombergend oppervlak (achterlandstudie)

Aanscherping bodembescherming:

- Nadere bepaling bresvorming bij optreden erosie bodembescherming (beschouwing situatie en constructie in relatie tot het ontstaan van grondmechanische instabiliteit van het kunstwerk en daarmee het ontstaan van een bres)

11.2 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.

11.3 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 de kans op falen van het sluitproces. Hieronder vallen alle aspecten van dit sluitproces.
- 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.

11.3.1 Nadere bepaling van de kans op falen van het sluitproces

De kans op falen van het sluiten wordt met name beïnvloed door de volgende drie aspecten±

- 1) Kans dat het kunstwerk bij een naderend hoogwater geopend staat en dus gesloten moet worden (P_{open})
- 2) Kans dat het feitelijke sluitproces faalt wanneer er een vraag vanuit hoogwaterkeren optreedt (P_{ns}).
- 3) Kans dat herstel van een gefaalde sluiting ook faalt ($P_{f,herstel}$).

In een toets op maat kunnen bovenstaande aspecten als geheel nader worden beschouwd. Er kan echter ook voor worden gekozen om aspect 1 en de aspecten 2 en 3 apart te beschouwen. Een separate beschouwing van aspecten 2 en 3 is in de meeste gevallen niet zinvol, omdat herstellen van een gefaalde sluiting feitelijk onderdeel hoort te zijn van het reguliere sluitproces.

- ad 1. In de toets op maat kan worden beschouwd of de kans op open staan bij een naderend hoogwater verder kan worden aangescherpt. Hiervoor zijn gegevens uit de praktijk benodigd, die betrekking hebben op het dagelijks functioneren van het kunstwerk. Een nadere analyse van deze gegevens kan leiden tot een aanscherping van de kans op open staan. Voor schutsluizen en in- en uitwateringssluizen kan hiermee winst te behalen zijn.
- ad 2. De kans dat het reguliere sluitproces faalt, kan in de toets op maat nader worden beschouwd door het opstellen van een foutenboomanalyse. Afhankelijk van het maatgevende proces voor de faalkans (alarmering, mobilisatie, bediening en technisch falen) en het in toetslaag 2a geconstateerde veiligheidstekort kan een dergelijke analyse enigszins beperkt worden opgesteld. Aanbevolen wordt echter om bij het uitvoeren van een foutenboomanalyse, dit zo volledig mogelijk te doen, opdat alle processen met gelijke middelen worden gewogen. Bij het uitvoeren van een foutenboomanalyse dient ook de hiervoor bedoelde software (bv Fault Tree) te worden gebruikt.
Belangrijk voor het uitvoeren van een goede foutenboomanalyse is dat de dagelijkse praktijk hierin wordt verwerkt. Gewaakt moet worden voor een sec theoretische analyse, omdat dit niet altijd recht doet aan de praktijk.
- ad 3. Het herstellen van een gefaalde reguliere hoogwatersluiting is in sommige gevallen nog mogelijk. Belangrijke randvoorwaarde hiervoor is dat al op voorhand nagedacht is over mogelijke faalwijzen en de maatregelen die hiervoor kunnen worden getroffen. Ook hier geldt dat informatie uit het veld van groot belang kan zijn.

11.3.2 Nadere bepaling komberging

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 het open staan van een kunstwerk.
- 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 pas sprake van falen bij dusdanig veel instroming door 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 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.

11.3.3 Kwantificering van de aanwezige reststerkte

Alleen bij het deelfaalmechanisme bezwijken bodembescherming is sprake van reststerkte.

Indien de faalkans voor *betrouwbaarheid sluiting* 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 de schematiseringshandleiding [DLT-shbs 2015].

Literatuur

[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-shbs 2015]

WTI 2017 Cluster Toetsregels Kunstwerken - Schematiseringshandleiding faalmechanisme niet sluiten, Deltares, kenmerk 1220087-002-GEO-0002, Versie D1, 14 december 2015, definitief;

[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;

[HKV-Wzzw 2014]

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

[MVW-vtv 2004]

De veiligheid van de primaire waterkeringen in Nederland, Voorschrift Toetsen op Veiligheid voor de tweede toetsronden 2001-2006 (VTV). Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2004;

[MVW –vtv 2006]

Voorschrift Toetsen op Veiligheid Primaire Waterkeringen. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, ISBN 978 90 369 5762 5, september 2007;

[MVW-vtvT 2011]

Voorschrift Toetsen op Veiligheid Primaire Waterkeringen, Technisch deel (concept). Ministerie van Verkeer en Waterstaat, juli 2012;

[NEN-3651 2012]

Aanvullende eisen voor buisleidingen in of nabij belangrijke waterstaatswerken. NEN, ICS-code 23.040.10 93.010, Delft;

[Nortier-tvm 1996]

Toegepaste vloeistofmechanica, hydraulica voor waterbouwkundigen. Nortier, ISBN 90-401-0318-6, 1996;

[RIKZ-TJO 1994]

Tienjarig overzicht 1981 – 1990, presentatie van afvoeren, waterstanden, watertemperaturen, golven en kustmetingen. Rijksinstituut voor Kust en Zee (RWS), ISBN 90-369-0064-6, 1994;

[RIZA-HR2006 2007]

Hydraulische Randvoorwaarden primaire waterkering voor de derde toetsronde 2006-2011. Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RWS), ISBN 978-90-369-7561-8, augustus 2007;

[RWS-OS 2000]

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

[TAW-bWKBC 1997]

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

[TAW-GW 1998]

Grondslagen voor waterkeren. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, ISBN 90-369-3735-3, januari 1998;

[TAW-LK 2003]

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

[TUD-vmB70 1990]

Collegehandleiding b70 – VLOEISTOFMECHANICA. Prof. dr. ir. J.A. Battjes, b70 uitgave januari 1990, 203010, Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, Vakgroep Waterbouwkunde;

[VNK-mech 2007]

Kunstwerken in PC-Ring, Mechanismebeschrijvingen. Fugro, opdrachtnummer 1206-0076-000, versie 2, 4 mei 2007;

[VNK-pcr 2008]

Theoriehandleiding PC-RING - Deel A: Mechanismebeschrijvingen. TNO, 2008-D-Rxxxx/A, project 034.67208, versie 5.0, 29 februari 2008;

[WTI-plan 2014]

Programmaplan Wettelijk toetsinstrumentarium 2017 (versie 2) - Onderzoek en ontwikkeling landelijk toetsinstrumentarium. Programmteam WTI 2017, concept versie 0.1, 21 maart 2014;

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 kombergend 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

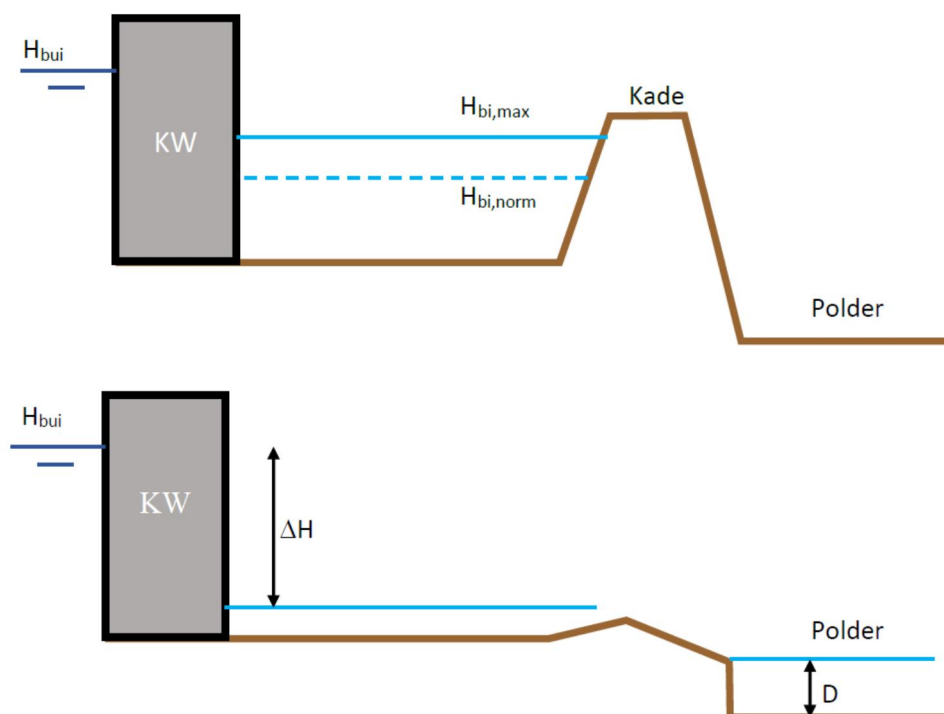
of overlopen, waarna (een deel van) het watersysteem leeg loopt in het achterliggende gebied. Hierbij moet het in principe gaan om een zodanig watervolume dat dit leidt tot een schade van minimaal 10 miljoen euro en/of ten minste 1 slachtoffer. Ook hierbij kan de praktische maat van 0,30 m water op straat 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 11-1 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.