



RWS INFORMATIE

Schematiseringshandleiding betrouwbaarheid sluiting kunstwerk

WBI 2017

Datum	28 mei 2021
Status	Definitief

Colofon

Uitgegeven door	Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
Informatie	Helpdesk Water, www.helpdeskwater.nl
Contact	helpdeskwater@rws.nl
Uitgevoerd door	Rijkswaterstaat, Water Verkeer en Leefomgeving
Datum	28 mei 2021
Status	Definitief
Versienummer	3.1

Inhoud

Wijzigingen versies schematiseringshandleiding 9

1.	Schematiseringshandleidingen en WBI 11
1.1	Schematiseringshandleidingen en WBI generiek 11
1.2	Uitgangspunten voor het toetsspoor betrouwbaarheid sluiting kunstwerk 14
1.3	Opbouw 15
2.	Stappenschema 17
2.1	Eenvoudige toets 18
2.1.1	Toetsschema en beslisregels 18
2.1.2	Onderbouwing eenvoudige beslisregels 20
2.2	Gedetailleerde toets probabilistisch per vak 21
2.3	Toets op maat 25
2.3.1	Aanscherpen faalkans 25
2.3.2	Aanscherping faalkanseis 26
3.	Belastinggevallen en hydraulische belasting 29
3.1	Dominante hydraulische belasting 29
3.2	Hydraulische belastingen 29
3.3	Belastinggevallen 30
4.	Inventarisatie beschikbare gegevens 31
4.1	Gebruiksgegevens 31
4.2	Sluitingsprotocollen 31
4.3	Geometrie kunstwerk 31
4.4	Gegevens bodembescherming 32
4.5	Gegevens komberging 33
4.6	Gegevens veldbezoek 34
4.7	Gegevens inspectie, beheer en onderhoud 35
5.	Vakindeling 36
6.	Schematisering 37
6.1	Schematisering sluitproces (P_{open} en P_{ns}) 38
6.2	Schematisering faalkans van herstel van een falende sluiting ($P_{f;herstel}$) 39
6.3	Schematisering gevolgen na falen sluiting 39
6.3.1	Modelkeuze en gegevens instromend debiet 40
6.3.2	Keuze schematisering bodembescherming en/of kombergend vermogen 41
6.3.2.1	Kombergend vermogen is maatgevend 41
6.3.2.2	Sterkte bodembescherming is maatgevend 42
6.3.2.3	Maatgevend deelfaalmechanisme is op voorhand niet bekend 42
6.3.3	Schematisering bodembescherming 42
6.3.4	Schematisering komberging 43
6.4	Analyse van de uitkomsten 43
7.	Overzicht parameters per deelfaalmechanisme 46
7.1	Overzichtstabel parameters 46
7.2	Deelfaalmechanisme Z12: kans bezwijken kunstwerk als gevolg van erosie bodem 47
7.2.1	Faalkans gegeven erosie bodem 47
7.3	Deelfaalmechanisme Z21: overschrijden bergend vermogen 51

7.3.1	Modelfactor kombergend vermogen	52
7.3.2	Kombergend oppervlak	53
7.3.3	Toegestane peilverhoging komberging	55
7.3.4	Modelfactor instromend volume	57
7.3.5	Factor voor stormduur hoogwater	58
7.3.6	Stormduur	58
7.3.7	Instromend debiet door kunstwerk gegeven geopend kunstwerk	60
7.3.7.1	Oriëntatie	62
7.3.7.2	Breedte doorstroomopening	63
7.3.7.3	Modelfactor overloopdebiet volkomen overlaat	64
7.3.7.4	Modelfactor overslagdebiet	64
7.3.7.5	Kerende hoogte bij niet hoogwatergesloten zijn van kunstwerk	65
7.3.7.6	Modelfactor lange overlaat	66
7.3.7.7	Binnenwaterstand	66
7.3.7.8	Drempelhoogte	68
7.3.7.9	Afvoercoëfficiënt	69
7.3.7.10	Doorstroomoppervlak	69
7.4	Deelfaalmechanisme Z_{22} : falen bodembescherming achter constructie	70
7.4.1	Kritieke instromend debiet	71
7.4.2	Stroomvoerende breedte bodembescherming	77
7.5	Deelfaalmechanisme Z_{23} : falen sluitproces	79
7.5.1	Kans op open staan bij naderend hoogwater	79
7.5.2	Kans mislukken sluiting	87
7.5.3	Aantal identieke doorstroomopeningen	90
7.6	Deelfaalmechanisme Z_{24} : falen van herstel van het sluitproces	91
7.6.1	Faalkans herstel van gefaalde situatie	92
8.	Voorbeeld	97
8.1	Coupure in bovenrivierengebied	97
8.1.1	Schematisering sluitproces	97
8.1.2	Schematisering kans op open staan	97
8.1.3	Schematisering faalkans van herstel	97
8.1.4	Schematisering gevolgen	98
8.1.5	Analyse	99
A	Literatuur	101
B	Begrippen-, afkortingen en symbolen	103
C	Parameterlijst uitgebreid	104
D	Afleiding formulepark voor kans op falen door niet sluiten	105
E	Definitie falen komberging	109
F	Falen bij hoogfrequente waterstanden	113
G	Schema werkwijze beoordeling betrouwbaarheid sluiting kunstwerk	116
G.1	Toelichting op het schema werkwijze beoordeling	116
G.2	Schema werkwijze beoordeling Betrouwbaarheid sluiting kunstwerk (BSKW)	117
G.3	Referenties bij het schema werkwijze beoordeling Betrouwbaarheid sluiting kunstwerk (BSKW)	117

H Analyse buiten Riskeer: afhankelijkheid van falen sluiten van meerdere
doorstroomopeningen 119

Wijzigingen versies schematiseringshandleiding

In voorliggende schematiseringshandleiding zijn in de afgelopen jaren meerdere wijzigingen doorgevoerd. In dit hoofdstuk worden de wijzigingen per versie weergegeven.

De wijzigingen komen voort uit:

- Vragen door gebruikers gesteld aan de helpdesk, welke hebben gezorgd voor verduidelijkingen en aanvullende toelichtingen in de schematiseringshandleiding.
- Voortschrijdend inzicht als gevolg van ervaringen welke zijn opgedaan met de beoordeling van *betrouwbaarheid sluiting*.
- Wijzigingen in het rekeninstrumentarium Ringtoets en/of Riskeer.

De eerste versie (1.0) van de schematiseringshandleiding geldt als basis voor opvolgende versies. Deze eerste versie dateert van 2 januari 2017 en is in de basis gestoeld op het *Toetsspoorrapport Betrouwbaarheid Sluiting* [16] en de daaronder liggende achtergrondrapporten. Zowel het Toetsspoorrapport als de achtergrondrapporten hebben na 2017 geen update gehad en zijn op aanvraag beschikbaar. Dat betekent dat deze rapporten op een aantal punten niet één op één meer passen op de voorliggende schematiseringshandleiding. De basisprincipes zijn echter niet gewijzigd. De genoemde documenten geven dus nog steeds veel inzicht in de werkwijze met betrekking tot *betrouwbaarheid sluiting*. In geval van tegenstrijdigheden prevaleert deze schematiseringshandleiding.

Wijzigingen van versie 2.0 (2019) naar versie 3.0 (2021)

Versie 3.0 dateert van 1 mei 2021 en bevat meerdere aanpassingen ten opzichte van versie 2.0. Hieronder is een overzicht gegeven van de wijzigingen. Hierbij worden naast inhoudelijke aanpassingen alleen algemene tekstuele aanpassingen vermeld.

Nr.	Wijziging	Waar
3.a	Indien het aantal doorstroomopening (n) groter is dan één en er een bepaalde mate van afhankelijkheid van falen tussen doorstroomopening is, wordt aanbevolen om een analyse buiten Ringtoets/Riskeer uit te voeren. Een toelichting en voorbeeld hiervoor is opgenomen in bijlage Fout! Verwijzingsbron niet gevonden..	H 7, Bijlage Fout! Verwijzing sbron niet gevonden.
3.b	In een toets op maat is de mogelijkheid gegeven om naast aanscherping van de faalkans ook de faalkanseis aan te scherpen indien de berekende faalkansen voor betrouwbaarheid sluiting van de andere kunstwerken klein genoeg zijn om dit mogelijk te maken. Hiertoe moeten alle kunstwerken in het dijktraject zijn geanalyseerd op betrouwbaarheid sluiting. De wijziging is in het voorliggend document opgenomen door paragraaf 2.3 'Toets op maat' op te splitsen in de sub paragrafen 2.3.1 'Aanscherpen faalkans' en 2.3.2 'Aanscherping faalkanseis'. In de eerste paragraaf staat de oorspronkelijke tekst uit versie 2.0 van de schematiseringshandleiding. In de tweede paragraaf is de aanscherping van de faalkanseis toegevoegd.	§ 2.3
3.c	In een nieuwe bijlage F wordt ingegaan op de berekening van de faalkans voor <i>betrouwbaarheid sluiting</i> op het moment dat de kritieke buitenwaterstand waarbij overstromingsgevolgen optreden (bezijken bodembescherming dan wel tekort aan komberging) frequent voorkomt (meer dan eens per 10 jaar). Tevens is aangegeven hoe de faalkans kan worden bepaald bij getijde-gedomineerde watersystemen waarbij de kritieke waterstand meerdere getijdeperioden per jaar wordt overschreden. Een verwijzing naar de bijlage is opgenomen in de paragrafen 7.3 en 7.4	Bijlage F

Nr.	Wijziging	Waar
3.d	Omdat het programma Ringtoets niet verder ontwikkeld wordt en er in de toekomst alleen gebruik gemaakt wordt van het programma Riskeer (voor zowel beoordelen als ontwerpen) is de term Ringtoets, daar waar van toepassing, vervangen door de term Riskeer.	Gehele document
3.e	De benaming van de parameters is in hoofdstuk 7 en bijlage C gelijk getrokken met de benaming zoals toegepast in Riskeer. Bijvoorbeeld de benaming van de parameter P_{ns} was in versie 2.0 van de schematiseringshandleiding gelijk aan 'Faalkans sluiting geopend kunstwerk' en is in voorliggende versie 3.0 in overeenstemming met Riskeer aangepast naar 'Kans mislukken sluiting'.	Hoofdstuk 7 en Bijlage C

Wijzigingen van versie 1.0 (2017) naar versie 2.0 (2019)

Versie 2.0 dateert van 28 november 2019 en bevat meerdere aanpassingen ten opzichte van versie 1.0. Hieronder is een overzicht gegeven van de wijzigingen. Hierbij worden naast inhoudelijke aanpassingen alleen algemene tekstuele aanpassingen worden vermeld.

Nr.	Wijziging	Waar
2.a	Eenvoudige toets: In verband met het aanscherpen van bestaande eenvoudige beslisregels en het toevoegen van een paar nieuwe beslisregels is §2.1 uitgebreid met het toetsschema van de eenvoudige toets, alle eenvoudige beslisregels en de onderbouwing hiervan in § 2.1.1 respectievelijk §2.1.2. De wijzigingen in de eenvoudige beslisregels en de nieuwe beslisregels zijn middels onderstreping aangegeven.	§ 2.1
2.b	In Ringtoets zijn bij het instroommodel 'lage drempel' de modelfactoren m_{onv} (modelfactor onvolkomen stroming, formule 7-6 in §7.3.7) en m_{ol} (modelfactor volkomen stroming, formule 7-7 in §7.3.7) vervangen door m_{vl} (modelfactor voor lange overlaten). Deze nieuwe parameter is in §7.3.7.6 uitgewerkt en vervangt daarmee de oorspronkelijke tekst van deze paragraaf over m_{onv} . Met deze wijziging is een discontinuïteit in het instroommodel 'lage drempel' opgelost, wat de nauwkeurigheid van de uitkomsten en de rekensnelheid van Ringtoets ten goede komt.	§7.3.7
2.c	Ten behoeve van nadere duiding en eventueel op te stellen analyses op maat is in bijlage D de afleiding van het formulepark van falen door niet sluiten opgenomen. De uitgangspunten die ten grondslag liggen aan de formules worden hierin ook vermeld.	Bijlage D
2.d	Voor het deelmechanisme komberging is aangesloten op de pragmatische benadering van significante gevolgen uit de Grondslagen.	Bijlage E
2.e	In de vernieuwde versie van de schematiseringshandleiding is daarnaast aandacht besteed is aan: - Tekstuele verduidelijkingen van verschillende termen, zoals het correcte gebruik van de termen 'toetsen' en 'beoordelen' - Het zoveel mogelijk vervangen of duiden van de termen 'voldoet'/'voldoet niet'. - Er is een link gelegd tussen symbolen in de schematiseringshandleiding, omschrijving in Ringtoets en de ID in het .csv bestand van de kunstwerken zoals gebruikt in Ringtoets. Dit is weergegeven in een tabel in een nieuwe bijlage C, waarbij de tabel 7-1 in §7.1 als basis dient. De oorspronkelijk bijlage C (Definitie falen komberging) is nu genummerd als bijlage E.	Hele document Bijlage C

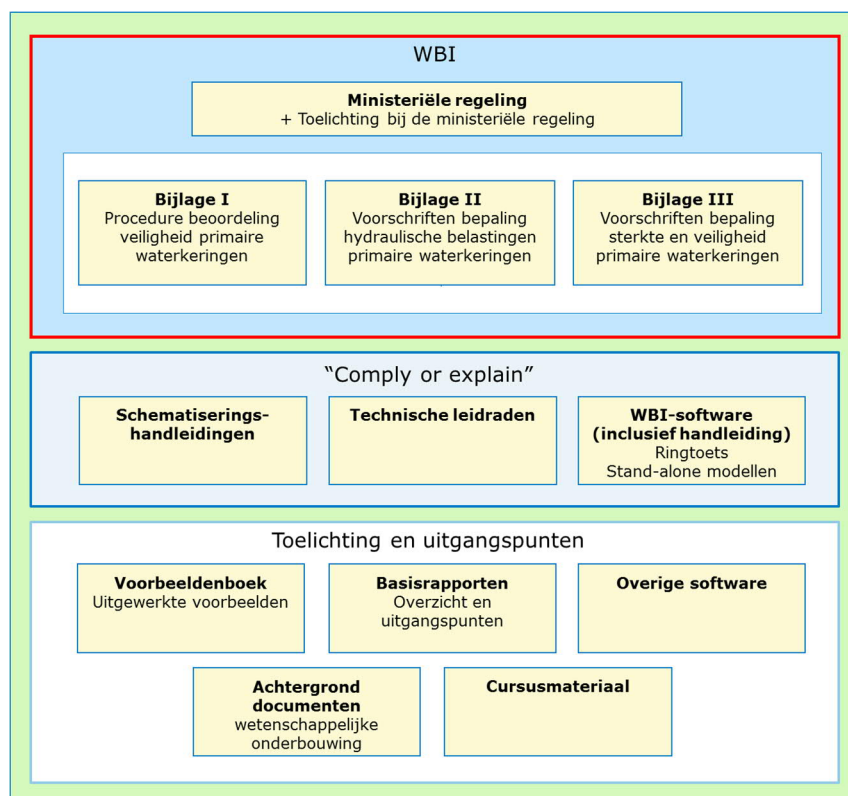
1. Schematiseringshandleidingen en WBI

1.1 Schematiseringshandleidingen en WBI generiek

Deze schematiseringshandleiding is opgesteld in het kader van het Wettelijk Beoordelings-instrumentarium (hierna: WBI 2017 of WBI). Het WBI voor de beoordelingsronde 2017-2023 bestaat uit de ministeriële regeling en 3 bijlagen. Die drie bijlagen zullen verder worden aangeduid als:

- *WBI 2017 Bijlage I Procedure.*
- *WBI 2017 Bijlage II Hydraulische belastingen.*
- *WBI 2017 Bijlage III Sterkte en veiligheid.*

Het WBI bevat de voorschriften voor het uitvoeren van de beoordeling. In deze voorschriften wordt verwezen naar een aantal documenten en applicaties die de beheerder ondersteunen bij het uitvoeren van de beoordeling, waaronder de schematiseringshandleidingen en de WBI software. Een overzicht van de structuur van het WBI en de daaraan gerelateerde documenten staat in Figuur 1-1. Binnen het rode kader de formele WBI documenten, daarbuiten de ondersteunende documenten en applicaties.



Figuur 1-1 Het WBI 2017 en daaraan gerelateerde documenten

BOI software

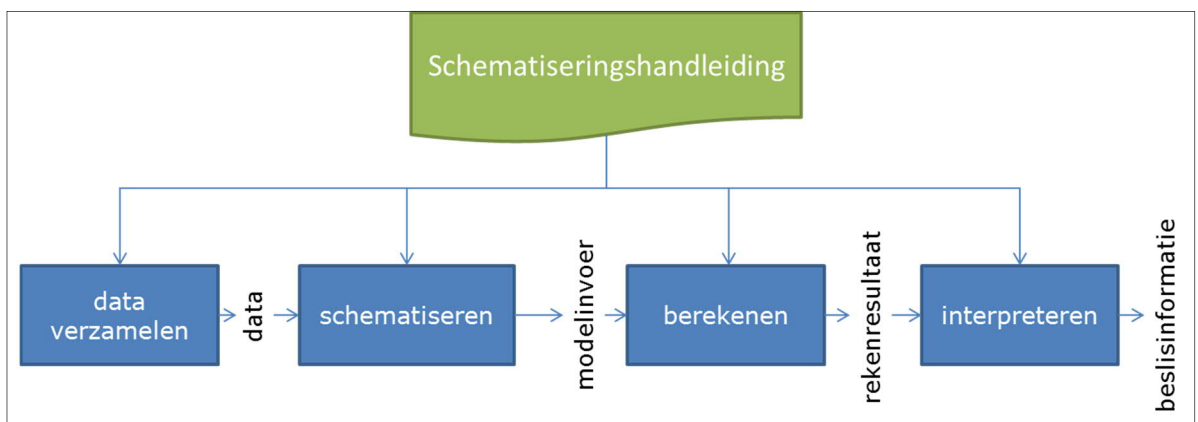
Er zijn meerdere 'WBI applicaties'. Riskeer is feitelijk het 'beoordelings- en ontwerpplatform' en staat daarom ook wel bekend als dé BOI software. De andere applicaties, waaronder de diverse Basismodules (zoals BM Gras Buitentalud, BM Asfalt en Steentoets) en D-Soilmodel maken echter ook nadrukkelijk deel uit van de BOI software-familie.

Ringtoets of Riskeer?

Ringtoets en Riskeer zijn beide applicaties waarbinnen voor een aantal toetssporen de berekeningen en analyses kunnen worden uitgevoerd en de resultaten geassembleerd tot op het niveau van een oordeel per traject. Ringtoets versie 18.1.1 blijft de versie die primair bedoeld is voor de eenvoudige en de gedetailleerde toetsingen. Vanaf november 2019 is ook Riskeer beschikbaar, een doorontwikkelde versie van Ringtoets. Er is bewust gekozen voor de naamswijziging om het verschil tussen de applicatie t.b.v. de beoordeling (eenvoudig, gedetailleerd conform de regeling) te scheiden van de applicatie die ook kan worden ingezet voor enkele specifieke Toetsen op Maat en verificatie van overstromingskansen bij het ontwerp. In Riskeer 19.1.1 zijn namelijk nieuwe functionaliteiten beschikbaar en is ook nieuwe kennis toegepast. Wanneer overigens in Riskeer 19.1.1 met dezelfde instellingen wordt gerekend als in Ringtoets 18.1.1 leidt dat tot hetzelfde resultaat. Daar waar in deze schematiseringshandleiding over 'Riskeer' wordt gesproken, kan over het algemeen ook 'Ringtoets' worden gelezen.

Doel van de schematiseringshandleiding

Het uitvoeren van een toets (eenvoudige toets, gedetailleerde toets per vak of toets op maat) voor het beoordelen van primaire waterkeringen bestaat op hoofdlijnen uit vier activiteiten, zie Figuur 1-2. In een schematiseringshandleiding wordt, gegeven een rekenmethode of model, de samenhang aangegeven tussen deze vier activiteiten: welke data benodigd is, hoe moet worden geschematiseerd, welke software hiervoor beschikbaar is en in sommige gevallen hoe de resultaten kunnen worden geïnterpreteerd.



Figuur 1-2 Activiteiten verbonden met een toets

De activiteit schematiseren wordt hier gedefinieerd als het vertalen van de gegevens over de waterkering naar invoer voor de methode (meestal een rekenmodel al dan niet in software) waarmee de toets wordt uitgevoerd. De gegevens kunnen meetgegevens zijn uit het veld of het laboratorium, ontwerp- of revisietekeningen zijn, maar kunnen ook kennis en ervaring betreffen. Bij het schematiseren speelt de beschikbare hoeveelheid gegevens en de kwaliteit ervan een grote rol. Bij weinig gegevens is de schematisering grof of globaal en met een grote onzekerheid. Naarmate er meer en betere gegevens beschikbaar zijn, wordt de schematisering fijner en preciezer, wat zal leiden tot een betere inschatting van de overstromingskans. Vanzelfsprekend zit hier een optimum in, dat van geval tot geval verschilt. Meer gegevens is dus niet per definitie beter.

Faalmechanismen zijn vertaald in modellen. De meer complexe modellen zijn vervolgens weer in software gevat, omdat de berekeningen nu eenmaal niet meer op de achterkant van de sigarendoos kunnen worden gemaakt. Bij softwareontwikkeling worden keuzes gemaakt voor de

(vrijheid van) invoer. Soms zijn modelparameters hard geprogrammeerd, in andere gevallen is het invoer gebruiker. De beschikbare software bepaalt dus in belangrijke mate de benodigde invoer. In algemene zin kunnen we wel stellen dat een schematisering bij een model óf applicatie hoort en niet bij een faalmechanisme. De faalmechanismen zijn beschreven in de [fenomenologische beschrijving WBI](#)¹. De beschikbare modellen en (bijbehorende) applicaties beschrijven soms maar een deel van het hierin beschreven faalspoor. In een aantal gevallen zijn er meerdere modellen beschikbaar en is het aan de gebruiker een keuze te maken.

Het doorlopen van de vier activiteiten uit Figuur 1-2 is in veel gevallen een iteratief proces. Zeker als ervoor wordt gekozen om te starten met een grove schematisering. In de vierde activiteit wordt bekeken of door het inwinnen van extra gegevens en/of het verfijnen van de schematisering, het resultaat van de derde activiteiten kan worden aangescherpt. Het is uiteraard ook mogelijk om meteen te kiezen voor een gedetailleerde schematisering.

De schematiseringshandleiding geeft aanwijzingen voor het type en de benodigde hoeveelheid aan onderzoek om tot een goede schematisering te kunnen komen. Verder ondersteunt de schematiseringshandleiding gebruikers in het omzetten van (veld)gegevens naar de juiste rekenparameters en goede schematiseringen die in de toets kan worden toegepast. De wijze waarop gegevens ingewonnen moeten worden (bijvoorbeeld hoe veldonderzoek of laboratoriumonderzoek uitgevoerd wordt) wordt slechts summier behandeld.

De schematiseringshandleiding is geen wet. Het is een handleiding die de gebruiker er niet van ontslaat zelf na te denken. Als de lokale situatie aanleiding geeft om af te wijken van wat in de Schematiseringshandleiding staat beschreven, is dat zelfs aan te raden.

Veel van wat in deze schematiseringshandleiding staat beschreven is ook toepasbaar bij het ontwerp van (primaire) waterkeringen, of bijvoorbeeld bij het toetsen van regionale keringen. Op een aantal plekken zijn ook specifiek ten aanzien van ontwerpen handvatten gegeven. De lezer moet zich echter nadrukkelijk realiseren dat deze schematiseringshandleiding is geschreven voor de beoordeling van primaire waterkeringen.

Uitgangspunten

Voor alle schematiseringshandleidingen gelden de volgende uitgangspunten:

- Voor de gegevens die in het rekenmodel voor het toetsspoor worden ingevoerd wordt een format voorgeschreven. Een rekenmodel kent immers toepassingsgrenzen. Het format sluit aan bij de Aquo standaard. Verdere informatie hierover is te vinden in de Handleiding datamanagement² WBI [9].
- Deze schematiseringshandleiding *ondersteunt* gebruikers in het omzetten van (veld)gegevens naar de juiste rekenparameters en goede schematiseringen die in de beoordelingsmethoden kunnen worden toegepast.
- Deze schematiseringshandleiding geeft tevens *aanwijzingen* voor de waarden die voor parameters aangehouden kunnen worden. In de Handleiding Datamanagement WBI [9] (paragraaf 4.1) zijn vier typen waarden benoemd, die ook in deze schematiseringshandleiding worden gehanteerd:

¹ <https://www.helpdeskwater.nl/algemene-onderdelen/structuur-pagina/zoeken-site/@192499/fenomenologische/>

² <https://www.helpdeskwater.nl/algemene-onderdelen/structuur-pagina/zoeken-site/@205764/handleiding/>

Tabel 1-1 Indeling bij duiding van de parameterwaarden

Groep	Benaming	Toelichting
1	Vaste waarde	Parameterwaarden mogen door de gebruiker niet worden gewijzigd (voor de beoordeling)
2	Defaultwaarde of aanbevolen waarde	Parameterwaarden mogen door de gebruiker wel worden gewijzigd.
3	Startwaarde	Parameterwaarden worden bij voorkeur door lokale waarden vervangen
4	Vrije waarde	Geen gegeven parameterwaarden. De gebruiker moet de regionale of lokale waarden bepalen of op ervaring inschatten.

Doelgroep

De schematiseringshandleiding is geschreven voor een deskundig gebruiker die bekend is met de voorschriften en de (deel)faalmechanismen en modellen die van toepassing zijn voor deze schematiseringshandleiding.

1.2

Uitgangspunten voor het toetsspoor betrouwbaarheid sluiting kunstwerk

In deze *Schematiseringshandleiding betrouwbaarheid sluiting kunstwerk* zijn de volgende uitgangspunten van toepassing:

- Deze schematiseringshandleiding heeft betrekking op zogenaamde puntconstructies zoals sluizen, gemalen, coupures en dergelijke. Het heeft geen betrekking op demontabele keringen³. Hiervoor wordt verwezen naar Toets op maat demontabele keringen [10].
- In dit document wordt onder ander gesproken over de sterkte van bodembeschermingen. Onder deze term vallen ook aansluit- en overgangsconstructies van bodembeschermingen. Alhoewel hiervoor geen specifieke sterktemodellen voor handen zijn, dienen deze constructies voor zover dit mogelijk is kwalitatief te worden meegenomen in de beschouwingen. Dit betekent dat bij indicaties van slechte aansluitingen (bijvoorbeeld gebleken bij inspecties) de rekenwaarde van de sterkte van de bodembescherming gereduceerd moet worden.
- In tegenstelling tot andere toetssporen binnen het WBI wordt bij *betrouwbaarheid sluiting* gekeken naar het gehele jaar. Dat komt omdat ook bij dagelijkse waterstanden het niet sluiten van een kunstwerk kan leiden tot het falen van de kering. Tevens wordt hiermee voorkomen dat kunstwerken die in het winterhalfjaar gesloten zijn, niet beoordeeld hoeven te worden. Ook bij deze kunstwerken kan het niet op tijd gesloten zijn in een zomerperiode en het optreden van een hoge waterstand leiden tot grote gevolgen. Omdat de hydraulische databases in het WBI uitgaan van een winterhalfjaar is het bij de beoordeling van de laatste categorie kunstwerken (alleen geopend in zomer) eventueel nodig om een correctie hiervoor mee te nemen in de modellering (voor voorbeeld zie voorbeeld 2 op blz. 82).
- Voor dit toetsspoor kan niet genoeg benadrukt worden dat de exacte werking en toepassing van het kunstwerk bekend moet zijn. Niet alleen bij de mensen die het kunstwerk daadwerkelijk bedienen, maar ook bij de personen die de beoordeling uitvoeren.
- In de Waterwet is de overstromingskans gedefinieerd als *de kans op verlies van waterkerend vermogen van een dijktraject waardoor het door het dijktraject beschermde*

³ 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 waterkeringtracé

gebied zodanig overstroomt dat dit leidt tot dodelijke slachtoffers of substantiële economische schade. In de wetstekst is het aantal dodelijke slachtoffers en de schade die als 'substantieel' wordt beschouwd echter niet nader uitgewerkt. Dit is voor het toetsspoor *betrouwbaarheid sluiting kunstwerk* echter wel van belang, specifiek voor het deelfaalmechanisme *onvoldoende bergend vermogen*. Binnen het WBI is dit daarom nader uitgewerkt volgens Bijlage E.

1.3 Opbouw

De opbouw van deze handleiding is als volgt:

Onderwerp	Locatie
Stappenschema	Hoofdstuk 2
Belastinggevallen	Hoofdstuk 3
Inventarisatie gegevens	Hoofdstuk 4
Vakindeling	Hoofdstuk 5
Schematisering per kunstwerk	Hoofdstuk 6
Parameters	Hoofdstuk 7
Voorbeeld	Hoofdstuk 8

Het *stappenschema* in hoofdstuk 2 vormt de basis van de schematiseringshandleiding. Dit stappenschema geeft een overzicht van de te volgen stappen voor het schematiseren. Voor veel stappen wordt een verwijzing gegeven naar een paragraaf of hoofdstuk van deze schematiseringshandleiding waarin de betreffende stap verder wordt uitgewerkt. Het hoofdstuk 2 kan dus als leeswijzer of leidraad voor het toepassen van dit rapport worden gebruikt.

Hoofdstuk 5 is voor waterkerende kunstwerken niet van toepassing; ieder kunstwerk wordt (binnen Riskeer) als apart vak gedefinieerd.

Voor een omschrijving van begrippen wordt verwezen naar de begrippenlijst die is opgenomen als Appendix B van *WBI 2017 Bijlage I Procedure*.

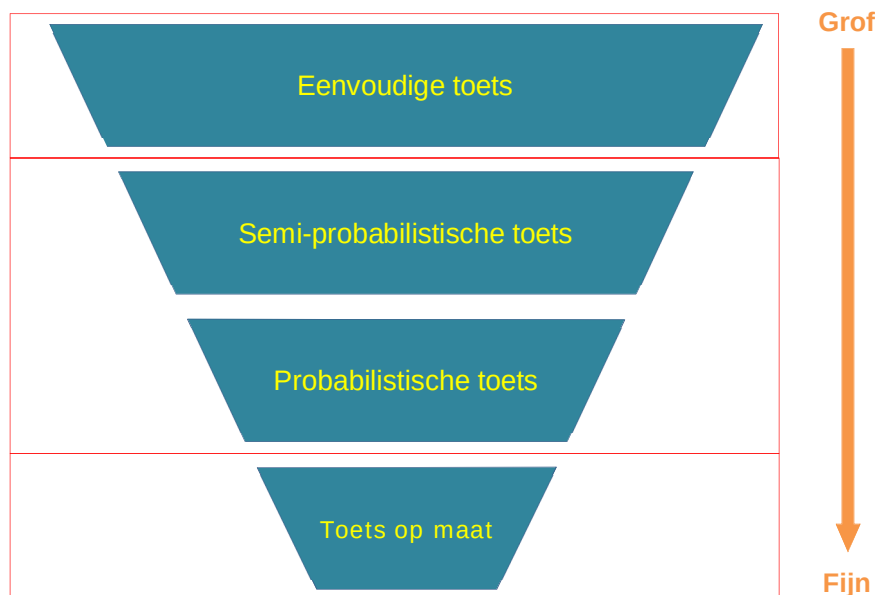
2. Stappenschema

Dit hoofdstuk geeft een weergave van het stappenplan/proces/stroomschema dat moet worden doorlopen om tot een schematisering te komen. Per stap is een verwijzing opgenomen naar de bijbehorende paragraaf waar uiteengezet wordt hoe dit geschematiseerd moet worden.

Uitgangspunt voor het toetsproces is dat van grof naar fijn wordt gewerkt. Onzekerheden worden steeds nauwkeuriger meegenomen waardoor een steeds scherper beeld van het overstromingskans wordt verkregen.

De toetsprocedure zoals voorgeschreven in *WBI 2017 Bijlage I Procedure* voorziet bij het verschijnen van het WBI 2017 in drie toetsniveaus:

1. *Eenvoudige toets*
2. *Gedetailleerde toets* (semi-probabilistisch of probabilistisch) per vak
3. *Toets op maat*



Figuur 2-1 De diverse toetsen in de toetsprocedure

Globaal genomen vergt elke volgende toets een grotere inspanning, maar dit is niet altijd het geval. Gegevens voor de ene toets kunnen ook input zijn voor de volgende toets. Ze worden dan bijvoorbeeld alleen gebruikt voor een ander model.

De toetsschema's voor de *eenvoudige* en de *gedetailleerde toets* zijn gegeven in *WBI 2017 Bijlage III Sterkte en veiligheid*. Deze schema's zijn echter niet geheel correct gebleken. De correcte schema's worden daarom in dit hoofdstuk gepresenteerd. Aanbevolen wordt de schema's uit deze schematiseringshandleiding te gebruiken. Deze verbetering moet worden gezien als een toets op maat.

In de volgende paragrafen zijn de *eenvoudige toets*, de *gedetailleerde toets* en de *toets op maat* globaal beschreven.

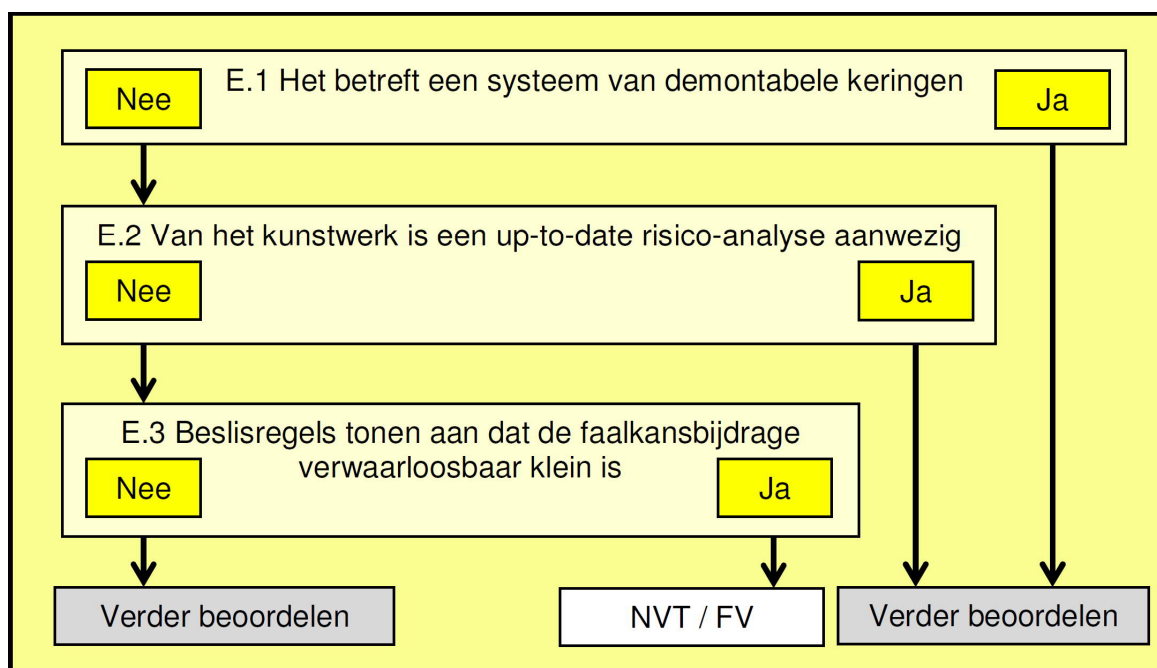
2.1 Eenvoudige toets

In de *eenvoudige toets* wordt met eenvoudige beslisregels gecontroleerd of de kans op falen voor het faalmechanisme *niet sluiten* bij kunstwerken voldoende klein is. Indien dit het geval is, dan hoeft geen verdere beoordeling uitgevoerd te worden en kan de score NVT/FV⁴ worden toegekend. Indien dit niet het geval is, wordt het toetsproces vervolgd als beschreven in *WBI 2017 Bijlage I Procedure*.

2.1.1 Toetsschema en beslisregels

De toetsregels voor de *eenvoudige toets* zijn hieronder weergegeven. De beslisregels in stap E.3 bevatten wijzigingen en toevoegingen op de toetsregels voor de eenvoudige toets zoals beschreven in *WBI 2017 bijlage III Sterkte en Veiligheid*. Deze wijzigingen en toevoegingen zijn in de beslisregels onderstreept weergegeven. Toepassing van de aangepaste regels uit deze schematiseringshandleiding is te beschouwen als een Toets op maat.

Voor toepassing van dit toetsspoor zijn slechts enkele gegevens van het kunstwerk nodig. Een daadwerkelijke schematisering hoeft niet uitgevoerd te worden.



Figuur 2-2 Schema eenvoudige toets betrouwbaarheid sluiting (BSKW)

Stap E.1: Het betreft een systeem van demontabele waterkeringen.

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. Voorbeelden van keringen die hieronder vallen zijn de demontabele keringen in Limburg en Kampen. Wanneer 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 E.2.

⁴ Dit staat voor 'Niet van toepassing/Faalkans verwaarloosbaar'

Stap E.2: Van het kunstwerk is een up-to-date risicoanalyse aanwezig.

Als er een risicoanalyse van de actuele situatie aanwezig is, dan kan dit een efficiënte route zijn naar een oordeel; in de Toets op maat moet dan worden vastgesteld welke beoordelingscategorie op basis van deze risicoanalyse van toepassing is. Is er geen risicoanalyse aanwezig, dan wordt de toets voortgezet met Stap E.3.

Stap E.3: Beslisregels tonen aan dat de faalkansbijdrage verwaarloosbaar klein is.

Indien een kunstwerk in Stap E.3 aan een of meer van de volgende beslisregels voldoet, dan is de faalkans voor *betrouwbaarheid sluiting* van dit kunstwerk verwaarloosbaar klein (let op: de onderstreepte zinsneden wijken af van de beslisregels uit *Bijlage III Sterkte en veiligheid*):

- A. Gemaal: Het gemaal is van twee hoogwaterkerende keermiddelen voorzien die met het pompbedrijf zijn gekoppeld en onafhankelijk van elkaar functioneren. (Denk hierbij bijvoorbeeld aan aandrijving, aansturing, energievoorziening etc.).
- 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 invloedszone van de waterkering.
- D. Gemaal: Indien de persleiding(en) van het gemaal middels een kattenrug door de waterkering voeren en het peil van de b.o.b. van de persleiding(en) is op het hoogste punt hoger dan de buitenwaterstand die hoort bij de signaleringswaarde van de norm.
- E. Hevel: Het peil van de b.o.b. van de hevelleiding(en) ligt boven de buitenwaterstand behorende bij de signaleringswaarde van de norm en de leiding(en) is/zijn voorzien van minstens één keermiddel. Indien dit laatste niet het geval is dient er in ieder geval een protocol te zijn waarin staat dat tijdens hoogwater de hevel nagelopen dan wel bediend wordt (bv. vacuümverbreker controleren).
- F. 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 of de hoogte van het 'lage' keermiddel en de kolk voldoen aan de faalkanseis uit het toetsspoor Hoogte. Aanvullend geldt dat de schutsluis geen situaties kent waarbij deze helemaal geopend staat.

De schutdeuren mogen nooit allemaal open staan, dus ook niet om:

- a. Scheepvaart vrije doorvaart te geven als er geen verval is.
- b. Water in dan wel uit de polder te laten.

Indien gebruik wordt gemaakt van deze toetsregel, dient bij het sterkte en stabiliteitsspoor te worden aangetoond dat het tweede keermiddel voldoende sterk is.

- G. Uitwateringssluis: De uitwateringssluis of vrij verval rioolleiding/riooloverstortleidingen (duiker), 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 kan op grond van deze eenvoudige toets geen oordeel worden geveld.

2.1.2 Onderbouwing eenvoudige beslisregels

In deze paragraaf worden de eenvoudige beslisregels herhaald en worden de gedachten die hierbij ten grondslag liggen bijgevoegd.

Hieronder staan de eenvoudige beslisregels waarmee kan worden aangetoond of een object een verwaarloosbare bijdrage als gevolg van *betrouwbaarheid sluiting* aan het overstromingsrisico heeft. Cursief is hierbij de onderbouwing aangegeven.

- A. Gemaal: Het gemaal is van twee hoogwaterkerende keermiddelen voorzien die met het pompbedrijf zijn gekoppeld en onafhankelijk van elkaar functioneren (Denk hierbij bijvoorbeeld aan aandrijving, aansturing, energievoorziening etc.).
Een dergelijk gemaal is buiten bediende⁵ 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. Opgemerkt wordt dat in de praktijk het meestal niet mogelijk is 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 geen slachtoffers) en treedt er geen bres op in de waterkering. Handsommen tonen aan dat zelfs bij 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 de ene maalgang weer uit te slaan met behulp van een andere maalgang. Dit is onder meer afhankelijk van de opvoerhoogte van de pompen.
- D. Gemaal: Indien de persleiding(en) van het gemaal middels een kattenrug door de waterkering voeren en het peil van de b.o.b. van de persleiding(en) is op het hoogste punt hoger dan de buitenwaterstand die hoort bij de signaleringswaarde van de norm.
Indien de b.o.b. van de persleiding(en) hoger ligt dan waterstand behorend bij de signaleringswaarde van de norm vindt ongewenste instroming niet snel plaats. Er zijn daarnaast bij een gemaal nagenoeg altijd keermiddelen aanwezig en tevens zit ook nog de pomp in de watergang van binnen naar buiten. Hierdoor is de kans zeer klein dat een eventueel instromend debiet via de persleiding(en) van een gemaal bij de aanwezigheid van een kattenrug tot overstromingsgevolgen leidt.
- E. Hevel: Het peil van de b.o.b. van de hevelleiding(en) ligt boven de buitenwaterstand behorende bij de signaleringswaarde van de norm en de leiding(en) is/zijn voorzien van minstens één keermiddel. Indien dit laatste niet het geval is dient er in ieder geval een protocol te zijn waarin staat dat tijdens hoogwater de hevel nagelopen dan wel bediend wordt (bijvoorbeeld vacuümverbreker controleren).

⁵ Met bediende tijd wordt bedoeld, de tijd waarin het gemaal zijn waterbeheersingsfunctie vervult.

Om een hevel zijn primaire functie uit te laten voeren is een vacuüminstallatie benodigd en ook een mogelijkheid tot het verbreken van het vacuüm. Dat verbreken van het vacuüm vindt altijd plaats op een punt om en nabij het hoogste punt van de leiding. Het is daardoor vanuit bereikbaarheid dus altijd mogelijk om bij ongewenste instroming het vacuüm te verbreken. Omdat hevelleidingen niet altijd permanent bemand zijn kan een hevel bij hele hoge waterstanden wellicht ongemerkt gaan hevelen indien de vacuümverbreker niet open staat.

Hevelen kan ook optreden bij waterstanden net onder het b.o.b. als gevolg van drukstoten die door hoge golven worden veroorzaakt. Hierdoor kunnen waterstandsschommelingen in de leiding(en) voorkomen. Daarom wordt bij de afwezigheid van keermiddelen de eis gesteld dat er een protocol is waardoor er tijdens hoge waterstanden aandacht is voor de hevel.

- F. 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 of de hoogte van het 'lage' keermiddel en de kolk voldoen aan de faalkanseis uit het toetsspoor *Hoogte*. Aanvullend geldt dat de schutsluis geen situaties kent waarbij deze helemaal geopend staat.

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.

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

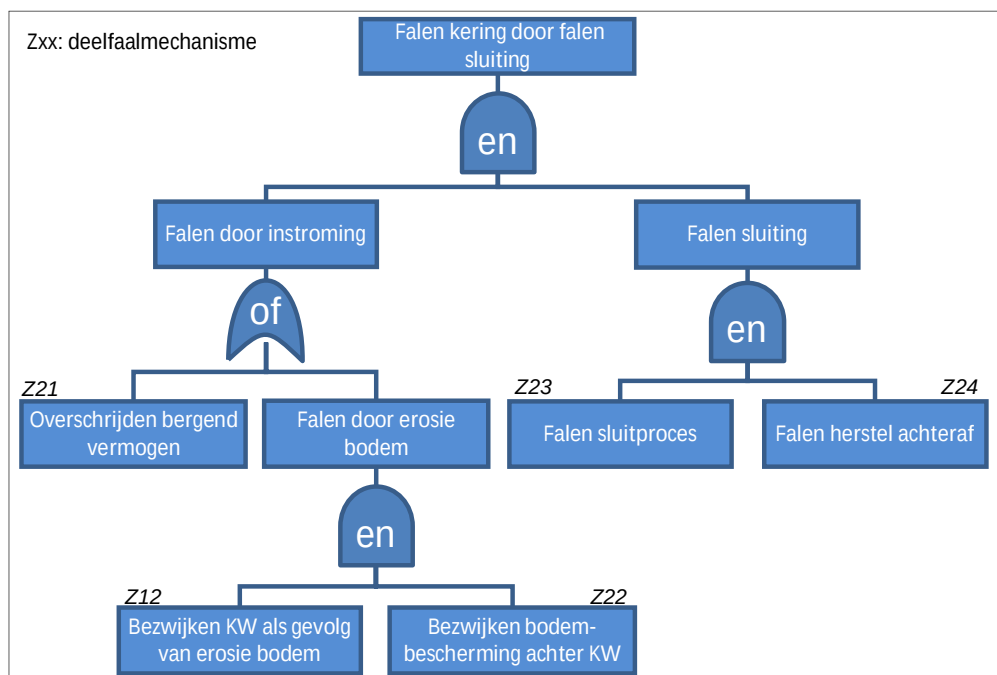
- G. Uitwateringssluis: De uitwateringssluis of vrij verval rioolleiding/riooloverstortleidingen (duiker), uitgerust met minimaal één hoogwaterkerend keermiddel komt binnendijks buiten de invloedszone van de waterkering uit in een inspectieput, waarvan de toegang minimaal op het niveau van het maaiveld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

Doordat de duikers uitkomen in een inspectieput is het ontstaan van ontgrondingen en daarmee het ontstaan van een bres met grote gevolgen uitgesloten.

2.2 Gedetailleerde toets probabilistisch per vak

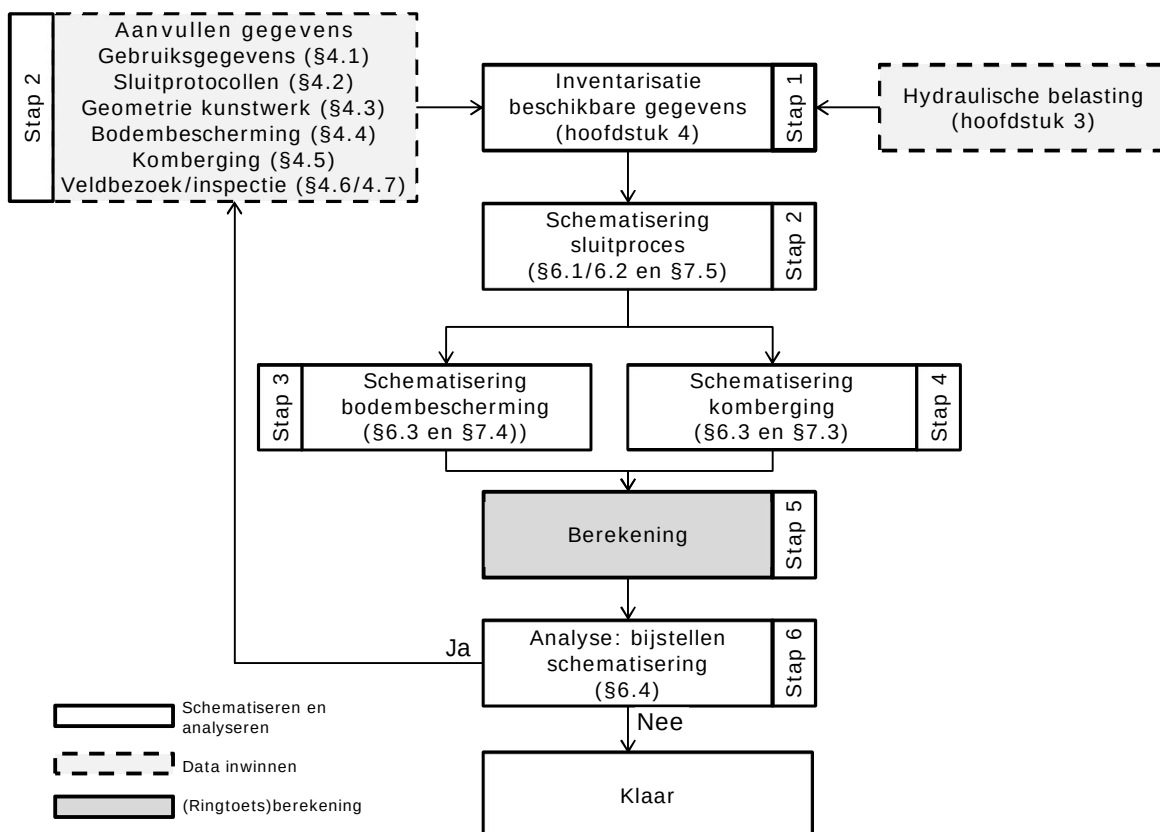
Bij de probabilistische *gedetailleerde toets* per vak wordt voor een kunstwerk een faalkans voor *niet sluiten* berekend. Deze wordt vergeleken met de faalkanseis voor dit toetsspoor.

Basis voor dit toetsspoor is onderstaande (Figuur 2-3) modellering van het toetsspoor in Riskeer.



Figuur 2-3 Modellering 'niet sluiten' in de gedetailleerde toets per vak

Deze modellering is verwerkt in onderstaand schema, waarin het stappenschema is weergegeven voor het uitvoeren van de *gedetailleerde toets*.



Figuur 2-4 Stappenschema gedetailleerde toets voor betrouwbaarheid sluiting kunstwerk

In het schema van Figuur 2-4 is weergegeven met welke stappen er gekomen kan worden van data naar beoordelingsresultaat. De diverse onderdelen van dit schema worden in komende hoofdstukken behandeld. Onderstaand zijn de verschillende stappen kort beschreven.

Stap 1. Inventarisatie van beschikbare gegevens (hoofdstukken 3 en 4).

Dit betreft zowel gegevens aangaande de sterkte van het kunstwerk als gegevens betreffende de belastingen op het kunstwerk met betrekking tot *niet sluiten*. Van groot belang zijn de gegevens over het dagelijks functioneren van het kunstwerk vanuit zijn primaire functie, zijnde niet waterkeren⁶. Samen met de protocollen voor sluiting in hoogwatersituaties dient dit altijd bekend te zijn. Indien deze gegevens niet voorhanden zijn, kan geen beoordeling worden uitgevoerd. Een omschrijving van het dagelijks gebruik moet dan ook altijd in de rapportage worden opgenomen. De protocollen voor hoogwatersluiting moeten actueel en direct opvraagbaar zijn. Om tot een goede schematisering van *niet sluiten* te komen, dienen er ook gegevens omtrent de bodembescherming, de komberging en de geometrie van het kunstwerk en zijn keermiddelen te worden verzameld. Middels een veldbezoek / inspectie wordt een beeld gekregen van de daadwerkelijke situatie. Het kan dan gaan om zaken als bereikbaarheid, conditie van de keermiddelen en een beeld van het achterland.

Stap 2. Schematisering sluitproces (paragraaf 6.1 en paragraaf 6.2)

Het sluitproces is het cruciale proces (deelfaalmechanisme) binnen het toetsspoor *betrouwbaarheid sluiting kunstwerk*. Voordat falen van het kunstwerk als gevolg van *niet sluiten* kan plaatsvinden, moet eerst de sluiting van het kunstwerk zijn gefaald. Pas daarna kan instroming plaatsvinden. Vandaar dat dit deelfaalmechanisme als eerste is genoemd. Als uit de configuratie van de keermiddelen blijkt dat de kans op niet sluiten bij een naderend hoogwater zeer klein is, kan overwogen worden om voor de overige deelfaalmechanismen van het faalmechanisme *niet sluiten* conservatieve waarden in te vullen. Dit omdat deze het absolute oordeel (kunstwerk scoort beoordelingscategorie II_v of hoger ten aanzien van *niet sluiten*) dan niet meer zullen beïnvloeden.

Bij het schematiseren van het sluitproces kan ook de faalkans van herstel bij een gefaalde reguliere sluiting worden meegenomen. Dit is afhankelijk van de situatie en configuratie van de hoogwaterkerende keermiddelen. Een eerste stap kan zijn om geen rekening te houden met een mogelijk herstel van een reguliere sluiting. Dit is een conservatieve benadering, maar indien hiermee wordt voldaan aan de eisen met betrekking tot *betrouwbaarheid sluiting* dan is een verdere beschouwing van een faalkans van herstel niet nodig. Indien niet wordt voldaan aan de eisen kan de impact van een mogelijk herstel van een gefaalde sluiting alsnog worden meegenomen.

Stap 3. Schematisering bodembescherming (paragraaf 6.3.3)

Indien het kunstwerk open blijft staan met als gevolg ongewenste instroming van water, kan worden gekeken naar de sterkte van de bodembescherming. Wanneer deze in staat is om de stroomsnelheden als gevolg van het instromende debiet te weerstaan, ontstaan er geen erosiekuilen en daarmee treedt ook geen instabiliteit als gevolg van niet sluiten op.

⁶ Kunstwerken in waterkeringen zijn bijna altijd aangelegd vanuit een andere functie dan waterkeren. Dit is de primaire functie. Als gevolg van deze primaire functie (de aanwezigheid van het kunstwerk in de waterkering), dient ook de functie van waterkeren vervuld te kunnen worden.

Stap 4. Schematisering komberging (paragraaf 6.3.4)

Wanneer het kunstwerk open blijft staan, kan door het instromend volume de beschikbare komberging achter het kunstwerk worden overschreden. Over het algemeen zal komberging niet maatgevend zijn. Als dit aan de hand van de eerste basisgegevens al inzichtelijk gemaakt kan worden, kan voor de parameters van komberging worden volstaan met niet nader te onderbouwen conservatieve waarden. Uiteraard dient dan wel te worden onderbouwd waarom komberging niet maatgevend zal zijn.

Tevens moet worden nagegaan of andere kunstwerken in het dijktraject ook een bijdrage kunnen leveren aan het instromend volume. Hierbij moet bedacht worden dat falen door betrouwbaarheid sluiten vaak plaatsvindt bij 'dagelijkse' omstandigheden⁷. Er is dus geen afhankelijkheid van de andere faalmechanismen *hoogte*, *piping* en *sterkte en stabiliteit*, omdat deze faalmechanismen hoogwater gedreven zijn. Daarnaast is de kans doorgaans erg klein dat de sluiting van onafhankelijke kunstwerken tegelijkertijd faalt. Dit betekent dat doorgaans de gehele komberging toegewezen kan worden aan het kunstwerk.

Stap 5. Berekening

Hier wordt de berekening uitgevoerd met behulp van Riskeer. Afhankelijk van de configuratie van het kunstwerk en de aanwezigheid van meerdere doorstroomopeningen met verschillende typen keermiddelen kan het nodig zijn om in eerste instantie meerdere sommen te maken. Uiteindelijk dient de maatgevende situatie, zijnde de situatie met de grootste faalkans, in de definitieve som te worden ingevoerd.

Stap 6. Analyse (paragraaf 6.4)

Hier worden de berekeningsresultaten geanalyseerd. Indien de uitkomst niet leidt tot tenminste een oordeel 'IIIv voldoet aan de ondergrens en mogelijk aan de signaleringswaarde' of beter dan moet worden nagegaan of er door het inwinnen van meer gegevens en het aanscherpen van de schematisering mogelijk wel tot een ander oordeel kan worden gekomen. Indien het oordeel IIIv is wordt dit eveneens aanbevolen. Richtlijnen hiervoor worden in paragraaf 2.3 gegeven.

Met betrekking tot de deelfaalmechanismen 'bezwijken bodembescherming' en 'onvoldoende kombergend vermogen' geldt, dat het voor kan komen dat zonder een berekening in stap 5 te maken, op voorhand één van deze deelfaalmechanismen kan worden uitgesloten. In dat geval is het kunnen 'uitvinken' van het betrokken deelfaalmechanisme de ideale situatie. Deze optie is in Riskeer echter niet aanwezig. Om dit te omzeilen dienen in die situatie dusdanige waarden voor de betrokken parameters te worden ingevuld, dat het betreffende deelfaalmechanisme niet meer maatgevend is. Dit wordt in hoofdstuk 6 bij de bespreking van de diverse deelfaalmechanismen nader uitgewerkt.

Voor kunstwerken is er, in tegenstelling tot alle toetssporen betreffende dijken en duinen, geen aandacht in deze schematiseringshandleiding voor de vakindeling. Die is niet van toepassing bij het schematiseren van kunstwerken; ieder kunstwerk wordt (binnen Riskeer) als apart vak gedefinieerd. Samengestelde kunstwerkcomplexen (bijvoorbeeld sluiscomplexen) worden hierbij ontleed, waarbij ieder kunstwerk waar mogelijk apart beoordeeld wordt. De samenhang

⁷ Uitzondering hierop zijn coupures. Hiervoor geldt echter dat deze nagenoeg altijd gebruik maken van een geheel andere kom als de kunstwerken waarbij vanuit de primaire functie watertransport plaatsvindt (gemalen, sluizen etc.) Bij coupures is in tegenstelling tot dergelijke kunstwerken geen sprake van een achterliggende watergang.

tussen de onderdelen (bijvoorbeeld een gedeeld kwelscherm) dient hierbij niet uit het oog te worden verloren.

2.3 Toets op maat

In de *toets op maat* kan de faalkans voor *niet sluiten* verder worden aangescherpt. Het is ook mogelijk in sommige situaties om na analyse van de overige kunstwerken in het dijktraject de faalkanseis aan te passen.

2.3.1 Aanscherpen faalkans

Voor eenvoudige aanscherpingen van de faalkans geldt dat deze binnen de *gedetailleerde toets* vallen. Echter zodra de aanscherpingen gedaan moeten worden middels berekeningen en analyses die niet behoren tot de standaardmethoden die voor *betrouwbaarheid sluiting kunstwerken* beschikbaar zijn in het instrumentarium, valt dit in de *toets op maat*. Het maken van dergelijke aanscherpingen dient altijd in overleg met de beheerder te worden uitgevoerd. Dit omdat een *toets op maat* slechts één van de mogelijke stappen is die genomen kan worden als uit het gedetailleerde toetsspoor blijkt dat niet wordt voldaan aan de faalkanseis behorende bij de norm, zie *WBI 2017 Bijlage I Procedure*. Soms kan het bijvoorbeeld minder inspanning vergen om een onderdeel te vervangen dan wel toe te voegen dan een *toets op maat* uit voeren om het onderdeel in meer detail te beoordelen.

Aanscherpingen die in de *toets op maat* kunnen worden overwogen zijn:

- Nadere bepaling kombergend vermogen (anders dan eenvoudige som van oppervlak vermenigvuldigd met toelaatbare peilverhoging):
 - Indien uit de analyse in stap 6 naar voren komt dat het kombergend vermogen maatgevend is voor de faalkans voor *niet sluiten*, in plaats van falen bodembescherming, kan een nadere analyse van dit kombergend vermogen worden uitgevoerd. Deze nadere analyse kan betrekking hebben op het totale oppervlak dat voor komberging beschikbaar is en op de toelaatbare peilstijging op het kombergend oppervlak. Zie [16] voor handvatten.
 - 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 natte doorsnede van dergelijke watergangen/waterpartijen substantieel varieert met het stijgen van de binnenwaterstand.
 - Met betrekking tot de toelaatbare peilstijging geldt dat hiervoor in de *gedetailleerde toets* 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 geen duidelijk veiligheidsbeeld is van de keringen langs de kom kan het nodig zijn deze keringen nader te onderzoeken. Een dergelijke inspanning kan zeer omvangrijk zijn. Dit is een voorbeeld van een situatie waarin het mogelijk meer optimaal is om een verbetermaatregel door te voeren in plaats van deze uitgebreide analyse.
 - Indien het watersysteem van de komberging is omringd door kades die praktisch niet door kunnen breken bij het gegeven keerpeil voor het systeem of als achter de kering geen regionaal watersysteem aanwezig is, dan is pas sprake van falen bij dusdanig veel overslag/overloop over het kunstwerk dat dit leidt tot substantiële economische schade en/of slachtoffers. In de *gedetailleerde toets* kan hiervoor een praktisch criterium van 0,2 m water op straat/maaiveld worden gehanteerd conform Grondslagen voor Hoogwaterbescherming [19]. In *toets op maat* 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 substantiële economische schade optreedt en/of slachtoffers vallen.
- Bij een klein achterliggend watersysteem dat wordt omringd door ‘zachte’ kades is in de *gedetailleerde toets* uitgegaan van de bijbehorende kleine komberging. Als overschrijding van dit kleine kombergend vermogen naar verwachting niet leidt tot significante gevolgen dan is in *toets op maat* 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 0,20 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 E is dit nader uitgewerkt.
 - Nadere bepaling faalkans van sluiten.
De faalkans van sluiten wordt in de *gedetailleerde toets* zoveel mogelijk bepaald met behulp van standaardmethoden en/of standaardwaarden. Indien de uitkomst van de *gedetailleerde toets* aangeeft dat de faalkans van sluiting dominant is voor het toetsspoor *betrouwbaarheid sluiting kunstwerk*, kan een aanscherping van deze faalkans worden uitgevoerd. Hiertoe kan een object specifieke risicoanalyse/faalkansanalyse worden uitgevoerd. In dat geval behoort deze actie tot de *toets op maat*.
 - Falen door erosie bodembescherming.
Het kan zijn dat de faalkans voor *niet sluiten* gedomineerd wordt door het bezwijken van de bodembescherming en het vervolgens falen van het kunstwerk als gevolg van het ontstaan van ontgrondingskuilen. Voor de laatste fase, het bezwijken van het kunstwerk zelf, zijn in Nederland nauwelijks handvatten om deze goed te beschrijven. Daarom wordt die laatste fase in het WBI 2017 als reststerkte gezien en valt daarmee buiten de *gedetailleerde toets*. De omvang van ontgrondingskuilen kan globaal berekend worden, maar de gevolgen van deze kuilen zijn lastiger in te schatten. Middels kwantitatieve (bepaling diepte ontgrondingskuilen) en kwalitatieve analyses kan een onderbouwing worden gevonden voor het meenemen van deze reststerkte. Dergelijke analyses kunnen worden ondergebracht in de *toets op maat*.
 - Nadere inschatting van het kritieke debiet.
Vooral wanneer in de *gedetailleerde toets* gebruik is gemaakt van richtwaarden voor het kritieke debiet kan het kritieke debiet in de *toets op maat* worden aangescherpt. Dit geldt met name voor bodembeschermingsconstructies die rechtstreeks worden belast door een overstortende straal. Dit vergt maatwerk waarvoor specialistische kennis omtrent bodembeschermingen vereist is.

Tot slot wordt opgemerkt dat het gebruik van eenvoudige toetsregels ook onder de toets op maat valt indien hiermee wordt afgeweken van de regels zoals opgenomen in *Bijlage III Sterkte en veiligheid*.

2.3.2 Aanscherping faalkanseis

Bij de afleiding van de faalkanseis per kunstwerk voor *betrouwbaarheid sluiting* wordt de faalkanseis op toetsspoorniveau verdeeld over de in het dijktraject aanwezige kunstwerken. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de lengte-effectfactor N_{dsn} . Deze is in *WBI 2017 bijlage III Sterkte en Veiligheid* (vergelijking 18.1 op pagina 85) als volgt beschreven.

$$N_{dsn} = \max(1; c \cdot n_{2a})$$

Waarin:

- c Reductiefactor om tot uitdrukking te brengen dat de faalkansen van kunstwerken niet allemaal precies even groot zijn (= 0,5) [-].
- n_{2a} Aantal kunstwerken in het dijktraject waarvan de faalkans niet verwaarloosbaar klein is volgens de eenvoudige toets [-].

In eerste instantie kan van bovenstaande beschrijving worden uitgegaan. Indien echter blijkt dat dit leidt tot het niet voldoen van één of meerdere kunstwerken binnen een dijktraject aan de berekende faalkanseis voor *betrouwbaarheid sluiting* op vakniveau kan de volgende aanscherping worden aangebracht met betrekking tot het lengte-effect. De definitie van de factor n_{2a} kan dan als volgt worden uitgebreid (onderstreepte deel):

n_{2a} : Aantal kunstwerken in het dijktraject waarvan de faalkans niet verwaarloosbaar klein is volgens de eenvoudige toets dan wel volgens de berekende faalkans in de gedetailleerde toets. De berekende faalkans kan als verwaarloosbaar klein worden beschouwd bij beoordeling van betrouwbaarheid sluiting binnen een dijktraject als deze kleiner of gelijk is aan $0,1 \times$ de faalkanseis op vakniveau bij de signaleringswaarde⁸.

Resultaat van de aanscherping is dat het aantal kunstwerken dat moet mee worden gerekend bij de bepaling van het lengte-effect wellicht kan worden verkleind. Dit leidt tot een kleinere waarde voor N_{dsn} en daarmee een minder strenge eis voor de kunstwerken die geen verwaarloosbare faalkansbijdrage hebben binnen het toetsspoor *betrouwbaarheid sluiting*.

NB: Doordat N_{dsn} is opgenomen in de specifiek voor deze situatie gehanteerde definitie van 'verwaarloosbaar klein' kan het zijn dat er een iteratieslag nodig is om de definitieve waarde van N_{dsn} te bepalen.

⁸ Stel de signaleringswaarde van de norm is 1/10.000 per jaar, de faalkansruimtefactor voor betrouwbaarheid sluiting is 0,04 en $N_{dsn} = 4$, dan moet de berekende faalkans kleiner zijn dan $0,1 \times 1/10.000 \times 0,04/4 = 1/10.000.000$ per jaar.

3. Belastinggevallen en hydraulische belasting

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de hydraulische belastingen en de belastinggevallen die voor het toetsspoor *betrouwbaarheid sluiting kunstwerk* van belang kunnen zijn. Voor dit toetsspoor geldt in ieder geval dat naast hydraulische belastingen er geen andere belastingen zijn die een directe rol spelen. Indirect kan het aanvaren of aanrijden van onderdelen van de sluitconstructie, onder niet gesloten omstandigheden, van invloed zijn op de kans van een succesvolle sluiting. Dit wordt uiteindelijk in rekening gebracht middels de kans dat het sluitproces faalt.

3.1 Dominante hydraulische belasting

Hydraulische belastingen zijn alleen van belang als het primaire sluitproces faalt (initieënd deelfaalmechanisme) en het kunstwerk dus ongewenst openstaat. De dominante hydraulische belasting is die buitenwaterstand waarbij, in het geval van een niet (hoog) waterkerend gesloten kunstwerk, er dusdanig veel water naar binnen stroomt dat of het kombergend vermogen wordt overschreden of de bodembescherming bezwijkt met als gevolg instabiliteit van het kunstwerk. De term 'hoogwater' is in het geval van *niet sluiten* een niet vast gedefinieerd begrip, aangezien zich ook bij lagere waterstanden problemen kunnen voordoen bij de bodembescherming en in het achterland op het moment dat het kunstwerk niet gesloten is. Een en ander is afhankelijk van onder andere de aanwezige en toelaatbare binnenwaterstand, de geometrie en configuratie van het kunstwerk, het gebruik van het kunstwerk vanuit zijn primaire functie(s) en de gevolgen die bij lagere waterstanden op kunnen treden.

Golven kunnen van belang zijn in het geval dat het toelaatbare buitenpeil van het niet gesloten kunstwerk bepaald wordt door een harde (hoge) drempel. Hierbij kan worden gedacht aan de binnendeuren van een schutsluis. Eventuele instroming van water bij het niet gesloten zijn van het hoogwaterkerend keermiddel kan dan plaatsvinden middels golfoverslag. Hierbij is het de vraag in welke mate golven op het buitenwater doordringen in de sluiscolk. In de modellen van de gedetailleerde toets wordt geen rekening gehouden met golfreductie in de sluiscolk. Als eerste grove benadering kan hiermee worden volstaan als desondanks aan de faalkanseis wordt voldaan. Indien nodig kan in een toets op maat de golfdoordringing door een sluis nauwkeuriger bepaald worden.

Met langsstroming wordt geen rekening gehouden, omdat dit geen rol van betekenis speelt.

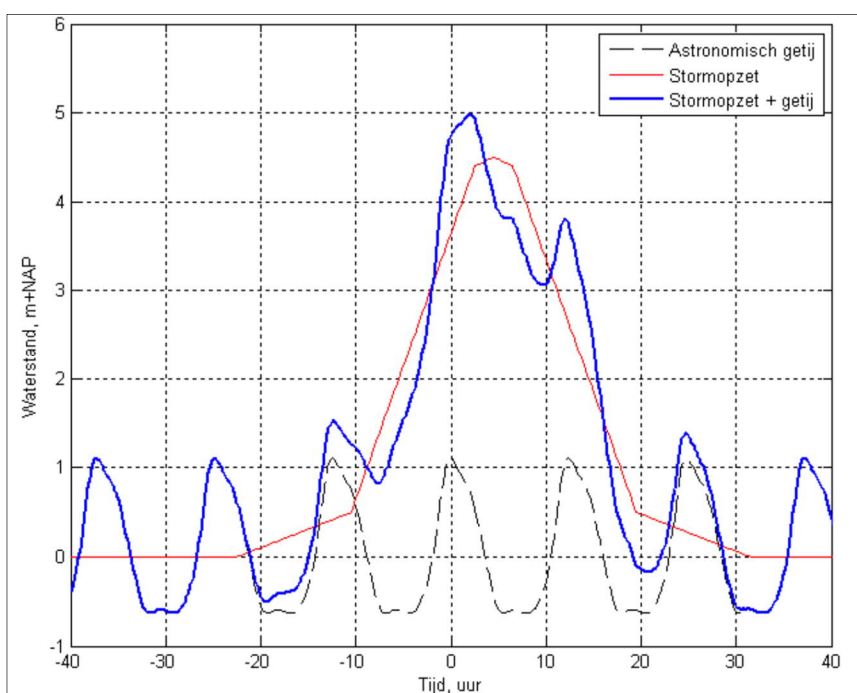
3.2 Hydraulische belastingen

De hydraulische belastingen zijn gerelateerd aan de wettelijke veiligheidsnorm met betrekking tot overstroming, zoals die is vastgelegd in de Waterwet. In deze wet is de veiligheidsnorm voor de primaire waterkeringen vastgelegd als de toelaatbare overstromingskans per jaar van een door een dijktraject beschermd gebied. Daarnaast moet er een doorsnede-eis bepaald worden op basis van het faalkansbudget en lengte-effect voor dit toetsspoor, zie Bijlage III Sterkte en veiligheid [5] paragraaf 18.2. Aangezien de beoordeling veelal met behulp van Riskeer wordt uitgevoerd en hierin de hydraulische belastingen reeds zijn opgenomen, is een uitgebreide schematisering van de hydraulische belastingen niet aan de orde. Wel kan het nodig zijn een vertaalslag te maken van de hydraulische belastingen op de uitvoerlocatie naar de hydraulische belastingen ter plaatse van het kunstwerk, bijvoorbeeld door een voorland of damconstructie in de schematisering mee te nemen.

Het verloop van de hoogwaterstand in de tijd is bij het faalmechanisme *niet sluiten* van belang, aangezien dit verloop mede bepaalt hoeveel water er gedurende een periode van een

hoogwaterstand via een ongewenst openstaand kunstwerk naar binnen kan stromen. Dit volume van instromend water is van belang om te kunnen beoordelen of het kombergend vermogen wordt overschreden.

Het verloop van een hoogwaterstand 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 3-1 is ter illustratie voor het benedenrivierengebied (kustgebied) een standaard verloop van een hoogwatergolf weergegeven, waarbij ook de invloed van het getij is meegenomen. Deze grafiek is afkomstig uit [16].



Figuur 3-1 Waterstandsverloop in de tijd voor een locatie (bron: [18])

De invloed van het hoogwaterverloop op het instromende volume kan in de analyses alleen worden meegenomen door aanpassing van de parameter 'stormduur'. In paragraaf 7.3.6 worden hiervoor handvatten gegeven.

3.3

Belastinggevallen

Bij het faalmechanisme *niet sluiten* is bij het ongewenst open staan van een kunstwerk het optredende instromende debiet afhankelijk van een combinatie van buitenwaterstand en golven. Dit instromende debiet leidt tot een belasting op de achterliggende bodembescherming en het aanwezige kombergende vermogen. Indien na het falen van de sluiting het faalcriterium wordt overschreden dat hoort bij één van deze twee deelfaalmechanismen is sprake van falen van het kunstwerk.

De belasting op de bodembescherming dan wel op de komberging wordt veroorzaakt door het verval over het kunstwerk en de kenmerken van de niet gesloten doorstroomprofielen binnen het kunstwerk. Een groot verval bij een kunstwerk met een kleine doorstroomopening hoeft nog niet te leiden tot het optreden van één van de genoemde deelfaalmechanismen. Daarentegen kan een klein verval in combinatie met een grote doorstroomopening leiden tot substantiële gevolgen doordat bijvoorbeeld de komberging niet toereikend is.

4. Inventarisatie beschikbare gegevens

De inventarisatie van beschikbare gegevens bestaat in hoofdzaak uit het verzamelen van gegevens omtrent hydraulische belastingen (zie hoofdstuk 3), sluitingsprotocollen, geometrie, komberging, bodembescherming en dagelijks gebruik van het kunstwerk. Hierop wordt in onderstaande paragrafen nader ingegaan.

4.1 Gebruiksgegevens

Van groot belang zijn de gegevens omtrent het dagelijks gebruik van het kunstwerk. Dit betreft:

- De wijze waarop de keermiddelen bij de uitoefening van de primaire functie van het kunstwerk worden ingezet en de problemen die daar eventueel bij worden ondervonden.
- De frequentie en duur van inzet vanuit dagelijks functioneren. Dit bepaalt immers hoe groot de kans is dat een kunstwerk niet gesloten staat op het moment dat een hoogwater zich aandient.

Indien de primaire functie geen directe inzet van keermiddelen vereist, is het oefenen van de sluiting van des te groter belang. Gegevens omtrent daadwerkelijke sluitingen en proefsluitingen dienen dan ook te worden verzameld.

Aangezien het beschikbaar hebben van gegevens uit de praktijk aantoonde dat de werking van het kunstwerk bekend is, wordt de beschikbaarheid van deze gegevens als harde randvoorwaarde voor de beoordeling gezien. Indien de dagelijkse werking van het kunstwerk niet afdoende bekend is, is een zinvolle beoordeling niet mogelijk. In dat geval kan de beoordeling op *niet sluiten* niet plaatsvinden.

4.2 Sluitingsprotocollen

Evenals de gebruiksgegevens, is de aanwezigheid van sluitingsprotocollen en de aantoonbare toepassing hiervan binnen oefeningen en daadwerkelijke sluitingen van groot belang. Bij het ontbreken van deze gegevens geldt wederom dat het toetsspoor *betrouwbaarheid sluiting kunstwerk* niet kan worden doorlopen. Door het stellen van deze randvoorwaarde bij zowel de sluitingsprotocollen als de gebruiksgegevens (paragraaf 4.1) wordt voorkomen dat bij een beoordeling een papieren werkelijkheid wordt beoordeeld in plaats van de werkelijke praktijk buiten.

Met betrekking tot de faalkans van herstel van een gefaalde reguliere sluiting, dient in de protocollen te zijn opgenomen welke vormen van herstel voor een specifiek kunstwerk mogelijk worden geacht. In *Handreiking borging betrouwbaarheid sluiting in draaiboeken* [22], wordt ingegaan op borging van dergelijke maatregelen in de protocollen. Indien op voorhand niet is nagedacht over vormen van herstel en dit niet is vastgelegd, dient deze faalkans gelijk aan 1 te worden gesteld.

4.3 Geometrie kunstwerk

De geometrie van het kunstwerk en de daarin aanwezige keermiddelen vormen de basis voor de beoordeling van het toetsspoor *betrouwbaarheid sluiting kunstwerk*. Van het kunstwerk dienen daarom minimaal de volgende gegevens bekend te zijn:

- A. Aantal, afmetingen en verticaal verloop (bijvoorbeeld een kattenrug van een watervoerende leiding) van de doorstroomopeningen.
- B. Configuratie, aantal, type en aandrijving van de keermiddelen.
- C. Sterkte en/of kerende hoogte van de keermiddelen.

ad. A. De gegevens omtrent de doorstroomopeningen bepalen samen met de aanwezige binnenwaterstand het instromende debiet, indien het kunstwerk niet gesloten is. Deze gegevens kunnen worden gevonden op tekeningen of worden bepaald middels inmetingen in het veld.

ad. B. De configuratie, het aantal, het type en de aandrijving van de keermiddelen zijn belangrijk bij het bepalen van de faalkans van het sluitproces. Deze gegevens dienen bekend te zijn om überhaupt een beoordeling op *niet sluiten* uit te kunnen voeren.

ad. C. De sterkte en kerende hoogte van de keermiddelen bepalen welke waterstand door de diverse keermiddelen gekeerd kan worden. Dit kan een rol spelen bij *niet sluiten*, omdat bijvoorbeeld een niet specifiek hoogwaterkerend keermiddel wel kan bijdragen aan de maximaal toelaatbare waterstand op het moment dat het hoogwaterkerende keermiddel niet gesloten is. Hierbij kan worden gedacht aan bijvoorbeeld de binnendeuren van een schutsluis.

Indien de fysieke kerende hoogte van een keermiddel groot is, maar de sterkte (van het keermiddel of de opleggingen hiervan) niet toereikend is om een waterstand gelijk aan deze fysieke kerende hoogte te keren, dan dient hiermee rekening te worden gehouden.

De kerende hoogte van de keermiddelen kan bepaald worden vanaf tekening of door meting in het veld. Voor de sterkte van keermiddelen zoals de binnendeuren van schutsluizen kan een eerste eenvoudige inschatting bestaan uit het maximale schutpeil (bij waterstanden hoger dan dit peil wordt het schutproces gestaakt). Middels berekeningen of berekeningsrapporten kan een nadere bepaling van de sterkte worden uitgevoerd.

4.4 Gegevens bodembescherming

Als een kunstwerk ongewenst open blijft staan, kan water naar binnen stromen. Als gevolg hiervan wordt de bodembescherming aan de binnenzijde belast. Afhankelijk van het type en de opbouw van de bodembescherming is de kritieke stroomsnelheid verschillend. Door gegevens omtrent de bodembescherming in te winnen, kan een uitspraak worden gedaan over deze kritieke stroomsnelheid.

Gegevens omtrent de bodembescherming kunnen worden ingewonnen middels tekeningen en bestekken en het uitvoeren van inspecties. Met deze laatste stap wordt niet alleen een beeld verkregen over de opbouw van de bodembescherming, maar ook over de actuele staat van deze bodembescherming. Het kennen/onderbouwen van de actuele conditie van de bodembescherming is voorwaarde om met de aanwezigheid van een bodembescherming rekening te mogen houden. Aandachtspunten bij een inspectie zijn vooral:

- Opbouw bodembescherming.
Type, lengte en breedte van de bodembescherming. Ook de sortering en dikte van met name de toplaag is van belang. Met behulp van deze gegevens omtrent de bodembescherming kan met behulp van modellen een kritieke stroomsnelheid worden bepaald. Bepaling van deze stroomsnelheid vindt buiten Riskeer plaats.
- Conditie bodembescherming.
Ontbreken er stenen of zijn er kuilen in de bodembescherming waarneembaar?

- Aansluiting op het kunstwerk.
Is de aansluiting op de bodem van het kunstwerk nog intact?
- Beëindiging van de bodembescherming.
In hoeverre is de beëindiging van de bodembescherming nog intact? Is er sprake van een overgangsconstructie en zijn er sporen van erosie zichtbaar?

Voor de beheerder is het van belang om een goed beeld te krijgen van de ontwikkeling in de tijd van de conditie van de bodembescherming (het tempo van eventuele veroudering/degradatie). Daarom verdient het aanbeveling de bodembescherming periodiek te inspecteren. Door de ontwikkeling in de tijd te monitoren ontstaat een beter beeld van de eventuele afname van de sterkte van de bodembescherming. Veelal ontbreken echter inspectierapporten van de bodembescherming en is alleen van tekening bekend welke bodembescherming destijds is aangelegd. Het is dan aan de beheerder om een inschatting te maken van de kans op substantiële schade aan de bodembescherming. Hierbij kan een relatie worden gelegd tussen de kritieke stroomsnelheid van de bodembescherming en de te verwachten maximale belasting als gevolg van het dagelijks gebruik vanuit de functie van het kunstwerk. Bij een kunstwerk waarbij de bodembescherming robuust is ontworpen en aangelegd en waarbij de belasting naar verwachting weinig fluctueert (bijvoorbeeld een uitwateringssluits die automatisch sluit bij een zeker peilverschil) mag ervan uit worden gegaan dat de bodembescherming nog nagenoeg intact zal zijn. Hier kan dus worden uitgegaan van de bodembescherming die op tekening is aangegeven. Bij een schutsluis daarentegen waarbij de motorvermogens van de passerende schepen in de loop der tijd fors zijn toegenomen is dit veel minder zeker. Hier is het raadzaam om gegevens in te winnen en anders het kritieke debiet waarmee wordt gerekend relatief klein aan te houden.

Indien er helemaal geen gegevens omtrent de bodembescherming voorhanden zijn, wordt in een eerste analyse uitgegaan van het afwezig zijn van een (intact zijnde) bodembescherming. Dit heeft tot gevolg dat de grondsoort achter het kunstwerk direct van belang wordt. De kritieke snelheid moet dan worden gerelateerd aan deze grondsoort. Hiervoor zijn richtgetallen beschikbaar (zie Tabel 7-3).

Een scherper oordeel kan wellicht worden verkregen door de sterkte van de grondslag onder de bodembescherming mee te nemen in de betrouwbaarheidsanalyse. Dit valt echter buiten de *gedetailleerde toets*. In de *toets op maat* kan eventueel nog naar dit aspect worden gekeken.

Van de onderhoudstoestand van de bodem(bescherming) achter het kunstwerk kan ook indirect een beeld worden gevormd door het uitvoeren van lodingen. Indien deze lodingen ontgrondingskuilen in de nabijheid van het kunstwerk laten zien, is het duidelijk dat sprake is van erosie van de bodem(bescherming). Het omgekeerde geldt natuurlijk evenzeer, indien de lodingen geen ontgrondingskuilen in de nabijheid van het kunstwerk laten zien dan kan ervan worden uitgegaan dat de bodembescherming nog aanwezig is. Deze gegevens kunnen ook worden toegepast in de beschouwingen.

4.5 Gegevens komberging

Als een kunstwerk ongewenst open blijft staan, kan water naar binnen stromen. Als gevolg hiervan wordt een beroep gedaan op de komberging achter het kunstwerk door het instromende debiet. Hoeveel water achter het kunstwerk kan worden toegelaten dient te worden bepaald. Hiertoe is het vergaren van enkele gegevens benodigd. Indien op voorhand al duidelijk is dat komberging geen rol van betekenis speelt, of eenvoudig op een andere wijze kan worden meegenomen (bijvoorbeeld bij een kleine komberging, waarbij het binnenwater het buitenwater zonder erosie van de bodembescherming kan volgen), kan het verzamelen van de

benodigde gegevens in eerste instantie achterwege worden gelaten. In paragraaf 6.3.1 wordt aangegeven hoe bepaald kan worden of voor het kombergend vermogen gegevens ingezameld moeten worden.

Afhankelijk van de situatie dienen de volgende gegevens in meer of minder uitgebreide vorm te worden verzameld:

- Oppervlakte van de komberging.
Een komberging kan bestaan uit een achter het kunstwerk liggende vaarweg, maar ook uit een stelsel van watergangen en waterbergingen. Het totale (water-)oppervlak dat voor komberging beschikbaar is, dient inzichtelijk te worden gemaakt. In eerste instantie kan worden volstaan met een inschatting, met name in die situaties waarin de komberging bestaat uit een gevarieerde verzameling van watergangen en waterpartijen.
- Streefpeil en toelaatbaar peil.
Het verschil tussen deze peilen bepaalt de waterstijging die in het achterland mag plaatsvinden, voordat significante gevolgen optreden, zie Bijlage E. Met het oog hierop betreft het kritieke binnenpeil die waterstand die leidt tot significante gevolgen in het achterliggende watersysteem dan wel gebied. Dit wordt in Bijlage E nader uitgewerkt. Opgemerkt wordt dat het in de praktijk kan voorkomen dat er geen uitgebreide veiligheidsanalyse beschikbaar is van de keringen langs de kom. In dat geval moet een onderbouwde schatting worden gemaakt van het peil dat deze keringen kunnen keren. Een belangrijk aandachtspunt is dat het kritieke peil gezien moet worden in het licht van de overstromingskansbenadering. Een kritiek binnenpeil dat gekoppeld is aan overlast is niet acceptabel als dit leidt tot beoordelingscategorie lager dan 'III_v' (voldoet aan de ondergrens en mogelijk aan de signaleringswaarde) of slechter voor dit toetsspoor. Indien het leidt tot een beoordelingscategorie III_v wordt aanbevolen toch nog scherper het kritieke binnenpeil te definiëren zodat mogelijk beoordelingscategorie II_v (voldoet aan de signaleringswaarde) bereikt kan worden.
- Watertoevoer vanuit het achterland.
Nadat het kunstwerk is gesloten kan het zijn dat vanuit het achterland water wordt aangevoerd dat op dat moment niet geloosd kan worden. Dit water reduceert de komberging die voor *niet sluiten* beschikbaar is. Een inschatting van deze aanvoer van water dient door de beheerder te worden vastgesteld.
- Wateraanvoer en -afvoer door gemalen.
Aanwezigheid en inzet van gemalen die gedurende een hoogwater water op de kom lozen, dan wel water vanuit de kom op het buitenwater lozen.
- Het waterstandsverloop in de tijd.
Dit gegeven is nodig om in het instrumentarium een schatting van de stormduur te kunnen invullen.

4.6

Gegevens veldbezoek

Voorafgaand aan de beoordeling van een kunstwerk is een veldbezoek noodzakelijk voor een goed inzicht in de lokale situatie. Ook in het kader van *niet sluiten* is dit van belang. Het veldbezoek kan worden gebruikt voor de volgende punten:

- Verificatie/vaststellen van dimensies en keermiddelen in relatie tot informatie uit tekeningen en berekeningen.
- Gebruik van het kunstwerk en de diverse keermiddelen, met name in dagelijkse omstandigheden.
- Eventuele eenvoudig uit te voeren metingen (afmetingen doorstroomopeningen etc.).

- Plaats en afmetingen van eventuele sparingen in de constructie (bijvoorbeeld bij toegangsluiken), die ertoe kunnen leiden dat bepaalde keermiddelen slechts meedoen als de buitenwaterstand onder een bepaalde waarde blijft.
- Omgeving van het kunstwerk en situatie van het achterland. Hiermee kan een indruk worden verkregen van de eerste gevolgen bij falen van het kunstwerk.
- Visuele waarneming van eventuele bodembeschermingen voor zover mogelijk. Vooral op de taluds kan soms de aanwezige bodembescherming worden waargenomen.
- Inzicht in de conditie van de keermiddelen.
- Inzicht in mogelijke noodmaatregelen die getroffen zouden kunnen worden indien een sluiting faalt. Deze mogelijke noodmaatregelen dienen te zijn vastgelegd door de waterkeringbeheerder. Bij het veldbezoek kan geverifieerd worden of de voorgestelde noodmaatregelen realistisch zijn, gegeven de situatie dat de reguliere sluiting faalt.

Bij het veldbezoek wordt aanbevolen de volgende personen aanwezig te laten zijn:

- De toetser. Dit betreft de persoon die daadwerkelijk de analyse van het kunstwerk uitvoert en op grond daarvan komt tot een voorstel voor het oordeel.
- De opdrachtgever. Dit betreft de persoon die vanuit de beheerder de verantwoording draagt voor het oordeel over het kunstwerk.
- De bedienaar/beheerder. Dit betreft de persoon die bij het dagelijks beheer en/of gebruik regelmatig met het kunstwerk te maken heeft en die dus de nodige ervaringsgegevens hierover kan inbrengen.

Aanbevolen wordt om de bevindingen van het veldbezoek vast te leggen.

4.7

Gegevens inspectie, beheer en onderhoud

De beoordeling vindt plaats op de peildatum. Voor de analyse van *betrouwbaarheid sluiting* dient de actuele situatie onder de aanname van goed beheer te worden vertaald naar de situatie op peildatum. Uitgangspunt voor de toets is dat de beheerder middels inspectieresultaten inzicht heeft in de actuele conditie van (onderdelen) van het kunstwerk. Indien deze inspectiegegevens niet voorhanden zijn dient de actuele staat aan de hand van een eenvoudige visuele inspectie tijdens het veldbezoek te worden vastgesteld. Bij de beoordeling dient, daar waar twijfels zijn over de staat van het kunstwerk, te worden uitgegaan van conservatieve waarden.

Het kan nodig zijn om het kunstwerk te inspecteren indien dit recentelijk niet is uitgevoerd. Met behulp van deze inspectiegegevens kunnen aanvullende gegevens worden verzameld en kan een onderbouwde uitspraak worden gedaan over de conditie van de diverse onderdelen van het kunstwerk. Bij het toetsspoor *betrouwbaarheid sluiting kunstwerk* zijn overwegend gegevens omtrent de keermiddelen en de bodembescherming van belang. Wanneer er geen onderbouwd inzicht is in de actuele staat van deze onderdelen van het kunstwerk, kan de beoordeling in eerste instantie met conservatieve waarden worden uitgevoerd. Bij het vervolgens niet voldoen van het kunstwerk aan de faalkanseisen met betrekking tot *niet sluiten* dienen dan in de *gedetailleerde toets* alsnog inspecties te worden uitgevoerd waarmee een aanscherping van het oordeel mogelijk wordt.

5. Vakindeling

Voor kunstwerken is er, in tegenstelling tot alle toetssporen betreffende dijken en duinen, geen vakindeling. Die is niet van toepassing bij het schematiseren van kunstwerken; ieder kunstwerk wordt (binnen Riskeer) als apart vak gedefinieerd. Samengestelde kunstwerkcomplexen (bijvoorbeeld sluizencomplexen) worden hierbij ontleed, waarbij ieder kunstwerk waar mogelijk apart beoordeeld wordt.

Bij de beoordeling van grote samengestelde kunstwerkcomplexen spelen onder andere de volgende zaken een rol:

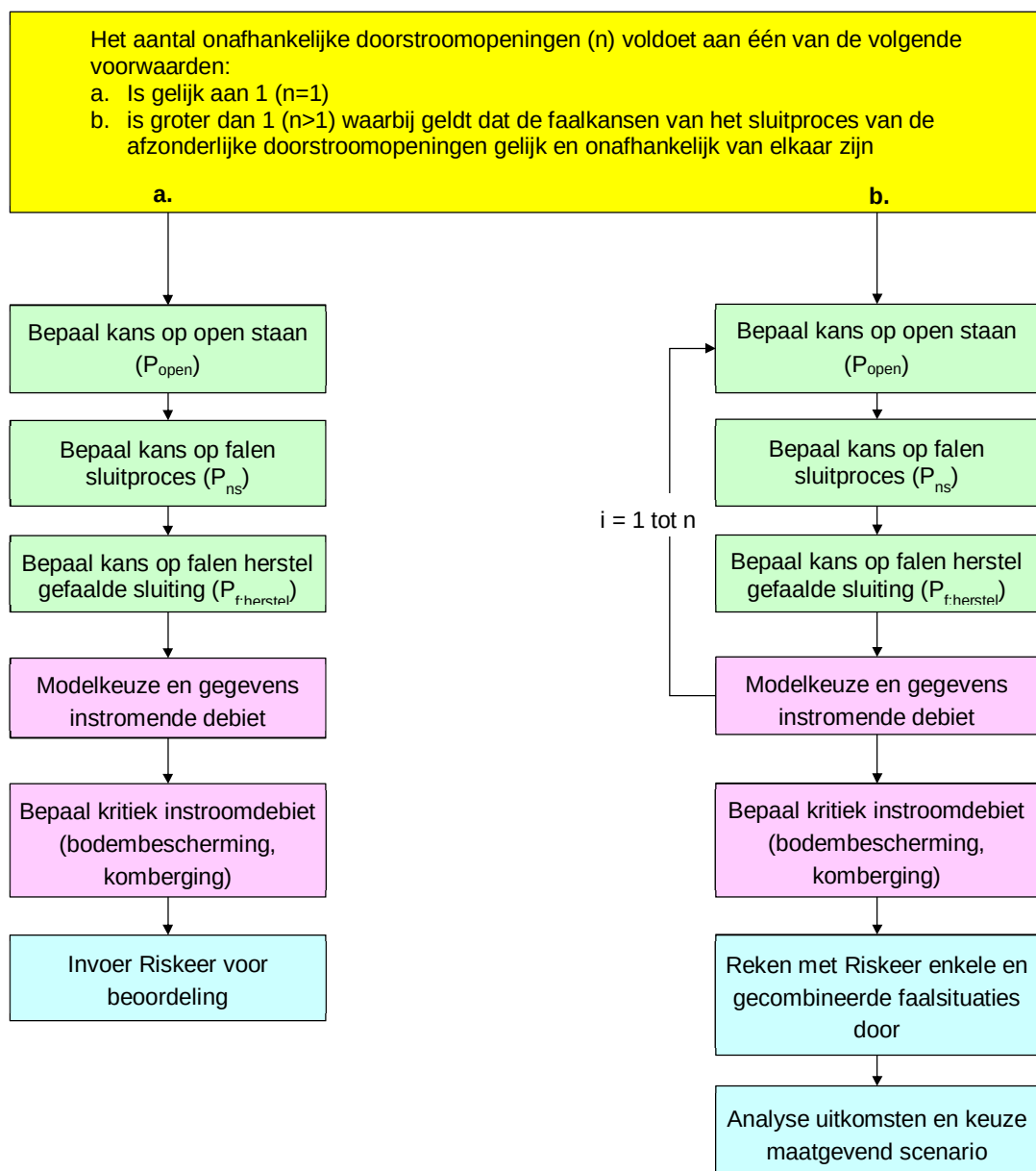
1. De aanname “onafhankelijk falen” van vakken/deelkunstwerken kan veel te optimistisch zijn, maar ook de aanname “afhankelijk falen” kan veel te pessimistisch zijn. Een goede onderbouwing en verdiscontering van de mate van afhankelijk falen is daarom nodig.
2. Bij falen als gevolg van een tekort aan komberging kan het zijn dat de afzonderlijke kunstwerken wel voldoen aan het kombergingscriterium, maar dat bij gecombineerd falen van kunstwerken er wel sprake is van overschrijding van dit criterium.

Grote samengestelde kunstwerkcomplexen vallen daarom vaak onder een toets op maat.

6. Schematisering

De schematisering van het faalmechanisme *niet sluiten* in het toetsspoor *betrouwbaarheid sluiting kunstwerk* kent een aantal stappen die in Figuur 2-4 zijn weergegeven. In dit hoofdstuk wordt het proces van schematisering nader beschreven. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat de benodigde gegevens inmiddels zijn verzameld (zie hoofdstuk 4).

In Figuur 6-1, dat aansluit op stap 2 uit Figuur 2-4, is in meer detail ingegaan op de schematisering van *niet sluiten*. Het schema begint met een keuze ten aanzien van het aantal onafhankelijke doorstroomopeningen. Dit bepaalt uiteindelijk het aantal analyses dat uitgevoerd wordt. Onder het schema is een eerste werkwijze aangegeven voor doorstroomopeningen die niet geheel onafhankelijk van elkaar sluiten.



Figuur 6-1 Schematiseringsschema niet sluiten

Indien er meerdere doorstroomopeningen zijn waarbij de sluiting van de keermiddelen niet volledig onafhankelijk is, past deze situatie niet goed in Riskeer. Aanbevolen wordt een analyse buiten Riskeer uit te voeren, zie bijlage H voor toelichting en een voorbeeld.

In dit hoofdstuk wordt kort ingegaan op de bovenstaand schema, waarbij dit per deelfaalmechanisme wordt opgepakt. Een uitgebreide handleiding met betrekking tot schematisering van de parameters is in het hierna volgende hoofdstuk opgenomen. In het schema in Figuur 6-1 is een aantal kleuren gebruikt. Geel geeft het keuzemoment weer, groen de stappen met betrekking tot het sluitproces. Paars duidt op gegevens met betrekking tot (toelaatbare) gevolgen en blauw geeft weer dat er geanalyseerd dient te worden. Zoals uit de figuur blijkt, kan het nodig zijn dat bij meerdere doorstroomopeningen ook meerdere situaties met Riskeer geanalyseerd worden, waarna het maatgevende scenario kan worden gekozen.

Algemeen geldt nog dat bij het schematiseren onderstaand principe van toepassing is:

Bij de schematiseringen wordt aanbevolen om van grof naar fijn te werken. Daarbij geldt dat als bij een stap voldaan wordt aan de faalkanseis die aan het beschouwde faalmecanisme wordt gesteld, een volgende verfijnende stap niet nodig is. In de eerste stappen is er sprake van grote onzekerheden welke leiden tot relatief grote faalkansen. In vervolgstappen worden onzekerheden gereduceerd waardoor een scherper beeld van de overstromingskans wordt verkregen. Deze werkwijze leidt ertoe dat in de meeste gevallen de eerste analyses een pessimistischer (conservatiever) beeld geven dan vervolganalyses.

6.1 Schematisering sluitproces (P_{open} en P_{ns})

Het schematiseren van het sluitproces (zie paragraaf 7.5) vereist een goed inzicht in aantal en type keermiddelen en de configuratie van het kunstwerk. Daarnaast dient de kennis met betrekking tot sluitingsprotocollen en de ervaringen vanuit dagelijks gebruik ook te worden meegenomen.

Het falen van het primaire sluitproces is in het rekenmodel afhankelijk van een tweetal factoren. Dit betreft:

1. De kans dat het kunstwerk niet (hoogwater) kerend gesloten staat op het moment dat een hoogwater zich aandient (P_{open}).
2. De kans dat het sluiten van één of meer (n) onafhankelijke doorstroomopeningen faalt op het moment dat dat vanuit hoogwaterkeren nodig is.

De kans dat een kunstwerk niet gesloten staat op het moment dat een hoogwater zich aandient, kan worden afgeleid uit de gegevens met betrekking tot het gebruik van het kunstwerk en de daarin aanwezige keermiddelen. De kans op het falen van de sluiting is afhankelijk van het type, aantal en aandrijving van de diverse keermiddelen en het aantal identieke doorstroomopeningen.

Indien een kunstwerk uit meerdere doorstroomopeningen bestaat, waarvan de kansen op falen van de sluiting niet identiek zijn, kan het nodig zijn om de diverse faalsituaties apart dan wel gecombineerd te bekijken om vast te kunnen stellen welke situatie maatgevend is. Voor een bepaald kunstwerk zal de faalkans van sluiting van één enkele doorgang vaak groter zijn dan de kans dat meerdere doorstroomopeningen tegelijkertijd niet sluiten. Daarentegen zijn de directe gevolgen (instromend debiet) bij het niet sluiten van één doorgang kleiner dan bij het niet sluiten van meerdere doorgangen tegelijkertijd. Bovenstaande kan betekenen dat er

meerdere sommen met Riskeer moeten worden uitgevoerd om de maatgevende situatie te bepalen. De maatgevende situatie dient uiteindelijk als berekeningsresultaat in Riskeer te worden geadministreerd.

6.2

Schematisering faalkans van herstel van een falende sluiting ($P_{f;herstel}$)

Nadat een reguliere sluiting is gefaald (zie paragraaf 7.5), is in veel situaties nog een herstel van de sluiting mogelijk. Dit betreft het alsnog afsluiten van de doorstroomopening(en) met behulp van de inzet van alternatieve middelen, dan wel het uitvoeren van corrigerende maatregelen om de faaloorzaak weg te nemen. Bij de eerste vorm van herstel kan gedacht worden aan bijvoorbeeld zandzakken, bigbags en alternatieve schotbalken. Bij de tweede vorm van herstel kan gedacht worden aan het verwijderen van bijvoorbeeld een blokkering van de sluitopening door obstakels⁹. In beide gevallen geldt dat er nog voldoende tijd beschikbaar moet zijn voordat het buitenwater dusdanig hoog wordt dat herstel niet meer mogelijk is en de sluiting dus definitief als gefaald kan worden beschouwd.

In de analyses met betrekking tot *niet sluiten* kan rekening worden gehouden met het herstellen van een gefaalde reguliere sluiting. Belangrijke aspecten die hierbij een rol spelen zijn:

- Beschikbare tijd tussen sluitpeil en waterstand waarbij daadwerkelijk water door een niet gesloten opening naar binnen kan stromen.
- Afmetingen en bereikbaarheid van de doorstroomopeningen/kunstwerk.
- Oorzaak falen van reguliere sluiting.

Het mogelijk herstellen van een gefaalde reguliere hoogwatersluiting kan in het beoordelingsmodel voor *niet sluiten* worden ingebracht door een waarde toe te kennen aan de kans dat dit herstel faalt ($P_{f;herstel}$). Deze parameter krijgt de waarde '1', wanneer herstel van een gefaalde reguliere hoogwater sluiting niet mogelijk wordt geacht binnen de aanwezige randvoorwaarden (bijvoorbeeld tijd). Voor veel waterkerende objecten geldt dat een waarde van '1' zeer conservatief zal zijn, omdat er al ruim voor het hoogwater wordt begonnen met de sluiting en de afmetingen van de doorstroomopeningen beperkt zijn.

In de schematisering wordt aanbevolen om in eerste instantie geen rekening te houden met een kans op herstel. Indien het kunstwerk dan reeds valt onder beoordelingscategorie II_v of hoger ten aanzien van *betrouwbaarheid sluiting kunstwerk*, is een verdere inspanning niet benodigd. Indien dit niet het geval kan alsnog een nadere inschatting van de faalkans van herstel in rekening worden gebracht (zie paragraaf 7.6).

6.3

Schematisering gevolgen na falen sluiting

Nadat de hoogwatersluiting van het kunstwerk gefaald is, stroomt er bij een voldoende hoge buitenwaterstand water door het kunstwerk ongewenst naar binnen. Dit instromende debiet is afhankelijk van het verloop, de ligging en de afmetingen van de doorstroomopening(en) die niet gesloten is/zijn. Daarnaast speelt het verschil tussen binnen- en buitenwaterstand een belangrijke rol. In hoeverre het instromende debiet leidt tot overstromingsgevolgen is afhankelijk van de sterkte van de bodembescherming direct achter het kunstwerk en het kombergend vermogen van het achterliggende watersysteem.

⁹ Bijvoorbeeld een geparkeerde auto in een coupure. Als er nog enkele uren tijd beschikbaar is voordat het water naar binnenstroomt, is het verwijderen van de geparkeerde auto een mogelijkheid tot herstel.

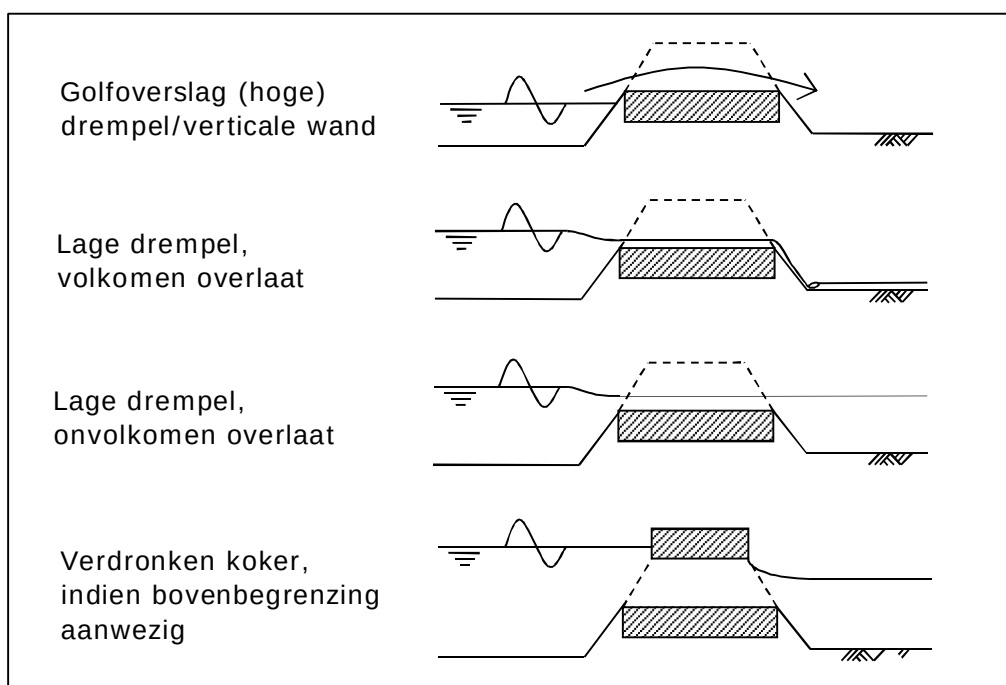
6.3.1

Modelkeuze en gegevens instromend debiet

Beschrijving van het instromende debiet vindt in Riskeer plaats aan de hand van een door de gebruiker op te geven model. Hierbij kan voor *niet sluiten* gekozen worden uit de volgende modellen (zie paragraaf 7.3.7 voor schematisering op parameterniveau):

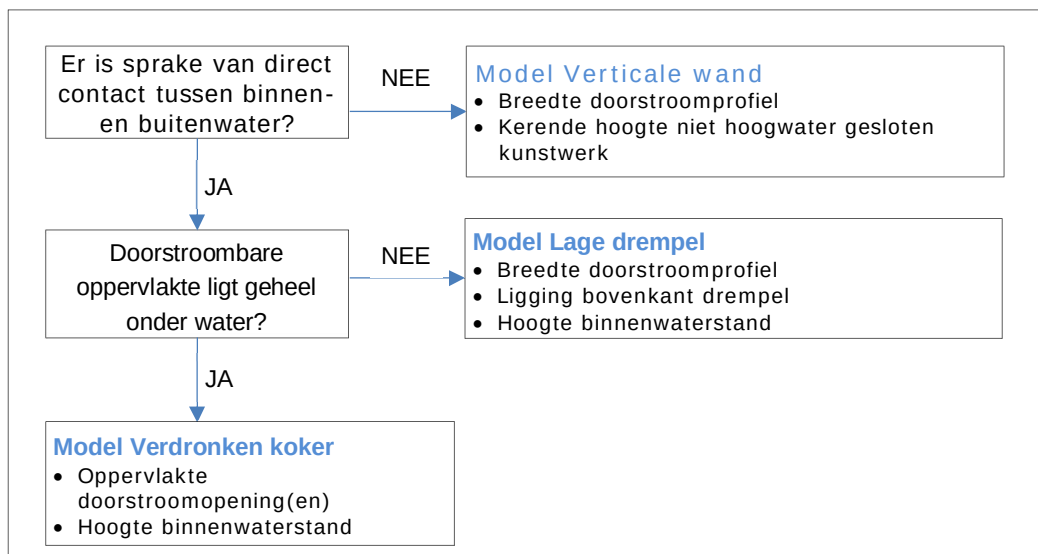
1. Hoge drempel/verticale wand.
2. Lage drempel.
3. Verdrongen koker.

In Figuur 6-2 is een schematische weergave van de diverse instromingsmodellen weergegeven. Voor het model lage drempel geldt dat hierbij sprake kan zijn van een volkomen stroming of een onvolkomen stroming. Het uiteindelijk toe te passen submodel wordt door Riskeer zelf bepaald en hoeft dus niet door de gebruiker te worden gekozen.



Figuur 6-2 Schematische weergave van de diverse instromingsmodellen bij niet sluiten

Het model kan worden gekozen met behulp van het schema in Figuur 6-3. In deze figuur is tevens aangegeven welke gegevens verzameld moeten worden voor een bepaald model.



Figuur 6-3 Keuze schema model instromend debiet in geval van niet hoogwater kerend gesloten zijn

Het kan voorkomen dat de uitkomsten van een analyse met Riskeer dusdanig zijn dat een aanpassing van het model voor het instromende debiet benodigd is, waarna nogmaals de analyse wordt uitgevoerd. Bijvoorbeeld als blijkt dat de kritieke buitenwaterstand dusdanig laag is dat er sprake is van een lage drempel, terwijl in eerste instantie het model verdrongen koker was gekozen.

Het model voor het instromende debiet bepaalt samen met het verval over het kunstwerk de hoeveelheid water die binnenstroomt op het moment dat het kunstwerk niet hoogwater kerend gesloten is. Voor meer informatie omtrent de modellen die het instromende debiet bepalen wordt verwezen naar paragraaf 7.3.7 en het Toetsspoorrapport [16].

6.3.2 Keuze schematisering bodembescherming en/of kombergend vermogen

Welke instromende debieten nu uiteindelijk leiden tot het falen van het kunstwerk wordt bepaald door de sterkte van de bodembescherming en het aanwezige kombergend vermogen. In sommige gevallen is op voorhand aan te geven welk van deze twee deelfaalmechanismen maatgevend zal zijn. Hiervan kan in de schematisering gebruik worden gemaakt. Er zijn de volgende mogelijkheden met betrekking tot de faalkans voor *niet sluiten*:

- A. Het kombergend vermogen is maatgevend (zie paragraaf 6.3.2.1).
- B. De sterkte van de bodembescherming is maatgevend (zie paragraaf 6.3.2.2).
- C. Op voorhand is het maatgevende deelfaalmechanisme niet bekend (zie paragraaf 6.3.2.3).

6.3.2.1 Kombergend vermogen is maatgevend

Indien sprake is van een (zeer) kleine kom en het is aantoonbaar dat bij instroming de binnenwaterstand zonder problemen de buitenwaterstand kan volgen, dan is het kombergend vermogen maatgevend. In dat geval zal bij het falen van de sluiting de binnenwaterstand zonder erosie van de bodembescherming kunnen oplopen tot het kritieke binnenpeil. Bij overschrijding hiervan treden vervolgens grote gevolgen op.

In deze situatie is in Riskeer de komberging te modelleren door voor de binnenwaterstand direct het kritieke binnenpeil in te voeren. Vervolgens wordt in Riskeer het faalmodel voor komberging uitgeschakeld door onrealistisch grote waarden voor het kombergend oppervlak en de toelaatbare peilstijging in te voeren. Deze waarden dienen dusdanig groot te zijn dat het deelfaalmechanisme-model geen significante bijdrage aan de faalkans meer levert. Ten slotte

dient voor het kritieke debiet voor de bodembescherming een (zeer) kleine waarde (bijvoorbeeld $0,01 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$; de kleinst mogelijke waarde die in Riskeer ingevoerd kan worden) te worden ingevoerd, omdat elke instroming die nog plaatsvindt bij het bereiken van het kritiek binnenpeil tot falen zal leiden. Een kwantitatieve onderbouwing van de parameters is in dit geval niet benodigd. Volstaan kan worden met een kwalitatieve onderbouwing van de gekozen werkwijze.

6.3.2.2 Sterkte bodembescherming is maatgevend

Indien sprake is van een zeer grote komberging, waarbij het instromende debiet verhoudingsgewijs dusdanig klein is dat de binnenwaterstand nauwelijks wordt beïnvloed door het instromende debiet, zal de bodembescherming maatgevend zijn. In dat geval wordt het verval over het kunstwerk tijdens een hoogwatersituatie steeds groter en daarmee ook de optredende stroomsnelheid ter plaatse van de bodembescherming.

De bovenstaande situatie kan gemodelleerd worden door voor het kombergend vermogen hele grote waarden in te voeren die niet direct kwantitatief hoeven te worden onderbouwd. Hiermee wordt dit deelfaalmechanisme niet maatgevend. Voor de bodembescherming dient gewerkt te worden met sterkteparameters die de sterkte van de bodembescherming realistisch beschrijven. Middels de uitkomsten van de analyse met Riskeer dient achteraf geverifieerd te worden of bovenstaand uitgangspunt met betrekking tot het niet maatgevend zijn van de komberging gerechtvaardigd is. Indien dit niet het geval is, moeten de waarden voor de komberging worden aangepast, totdat dit wel het geval is.

6.3.2.3 Maatgevend deelfaalmechanisme is op voorhand niet bekend

Indien het maatgevende deelfaalmechanisme op voorhand niet te onderbouwen is, dient voor zowel de komberging als de sterkte van de bodembescherming de normale schematisering te worden doorlopen met realistische waarden voor haar parameters.

6.3.3 *Schematisering bodembescherming*

Om de sterkte van de bodembescherming in Ringtoets te kunnen invoeren dient er enige pre-processing plaats te vinden buiten Ringtoets om. Naast een kritiek debiet per strekkende meter, dat gerelateerd is aan de waterdiepte aan de binnenzijde en de kritieke stroomsnelheid van de bodembescherming, moet ook een stroomvoerende breedte worden ingevoerd. De volgende stappen worden genomen om Riskeer te voeden met de diverse parameters. Opgemerkt wordt dat onderstaande stappen voornamelijk geënt zijn op het model voor de lage drempel en de verdronken koker (zie paragrafen 6.3.1 en 7.3.7). Voor het model voor een verticale wand kan een andere benadering nodig zijn omdat hierbij sprake is van een overstortende waterstraal. Hiervoor wordt verwezen naar paragraaf 7.4.1.

- I. Bepaal de locaties waar de bodembescherming verandert of waar significante overgangen van het doorstroomprofiel optreden.

De bodembescherming strekt zich uit over meerdere meters achter een kunstwerk. Aangezien het doorstroomprofiel achter een kunstwerk kan variëren door de aanwezigheid van vleugelwanden en het profiel van de achterliggende watergang, kan op verschillende locaties van de bodembescherming een analyse worden uitgevoerd. Voorbeelden van belangrijke locaties zijn:

- De aansluiting direct tussen bodembescherming en constructie van het kunstwerk.
- De aansluiting van bodembescherming op grond achterliggende watergang.
- Overgangen tussen verschillende typen bodembescherming.

Elke locatie kan een andere kritieke stroomsnelheid bezitten (als de bodembescherming tenminste varieert over de lengte ervan) en/of een andere stroomvoerende breedte.

- II. Bepaal per locatie de kritieke stroomsnelheid [m/s].
De sterkte van de bodembescherming wordt in eerste instantie bepaald door de kritieke stroomsnelheid. Dat is de stroomsnelheid waarbij er doorgaande erosie van de bodembescherming optreedt. Deze kritieke stroomsnelheid dient buiten Riskeer te worden bepaald. Hierbij kan gebruik worden gemaakt van de diverse modellen ((Izbash, Shields, Pilarczyk) die in de literatuur beschikbaar zijn om de sterkte van bodembeschermingen te bepalen. Voor meer informatie wordt verwezen naar *Achtergrondrapport bepaling kritiek overslag-/overloop-/instroomdebiet bij kunstwerken* [4].
- III. Bepaal per locatie het kritieke debiet per strekkende meter [m³/s/m].
Door vermenigvuldiging van de kritieke stroomsnelheid met de waterhoogte aan de binnenzijde wordt het kritieke debiet voor de bodembescherming gevonden. Ook deze berekening dient buiten Riskeer plaats te vinden.
- IV. Bepaal per locatie de stroomvoerende breedte van de bodembescherming [m].
Per locatie van de bodembescherming kan de stroomvoerende breedte anders zijn. Deze dient dus per locatie te worden bepaald, waarbij rekening wordt gehouden met het verloop van de achterliggende watergang, het stromingsbeeld van het instromende debiet en eventuele vleugelwanden.
- V. Bepaal per locatie het totale kritieke debiet [m³/s].
Deze stap kan worden overgeslagen indien slechts op één locatie de bodembescherming wordt beschouwd.
Door vermenigvuldiging van het kritieke debiet per strekkende meter met de stroomvoerende breedte wordt het totale kritieke debiet per locatie bepaald. Deze berekening dient buiten Riskeer te worden uitgevoerd. Uiteindelijk dient de q_c die hoort bij de kleinste waarde van het totale kritieke debiet, te worden ingevoerd in Riskeer.

Nadat de bodembescherming is geërodeerd, hoeft de ontgroning nog niet direct te leiden tot het falen van het kunstwerk. Dit kan in Riskeer worden ingebracht middels een parameter 'kans bezwijken kunstwerk als gevolg van erosie bodem' (zie paragraaf 7.2). Handvatten voor toepassing van deze parameter worden in de genoemde paragraaf gegeven. Uitgangspunt is dat in de *gedetailleerde toets* altijd een waarde van '1' voor deze parameter wordt ingegeven. Aanscherpingen vinden in principe alleen in de *toets op maat* plaats, tenzij een aanscherping eenvoudig (kwalitatief) is te onderbouwen.

6.3.4 Schematisering komberging

De komberging wordt in Riskeer gemodelleerd door waarden op te geven voor het kombergend oppervlak, de toelaatbare peilstijging en de duur van de hoogwatergolf. Geadviseerd wordt de schematisering in eerste instantie globaal uit te voeren, waarbij het wel duidelijk is dat het een conservatieve benadering is.

Het kombergend oppervlak en de toelaatbare peilstijging kunnen direct worden verkregen uit de gegevensinzameling (zie paragraaf 4.5). Met betrekking tot schematisering van de situatie wordt verwezen naar de specifieke parameterbeschrijving in paragraaf 7.3.

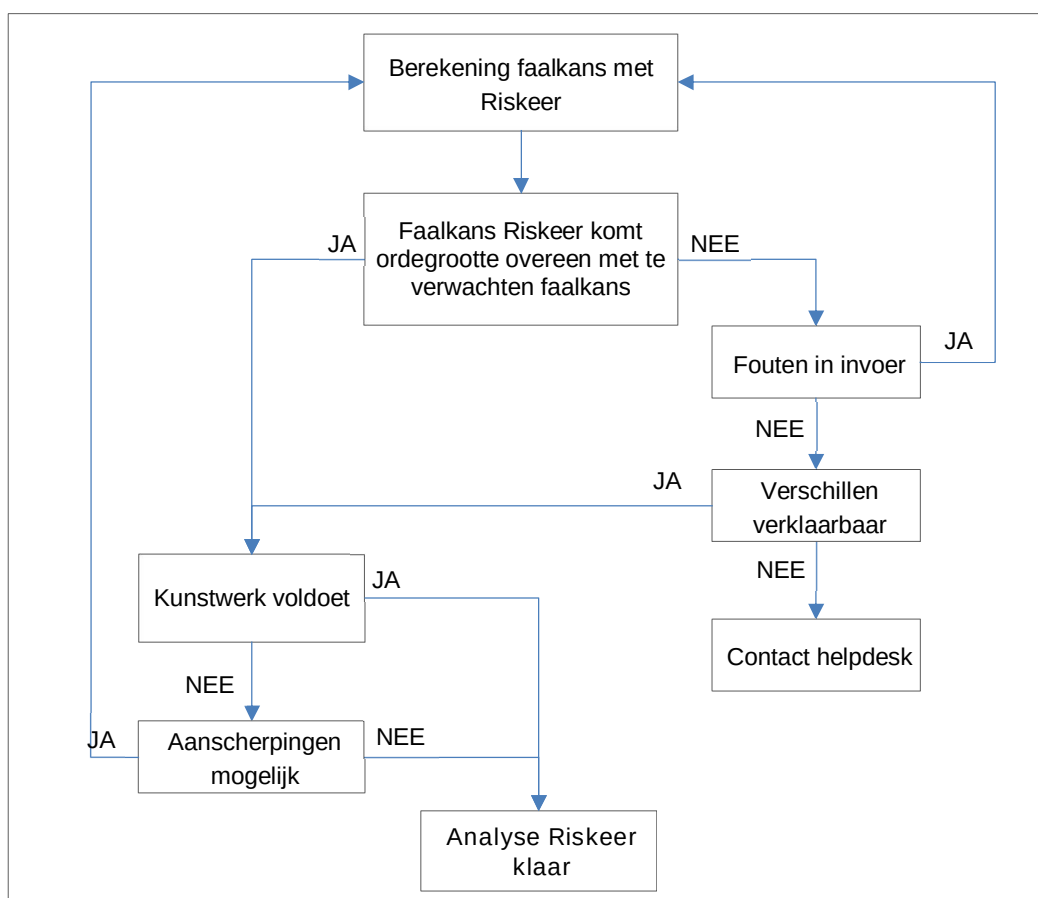
6.4 Analyse van de uitkomsten

Nadat Riskeer is gevoed met de juiste parameters kan een faalkans worden uitgerekend. In het schema in Figuur 6-4 is aangegeven welke stappen genomen kunnen worden nadat een berekening met Riskeer is uitgevoerd. Hieronder volgt een toelichting.

Bij het toetsspoor *betrouwbaarheid sluiting kunstwerk* wordt aanbevolen altijd een eenvoudige handsom te maken om de verwachte faalkans te berekenen. Een groot verschil tussen de

faalkans uit Riskeer en de verwachte faalkans kan duiden op de aanwezigheid van fouten. De verwachte faalkans is die faalkans die op basis van de invoer mag worden verwacht. Bij onverwachte uitkomsten kunnen onder andere de volgende vragen worden gesteld:

- Is de juiste invoer in Riskeer opgegeven? Dit kan betrekking hebben op bijvoorbeeld een typefout.
- Voldoen de uitkomsten van betrokken parameters nog wel aan de toepassingsvoorwaarden van het gekozen instroommodel (zie paragraaf 6.3.1)?
- Zijn de waarden van stochastische variabelen in het ontwerppunt van de faalkansberekening conform verwachting? Als dit niet zo is, kan dit duiden op bijvoorbeeld non-convergentie van de probabilistische berekening¹⁰.



Figuur 6-4 Analyse uitkomsten berekening Riskeer

Als fouten zijn geconstateerd, moeten deze worden hersteld en moet opnieuw een berekening met Riskeer worden uitgevoerd.

Indien het verschil verklaarbaar is na nadere analyse van de faalkans en de waarden in het berekende ontwerppunt, dan kan het normale proces weer worden gevolgd. Als het verschil niet kan worden verklaard, kan contact worden opgenomen met de Helpdesk Water.

¹⁰ Een andere indicatie van het niet convergeren van een analyse in Ringtoets is het bekijken van de waarde van de Z-functie in het ontwerppunt. Deze waarde is bij een geconvergeerde som gelijk aan 0. Wanneer geen convergentie heeft plaatsgevonden wijkt de waarde substantieel af van 0. Hoe het ontwerppunt in Ringtoets kan worden bekeken kan in de handleiding van Ringtoets worden teruggevonden.

Indien de berekende faalkans correct is berekend en de berekende faalkans leidt niet tot het oordeel 'voldoet aan de ondergrens en mogelijk aan de signaleringswaarde' (categorie III_v) of beter dan kan in de gedetailleerde toets middels aanscherpingen getracht worden om de faalkans nader te bepalen. Wanneer aanscherpen in de gedetailleerde toets niet meer mogelijk is, is het resultaat van deze gedetailleerde toets dat het kunstwerk niet voldoet aan de ondergrens en mogelijk aan de signaleringswaarde (categorie IV_v of lager) ten aanzien van overslag en/of overloop. De beoordeling dient dan vervolgd te worden met een toets op maat. Indien het oordeel III_v is wordt eveneens aanbevolen om te verkennen of aanscherping mogelijk is, hetzij via de gedetailleerde toets dan wel via een toets op maat.

7. Overzicht parameters per deelfaalmechanisme

Dit hoofdstuk geeft aanwijzingen voor de waardebepaling van de relevante parameters. Per parameter wordt aangegeven wat de parameter precies inhoudt, hoe de waarde kan worden bepaald, wat aandachtspunten zijn et cetera. Daarnaast wordt een voorbeeld gegeven.

Indien het aantal doorstroomopening (n) groter is dan één en er een bepaalde mate van afhankelijkheid van falen tussen doorstroomopening is, wordt aanbevolen om een analyse buiten Ringtoets uit te voeren. Een toelichting en voorbeeld hiervoor is opgenomen in bijlage Fout! Verwijzingsbron niet gevonden..

7.1 Overzichtstabel parameters

Per modelparameter wordt in onderstaande tabel 7-1 een aantal standaardgegevens gepresenteerd. Voor de duiding van de gegeven parameterwaarden voor het gemiddelde μ en de standaardafwijking σ / variatiecoëfficiënt V_r is de indeling gebruikt die in paragraaf 4.1 van de Handleiding Datamanagement [9] en de parameterlijst is beschreven (zie ook Tabel 1-1):

Tabel 7-1 Waarden behorende bij de statistische gegevens voor de relevante parameters

Symbol	Eenheid	Type	μ	V_r of σ	Groep	Δ_x	p_x	Δ_t	p_t	Paragraaf
$P_{r,kw erosie}$	[-]	det	1,0	-	2(μ)	-	1	-	1	7.2.1
m_{kom}	[-]	logn	1,0	$\sigma=0,20$	1(μ) en 1(σ)	-	0	-	1	7.3.1
A_{kom}	[m ²]	logn	Invoer	$V_r=0,10$	4(μ) en 2(V_r)	-	0	-	1	7.3.2
Δh_{kom}	[m]	logn	Invoer	$\sigma=0,10$	4(μ) en 2(σ)	-	0	-	1	7.3.3
m_{in}	[-]	det	1,0	-	1(μ)	-	-	-	1	7.3.4
$f_{is open}$	[-]	det	1,0	-	2(μ)	-	-	-	1	7.3.5
t_s	[uur]	logn	6,0	$V_r=0,25$	2(μ) en 1(V_r)	-	1	-	0	7.3.6
ψ_{kw}	[°]	det	invoer	-	4(μ)	-	0	-	1	7.3.7.1
B	[m]	nor	invoer	$\sigma=0,05$	4(μ) en 2(σ)	-	0	-	1	7.3.7.2
m_{ol}	[-]	nor	1,1	$\sigma=0,05$	2(μ) en 1(σ)	-	0	-	1	7.3.7.3
m_{os}	[-]	logn	0,09	$\sigma=0,06$	1(μ) en 1(σ)	-	0	-	1	7.3.7.4
$h_{kr,NS}$	[m+NAP]	nor	invoer	$\sigma=0,05$	4(μ) en 2(σ)	-	0	-	1	7.3.7.5
m_{vl}	[-]	nor	0,9	$\sigma=0,05$	1(μ) en 1(σ)	-	0	-	1	7.3.7.6
h_{bi}	[m+NAP]	nor	Invoer	$\sigma=0,10$	4(μ) en 2(σ)	-	0	12uur	0	7.3.7.7
h_{dr}	[m+NAP]	nor	Invoer	$\sigma=0,10$	4(μ) en 2(σ)	-	0	-	1	7.3.7.8
μ	[-]	logn	1,0	$\sigma=0,20$	2(μ) en 2(σ)	-	0	-	1	7.3.7.9
A	[m ²]	nor	Invoer	$\sigma=0,01$	4(μ) en 2(σ)	-	0	-	1	7.3.7.10
q_c	[m ³ /s/m]	logn	Invoer	$V_r=0,15$	4(μ) en 2(V_r)	-	0	-	1	7.4.1
B_{sv}	[m]	logn	Invoer	$\sigma=0,05$	4(μ) en 2(σ)	-	0	-	1	7.4.2
P_{open}	[-]	det	Invoer	-	4(μ)	-	-	-	-	7.5.1
P_{ns}	[-]	det	Invoer	-	4(μ)	-	-	-	0	7.5.2
n	[-]	det	Invoer	-	4(μ)	-	-	-	-	7.5.3
$P_{r,herstel}$	[-]	det	1,0	-	2(μ)	-	-	-	-	7.6.1

In tabel 7-2 zijn de statistische parameters die gebruikt zijn in tabel 7-1 nader toegelicht. In bijlage C is bovenstaande tabel nog uitgebreid met naamgeving en verwijzing naar benamingen van invoer in Riskeer.

Tabel 7-2 Toelichting gegevens vermeld bij parameters in tabel 7-1

Gegeven	Toelichting
type	Geeft aan of de parameter een stochastische variabele is of een deterministische variabele. Indien het een stochastische variabele is wordt het type kansverdeling aangegeven. De volgende aanduidingen kunnen voorkomen: det deterministische variabele nor normale verdeling logn lognormale verdeling
μ	Gemiddelde waarde van de parameter. Indien de parameter een deterministische variabele is, is dit de deterministische waarde. Indien deze parameter geen standaardwaarde kent, wordt dit aangegeven middels het woordje 'invoer', anders wordt de standaardwaarde vermeld. Opletten: Bij een lognormale verdeling heeft de gemiddelde waarde betrekking op de lognormale verdeling zelf en niet op de onderliggende normale verdeling zoals dat bijvoorbeeld in Excel het geval is.
V_r of σ	Variatiecoëfficiënt of standaardafwijking van de parameter. Alleen van toepassing bij een stochastische variabele. Er zijn standaardwaarden gegeven. Deze mogen alleen worden aangepast indien dit wordt onderbouwd. Opletten: Bij een lognormale verdeling heeft de spreiding betrekking op de lognormale verdeling zelf en niet op de onderliggende normale verdeling zoals dat bijvoorbeeld in Excel het geval is.
Δ_x	Correlatielengte voor de ruimtelijke spreiding. Omdat kunstwerken worden gemodelleerd als puntobjecten, is hier voor stochastische variabelen die betrekking hebben op het beschouwde kunstwerk geen waarde ingevuld. Dit kan niet door gebruiker worden aangepast.
ρ_x	Ondergrens van de correlatiecoëfficiënt met betrekking tot ruimtelijke spreiding. De waarde kan niet door gebruiker worden aangepast.
Δ_t	Correlatietijdsduur voor variaties in de tijd. De waarde kan niet door de gebruiker worden aangepast
ρ_t	Ondergrens van de correlatiecoëfficiënt met betrekking tot variaties in de tijd. De waarde kan niet door gebruiker worden aangepast

7.2

Deelfaalmechanisme Z12: kans bezwijken kunstwerk als gevolg van erosie bodem
De kans op bezwijken van het kunstwerk als gevolg van het eroderen van de bodem wordt in het WBI 2017 geschematiseerd middels de parameter *Faalkans gegeven erosie bodem* ($P_{f,kw|erosie\ bodem}$). Voordat dit deelfaalmechanisme op kan treden, moet het deelfaalmechanisme Z₂₂ *Falen bodembescherming achter constructie* zijn opgetreden. Dit deelfaalmechanisme wordt in paragraaf 7.4 besproken.

De faalfunctie voor het bezwijken van het kunstwerk als gevolg van erosie van de bodem is:

$$Z = -\Phi^{-1}\left(P_{f,kw|erosie\ bodem}\right) - u \quad 7-1$$

Waarin:

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

De parameter u in de bovenstaande faalfunctie is een stochastische hulpparameter, die niet ingevuld hoeft te worden. Middels deze hulpparameter wordt de kans $P_{f,kw|erosie\ bodem}$ op de juiste wijze meegenomen in een probabilistische berekening.

7.2.1

Faalkans gegeven erosie bodem

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r / σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
$P_{f,kw erosie\ bodem}$	[-]	det	1,0 ²	-	-	1	-	1

¹ Vaste waarde

² Defaultwaarde of aanbevolen waarde

³ Startwaarde

⁴ Vrije waarde

(zie Tabel 1-1)

De faalkans gegeven erosie bodem ($P_{f,kw|erosie\ bodem}$ [-]) is de kans op het bezwijken van het kunstwerk als gevolg van het eroderen van de bodem nadat de bodembescherming is bezweken. Deze faalkans is voor het toetsspoor *betrouwbaarheid sluiting kunstwerk* een deterministische variabele: gerekend moet worden met de verwachtingswaarde μ .

Hoe te bepalen

De standaardwaarde voor de parameter is 1,0. Dit impliceert dat bij doorgaand eroderen van de bodembescherming ook zeker sprake zal zijn van dusdanige erosie van de bodem dat het kunstwerk uiteindelijk zal falen.

Aanbevolen wordt om in de gedetailleerde toets in eerste instantie de standaardwaarde van 1,0 te hanteren. Dit past binnen de filosofie van het WBI 2017 om van grof naar fijn te werken. Een waarde van 1,0 is een conservatieve waarde die impliceert dat er geen reststerkte is.

Indien aanscherping van de waarde gewenst is, bijvoorbeeld omdat de erosie van de bodem(bescherming) substantieel bijdraagt aan de faalkans, worden hieronder enkele aandachtspunten gegeven. Ze zijn meestal alleen relevant voor de *toets op maat*. Middels deze aandachtspunten is het wellicht mogelijk om buiten het instrumentarium om (preprocessing) een nadere bepaling van de waarde van de parameter te onderbouwen. Opgemerkt wordt dat niet voor elk deelproces behorende bij het bezwijken van het kunstwerk als gevolg van erosie van de bodem, ook modellen beschikbaar zijn die een kwantitatieve waarde opleveren. Er kan dus ook sprake zijn van een kwalitatieve benadering. De hieronder gegeven aandachtspunten zijn niet uitputtend.

- Indien de fundatie van het kunstwerk aan de binnenzijde van de waterkering geheel met damwanden is omgeven (bijvoorbeeld als gevolg van bouwen op onderwaterbetonvloer) is het instabiel worden van het kunstwerk als gevolg van ontgrondingskuilen niet direct te verwachten. Een waarde van 0,01¹¹ voor $P_{f,kw|erosie\ bodem}$ kan dan ook in de *gedetailleerde toets* al worden toegepast.
- Bepalen van locatie en afmetingen (breedte en diepte) van de ontgrondingskuilen als bekend is welke grondsoort aanwezig is. Indien dit niet bekend is, kan een conservatieve schatting worden gemaakt. De afmetingen van ontgrondingskuilen kunnen bijvoorbeeld aan de hand van de modellen in het handboek 'Ontwerp van schutsluizen' [13] worden bepaald. Indien de afmetingen zeer beperkt zijn, is de invloed op de stabiliteit van het kunstwerk vermoedelijk ook klein. Een waarde tussen 1,0 en 0,01 voor $P_{f,kw|erosie\ bodem}$ is dan wellicht verdedigbaar. De keuze hangt af van de diepte van de berekende ontgrondingskuil, de afstand uit het kunstwerk en de opbouw van (met name) de fundatie van het kunstwerk.
- Bepalen van de opbouw van de constructie. Het gaat hierbij vooral om de fundatiewijze van het kunstwerk en de aanwezigheid van damwandschermen ter plaatse van de overgang van betonwerk naar bodembescherming. Bij de aanwezigheid van een in relatie tot de diepte van een mogelijke ontgrondingskuil lang damwandscherm, welke niet als draagkrachtig fundatie-element fungeert, kan de invloed van eventuele ontgrondingskuilen zeer beperkt zijn. De horizontale stabiliteit is in de meeste gevallen niet direct afhankelijk van het grondlichaam dat aan de uiteinden van de bodem van het kunstwerk hier tegenaan drukt, maar meer van bodem- en wandwrijvingen en specifieke funderingselementen. Een damwandscherm kan voorkomen dat erosie onder de vloerconstructie van het kunstwerk ontstaat, wat in eerste instantie de verticale draagkracht kan beïnvloeden. Bij de aanwezigheid van lange schermen, relatief ten opzichte van de afmetingen van optredende ontgrondingskuilen, is een waarde voor $P_{f,kw|erosie\ bodem}$ van 1,0 tot 0,01 aannemelijk. Deze waarde kan moeilijk kwantitatief worden onderbouwd. De onderbouwing zal dus

¹¹ Deze waarde is niet meer dan een educated guess; nadere onderbouwing ontbreekt

overwegend moeten plaatsvinden op basis van een 'educated guess' aan de hand van een beschrijving van het bezwijkproces.

- Indien het kunstwerk uit meerdere delen bestaat (bijvoorbeeld instroomwerk, leiding, uitstroomwerk) kan worden bekeken of het bezwijken van bijvoorbeeld het binnendijs gelegen in- of uitstroomwerk, leidt tot het bezwijken van het gehele kunstwerk dan wel de waterkering en daarmee tot het ontstaan van een bres. Indien bijvoorbeeld alleen het instroomwerk bezwijkt, maar verdere aantasting van het kunstwerk dan wel de waterkering kan worden uitgesloten of niet tot bresvorming leidt, is een waarde voor $P_{f,kw|erosie\ bodem}$ kleiner dan 1,0 verdedigbaar. Ook hier zal onderbouwing dus overwegend moeten plaatsvinden op basis van een 'educated guess' aan de hand van een beschrijving van het bezwijkproces.

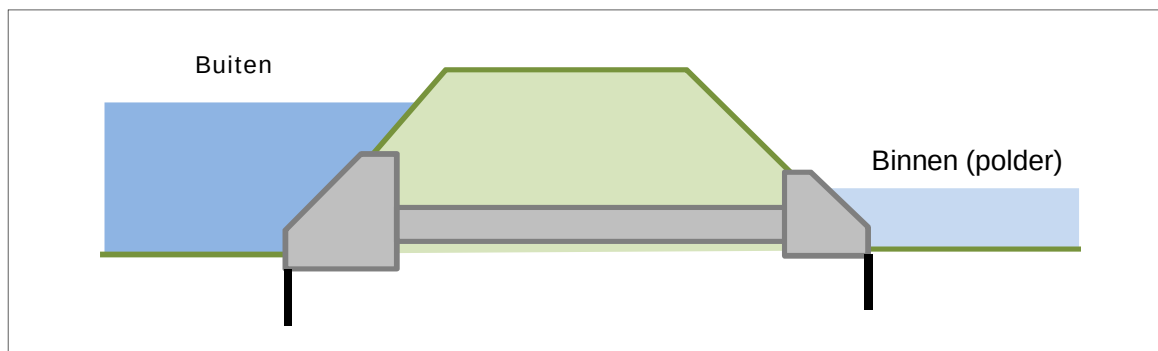
Aandachtspunten

Bij het bepalen/schatten van de kans op bezwijken kunstwerk als gevolg van erosie van de bodem zijn de volgende aandachtspunten van belang:

- Het optreden van ontgrondingskuilen kan niet alleen direct van invloed zijn op de stabiliteit van een (onderdeel van een) kunstwerk, maar ook de kans op onderloopsheid vergroten. Immers een kuil kan invloed hebben op de aanwezige kwelweglengte. Dit speelt vooral in die situaties dat na het aanvankelijk niet sluiten van een kunstwerk (waardoor erosie bodembescherming en ontstaan ontgrondingskuilen), het kunstwerk alsnog gesloten kan worden. Met een combinatie van erosie van instromende water en onderloopsheid hoeft in de toets geen rekening te worden gehouden. Na het ongewenst openstaan van een kunstwerk dient de beheerder wel een onderzoek naar de schade in te stellen, zodat eventuele aanvullende risico's ten aanzien van onder andere onderloopsheid kunnen worden verholpen.
- Het ontstaan van erosiekuilen is afhankelijk van de optredende stroomsnelheid. Gedurende een hoogwatergolf kan de stroomsnelheid in de tijd variëren, omdat bijvoorbeeld door een stijgende buitenwaterstand het verval tussen binnen en buiten toeneemt. Met deze tijdsafhankelijkheid kan bij de bepaling van de ontgrondingskuilen rekening worden gehouden, maar in een eerste grove benadering kan aan de buitenzijde worden uitgegaan van een niet variërende waterstand, behorend bij de toelaatbare kans op overstroming. Als aanscherping kan het werkelijke verloop van de hoogwatergolf op het overslag-/overloopdebiet in rekening gebracht worden. Hierbij wordt de hoogwatergolf opgedeeld in tijdsperioden en kan de groei van de ontgrondingskuil bij de diverse tijdsperioden bepaald worden.
- Niet alle aspecten van de onderbouwing van een waarde voor $P_{f,kw|erosie\ bodem}$ kunnen kwantitatief worden onderbouwd. Kwalitatieve onderbouwing speelt ook een rol. Hierbij is inzicht in constructies en (faal)mechanismen vereist.

Voorbeeld

Bij een uitwateringssluuis bestaande uit een instroomwerk, een leiding en een uitstroomwerk is de sluiting gefaald. Als gevolg hiervan stroomt er ongewenst water de polder in.



Figuur 7-1 Globale schets van doorsnede dijk met uitwateringssluis

Onder zowel het instroom- als het uitstroomwerk is een damwandscherm aanwezig. De lengte hiervan bedraagt in beide gevallen 3 m.

De volgende gegevens zijn nog voorhanden:

- Bij een buitenwaterstand met een overschrijdingskans gelijk aan de overstromingskansnorm treedt een verval op van 2,0 m.
- De stroomsnelheid ter plaatse van de bodem aan de binnenzijde als gevolg van dit verval bedraagt 2,0 m/s.
- De bodem bestaat uit zand met een kritieke stroomsnelheid van 0,5 m/s.
- De waterdiepte boven de bodem aan de binnenzijde is 2 m (d_{bin}).
- De relatieve dichtheid van het zand (Δ) = $(\rho_{zand} - \rho_{water}) / \rho_{water} = (2650 - 1000) / 1000 = 1,65$.
- Coëfficiënt voor invloed turbulentie (α) = 2.
- Uit een constructieve analyse is gebleken dat de kans dat het scherm onderuit gaat of grote krachten op het instroomwerk gaat uitoefenen groot is bij een ontgronding van 1,5 meter. Dit leidt tot een grote kans op ernstige ondermijning van het instroomwerk, wat vervolgens weer kan leiden tot bresvorming.

Met behulp van de formules 16.31a en 16.31b uit [13]¹² kan worden benaderd wanneer de ontgrondingskuil een diepte heeft van 1,5 m:

$$y_{max} = h \cdot (t / t_1)^{0,38}$$

$$t_1 = 330 \cdot \Delta^{1,7} \cdot h_{bin}^2 \cdot (\alpha \cdot u - u_{kr})^{-4,3}$$

Waarin:

y_{max}	Maximum-kuildiepte na tijd t [m].
h	Waterdiepte boven initiële bodemligging [m].
t_1	Tijd waarop maximum-kuildiepte gelijk is aan waterdiepte ($y_{max} = h_{bin}$) [m].
u	Over de verticaal gemiddelde stroomsnelheid [m/s].
α	Coëfficiënt voor invloed turbulentie [-] = $1,5 + 5 r$ (bijv.) [-].
r	Relatieve turbulentie-intensiteit [-].
Δ	Relatieve dichtheid [-] = $(\rho_{zand} - \rho_{water}) / \rho_{water} = (2650 \text{ kg/m}^3 - 1000 \text{ kg/m}^3) / 1000 \text{ m}^3 = 1,65$ [-].

¹² Bij het toepassen van formules omtrent ontgrondingskuilen is het van belang dat aandacht geschonken wordt aan het geldigheidsgebied van deze formules. Dit om onrealistische waarden te voorkomen.

u_{kr} Kritieke stroomsnelheid bodemmateriaal [m/s].

Invullen levert:

$$t_1 = 330 \cdot \Delta^{1,7} \cdot h_{bin}^2 \cdot (\alpha \cdot u - u_{kr})^{-4,3} = 330 \cdot 1,65^{1,7} \cdot 2^2 \cdot (2 \cdot 2,0 - 0,5)^{-4,3} = 14,1 \text{ uur}$$

$$y_{\max} = h \cdot (t / t_1)^{0,38} \Rightarrow t = t_1 \cdot (y_{\max} / h)^{2,63} = 14,1 \cdot (1,5 / 2)^{2,63} = 6,6 \text{ uur}$$

Bovenstaande impliceert dat in 6,6 uur tijd er een ontgrondingskuil met een diepte van 1,5 m kan ontstaan. Voor delen van het bovenrivierengebied kunnen pieken van hoogwatergolven langer dan 6,6 uur aanhouden. Indien dit kunstwerk daar gelegen is, kan op basis van bovenstaande beschouwing de standaardwaarde van $P_{f,kw|erosie \text{ bodem}}$ niet aangepast worden. In getijdegebieden is het discutabel of de kans op bezwijken bij deze gegevens naar beneden bijgesteld kan worden. Maar stel nu dat het scherm 5 m lang is en het kunstwerk in het benedenrivierengebied gelegen is, dan is de kans op bezwijken van het uitstroomwerk aanzienlijk kleiner. Een waarde van bijvoorbeeld 0,1 voor $P_{f,kw|erosie \text{ bodem}}$ is dan verdedigbaar als een eerste, conservatieve schatting.

7.3

Deelfaalmecanisme Z21: overschrijden bergend vermogen

De kans dat het aanwezige bergend vermogen niet toereikend is om het totale instromende volume tijdens een hoogwatergolf te bergen in het achterliggende systeem, zonder dat dit tot significante gevolgen leidt, wordt bepaald door de volgende parameters. Deze parameters worden vervolgens besproken:

- Modelfactor kombergend vermogen (m_{kom}).
- Kombergend oppervlak (A_{kom}).
- Kritieke peilverhoging komberging (Δh_{kom}).
- Modelfactor instromend volume (m_{in}).
- Factor voor stormduur gegeven geopend kunstwerk ($f_{ts|open}$).
- Stormduur (t_s).
- Instromend debiet ($Q_{in|open}$).

De eerste 3 parameters betreffen de 'sterkte' van het systeem. Ze bepalen het maximaal aanwezige volume aan kombergend vermogen in het achterland, waarbij nog niet geen significante gevolgen optreden (V_c). Het maximaal aanwezige kombergend volume V_c is gedefinieerd als:

$$V_c = m_{kom} \cdot A_{kom} \cdot \Delta h_{kom} \quad 7-2$$

De laatste 4 parameters betreffen de 'belasting' van het systeem. Zij bepalen het instromend volume als gevolg van het niet-gesloten zijn van het kunstwerk gedurende een hoogwaterperiode ($V_{instroom}$). Het maximaal instromend volume $V_{instroom}$ is gedefinieerd als:

$$V_{instroom} = m_{in} \cdot f_{ts|open} \cdot t_s \cdot Q_{in|open} \quad 7-3$$

De Z-functie voor het bezwijken als gevolg van niet sluiten en vervolgens een tekort aan kombergend vermogen is nu:

$$Z = V_c - V_{instroom} = m_{kom} \cdot A_{kom} \cdot \Delta h_{kom} - m_{in} \cdot f_{ts|open} \cdot t_s \cdot Q_{in|open} \quad 7-4$$

Belangrijk aandachtspunt is dat het kombergingsmodel in de volgende situaties niet toegepast hoeft te worden en wordt komberging op een andere wijze meegenomen:

- De komberging is relatief beperkt en bij instroming kan de binnenwaterstand met de buitenwaterstand meelopen zonder dat dit tot stabiliteitsverlies van het kunstwerk leidt.
- Het kunstwerk betreft een coupure in bebouwd gebied. Instroming van water door de ongewenst geopende coupure leidt direct tot water op straat.
- Het kombergend vermogen is relatief groot ten opzichte van het instromende debiet. In dat geval neemt de binnenwaterstand als gevolg van het instromende debiet zeer langzaam toe en is het verval over het kunstwerk daarmee geheel afhankelijk van de buitenwaterstand. Bij stijgende buitenwaterstand neemt het verval toe en daarmee ook de stroomsnelheid van het water door het kunstwerk. In deze situatie kan op voorhand al worden bepaald dat de sterkte van de bodembescherming maatgevend zal zijn. Een tekort aan komberging zal dan geen bijdrage aan de overstromingskans hebben.

Het kombergingsmodel kan in bovenstaande gevallen worden gevuld met dusdanig hoge waarden, dat de faalkansbijdrage van het kombergingsmodel in Riskeer verwaarloosbaar klein wordt. In de eerste twee gevallen wordt de komberging dan impliciet gemodelleerd via de binnenwaterstand en het model van het kritieke instromende debiet. In het laatste geval wordt komberging geheel niet meegenomen als deelfaalmechanisme en is het kritieke debiet met betrekking tot de bodembescherming op voorhand het maatgevende deelfaalmechanisme.

Het kombergingsmodel in Riskeer werkt met name bij kleinere kombergingen niet altijd optimaal. Indien het kombergingsmodel in Riskeer zorgt voor een onverklaarbare uitkomst (faalkans), wordt aanbevolen contact op te nemen met de Helpdesk Water.

Indien bij een niet gesloten kering de buitenwaterstand waarbij de beschikbare komberging wordt overschreden relatief vaak voorkomt (meer dan eens per 10 jaar), wordt aanbevolen om kennis te nemen van hetgeen hierover in bijlage F is opgenomen.

In het Toetsspoorrapport [16] wordt dieper op de achtergronden van komberging ingegaan.

7.3.1

Modelfactor kombergend vermogen

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r / σ	Δ_x	p_x	Δ_t	p_t
m_{kom}	[-]	logn	1,0 ¹	$\sigma=0,20$ ¹	-	0	-	1

¹ Vaste waarde

² Defaultwaarde of aanbevolen waarde

³ Startwaarde

⁴ Vrije waarde

(zie Tabel 1-1)

De *modelfactor kombergend vermogen* (m_{kom} [-]) is de modelfactor die de onzekerheden in het model voor de beschikbare komberging in rekening brengt. Verondersteld wordt dat de *modelfactor kombergend vermogen* lognormaal is verdeeld. Die verdeling wordt gekarakteriseerd door de verwachtingswaarde $\mu = 1,0$ [-] en een standaardvariatie $\sigma=0,20$ [-].

Hoe te bepalen

In het instrumentarium is reeds een vaste waarde aanwezig. Zowel het gemiddelde als de standaardafwijking kunnen niet worden aangepast.

Aandachtspunten

n.v.t.

Voorbeeld

n.v.t.

7.3.2 *Kombergend oppervlak*Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r / σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
A_{kom}	[m ²]	logn	Invoer ⁴	$V_r = 0,10$ ²	-	0	-	1

¹ Vaste waarde² Defaultwaarde of aanbevolen waarde³ Startwaarde⁴ Vrije waarde

(zie Tabel 1-1)

Het *kombergend oppervlak* (A_{kom} [m²]) is het oppervlak dat beschikbaar is voor komberging. Meestal is dit het oppervlak van het achter het kunstwerk liggende watersysteem, maar het kan ook een oppervlak van een gebied zijn. Verondersteld wordt dat het *kombergend oppervlak* lognormaal is verdeeld. Die verdeling wordt gekarakteriseerd door een verwachtingswaarde μ en een variatiecoëfficiënt $V_r = 0,10$ [-]. De verwachtingswaarde moet worden opgegeven en de variatiecoëfficiënt is een aanbevolen waarde die kan worden aangepast.

Hoe te bepalen

Afhankelijk van de vormgeving van de beschikbare komberging kan de bepaling zeer eenvoudig zijn, maar ook zeer complex. Het kombergend oppervlak onderhoudt een sterke relatie met de voor komberging beschikbare peilverhoging op het binnenwater Δh_{kom} (zie paragraaf 7.3.3).

Indien het voor komberging beschikbare oppervlak afhankelijk is van de binnenwaterstand, kan een gemiddelde waarde over de beschikbare peilverhoging worden gebruikt. Dit leidt niet tot een theoretisch perfecte waarde, maar gelet op de grofheid van het model is dit vaak acceptabel.

Met betrekking tot de variatiecoëfficiënt wordt aanbevolen deze niet aan te passen.

Aandachtspunten

Met betrekking tot de in te voeren waarde moet rekening worden gehouden met het volgende:

- 1 Toestroming van water vanuit het achterland kan niet specifiek gemodelleerd worden. Deze toestroming kan plaatsvinden onder normaal verval, maar ook via poldergemalen die hun water lozen op de boezem.
- 2 Een kombergend volume kan worden benut door meerdere kunstwerken in een dijktraject. Indien de correlatie met betrekking tot *niet sluiten* groot is tussen deze kunstwerken¹³, kan het nodig zijn om het totaal beschikbare volume te verdelen over deze kunstwerken. Echter geldt bijna altijd dat de correlatie dusdanig beperkt is, dat de kans dat de kunstwerken gelijktijdig niet sluiten verwaarloosbaar klein mag worden verondersteld en dus bij bepaling van het beschikbare kombergend oppervlak geen rekening gehouden hoeft te worden met andere kunstwerken.
- 3 Een kombergend volume kan worden benut door meerdere kunstwerken die behoren tot verschillende dijktrajecten. Hier gelden dezelfde overwegingen als bij het vorige punt.

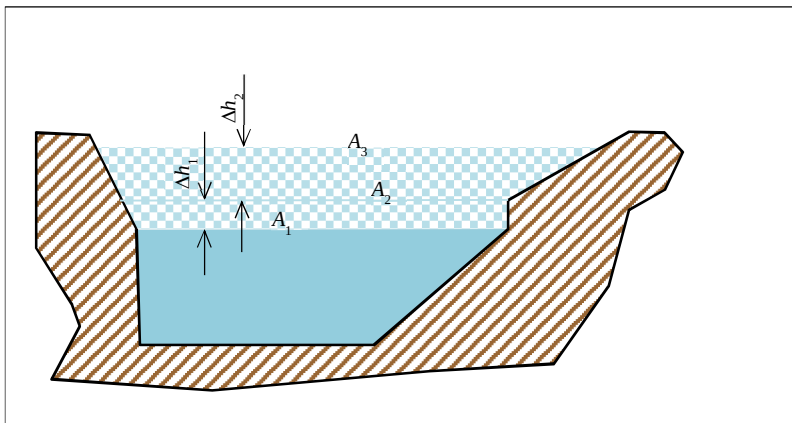
¹³ Bijvoorbeeld kunstwerken die (nagenoeg) identiek zijn met betrekking tot hoogwaterbelastingen, aandrijving en kerende hoogte in niet gesloten toestand.

- 4 Tijdens hoogwater kan het voorkomen dat gemalen worden ingezet om hoogwater te lozen op het buitenwater. Hierdoor komt feitelijk meer kombergend vermogen beschikbaar. Om dit in rekening te brengen dient rekening te worden gehouden met de duur van de hoogwatergolf en de capaciteit van de afvoerende gemalen.

Met bovenstaande punten dient rekening te worden gehouden bij bepaling van het voor een specifiek kunstwerk beschikbare kombergend volume. De standaard werkwijze is dat dit specifiek maken van het kombergend volume uiteindelijk plaatsvindt via het kombergend oppervlak.

Voorbeeld

Achter een keersluis is een watergang aanwezig met de dwarsdoorsnede gegeven in Figuur 7-2. De kritieke peilverhoging Δh_{kom} is gelijk aan $\Delta h_1 + \Delta h_2$. Er zijn drie oppervlakten in de dwarsdoorsnede bepaald, te weten A_1 , A_2 en A_3 .



Figuur 7-2 Schematische weergave dwarsdoorsnede voor voorbeeld

In het dijktraject bevinden zich nog drie kunstwerken die uitkomen op dezelfde watergang. Dit betreft een gemaal dat gedurende hoogwater water uitmaalt (Q_{pomp} m³/s), een schutsluis en nog een keersluis. De schutsluis beschikt over schutdeuren in binnen- en buitenhoofd met een kerende hoogte die ruim groter is dan het kritieke binnenpeil. Tevens is er een stormvloeddeur aanwezig met een kerende hoogte gelijk aan de kruin van de aansluitende dijk. De tweede keersluis betreft eenzelfde soort constructie als het beschouwde kunstwerk, alleen is de breedte van dit kunstwerk tweemaal zo klein. Het beschikbare kombergend volume wordt gedurende een hoogwater ook benut door toestromend water vanuit het achterland met een gemiddelde toevoer van $Q_{achterland}$ m³/s. De totale duur van de hoogwatergolf is gelijk aan t_s .

Het voor het kunstwerk beschikbare volume aan komberging kan met de volgende formule benaderd worden:

$$V_{c,kw} = A_{gem} \cdot \Delta h_{kom} - \sum_{i=1}^{i=n} V_{kw,i} + V_{pompen} - V_{achterland}$$

Waarin:

$V_{c,kw}$	Kombergend vermogen (volume) beschikbaar voor het beschouwde kunstwerk [m ³].
A_{gem}	Het voor komberging gemiddeld beschikbare oppervlak [m ²].
Δh_{kom}	Kritieke peilverhoging komberging (zie paragraaf 7.3.3) [m].
$V_{kw,i}$	Instromend volume door kunstwerk i dat aansluit op dezelfde komberging [m ³].

- n Aantal kunstwerken buiten het beschouwde kunstwerk dat op dezelfde komberging uitkomt [-].
- $V_{\text{achterland}}$ Instromend volume als gevolg van aanvoer vanuit het achterland [m^3].
- V_{pompen} Volume dat gedurende een hoogwater kan worden weggepompt door inzet van bijvoorbeeld aanwezige gemalen of mobiele pompen [m^3].

Rekening houdend met het ter plaatse van toepassing zijnde verloop van de hoogwatergolf (en daarmee de duur van de hoogwatergolf t_s) kan de formule worden omgeschreven naar:

$$V_{c,kw} = A_{\text{gem}} \cdot \Delta h_{\text{kom}} - \sum_{i=1}^{i=n} V_{kw,i} + (Q_{\text{pompen}} - Q_{\text{achterland}}) \cdot t_s$$

De diverse parameters kunnen nu worden uitgewerkt:

A_{gem} Het gemiddelde beschikbare kombergend oppervlak is in dit geval gelijk aan:

$$A_{\text{gem}} = \frac{\frac{1}{2} \cdot (A_1 + A_2) \cdot \Delta h_1 + \frac{1}{2} \cdot (A_2 + A_3) \cdot \Delta h_2}{\Delta h_1 + \Delta h_2} = \frac{A_1 \cdot \Delta h_1 + A_3 \cdot \Delta h_2}{2 \cdot \Delta h_{\text{kom}}} + \frac{A_2}{2}$$

Δh_{kom} Dit is de waarde van de kritieke peilverhoging

n In dit geval gelijk aan 1. Er is namelijk nog één andere keersluis die door één en hetzelfde besturingssysteem als de beschouwde keersluis wordt aangestuurd. In dit voorbeeld wordt ervan uitgegaan dat de faalkans van sluiten voor beide keersluizen geheel gecorreleerd zijn.

$V_{kw,i}$ Het volume dat door de andere keersluis stroomt, zal in het voorbeeld verhoudingsgewijs 2 keer zo klein zijn als het volume door het beschouwde kunstwerk. Het verval over beide objecten is gelijk, waardoor de stroomsnelheid ook gelijk is. Dit betekent dat alleen de breedte van de kunstwerken het verschil in instromend debiet bepaalt. $V_{kw,i}$ is hier daarom gelijk aan $\frac{1}{2} \cdot V_{c,kw}$.

De voor het kunstwerk beschikbare komberging is nu gelijk aan:

$$V_{c,kw} = A_{\text{gem}} \cdot \Delta h_{\text{kom}} - \frac{1}{2} \cdot V_{c,kw} + (Q_{\text{pompen}} - Q_{\text{achterland}}) \cdot t_s$$

$$V_{c,kw} = \frac{2}{3} \cdot \left(A_{\text{gem}} \cdot \Delta h_{\text{kom}} + (Q_{\text{pompen}} - Q_{\text{achterland}}) \cdot t_s \right)$$

Het in te voeren kombergend oppervlak wordt nu:

$$A_{\text{kom}} = \frac{V_{c,kw}}{\Delta h_{\text{kom}}} = \frac{2}{3} \cdot \left(A_{\text{gem}} + \frac{(Q_{\text{pompen}} - Q_{\text{achterland}}) \cdot t_s}{\Delta h_{\text{kom}}} \right)$$

7.3.3 Toegestane peilverhoging komberging

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_f / σ	Δ_x	p_x	Δ_t	p_t
Δh_{kom}	[m]	logn	Invoer ⁴	$\sigma = 0,10^{-2}$	-	0	-	1

¹ Vaste waarde

² Defaultwaarde of aanbevolen waarde

³ Startwaarde

⁴ Vrije waarde

(zie Tabel 1-1)

De *toegestane peilverhoging komberging* (Δh_{kom} [m]) is de peilverhoging op het kombergend oppervlak die nog net niet leidt tot significante overstromingsgevolgen in het achterland. Verondersteld wordt dat de *toegestane peilverhoging komberging* lognormaal is verdeeld. Die verdeling wordt gekarakteriseerd door een verwachtingswaarde μ en een standaardafwijking $\sigma = 0,10$ [-]. De verwachtingswaarde moet worden opgegeven en de variatiecoëfficiënt kan worden aangepast.

Hoe te bepalen

De kritieke peilverhoging kan bepaald worden middels onderstaande formule:

$$\Delta h_{kom} = h_{bi;kr} - h_{bi;hoogwater}$$

Waarin:

Δh_{kom}	Kritieke peilverhoging komberging [m].
$h_{bi;kr}$	Peil in het achterland waarbij nog net geen significante gevolgen optreden [m+NAP].
$h_{bi;hoogwater}$	Peil dat onder hoogwateromstandigheden op het binnenwater wordt gehandhaafd [m+NAP].

Het kritieke peil op het binnenwater wordt in eerste instantie bepaald door de criteria die verbonden zijn aan de definitie van het kombergend vermogen. Dat betekent dat er sprake moet zijn van significante gevolgen, hetgeen binnen de *gedetailleerde toets* als volgt vorm is gegeven:

- het normpeil van het regionale watersysteem wordt overschreden (indien het watersysteem van de komberging is omringd door 'zachte' kades)
- 0,2 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)

In een *toets op maat* kan nog worden beschouwd of dit nog verder kan worden aangescherpt.

Voor het kritieke binnenpeil wordt dus in principe die waterstand aangehouden die past bij de normering van de achterliggende kades. Indien de achterliggende kades niet zijn genormeerd, dient een onderbouwde inschatting van de sterkte van deze kades plaats te vinden.

Het binnenpeil is het peil dat onder normale omstandigheden gehandhaafd wordt op het open binnenwater. Dit kan een ander peil zijn dan het streefpeil van het betreffende binnenwater. Het binnenpeil is afhankelijk van het gevoerde waterbeheer vlak vóór en tijdens hoogwater en optredende kwel. Indien het binnenpeil tijdens hoogwater niet bekend is, of niet gecontroleerd wordt, kan als vertrekpunt worden uitgegaan van het winterpeil. Wel moet geverifieerd worden of deze als gevolg van met name kwel¹⁴ niet alsnog hoger kan zijn. Het meenemen van ervaringen van recente hoogwaterperioden is gewenst bij het bepalen van het aan te houden binnenpeil.

Aanbevolen wordt om de standaardwaarde van de standaardafwijking niet aan te passen. Indien dit toch gewenst is, dient dit te worden onderbouwd.

¹⁴ Afwatering van andere kunstwerken op het betreffende binnenwater is onder de parameter A_{kom} reeds beschouwd

Aandachtspunten

De parameter heeft een sterke relatie met het kombergend oppervlak. In deze schematiseringshandleiding is ervoor gekozen om middels de parameter van het kombergend oppervlak (A_{kom} , zie paragraaf 7.3.2) overige invloeden op het kombergend vermogen te verrekenen. Hier kan uiteraard van worden afgeweken.

Een specifieke aanpassing van het streefpeil is mogelijk, indien bewust voorafgaand aan een hoogwater afgemaald wordt naar een lager peil, zodat er een groter kombergend vermogen aanwezig is.

Voorbeeld

Achter een kunstwerk is een kombergend oppervlak aanwezig. Het streefpeil onder dagelijkse omstandigheden bedraagt in de winterperiode NAP +2,0 m. Voorafgaand aan een hoogwater wordt het peil afgemalen tot NAP +1,6 m. Hiertoe wordt een gemaal ingezet. Bij een waterstand van NAP +2,8 m wordt verwacht dat de achterliggende kering bezwijkt als gevolg van piping in een kadevak.

Dit alles betekent dat indien de sluiting van het hoogwater kerend keermiddel mislukt de toelaatbare peilverhoging gelijk is aan $\Delta h_{kom} = \text{NAP} + 2,80 \text{ m} - \text{NAP} + 1,60 \text{ m} = 1,20 \text{ m}$.

7.3.4 *Modelfactor instromend volume*Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r / σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
m_{in}	[-]	det	1,0 ¹	—	-	-	-	-

¹ Vaste waarde² Defaultwaarde of aanbevolen waarde³ Startwaarde⁴ Vrije waarde

(zie Tabel 1-1)

De modelfactor instromend volume (m_{in} [-]) is de modelfactor die de onzekerheden in het model voor het instromende volume in rekening brengt. Deze modelonzekerheid is uiteindelijk buiten beschouwing gelaten omdat de onzekerheid omtrent het instromend volume al bij de andere parameters van de Z-functie in rekening wordt gebracht. De modelfactor instromend volume is voor het toetsspoor *betrouwbaarheid sluiting kunstwerk* een deterministische variabele: gerekend moet worden met een vaste waarde voor de verwachtingswaarde $\mu = 1,0$.

Hoe te bepalen

Deze is als een deterministische variabele met een vaste standaardwaarde van 1 in het instrumentarium voor de *gedetailleerde toets* opgenomen. Feitelijk speelt deze parameter in de modellering dus geen rol.

Aandachtspunten

n.v.t.

Voorbeeld

n.v.t.

7.3.5 Factor voor stormduur hoogwater

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r / σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
$f_{ts open}$	[-]	det	1,0 ²	-	-	-	-	-

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 1-1)

De factor voor stormduur hoogwater ($f_{ts|open}$ [-]) is een factor voor beperking van de stormduur (zie paragraaf 7.3.6) in relatie tot het ongewenst instromen van water. Met name bij een kunstwerk waarvan de drempel relatief hoog ligt ten opzichte van de buitenwaterstand, vindt instroming na het falen van de sluiting plaats op een moment dat een deel van de hoogwatergolf reeds gepasseerd is. Het in rekening brengen van de gehele hoogwatergolf is dan niet realistisch. Middels de parameter $f_{ts|open}$ kan een deel van de duur van de hoogwatergolf worden meegenomen. Deze factor is een deterministische grootheid, de defaultwaarde van 1,0 kan door de gebruiker worden aangepast.

Hoe te bepalen

Aanbevolen wordt om in eerste instantie de uit te gaan van de standaardwaarde van 1,0. Indien de uitkomst van de toets negatief is, kan in geval van een hoge drempel worden overwogen om de factor aan te passen. Randvoorwaarde hierbij is dat het kombergend vermogen ten opzichte van de sterkte van de bodembescherming dominant in de faalkans doorwerkt.

Aandachtspunten

Het schematiseren van slechts een deel van de hoogwatergolf is ook mogelijk door voor de parameter t_s (stormduur, paragraaf 7.3.6) niet de gehele geschematiseerde stormduur in te voeren.

Voorbeeld

n.v.t.

7.3.6 Stormduur

Wat is het

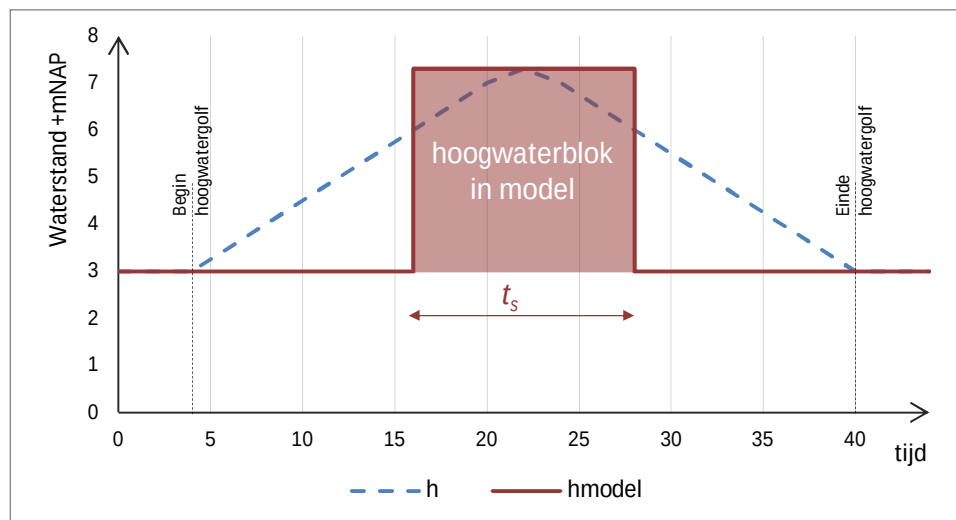
Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r / σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
t_s	[uur]	logn	6,0 ²	$V_r=0,25$ ¹	-	1	-	0

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 1-1)

De stormduur (t_s [uur]) is de duur van de piek van de storm waarmee het inkomende volume van buitenwater kan worden bepaald. Verondersteld wordt dat de stormduur lognormaal is verdeeld. Om die verdeling te karakteriseren kan de verwachtingswaarde μ worden aangepast. Voor de variatiecoëfficiënt V_r is er een standaardwaarde 0,25 [-] die niet kan worden aangepast.

Hoe te bepalen

Middels deze parameter kan een zeer globale schematisering van de periode van hoogwater (door afvoer, verhoogd meerpeil en/of stormopzet) worden bewerkstelligd. Het model voor komberging in Riskeer is alleen in staat om de afvoergolf als een blok te schematiseren, waarbij de piek van de buitenwaterstand gedurende de tijdsperiode t_s als constant wordt verondersteld. In onderstaande Figuur 7-3 is een voorbeeld opgenomen.



Figuur 7-3 Schematisering verloop hoogwatergolf in Riskeer

In Riskeer is de stormduur lognormaal verdeeld met een door de gebruiker op te geven verwachtingswaarde en een variatiecoëfficiënt van 0,25 aanwezig. Aanbevolen wordt om voor windgedomineerde belastingsystemen in eerste instantie te rekenen met een verwachtingswaarde van 6 uur. Bij afvoergedomineerde belastingsystemen wordt aanbevolen om gebruik te maken van de Waterstandsverlooptool om een adequate inschatting van het instromende volume te bepalen. Omdat het model grof is, is het mogelijk om de waarde van de tijdsduur aan te passen. Hiermee is het model voor komberging per kunstwerk eventueel specifiek te maken. Vanwege de vele onzekerheden omtrent de werkelijke stormduur is de relatief grote variatiecoëfficiënt niet aanpasbaar.

In het instroommodel wordt geen rekening gehouden met een verlopende binnenwaterstand. Het stijgen van de binnenwaterstand is in werkelijkheid direct van invloed op het instromende debiet¹⁵. Dit is dus een sterke vereenvoudiging van de werkelijkheid. In [16] wordt hierop nader ingegaan.

Ten behoeve van de schematisering wordt de volgende werkwijze voorgesteld:

- Indien het om een klein kunstwerk (kokerconstructies, coupures, kleine sluizen) gaat, hanteer standaardwaarde van 6 uur. Uitgangspunt hierbij is dat een klein kunstwerk na 6 uur instroming op alternatieve wijze gesloten moet kunnen zijn.
- Indien het om een groot kunstwerk gaat met een relatief hoge drempel, hanteer een standaardwaarde van 6 uur. Uitgangspunt hierbij is dat de drempelhoogte dusdanig is, dat alleen de piek van de afvoer voor instroming zorgt.
- Indien het om een groot kunstwerk gaat met een relatief lage drempel (lage kritieke buitenwaterstand), maak dan een nadere analyse van de hoogwatergolf ter plaatse en de instroom die daarbij optreedt. Voor een kunstwerk bij een windgedomineerd belastingsysteem (bijvoorbeeld aan de kust) is een tijdsduur van 6 uur naar verwachting nog steeds passend.
- In een afvoergedomineerd belastingsysteem (rivierengebied) zal de in rekening te brengen belastingduur in alle drie bovenstaande situaties vaak groter moeten worden gekozen,

¹⁵ Uitzondering hierop is een situatie waarbij water over een hoge drempel (bijvoorbeeld schutdeur) stort en er dus geen direct contact is tussen binnen- en buitenwater.

daarbij moet worden gelet op de tijdsduur gedurende welke de hoogwaterstand hoger is dan de drempelhoogte.

Aandachtspunten

n.v.t.

Voorbeeld

n.v.t.

7.3.7 Instromend debiet door kunstwerk gegeven geopend kunstwerk

Wat is het

Dit betreft een parameter ($Q_{in|open}$) die bepaald wordt door het gekozen model voor instroming bij een niet gesloten kunstwerk. Er zijn een drietal modellen beschikbaar met elk hun eigen formules. Hieronder zijn per model de formules gegeven (deze zijn overgenomen uit paragraaf 4.3.2 [16]). Sommige parameters komen in meerdere formules voor. Na de formules worden de diverse parameters stuk voor stuk besproken in subparagrafen.

Overslag/overloopdebiet verticale wand (hoge drempel)¹⁶

$$Q_{in|open} = B \cdot m_{OL} \cdot 0,55 \cdot \sqrt{-g \cdot (h_{kr;NS} - h_{bu})^3} + B \cdot m_{os} \cdot \sqrt{g \cdot (H_s)^3} \quad \begin{matrix} h_{bu} > h_{kr;NS} \\ \text{Aanlandige golven}^{17} \end{matrix} \quad 7-5$$

Lage drempel

Onvolkomen stroming:

$$Q_{in|open} = B \cdot m_{vl} \cdot (h_{bi} - h_{dr}) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_{bu} - h_{bi})} \quad h_{bu} < \frac{3}{2} \cdot h_{bi} - \frac{1}{2} \cdot h_{dr} \quad 7-6$$

Volkomen stroming:

$$Q_{in|open} = B \cdot m_{vl} \cdot 0,55 \cdot \sqrt{g \cdot (h_{bu} - h_{dr})^3} \quad h_{bu} \geq \frac{3}{2} \cdot h_{bi} - \frac{1}{2} \cdot h_{dr} \quad 7-7$$

Stroming door verdronken koker:

$$Q_{in|open} = \mu \cdot A \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_{bu} - h_{bi})} \quad 7-8$$

In de formule 7-5 is de significante golfhoogte H_s opgenomen. In de databases met hydraulische randvoorwaarden zoals gebruikt door Riskeer is als golfhoogte H_{m0} opgenomen. Zonder in details te treden kan worden gesteld dat H_{m0} nagenoeg gelijk is aan H_s .

Ten aanzien van de golfcondities wordt nog een aanpassing van de significante golfhoogte (H_s in formule 7-5) doorgevoerd op het moment dat er sprake is van scheve golfval. Hierbij wordt aangesloten bij hetgeen ook bij het toetsspoor *hoogte* is ingevoerd.

¹⁶ In vergelijking met overslag/overloop is voor de verticale wand bij niet sluiten slechts één formule aanwezig. Alleen de situatie waarbij de buitenwaterstand hoger is dan de kruinhoogte in niet gesloten toestand wordt meegenomen. Een situatie met alleen overslag ($h < h_{kr;NS}$) wordt niet beschouwd. Een verticale wand in niet gesloten toestand kan alleen optreden bij een schutsluis of een coupure. In beide gevallen is sprake van situatie waarbij golven sterk gereduceerd zullen zijn door de schutkolk, dan wel het oplopend talud (coupure), waardoor deze situatie als niet maatgevend wordt beschouwd.

¹⁷ Met aflandige wind, verdwijnt de laatste term en blijft een situatie met overloop over.

De hoek van golfval β is als volgt gedefinieerd:

$$\begin{aligned} |\theta - \Psi_{kw}| \leq 180 &\Rightarrow \beta = |\theta - \Psi_{kw}| \\ |\theta - \Psi_{kw}| > 180 &\Rightarrow |(|\theta - \Psi_{kw}|) - 360| \end{aligned} \quad 7-9$$

Waarin:

β Hoek van golfaanval [°].
 θ Golfrichting [°N].
 Ψ_{kw} Oriëntatie normaal van kunstwerk [°N].

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 belastingen als input wordt gegenereerd:

$$H_s = \gamma_s \cdot H_{s,HR} \quad 7-10$$

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. Deze invloedsfactor is als volgt gedefinieerd:

$$\begin{aligned} 0 < \beta \leq 80 &\Rightarrow \gamma_s = 10 \\ 80 < \beta \leq 110 &\Rightarrow \gamma_s = (110 - \beta)/30 \\ 110 < \beta \leq 180 &\Rightarrow \gamma_s = 0,0 \end{aligned} \quad 7-11$$

Alleen de hoek de normaal van het kunstwerk (Ψ_{kw}) moet door de gebruiker worden ingegeven.

De keuze voor het toe te passen instromingsmodel dient in Riskeer te worden gemaakt. Hierbij geldt dat in het geval van het model 'lage drempel' het programma zelf bepaalt welke formule van toepassing is (onvolkomen/volkomen). Over het algemeen geldt dat voor de volgende typen kunstwerken de volgende modelkeuzes geëigend zijn:

Kunstwerktipe	Model	Motivatie
Coupure	Verticale wand of lage drempel	Indien er geen direct contact is tussen binnen- en buitenwater en golven spelen een rol, is het model 'Verticale wand' het geschikte model. Wanneer golven geen rol spelen (bv door afgeschermd ligging) is het model 'lage drempel' beter passend.
Schutsluis	Verticale wand	Indien de drempel wordt gevormd door bijvoorbeeld de gesloten deur in het binnenhoofd is er sprake van een verticale wand waarover het water stort. Er is geen direct contact tussen binnen- en buitenwater.
Keersluis	Lage drempel	Er is sprake van direct contact tussen binnen- en buitenwater en de doorstroombopening is meestal niet begrensd aan de bovenzijde (geen kokerconstructie).
Gemaal	Verdronken koker	De persleiding(en) van een gemaal bevindt/bevinden zich meestal geheel onder water.
Inlaatsluis Uitwateringssluis of duiker	Verdronken koker of lage drempel	De leiding(en) van een inlaatsluis bevindt/bevinden zich soms geheel onder water (duikerconstructie). Soms gaat het echter over doorgangen zonder begrenzing aan de bovenzijde, waarbij sprake is van direct contact tussen binnen- en buitenwater.

7.3.7.1

Oriëntatie

De hoek van golfval is de hoek tussen de golfrichting (θ [°N]) en de normaal van het kunstwerk (ψ_{kw} [°N]). De golfrichting wordt binnen het beoordelingsinstrumentarium bepaald als onderdeel van de hydraulische belastingen en hoeft niet ingevoerd te worden. Wel moet de oriëntatie van de normaal van het kunstwerk worden ingevoerd in Riskeer zodat de hoek van golfval kan worden bepaald.

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_f / σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
ψ_{kw}	[°]	det	invoer ⁴	—	-	-	-	-

¹ Vaste waarde

² Defaultwaarde of aanbevolen waarde

³ Startwaarde

⁴ Vrije waarde

(zie Tabel 1-1)

De *oriëntatie* (ψ_{kw} [°N]) is de oriëntatie van de normaal (de as) van het kunstwerk ten opzichte van het noorden. De *oriëntatie normaal van het kunstwerk* is voor deze toets een deterministische variabele: gerekend moet worden met de verwachtingswaarde μ .

Hoe te bepalen

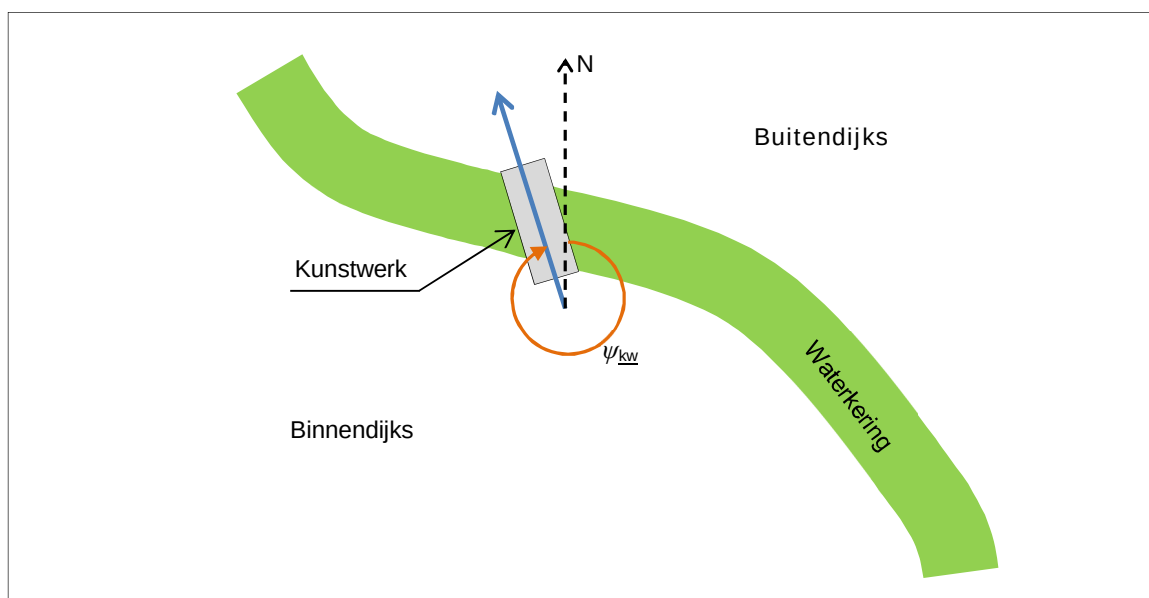
De in te voeren waarde voor deze parameter kan worden afgelezen/opgemeten uit tekeningen of met behulp van kaarten. De normaal van het kunstwerk is hierbij gedefinieerd als de lijn die loodrecht op de keermiddelen van het kunstwerk staat en buitenwaarts gericht is. Deze lijn loopt van de binnenzijde van de dijkring naar de buitenzijde (het buitenwater). De in te voeren hoek is gelijk aan de hoek tussen het noorden en de normaal van het kunstwerk, waarbij met de wijzers van de klok mee gemeten wordt.

Aandachtspunt

De hoek wordt gemeten ten opzichte van de noordrichting met de wijzers van de klok mee.

Voorbeeld

In Figuur 7-4 is voor een denkbeeldige situatie de oriëntatie van een kunstwerk weergegeven. Deze bedraagt in dit geval circa 340°.



Figuur 7-4 Wijze van bepaling hoek kunstwerknormaal ten opzichte van Noord

7.3.7.2 Breedte doorstroomopening

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r/σ	Δ_x	p_x	Δ_t	p_t
B	[m]	nor	invoer ⁴	$\sigma=0,05$ ²	-	0	-	1

¹ Vaste waarde² Defaultwaarde of aanbevolen waarde³ Startwaarde⁴ Vrije waarde

(zie Tabel 1-1)

Breedte van de doorstroomopening (B [m]) is de totale breedte waardoor het water stroomt als het kunstwerk niet gesloten is. Verondersteld wordt dat de *breedte van de doorstroomopening(en)* normaal is verdeeld. Die verdeling wordt gekarakteriseerd door een verwachtingswaarde en een standaardafwijking ($\sigma = 0,05$ [m]). De verwachtingswaarde moet worden opgegeven, de standaardafwijking is een aanbevolen waarde en kan eventueel door de softwaregebruiker worden aangepast.

Hoe te bepalen

De breedte kan van tekening worden afgelezen of in het veld worden opgemeten. Het gaat hierbij om de kleinste breedte, omdat dit uiteindelijk bepaalt welk debiet er kan doorstromen.

Indien een kunstwerk meerdere doorstroomopeningen heeft, dient te worden afgewogen of het waarschijnlijk is dat twee of meer doorstroomopeningen gelijktijdig ongewenst niet gesloten zijn. Dit is terug te voeren op de correlatie tussen de sluiting van de keermiddelen van de verschillende doorstroomopeningen. Dit houdt ook verband met de factor n (zie paragraaf 7.5.3).

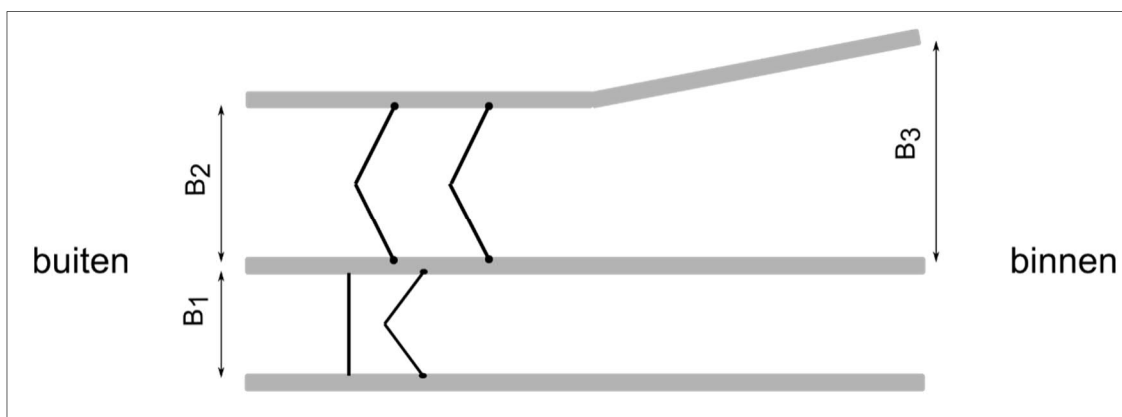
Het wordt aanbevolen om de standaardwaarde van de spreiding niet aan te passen, tenzij er geen metingen of tekeningen zijn van de breedte en men globaal de breedte heeft bepaald. Een grotere spreiding kan dan worden toegepast.

Aandachtspunten

N.v.t.

Voorbeeld

Een uitwateringssluits met twee van elkaar gescheiden doorstroomopeningen. De ene opening is voorzien van twee stel puntdeuren die alleen automatisch gesloten kunnen worden. De andere opening is voorzien van een stel handbediende puntdeuren en een automatische hefschuif. Als voornaamste faaloorzaak voor het niet sluiten van de deuren wordt door de beheerder de aanwezigheid van een obstakel op de drempel benoemd. De breedte van beide doorstroomopeningen is niet gelijk en verloopt ook nog (zie onderstaande schets).



Gelet op de verscheidenheid met betrekking tot de keermiddelen is een gelijktijdige falen van de sluiting van beide doorgangen niet waarschijnlijk. Met name het feit dat de puntdeuren van de smalste doorgang met de hand gesloten kunnen worden, zorgt ervoor dat de eventuele correlatie via de stroomvoorziening van de overige keermiddelen van ondergeschikt belang is.

In eerste instantie kan er gekozen worden om alleen rekening te houden met het open staan van de breedste doorgang. Hierbij dient dan de kleinste breedte te worden ingevoerd. Hieruit volgt dat $B = B_2$.

Indien het vermoeden bestaat dat de betrouwbaarheid van sluiting wel sterk gecorreleerd is tussen beide doorstroomopeningen, dan kan in eerste instantie gekozen worden om voor B de waarde van $B_1 + B_2$ in te voeren. Dit is dan de conservatieve benadering.

7.3.7.3 Modelfactor overloopdebiet volkomen overlaat

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_f / σ	Δ_x	p_x	Δ_t	p_t
m_{OL}	[-]	nor	1,1 ²	$\sigma = 0,03$ ¹	-	0	-	1

¹ Vaste waarde

² Defaultwaarde of aanbevolen waarde

³ Startwaarde

⁴ Vrije waarde

(zie Tabel 1-1)

De *modelfactor overloopdebiet volkomen overlaat* (m_{OL} [-]) is de modelfactor die de onzekerheid in rekening brengt die hoort bij de berekening van het overloopdebiet met de formule voor een verticale wand/hoge drempel. Verondersteld wordt dat deze modelfactor normaal is verdeeld. Die verdeling wordt gekarakteriseerd door een verwachtingswaarde $\mu = 1,1$ [-] en een standaardafwijking $\sigma = 0,03$ [-]. De verwachtingswaarde is een aanbevolen waarde en kan wel door de softwaregebruiker worden aangepast, de standaardafwijking is een vaste waarde en kan niet worden aangepast.

Hoe te bepalen

De parameter betreft een modelparameter die hoort bij situatie waarin sprake is van volkomen stroming. Daarvan is sprake als het instromend debiet niet beïnvloed wordt door het binnenwater, zoals in het model verticale wand/hoge drempel. Bij een volkomen lange overlaat wordt de parameter ook wel toegepast, echter hier heet deze m_{VL} (zie ook paragraaf 7.3.7.6)

De standaardwaarde voor het gemiddelde van m_{OL} is een conservatieve waarde. Aanpassing van deze waarde wordt echter niet aanbevolen, tenzij er een goede onderbouwing voor is. De standaardafwijking kan niet worden aangepast door de gebruiker.

Aandachtspunten

N.v.t.

Voorbeeld

Voor voorbeelden voor aanpassing van de parameter wordt verwezen naar de diverse vakliteratuur zoals [15].

7.3.7.4 Modelfactor overslagdebiet

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_f / σ	Δ_x	p_x	Δ_t	p_t
m_{OS}	[-]	logn	0,09 ¹	$\sigma = 0,06$ ¹	-	0	-	1

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 1-1)

De parameter m_{os} is de modelfactor voor het overslagdebiet. Verondersteld wordt dat deze modelfactor lognormaal is verdeeld. Die verdeling wordt gekarakteriseerd door een verwachtingswaarde $\mu = 0,09$ en een standaardafwijking $\sigma = 0,06$. Deze vaste waarden kunnen niet worden aangepast.

Hoe te bepalen

De vaste standaardwaarden voor deze parameter zijn gebaseerd op literatuurstudie.

Aandachtspunten

Opgemerkt wordt dat de gegeven waarden voor μ en σ anders zijn dan in de Leidraad Kunstwerken 2003 [11] staan aangegeven. De waarden die in paragraaf B.2.4.1 van de Leidraad Kunstwerken 2003 staan weergegeven ($\mu=0,34$ en $\sigma=0,09$) zijn niet correct.

Voorbeeld

N.v.t.

7.3.7.5 Kerende hoogte bij niet hoogwatergesloten zijn van kunstwerk

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r/σ	Δ_x	p_x	Δ_t	p_t
$h_{kr;NS}$	[+mNAP]	nor	invoer ⁴	$\sigma=0,05$ ²	-	0	-	1

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 1-1)

De *kerende hoogte kunstwerk bij niet hoogwatergesloten zijn van kunstwerk* ($h_{kr;NS}$ [m+NAP]) is de fysiek aanwezige kerende hoogte van het kunstwerk als de hoogwaterkerende keermiddelen niet gesloten zijn. De parameter wordt gebruikt in het model van de verticale wand bij bepaling van het instromende debiet bij een niet gesloten kering. Verondersteld wordt dat de *kerende hoogte kunstwerk* bij niet hoogwaterkerend gesloten zijn van het kunstwerk normaal is verdeeld. Om die verdeling te karakteriseren moet de verwachtingswaarde μ worden opgegeven. Voor de standaardafwijking σ is de aanbevolen waarde 0,05 m, maar die waarde kan worden aangepast.

Hoe te bepalen

De parameter kan worden bepaald uit inmeetgegevens of tekeningen van het object. Het betreft de kerende hoogte die aanwezig is op het moment dat het hoogwater kerende keermiddel(len) niet gesloten is, en het dan instromende debiet plaatsvindt over een verticaal element. Een duidelijk voorbeeld betreft een schutsluis, waarbij de stormvloeddeur niet gesloten is maar de normale schutdeur wel. Het water stroomt dan bij een voldoende hoge buitenwaterstand over de schutdeur.

Aandachtspunten

In sommige gevallen kan het model ook worden gebruikt om een bijzondere situatie te modelleren. Aan de hand van de uitkomsten dient dan wel te worden geverifieerd of nog wordt voldaan aan de toepassingsvoorwaarden. Een voorbeeld van een bijzondere situatie is een persleiding van een gemaal die met een kattenrug in de dijk ligt. Feitelijk is het hoogste punt in de kattenrug ook een verticale drempel op het moment dat de keermiddelen niet gesloten zijn.

Het gebruik van tekeningen is toegestaan, maar het wordt aanbevolen om gebruik te maken van actueel ingemeten hoogtegegevens. Bij het gebruik van informatie van tekening kan het

nodig zijn om de standaardafwijking wat te vergroten. Indien het zeer recent ingemeten waarden betreft, kan de standaardafwijking eventueel worden verlaagd.

Voorbeeld

Beschouw een schutsluis die is uitgerust met in elk hoofd een stel schutdeuren. De deuren in het buitenhoofd fungeren naast schutdeur ook als stormvloeddeur en hebben een kerende hoogte van NAP +4,0 m. In het binnenhoofd zijn alleen schutdeuren aanwezig, waarvan de kerende hoogte conform tekening gelijk is aan NAP +2,50 m. In het ontwerp is rekening gehouden met een dusdanig verval over de binnendeuren dat deze in staat zijn om een waterstand tot boven hun kruin te keren. In dit geval is $h_{kr,NS}$ gelijk aan NAP +2,50 m.

Voor het geval dat de binnendeuren niet tot aan hun kruin de waterstand kunnen keren, kan dit ook in rekening gebracht worden door toepassing van het model 'lage drempel' (zie paragraaf 7.3.7). Hierbij dienen bepaalde parameters bewust anders gemodelleerd te worden om tot een enigszins realistische schematisering van de situatie te komen (zie paragraaf 7.3.7.7).

7.3.7.6 Modelfactor lange overlaat

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r/σ	Δ_x	p_x	Δ_t	p_t
m_{vl}	[-]	nor	0,9 ¹	$\sigma=0,05$ ¹	-	0	-	1

¹ Vaste waarde

² Defaultwaarde of aanbevolen waarde

³ Startwaarde

⁴ Vrije waarde

(zie Tabel 1-1)

De *modelfactor lange overlaat* (m_{vl} [-]) is de modelfactor die de onzekerheid in rekening brengt die hoort bij de berekening van het instroomdebiet met de formule voor een volkomen overlaat en de onvolkomen overlaat. Verondersteld wordt dat deze modelfactor normaal is verdeeld. Die verdeling wordt gekarakteriseerd door een verwachtingswaarde $\mu = 0,9$ [-] en een standaardafwijking $\sigma = 0,05$ [-]. Zowel de verwachtingswaarde als de variatiecoëfficiënt is een vaste waarde en kan niet door de softwaregebruiker worden aangepast.

Hoe te bepalen

De parameter betreft een modelparameter die behoort bij de situatie waarin sprake is van een (lange) overlaat. Voorheen werd er voor deze parameter onderscheid gemaakt in volkomen stroming (m_{OL}) en onvolkomen stroming (m_{onv}). Omdat beide modelfactoren niet aan elkaar gelijk waren ontstond een discontinuïteit in de berekeningen rond het omslagpunt volkomen/onvolkomen stroming. Daarom is ervoor gekozen om in Riskeer uit te gaan van één parameter voor beide situaties. De eventuele fout die hiermee gemaakt wordt is zeer beperkt.

Indien buiten Riskeer een berekening gemaakt wordt van het instromende debiet kan uiteraard wel rekening worden gehouden met separate modelfactoren voor volkomen en onvolkomen stroming. Hiervoor wordt verwezen naar de diverse vakliteratuur.

Aandachtspunten

Met betrekking tot deze parameter zijn geen verdere aandachtspunten.

Voorbeeld

Aangezien de parameter niet aangepast kan worden, wordt er ook geen voorbeeld gegeven.

7.3.7.7 Binnenwaterstand

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r/σ	Δ_x	p_x	Δ_t	p_t
h_{bi}	[+mNAP]	nor	invoer ⁴	$\sigma=0,10$ ²	-	1	12 uur	0

¹ Vaste waarde² Defaultwaarde of aanbevolen waarde³ Startwaarde⁴ Vrije waarde

(zie Tabel 1-1)

De *binnenwaterstand* (h_{bi} [m+NAP]) is de waterstand aan de binnendijkse zijde van het kunstwerk tijdens maatgevende omstandigheden. Het is van toepassing bij de modellen lage drempel en verdrongen koker voor het instromende debiet bij niet sluiten van de hoogwaterkerende keermiddelen. Verondersteld wordt dat de *binnenwaterstand* normaal is verdeeld. Om die verdeling te karakteriseren moet de verwachtingswaarde μ worden opgegeven. Voor de standaardafwijking σ is de defaultwaarde 0,10 m, maar die waarde mag gemotiveerd worden aangepast.

Hoe te bepalen

De parameter kan worden bepaald in overleg met de beheerder. Specifiek dient naar een hoogwatersituatie te worden gekeken. Indien het sluitregime van invloed is op de binnenwaterstand kan hiermee rekening worden gehouden. Zo kan het in het geval van een keersluis zo zijn dat deze pas gesloten wordt bij een bepaalde buitenwaterstand, waarbij in de tijdsperiode voor deze sluiting de binnenwaterstand meeloopt met de buitenwaterstand.

De binnenwaterstand is afhankelijk van het gevoerde waterbeheer vlak vóór en tijdens hoogwater en de oriëntatie van de binnendijkse watergang. Indien de binnendijkse waterstand tijdens hoogwater niet bekend is, of niet gecontroleerd wordt, kan als vertrekpunt de gemiddelde waterstand worden genomen omdat de waterstand van het watersysteem tijdens een hoogwater vanwege kwel en eventuele afname van lozingscapaciteit vrijwel altijd hoger zal zijn ([12] paragraaf 6.2.1.2). Indien sprake is van een zomer- en winterpeil kan worden uitgegaan van het winterpeil.

Aandachtspunten

De waterbeheerstrategie tijdens hoge rivierafvoeren kan van invloed zijn op het polderpeil (denk aan pompcapaciteit van de gemalen of maalstops).

Voorbeeld

Voor situaties die normaal passen in de aanwezige modellen voor een lage drempel of een verdrongen koker worden geen voorbeelden gegeven. De parameter h_{bi} spreekt hierbij immers voor zich.

Bepaalde afwijkende situaties kunnen worden gefit op de beschikbare modellen. Hierbij kan de parameter h_{bi} een rol spelen. Hieronder een voorbeeld.

Een schutsluis is uitgerust met in elk sluishoofd een stel schutdeuren. De deuren in het buitenhoofd fungeren naast schutdeur ook als stormvloeddeur en hebben een kerende hoogte van NAP +4,0 m. In het binnenhoofd zijn schutdeuren aanwezig waarvan de kerende hoogte conform tekening gelijk is aan NAP +3,00 m. Uit gegevens met betrekking tot het binnenhoofd blijkt dat het kritieke verval vanuit sterkte en stabiliteit optreedt bij een waterstand die gelijk is aan NAP +2,0 m. De binnenwaterstand bedraagt NAP +0,50 m.

Een dergelijke situatie kan worden benaderd door gebruik te maken van het model voor een lage drempel waarbij als binnenwaterstand (h_{bi}) een waarde van NAP+2,0 m wordt ingevuld. Het kritieke instromende debiet gerelateerd aan de sterkte van de bodembescherming wordt dan in eerste instantie een kleine waarde toebedeeld. Dit resulteert erin dat wanneer de ingevoerde binnenwaterstand (is in dit geval de realiseerbare kerende hoogte bij niet sluiten)

wordt overschreden, er al snel bezwijken optreedt van de bodembescherming. Het is immers waarschijnlijk dat de bodembescherming zal falen wanneer de binnendeuren bezwijken bij een verval met een buitenwaterstand van NAP +2,0 m.

7.3.7.8 Drempelhoogte

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r / σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
h_{dr}	[+mNAP]	nor	invoer ⁴	$\sigma=0,10$ ²	-	0	-	1

¹ Vaste waarde

² Defaultwaarde of aanbevolen waarde

³ Startwaarde

⁴ Vrije waarde

(zie Tabel 1-1)

De *drempelhoogte (niet gesloten kering)* (h_{dr} [m+NAP]) is de hoogte van de bovenkant van de constructie die uiteindelijk het instromende debiet bepaalt. De parameter hoort bij het model voor de lage drempel ter bepaling van het instromende debiet bij een niet gesloten kering. Verondersteld wordt dat de *drempelhoogte niet gesloten kering* normaal is verdeeld. Om die verdeling te karakteriseren moet de verwachtingswaarde μ worden opgegeven. Voor de standaardafwijking σ is de defaultwaarde 0,10 m, maar die waarde mag worden aangepast indien dit kan worden onderbouwd.

Hoe te bepalen

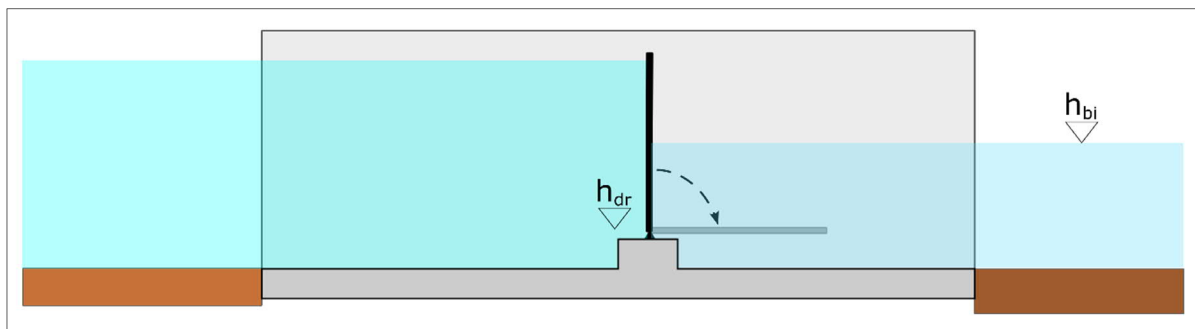
De parameter kan worden bepaald uit metingen in het veld of door gebruik van tekeningen. In het laatste geval verdient het aanbeveling om hetgeen op tekening vermeld staat omtrent de hoogte van de drempel te verifiëren middels metingen, voor zover dat in het recente verleden nog niet heeft plaatsgevonden.

Aandachtspunten

De parameter behoort bij het model waarmee de belasting (instromende debiet over aanwezige bodembescherming) bepaald wordt. Het instromende debiet wordt gedicteerd door het kleinste doorstroomoppervlak dat bij een niet gesloten kunstwerk aanwezig is. Dit betekent bijvoorbeeld dat als in een doorstroomopening meerdere drempelniveaus aanwezig zijn terwijl de overige afmetingen gelijk blijven, het hoogste drempelniveau zorgt voor het kleinste doorstroomoppervlak en daarmee bepalend is voor het instromende debiet.

Voorbeeld

Onderstaand voorbeeld geeft een doorsnede over een kunstwerk waarin een stuw aanwezig is. Deze stuw kan helemaal gesloten worden, maar er zijn ook perioden waarin de stuw helemaal gestreken is.



Door de constructie van de stuw is het doorstroomprofiel enigszins geknepen ter plaatse van de stuw. Wanneer de stuw gestreken is, wordt het doorstroomprofiel bepaald door de waterstand boven de stuw en de drempelhoogte van de stuw. Die bepaalt daarmee het instromende

debiet. Voor h_{dr} dient in dit geval dus de hoogte van de bovenkant van de gestreken stuwconstructie te worden ingevuld.

7.3.7.9 Afvoercoëfficiënt

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r / σ	Δ_x	p_x	Δ_t	p_t
μ	[-]	logn	1,0 ²	$\sigma=0,20$ ²	-	0	-	1

¹ Vaste waarde

² Defaultwaarde of aanbevolen waarde

³ Startwaarde

⁴ Vrije waarde

(zie Tabel 1-1)

De *afvoercoëfficiënt* (μ [-]) is de afvoercoëfficiënt van de opening(en) waardoor het water stroomt als het kunstwerk niet gesloten is. De parameter is van belang bij het model voor een verdrongen koker waarmee het instromende debiet kan worden bepaald indien de sluiting van de koker faalt. Verondersteld wordt dat de *afvoercoëfficiënt verdrongen koker* lognormaal is verdeeld. Die verdeling wordt gekarakteriseerd door een verwachtingswaarde met een standaardwaarde van 1,0 en een standaardafwijking ($\sigma = 0,20$ [-]). De defaultwaarde voor de verwachtingswaarde is voor veruit de meeste situaties een conservatieve waarde. Deze waarde mag gemotiveerd worden bijgesteld. De standaardafwijking kan niet door de softwaregebruiker worden aangepast.

Hoe te bepalen

De waarde van deze afvoercoëfficiënt kan worden bepaald middels het bepalen van de diverse energieverliezen van het water stromend door de koker. Deze energieverliezen bestaan bijvoorbeeld uit wrijvingsverliezen en in- en uittredeverliezen. Voor een onderbouwde bepaling van de gemiddelde waarde van μ wordt verwezen naar de vakliteratuur (bijvoorbeeld §4.15 van het boek "Toegepaste vloeistofmechanica, Nortier"[15]).

Aandachtspunten

N.v.t.

Voorbeeld

Voor voorbeelden voor aanpassing van de parameter wordt verwezen naar de vakliteratuur.

7.3.7.10 Doorstroomoppervlak

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r / σ	Δ_x	p_x	Δ_t	p_t
A	[m ²]	logn	invoer ⁴	$\sigma=0,01$ ²	-	0	-	1

¹ Vaste waarde

² Defaultwaarde of aanbevolen waarde

³ Startwaarde

⁴ Vrije waarde

(zie Tabel 1-1)

Het *doorstroomoppervlak* (A [m²]) is het doorstroomoppervlak van de opening(en) waardoor het water stroomt als het kunstwerk niet gesloten is. De parameter is van belang bij het model voor een verdrongen koker waarmee het instromende debiet kan worden bepaald indien de sluiting van de koker faalt. Verondersteld wordt dat het *doorstroomoppervlak* normaal is verdeeld. Die verdeling wordt gekarakteriseerd door een verwachtingswaarde en een standaardafwijking ($\sigma = 0,01$ [m²]). De verwachtingswaarde moet worden opgegeven, de standaardafwijking kan eventueel door de softwaregebruiker worden aangepast.

Hoe te bepalen

Het *doorstroomoppervlak* kan vanaf tekening worden bepaald, of middels een inmeting worden vastgelegd. Het gaat hierbij om de kleinste oppervlakte, omdat die uiteindelijk bepaalt welk debiet er kan doorstromen.

Indien een kunstwerk meerdere doorstroomopeningen heeft, dient te worden afgewogen of het waarschijnlijk is dat twee of meer doorstroomopeningen gelijktijdig ongewenst niet gesloten zijn. Dit is terug te voeren op de correlatie tussen de sluiting van de keermiddelen van de verschillende doorstroomopeningen. Dit houdt ook verband met de factor n (zie paragraaf 7.5.3).

Het wordt aanbevolen om de standaardwaarde van de spreiding niet aan te passen, tenzij er geen meting of tekeningen zijn van de doorstroomopening en men globaal het oppervlak heeft bepaald. Een grotere spreiding kan dan worden toegepast.

Aandachtspunten

N.v.t.

Voorbeeld

Een moeilijk bereikbare uitwateringssluis bestaat uit een tweetal parallelle buizen door de dijk met gelijke afmetingen ($\varnothing$ 500 mm). De beide buizen komen buitendijks uit in één gezamenlijk uitstroomwerk. Het keermiddel in dit uitstroomwerk betreft een terugslagklep die het gehele uitstroomwerk afsluit. Halverwege de leidingen in de dijk is een inspectieput aanwezig, waarin zich tevens per buis een handbediende spindelschuif bevindt. Deze spindelschuiven worden alleen gesloten tijdens de jaarlijkse testen en in geval van hoogwater. Binnendijks komen de leidingen ook in een gezamenlijk instroomwerk samen. Als belangrijkste faaloorzaak voor niet sluiten van de spindelschuiven wordt het niet bereiken van het kunstwerk aangemerkt.

In dit geval kan voor de doorstroomoppervlakte de totale oppervlakte van beide buizen worden ingevuld. Het falen van de keermiddelen is immers sterk gecorreleerd. Voor A kan dan ook een waarde van $2 \times \frac{1}{4} \times \pi \times 0,5^2 = 0,79 \text{ m}^2$ worden aangehouden.

7.4

Deelfaalmechanisme Z_{22} : falen bodembescherming achter constructie

De bodembescherming achter de constructie faalt als de kritieke stroomsnelheid van de bodembescherming wordt overschreden. Deze stroomsnelheid treedt op bij een bepaald kritiek debiet. Het debiet dat binnenstroomt onder bepaalde omstandigheden wordt bepaald met de formules beschreven in paragraaf 7.3.7. De kans dat het instromende debiet groter is dan het kritieke debiet wordt bepaald door de volgende parameters die vervolgens worden besproken:

- Kritiek debiet per strekkende meter (q_c).
- Stroomvoerende breedte ter plaatse van de bodembescherming (B_{sv}).
- Instromend debiet ($Q_{in|open}$).

De eerste 2 parameters betreffen de sterkte van het systeem welke is gedefinieerd als:

$$Q_c = q_c \cdot B_{sv} \quad 7-12$$

De parameters q_c en B_{sv} zijn aan elkaar gekoppeld afhankelijk van de locatie die wordt bekeken. Achter een kunstwerk is vaak sprake van een bodembescherming, die uiteindelijk overgaat in een aansluiting op de natuurlijke bodem. Het ontstaan van erosiekuilen kan plaatsvinden bij de bodembescherming, maar ook bij onbeschermde bodem aansluitend op de bodembescherming. Dit laatste is alleen van belang indien dit leidt tot instabiliteit van het

kunstwerk. Wanneer de bodembescherming voldoende lang is, zullen erosiekuilen achter de bodembescherming niet meer leiden tot instabiliteit van het kunstwerk. Wellicht leidt dit wel tot schade aan de bodembescherming, maar de verwachting is dan nog steeds dat dit niet binnen een hoogwaterperiode leidt tot instabiliteit van de constructie. Normaliter is de lengte van de bodembescherming hier ook op ontworpen. Welke lengte van de bodembescherming voldoende is, is afhankelijk van de specifieke situatie. Per geval dient hiervoor een afweging te worden gemaakt. Uiteindelijk bepaalt de combinatie van het kritieke debiet per strekkende meter en de stroomvoerende breedte wat het maatgevende totale kritieke debiet (Q_c) is.

Het instromende debiet is afhankelijk van de situatie en de afmetingen van het kunstwerk. Het instromende debiet wordt met behulp van de formules in paragraaf 7.3.7 bepaald door het instrumentarium.

De Z-functie voor het bezwijken als gevolg van niet sluiten en vervolgens een het falen van de bodembescherming is:

$$Z = Q_c - Q_{\text{in|open}} = q_c \cdot B_{\text{sv}} - Q_{\text{in|open}} \quad 7-13$$

In het navolgende worden de parameters uit deze Z-functie nader toegelicht.

Indien bij een niet gesloten kering de waterstand waarbij de bodembescherming bezwijkt relatief vaak voorkomt (meer dan eens per 10 jaar), wordt aanbevolen om kennis te nemen van hetgeen hierover in bijlage F is opgenomen.

7.4.1 Kritieke instromend debiet

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r / σ	Δ_x	p_x	Δ_t	p_t
q_c	[m ³ /s/m]	logn	Invoer ⁴	$V_r = 0,15$ ²	-	0	-	1

¹ Vaste waarde

² Defaultwaarde of aanbevolen waarde

³ Startwaarde

⁴ Vrije waarde

(zie Tabel 1-1)

Het kritieke instromend debiet (q_c [m³/s/m]) is het debiet per strekkende meter dat door het niet gesloten kunstwerk stroomt waarbij dusdanige stroomsnelheden aan de bodem optreden dat de bodem(bescherming) bezwijkt. Onder bezwijken wordt hier verstaan het optreden van doorgaande erosie van de bodem(bescherming). Praktisch gezien is een eerste conservatieve benadering te maken door uit te gaan van het criterium dat bewegen van individuele stenen optreedt. Verondersteld wordt dat het kritiek debiet lognormaal is verdeeld. Om die verdeling te karakteriseren moet de verwachtingswaarde μ worden opgegeven. Voor de variatiecoëfficiënt V_r is er een defaultwaarde 0,15 [-], maar die waarde kan worden aangepast.

Hoe te bepalen

Van groot belang bij het bepalen van het kritieke debiet is de beschikbare informatie omtrent de bodembescherming en de instroomsituatie die bij een niet gesloten kunstwerk ontstaat (zie paragraaf 7.3.7). Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen de volgende twee groepen:

1. Verdrongen koker en overlaat: horizontale stroming over bodembescherming
2. Verticale wand: deels verticale stromingsbelasting op bodembescherming

Beide situaties worden hieronder behandeld.

Verdronken koker en overlaat

Het kritieke debiet kan voor verdronken kokers en overlaten worden benaderd door de kritieke stroomsnelheid met betrekking tot de bodembescherming te vermenigvuldigen met de aan de binnenzijde aanwezige waterdiepte. Hierbij wordt de stroomsnelheid dus over de diepte constant verondersteld. In formulevorm is dit:

$$q_c = u_c \cdot (h_{bi} - h_{dr}) \quad 7-14$$

Waarin:

- u_c Dieptegemiddelde kritieke stroomsnelheid met betrekking tot de bodembescherming [m/s].
- h_{bi} Binnenwaterstand [m+NAP].
- h_{dr} Hoogte bovenkant bodembescherming (vaak is dit gelijk aan hoogte drempel) [m+NAP].

De voorgaande formule 7-14 is niet van toepassing voor coupures, waar geen watergang aan de binnenzijde aanwezig is. Als eerste conservatieve benadering wordt voor kritieke (overstort)-debieten bij coupures verwezen naar de richtgetallen uit tabel 7-4 in paragraaf 7.3.1 van de schematiseringshandleiding voor Hoogte (zie [17]).

De kritieke stroomsnelheid met betrekking tot de bodembescherming kan worden bepaald met de beschikbare formules van bijvoorbeeld Izbash, Shields en Pilarczyk. Handvatten voor het gebruik van deze formules worden gegeven in hoofdstuk 2 van het *Achtergrondrapport bepaling kritiek overslag-/overloop-/instroomdebiet bij kunstwerken* [4]. De waterdiepte boven de bodembescherming kan met de beschikbare gegevens van binnenwaterstand en ligging bodembescherming worden bepaald.

Als er geen bodembescherming aanwezig is (of deze is geërodeerd), dan is de kritieke stroomsnelheid afhankelijk van de grondsoort. Op basis van deels empirische bevindingen [15], [14] en [1] is in tabel 7-3 hiervan een overzicht samengesteld. Deze waarden kunnen worden gebruikt als eerste richtgetallen.

Tabel 7-3 Kritieke stroomsnelheden onbeschermd bodem

Grondsoort	u_c [m/s]
fijn zand	0,10
matig fijn zand	0,15
matig grof zand	0,20
grof zand	0,30
Veen	0,30-0,60
kleiig zand	0,40-0,50
slappe klei	0,60-0,80
redelijk vaste klei	0,80-1,00
vaste klei	1,00-1,20
Grind	1,00

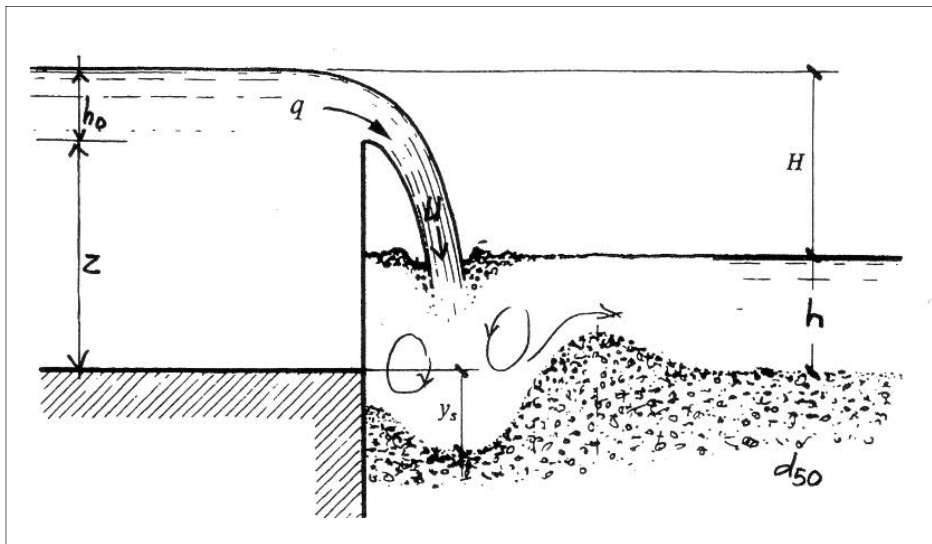
Verticale wand (onderstaande tekst is een op een overgenomen uit de schematiseringshandleiding voor hoogte [17]).

Bij een situatie met een verticale wand, welke zich overwegend bij schutsluizen kan voordoen in het geval van het toetsspoor *betrouwbaarheid sluiting kunstwerk*, kan er sprake zijn van een overstortende straal bij een voldoende hoge waterstand. Deze waterstraal komt aan de

binnenzijde uit in de daar aanwezige waterdiepte. Indien achter de verticale wand (bijvoorbeeld binnendeur van sluis) een betonnen vloer aanwezig is, zal de energie van de overstortende straal kunnen worden opgenomen door het betonwerk. De overstortende straal zorgt in dat geval niet voor de maatgevende belasting op die bodem(bescherming). Het kritieke debiet kan dan worden gekoppeld aan de bodembescherming die aansluit op de betonnen bodem. In dat geval kan gebruik worden gemaakt van de benadering die bij verdrongen koker/overlaat wordt gehanteerd.

Indien de overstortende straal terecht komt boven een bodem die niet van beton is, maar beschermd wordt middels een bestorting of een andere soort van bodembescherming, kan dit het maatgevende mechanisme worden.

In [1] is een mogelijke methode gegeven aan de hand waarvan diepte van erosiekuilen door een overstortende straal globaal kan worden bepaald met behulp van enkele formules. Ten behoeve van deze methode zijn gegevens omtrent de bodembescherming benodigd. De schematisering kan plaatsvinden met behulp van Figuur 7-5.



Figuur 7-5 Overstortende straal met ontgrondingskuil achter de constructie [1]

Het debiet over de kruin wordt benaderd met de volgende formule:

$$q_c = 1,705 \cdot \sqrt{h_0^3} \quad 7-15$$

Waarin:

q_c kritiek debiet per meter breedte [$\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$].

h_0 overstorthoogte boven de kruin [m].

De erosiediepte als gevolg van het overstortende debiet kan worden bepaald met behulp van de volgende formule:

$$y_s = 0,4 \cdot q_c^{0,6} \cdot H^{0,4} \cdot d_{50}^{-0,3} - 0,5 \cdot h \quad 7-16$$

Waarin:

y_s erosiediepte als evenwichtswaarde ≥ 0 [m].

q_c	kritiek debiet per meter breedte [m^2/s].
H	hoogteverschil boven- benedenstroomse waterstand [m] = $z+h_0-h$.
z	hoogte sluisdeur boven <u>benedenstroomse</u> bodem [m].
h	waterdiepte benedenstroomse zijde [m].
h_0	overstorthoogte boven de kruin [m].
d_{50}	diameter korrels of stenen [m].

Bij een bepaalde erosiediepte van een laag kan worden gesteld dat deze laag bezweken is. In het document [1] wordt voorgesteld om hier een waarde van 0,50 tot 0,60 van de oorspronkelijke laagdikte voor aan te houden.

Voor de beoordeling is het van belang om vast te stellen welk debiet leidt tot ontgrondingskuilen met dusdanige diepte dat de stabiliteit van het kunstwerk in gevaar komt. Dit betekent dat aan de hand van de hoogte van de verticale wand, de diepte van de benedenstroomse watergang en de maximaal toelaatbare diepte van de erosiekuil via een iteratief proces een bijbehorend kritiek debiet kan worden afgeleid. Hierbij kan gebruik worden gemaakt van meerdere lagen van de bodem.

Algemeen kan worden gesteld dat een debiet groter dan $1,0 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ over een sluisdeur niet toelaatbaar geacht moet worden. Dergelijke debieten leiden tot waterstanden die circa 60 cm hoger zijn dan de kruin van de deuren. Bij dergelijke debieten kan niet worden uitgesloten dat andere fenomenen gaan optreden zoals het trillen van de deuren door bijvoorbeeld insluiting van lucht onder de overstortende straal.

Aandachtspunten

Met betrekking tot de kritieke stroomsnelheid voor de bodembescherming en daarmee het kritieke debiet kunnen de volgende aandachtspunten worden vermeld:

- Naast de aanwezigheid van bodembescherming is het ook van belang dat bekend is wat de conditie van deze bodembescherming is. Vaak is dit gegeven niet direct voorhanden, omdat hiervoor een inspectie moet plaatsvinden. Lodingen van de bodem kunnen een indicatie geven omtrent de aanwezigheid en volledigheid van de bodembescherming. Bij het detecteren van kuilen in de bodem kan vaak worden gesteld dat de bodembescherming niet meer intact is. Indien de conditie van de bodembescherming niet bekend is en de bodembescherming niet recent is aangelegd of hersteld (periode < 5 jaar), dienen conservatieve aannamen te worden gedaan met betrekking tot de kritieke stroomsnelheid.
- Bodembeschermingen bij kunstwerken worden vaak aangelegd vanuit een andere functie dan waterkeren. Het kan gaan om schroefstraalbelastingen of stroomsnelheden die optreden bij de lozing van water. Dit in gedachten nemende kan vanuit de functie van het kunstwerk ook een inschatting van toelaatbare stroomsnelheden worden ingeschat (of wellicht worden teruggevonden in de ontwerpdocumenten).
- Een nadere analyse van het kritieke instromende debiet kan worden gemaakt door de stroming scherper te modelleren. Dit kan door bijvoorbeeld rekening te houden met het theoretische verloop van de stroomsnelheid over de waterdiepte. Een dergelijke exercitie is alleen nuttig indien gedetailleerde gegevens van de bodembescherming bekend zijn (opbouw, actuele conditie en hoogteligging van deze bodembescherming).
- Van belang is dat het kritieke debiet per strekkende meter (q_c) altijd wordt gezien in combinatie met de stroomvoerende breedte B_{sv} (zie paragraaf 7.4.2).

Met betrekking tot schutsluizen geldt dat de bodembescherming vaak is uitgelegd op schroefstraalbelastingen. De toelaatbare stroomsnelheden kunnen dan behoorlijk oplopen. In

hoofdstuk 16 van 'Ontwerp van schutsluizen' [13] wordt het ontwerp van bodembeschermingen bij schutsluizen behandeld en zijn ook voorbeelden aanwezig.

Hieronder worden in tabel 7-4 ter indicatie voorbeelden van sorteringen gegeven, niet uitputtend, voor het geval er geen gegevens zijn over de sortering van een breuksteen bodembescherming. Met behulp van de sortering kunnen kritieke stroomsnelheden worden bepaald met modellen zoals Shields, Izbash en Pilarczyk.

Tabel 7-4 Voorbeelden sorteringen steenbestortingen

Sortering [kg]	Type kunstwerk
5-40	Schutsluis pleziervaart
10-60	-
40-200	Schutsluis binnenvaart (beroeps) Keersluis* Binnenwaterzijde spuisluis Inlaatwerk **
60-300	Zeesluis IJmuiden
300-1000	Stuw in rivier (Maas)***

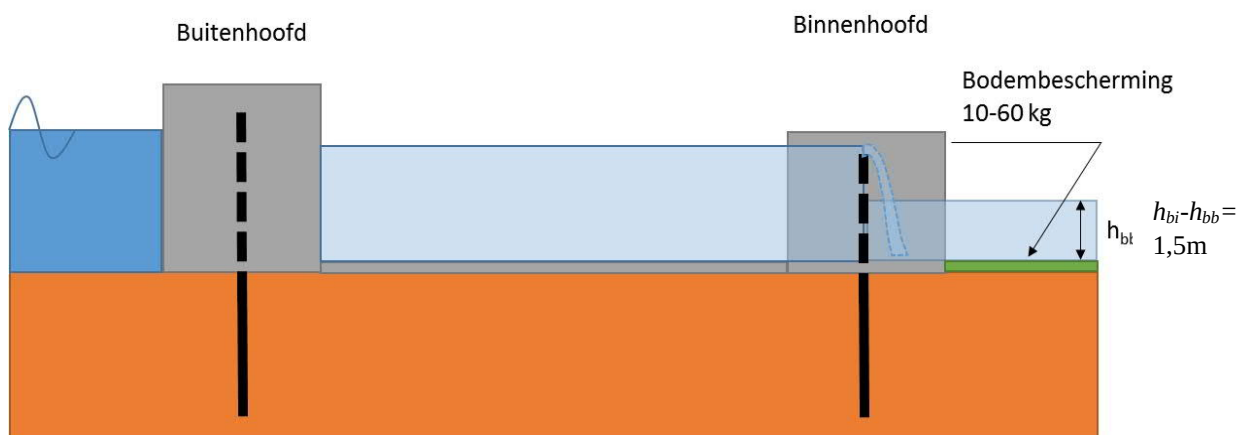
* Deze sortering is relatief zwaar omdat de sluis bij een instromend debiet wordt gesloten en wellicht lekstromen langs of onder de deur heeft.

** Vaak worden hier tegels of zuilen gebruikt, in het geval van stortsteen is dit een minimale sortering.

*** Direct achter de stuw ligt meestal een woelbak van beton of gepenetreerd stortsteen, de aangegeven sortering ligt daar weer achter.

Voorbeeld 1

Beschouw de volgende situatie: achter een recreatiesluis is een bodembescherming aanwezig bestaande uit stortsteen met sortering 10-60 kg. Beide deuren zijn gesloten. Door het optredende overslag-/overloopdebiet is de kolk volgelopen tot aan het niveau van de binnendeuren. Hierover treedt als gevolg van het overslag-/overloopdebiet een overstortende straal op die de bodembescherming belast, zie Figuur 7-6.



Figuur 7-6 Sluis met bodembescherming belast door overtrekkende stroming

De overstortende straal komt terecht binnen de contouren van het betonwerk. Voor het voorbeeld wordt aangenomen dat de straal zich over de volledige waterdiepte spreidt voordat de bodembescherming wordt bereikt.

Van de bodembescherming is uit een recente inspectie bekend dat deze zich in goede staat bevindt. De kritieke stroomsnelheid kan nu als volgt berekend worden (zie *Achtergrondrapport bepaling kritiek overslag-/overloop-/instroomdebiet bij kunstwerken* [4] voor achtergrondinformatie bij het gebruik van de diverse formules).

Als vertrekpunt wordt de formule van Pilarczyk genomen:

$$D = \frac{\phi_{sc}}{\Delta} \frac{0,035}{\psi_{cr}} k_h k_{sl}^{-1} k_t^2 \frac{U^2}{2g} \quad 7-17$$

welke is te herschrijven als:

$$U = \sqrt{\frac{2g\Delta D \psi_{cr} k_{sl}}{\phi_{sc} 0,035 k_h k_t^2}} \quad 7-18$$

Nb. van deze formule is ook een recentere versie gepubliceerd waarbij k_t^2 is vervangen door k_t (paragraaf 4.2.1.4 [8]). Hier is echter uitgegaan van de meest bekende versie.

Hierin worden de volgende waarden ingevuld:

D	Karakteristieke elementafmeting [m], voor granulaire materialen geldt: $D = D_{n50}$. Bij sortering 10-60 kg hoort een D_{n50} van 0,24 m (zie bijvoorbeeld Bijlage I van CUR 197 Breuksteen in de praktijk).
ψ_{cr}	Als startwaarde voor de schuifspanningsparameter wordt uitgegaan van $\psi_{cr} = 0,035$ [-] voor granulaire materialen. Indien nodig kan dit zonder problemen worden aangescherpt naar $\psi_{cr} = 0,05$.
ϕ_{sc}	Ervan uitgaande dat de bodembescherming niet boven de drempel van het binnenhoofd uitsteekt kan worden uitgegaan van een waarde van de stabiliteitsparameter ϕ_{sc} van 0,75 [-], horende bij breuksteen in een doorgaande laag (minimale twee lagen stenen).
Δ	Relatieve dichtheid [-]: $\Delta = (\rho_s - \rho_w) / \rho_w = (2650 \text{ kg/m}^3 - 1000 \text{ kg/m}^3) / 1000 \text{ m}^3 = 1,65$.
k_h	$k_h = (1 + (h_{bi} - h_{bb})/D)^{-0,2}$ voor niet-volledig ontwikkeld snelheidsprofiel zoals hier. Invullen levert $k_h = (1 + 1,5/0,24)^{-0,2} = 0,67$ [-].
k_{sl}	Taludfactor [-]. Niet van toepassing, de bodembescherming ligt horizontaal.
k_t	Vanwege de korte afstand tussen betonwerk en begin van de bodembescherming wordt een hoge waarde voor de turbulentiefactor aangehouden van $k_t^2 = 2,0$ [-].
u_c	Dieptegemiddelde kritieke stroomsnelheid [m/s].
g	Zwaartekrachtversnelling (=9,81) [m/s ²].

Invullen van formule 7-18 levert een kritieke stroomsnelheid op van 2,8 m/s.

Vermenigvuldiging met de waterdiepte van 1,5 m levert een waarde voor het in te vullen kritiek debiet q_c op van 4,2 m³/s/m.

Voorbeeld 2

Van een gemaal is bekend dat deze onder normale omstandigheden maximaal 1,0 m³/s kan (en moet kunnen) verpompen. Aan de binnenzijde van de waterkering is een betonnen instroomwerk aanwezig, wat aansluit op een bodembescherming. De opbouw van de bodembescherming is onbekend. Uit lodingen blijkt dat de bodem geen erosiekuilen vertoont. In dit geval heeft men direct een eerste conservatieve indicatie van het kritieke debiet. Verwacht mag worden dat de bodembescherming met enige robuustheid is uitgelegd en dat deze een debiet van 1,0 m³/s ruimschoots aan kan. Dit wordt ingegeven door het feit dat bij het ontwerp van de bodembescherming de uitgerekende bodembescherming (sortering van stenen) naar boven afgerond wordt.

Met behulp van de stroomvoerende breedte kan nu voor de waarde van kritiek debiet per strekkende meter een waarde worden ingevoerd. Stel dat de stroomvoerende breedte 2,0 m bedraagt, dan is een inschatting van de waarde van q_c gelijk aan $1,0/2,0 = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

7.4.2 Stroomvoerende breedte bodembescherming

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r/σ	Δ_x	p_x	Δ_t	p_t
B_{sv}	[m]	logn	Invoer ⁴	$\sigma=0,05$ ²	-	0	-	1

¹ Vaste waarde² Defaultwaarde of aanbevolen waarde³ Startwaarde⁴ Vrije waarde

(zie Tabel 1-1)

De *stroomvoerende breedte bodembescherming* (B_{sv} [m]) is de stroomvoerende breedte ter plaatse van de maatgevende bodembescherming in verband met het optreden van erosiekuilen achter (aan de binnenzijde van de waterkering) het kunstwerk. Verondersteld wordt dat deze breedte lognormaal is verdeeld. Om die verdeling te karakteriseren moet de verwachtingswaarde μ worden opgegeven. Voor de standaardafwijking σ is de defaultwaarde 0,05 m, maar die waarde kan worden aangepast.

Hoe te bepalen

De stroomvoerende breedte dient te worden betrokken op de bodem(bescherming) waarvoor het kritieke debiet (zie paragraaf 7.4.1) is bepaald. Samen met de kritieke stroomsnelheid behorende bij de bodem(bescherming) levert de stroomvoerende breedte het totale kritieke debiet op.

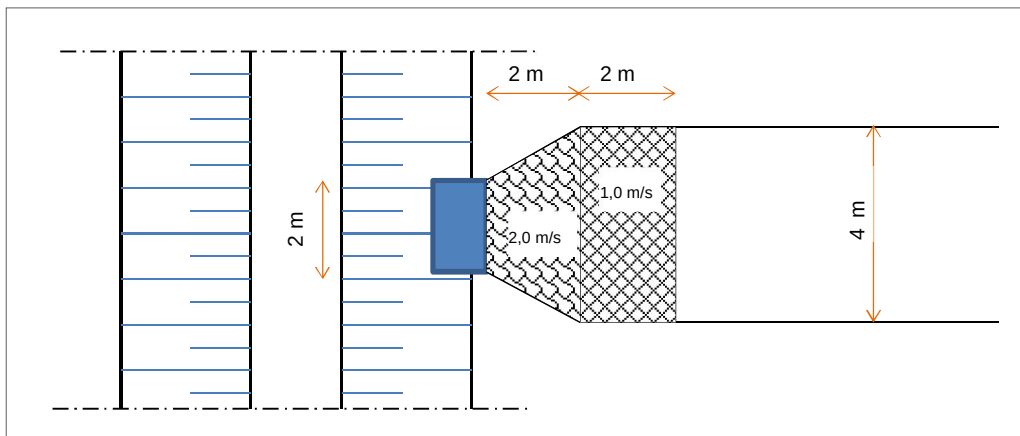
Het vaststellen van de stroomvoerende breedte kan met behulp van tekeningen of metingen in het veld. Een globale schatting is ook nog mogelijk met GIS-applicaties. Indien dit laatste wordt gehanteerd verdient het de aanbeveling om de spreiding van de parameter wat op te voeren. Bij de bepaling van de stroomvoerende breedte dient rekening te worden gehouden met eventuele neren (zie ook paragraaf 8.3.3 van [16]).

Aandachtspunten

Van belang is dat de stroomvoerende breedte B_{sv} altijd wordt gezien in combinatie met het kritieke debiet per strekkende meter (q_c) (zie paragraaf 7.4.1).

Voorbeeld

Een gemaal met een maximale capaciteit van $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$ heeft binnendijks een instroomwerk met een breedte van 2,0 m. De waterdiepte aan de binnenzijde bedraagt 1,0 m. Na het instroomwerk verbreedt de watergang zich geleidelijk middels vleugelwanden tot een breedte van 4,0 m. In Figuur 7-7 is een en ander weergegeven in bovenaanzicht.



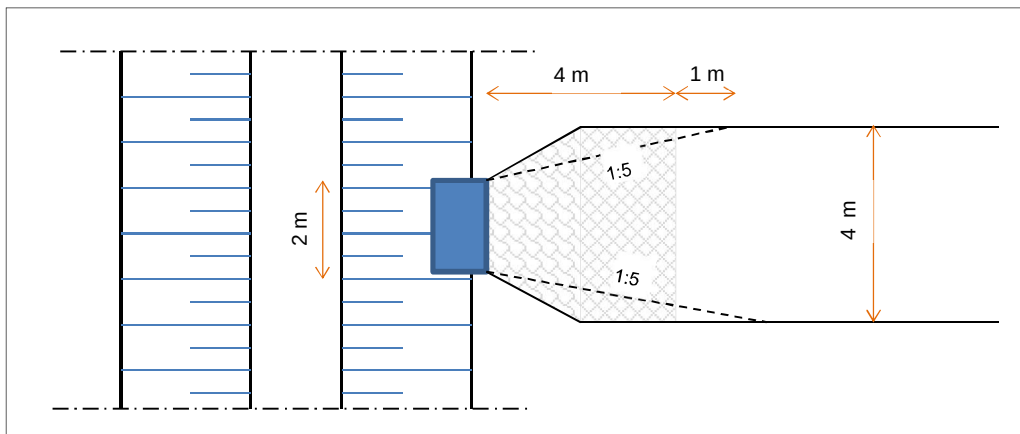
Figuur 7-7 Gemaal met afmetingen bodembescherming

Voor de bodembescherming over de eerste twee meter geldt een kritieke stroomsnelheid van 2,0 m/s, voor de volgende twee meter een kritieke stroomsnelheid van 1 m/s en voor de bodem achter de bodembescherming geldt dat deze bestaat uit redelijke vaste klei.

Stel dat is bepaald dat de spreiding van het debiet in deze specifieke situatie in horizontale richting plaats vindt met een verhouding 1:5, zie Figuur 7-8.

Ter plaatse van de aansluiting van het uitstroomwerk met de bodembescherming geldt een kritiek debiet van:

$$Q_c = u_c \cdot (h_{bi} - h_{dr}) \cdot B_{sv} = 2,0 \cdot (1,0) \cdot 2,0 = 4,0 \text{ m}^3/\text{s}$$



Figuur 7-8 Gemaal met bodembescherming belast door overtrekkende stroming

Ter plaatse van de overgang van de ene bodembescherming naar de andere geldt een kritiek debiet van:

$$Q_c = u_c \cdot (h_{bi} - h_{dr}) \cdot B_{sv} = 1,0 \cdot (1,0) \cdot (2,0 + 2 \cdot 2 \cdot 0,20) = 1,0 \cdot (1,0) \cdot (2,8) = 2,8 \text{ m}^3/\text{s}$$

Met betrekking tot de aansluiting tussen bodembescherming en onbeschermd bodem geldt een maximaal toelaatbaar debiet van (voor redelijk vaste klei is een kritieke stroomsnelheid van 1,0 m/s aangehouden, zie Tabel 7-3):

$$Q_c = u_c \cdot (h_{bi} - h_{dr}) \cdot B_{sv} = 1,0 \cdot (1,0) \cdot (2,0 + 2 \cdot 4 \cdot 0,20) = 1,0 \cdot (1,0) \cdot (3,6) = 3,6 \text{ m}^3/\text{s}$$

Uit bovenstaande blijkt dat het kritieke debiet bepaald wordt door het tweede deel van de bodembescherming. Er moet een kritieke stroomsnelheid van 1,0 m/s en een stroomvoerende breedte van 2,80 m ingevuld worden in het model.

7.5

Deelfaalmechanisme Z_{23} : falen sluitproces

De initiërende fase van het faalproces *niet sluiten* wordt gevormd door falen van het sluitproces. In bijlage D is een nadere afleiding van het formulepark van falen door niet sluiten gegeven, met als eindresultaat de onderstaande formules. Zoals in bijlage D is te zien liggen aan deze formules enkele belangrijke aannames ten grondslag. Met behulp van bijlage D kunnen voor afwijkende situaties formules op maat worden afgeleid.

Falen van het sluitproces van een kunstwerk wordt bepaald door de volgende parameters:

- De kans dat het kunstwerk niet hoogwaterkerend gesloten is dan wel niet gesloten kan worden omdat deze in reparatie is op het moment dat een willekeurig hoogwater zich aandient (P_{open}).
- De faalkans van sluiting van een doorstroomopening per sluitvraag (P_{ns}).
- Het aantal doorstroomopeningen (n). Indien $n > 1$, zie het kader in de inleiding van hoofdstuk 7.

De laatste parameter kan voor een kunstwerk met meerdere doorstroomopeningen verder worden uitgewerkt. Bij identieke doorstroomopeningen, waarvan de faalkans van sluiting onafhankelijk van elkaar is, kan de faalkans van sluiting van het kunstwerk worden benaderd door (zie paragraaf 7.5.2):

$$P_{ns,tot} = n \cdot P_{ns} \quad 7-19$$

De faalkans voor het sluitproces wordt nu:

$$P_{f,sluitproces} = P_{ns,tot} \cdot P_{open} = n \cdot P_{ns} \cdot P_{open} \quad 7-20$$

De faalfunctie voor het falen van het sluitproces is:

$$Z = -\Phi^{-1}(P_{f,sluitproces}) - u \quad 7-21$$

Waarin:

Φ^{-1} : inverse van de standaardnormale verdeling.

De parameter u in de bovenstaande faalfunctie is een stochastische hulpparameter, die niet ingevuld hoeft te worden. Middels deze hulpparameter wordt de kans $P_{f,sluitproces}$ op de juiste wijze meegenomen in een probabilistische berekening.

7.5.1

Kans op open staan bij naderend hoogwater

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_f / σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
P_{open}	[-]	det	Invoer ⁴	-	-	-	-	-

¹ Vaste waarde

² Defaultwaarde of aanbevolen waarde

³ Startwaarde

⁴ Vrije waarde

(zie Tabel 1-1)

De kans op open staan (P_{open}) is de kans dat het kunstwerk niet hoogwaterkerend gesloten is dan wel niet gesloten kan worden omdat deze in reparatie is op het moment dat een hoogwater zich aandient. Indien een kunstwerk open staat bij een naderend hoogwater dient de sluitprocedure te worden uitgevoerd. De invoer betreft de verwachtingswaarde van de kans.

Hoe te bepalen

De kans dat het kunstwerk niet hoogwater kerend gesloten is bij een naderend hoogwater wordt bepaald door het gebruik van het kunstwerk uit het oogpunt van zijn primaire functie (functie anders dan waterkeren). Teneinde dit goed te kunnen bepalen zijn gegevens over het gebruik van het kunstwerk benodigd.

Er is een viertal typen kunstwerken te onderscheiden:

- A. Altijd hoogwater kerend gesloten. 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 hoogwater kerend gesloten en wordt alleen op aanvraag geopend om zijn primaire functie uit te oefenen. Na afloop hiervan wordt het kunstwerk weer hoogwater kerend gesloten. Voorbeeld: spuisluis.
- C. Te sluiten bij hoogwater. Het kunstwerk staat vanuit zijn primaire functie altijd geopend (niet hoogwater kerend 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 relatie met het buitenwater hebben.

De basisformule ter bepaling van de kans op openstaan wordt gevormd door (zie bijlage D)¹⁸:

$$P_{open} = N_{open} \cdot (T_{open} + T_{rep}) \quad 7-22$$

Hierin is:

P_{open}	De kans dat een kunstwerk niet hoogwater kerend gesloten is op het moment dat een hoogwater zich aandient [-]
N_{open}	Aantal keren dat het kunstwerk vanuit zijn primaire functie wordt geopend en weer gesloten [-/jaar].
T_{open}	Gemiddelde tijdsduur per keer dat een kunstwerk vanuit zijn primaire functie open staat [jaar]
T_{rep}	Gemiddelde reparatieduur bij een falende sluiting als gevolg waarvan het kunstwerk open staat [jaar].

Met behulp van de formule kan nu voor de bovenstaande vier situaties gekeken worden naar de kans op open staan.

Ad A. Altijd hoogwatergesloten kunstwerken

¹⁸ De term P_{open} is een wat verwarrende term omdat dit niet de kans is dat het kunstwerk open staat voorafgaand aan een waterstand hoger dan $h_{bui,toel}$. Het is eigenlijk een 'samenraapsel' van elementen uit de kans op niet-sluiten gegeven $h > h_{bui,toel}$ en de kans op de onmogelijkheid van een sluiting vanwege het in reparatie zijn van het kunstwerk gegeven $h > h_{bui,toel}$ (zie verder bijlage D).

Deze kunstwerken zijn altijd, dus ook tijdens uitvoering van hun primaire functie, hoogwater kerend gesloten. Een voorbeeld hiervan is een schutsluis waarvan de beide sluishoofden (inclusief keermiddelen) en de kolkwanden hoogwater kerend zijn. Ook tijdens schutten is hier sprake van een kunstwerk dat hoogwater kerend gesloten staat, omdat tijdens het schutproces altijd de keermiddelen in één van de hoofden gesloten staan.

Het is eenvoudig in te zien het faalmechanisme *niet sluiten* in dit geval geen bijdrage heeft aan de faalkans van het kunstwerk. De kans dat het kunstwerk niet hoogwater kerend gesloten staat (P_{open}) van dit kunstwerk is immers gelijk is aan nul. Hierbij dienen nog de volgende zaken te worden toegevoegd:

- De kans dat bij het openstaan van een van de keermiddelen per ongeluk ook het andere keermiddel wordt geopend, wordt verwaarloosbaar geacht. In veel gevallen is hier een beveiliging voor aanwezig. Daarnaast is de kans groot dat dit tweede keermiddel dan tegen of in ieder geval onder druk van het verval geopend moet worden, wat daarmee een aanvullende belemmering kan zijn.
- De kans op het ontstaan van een bres als gevolg van uitvaring van het gesloten keermiddel wordt meegenomen bij het toetsspoor *sterkte en stabiliteit*. Hierin zit onder andere een kans op aanvaring van het keermiddel in verwerkt.

Gebruik makend van de genoemde formule kan dit ook worden onderbouwd. Immers de waarde voor N_{open} is gelijk aan nul, omdat het kunstwerk nooit openstaat. Hiermee wordt P_{open} en dus $P_{fa;ns}$ ook gelijk aan nul.

Ad. B Te openen op aanvraag

Het gaat hierbij om kunstwerken die normaal gesproken hoogwater kerend gesloten staan, maar die vanuit hun primaire functie op aanvraag één of meerdere keren per jaar openen en weer sluiten. Voorbeelden hiervan zijn gemalen, duikers en in- en uitwateringssluizen.

De kans dat het kunstwerk bij een naderend hoogwater niet gesloten staat is gelijk aan de periode waarover de primaire functie wordt uitgeoefend vermeerderd met de reparatietijd bij een falende sluiting. Het is evident dat hoe korter de totale geopende tijd is, des te kleiner de kans wordt dat het kunstwerk open staat op het moment dat zich een hoogwater voordoet.

Formule 7-22 is voornamelijk geënt op deze categorie kunstwerken. Belangrijk voor een goede beoordeling is kennis van het daadwerkelijk gebruik van het object, zoals frequentie van primaire functieervulling, duur van functieervulling en wijze waarop (bijvoorbeeld pompen) deze plaatsvindt. Aan de hand van die gegevens kunnen inschattingen worden gemaakt voor de betrokken parameters. Voor het inschatten van de reparatieperiode dient gekeken te worden naar aspecten als signalering van een gefaalde sluiting en mogelijkheden tot het nemen van maatregelen (bijvoorbeeld onderhoudscontracten, tijdelijke maatregelen).

Ad. C Te sluiten bij hoogwater

Onder deze categorie vallen de kunstwerken die normaal gesproken openstaan en die alleen gesloten worden vanuit het aspect waterkeren. Voorbeelden hiervan zijn coupures en keersluizen.

De kans op niet hoogwaterkerend gesloten staan kan voor deze objecten eenvoudig worden bepaald. Indien een kunstwerk gedurende het gehele jaar openstaat, is de kans gelijk aan 1. Wanneer sprake is van een vaste periode waarover een object gesloten staat, is de kans gelijk aan het deel van het jaar waarover het object openstaat.

Ad. D Te sluiten bij calamiteit

Deze groep kenmerkt zich door het feit dat ze in eerste instantie geen directe verbinding hebben met het buitenwater. Pas na het optreden van een calamiteit is sluiting van het kunstwerk gewenst, om substantiële gevolgen te voorkomen dan wel te beperken. Een tunnel die een waterkering kruist is een voorbeeld van een dergelijke constructie.

Feitelijk staan deze objecten altijd gesloten, omdat er geen directe verbinding met het buitenwater is. Dit contact ontstaat pas in het geval van een calamiteit. Voor een tunnel die een waterkering passeert, is vanuit het oogpunt van waterkeren sprake van openstaan als zich een substantiële lekkage in de tunnel voordoet. Hiermee wordt de kans op openstaan gelijk aan de kans op optreden van de calamiteit. Formule 7-21 is hier niet direct van toepassing. Tunnels die tevens onderdeel vormen van de primaire waterkering, kunnen worden beschouwd als waterkerend kunstwerk dat qua stabiliteit, sterkte en niet-sluiten moet voldoen aan de eisen. Indien daarin keermiddelen aanwezig zijn is deze handleiding daarvoor ook van toepassing.

Aandachtspunten

Om een goede inschatting te maken van P_{open} zijn accurate gegevens omtrent gebruik en bediening van het object benodigd. Indien deze niet voorhanden zijn, kan gestart worden met een conservatieve schatting. Bij het niet voldoen van het kunstwerk op het faalmechanisme *niet sluiten* dienen deze gegevens dan alsnog te worden achterhaald, zodat een scherpere beoordeling plaats kan vinden.

De tijdsduur van een reparatie is vermoedelijk het lastigste om in te schatten. Hierbij moet worden bedacht dat deze tijdsduur beïnvloed wordt door onder andere signalering van falen, de faaloorzaken en de eigenschappen van het kunstwerk.

- **Signalering.**
Hoe snel falen van sluiting gesignaleerd wordt hangt af van het gebruik van het kunstwerk, de aanwezige controlesystemen (zoals automatische peilmetingen en foutmeldingen) en controles in het veld. De signaleringstijd heeft direct invloed op de reparatietijd. Hoe langer de signaleringstijd des te langer ook de reparatietijd.
- **Faaloorzaken.**
Dit heeft betrekking op de mogelijkheden om een falende sluiting te herstellen. Indien bijvoorbeeld de sluiting faalt omdat een drijvend obstakel het keermiddel blokkeert, is dit vermoedelijk snel te herstellen door het obstakel te verwijderen met bijvoorbeeld een stok. Als het obstakel zich onder water bevindt wordt het verwijderen al een stuk lastiger en is wellicht de inzet van duikers benodigd. Hierdoor zal de reparatietijd toenemen. Opgemerkt wordt dat in het laatste geval verondersteld mag worden dat de beheerder de waterstandsvoorspellingen zal raadplegen om te kijken of het kunstwerk tijdelijk op alternatieve wijze gesloten moet worden zolang de reparatie niet heeft plaatsgevonden.
- **Eigenschappen van kunstwerk.**
Afmetingen van doorstroomopening(en), bereikbaarheid van het kunstwerk, bereikbaarheid van de keermiddelen/aandrijving, eventuele aanwezigheid van stroming door het kunstwerk en aanwezigheid van andere keermiddelen zijn aspecten die de reparatieduur kunnen beïnvloeden.

Het is niet mogelijk om voor alle aspecten richtgetallen te bepalen. Het gaat er dan ook om een enigszins onderbouwde (subjectieve) aanname omtrent de reparatietijd te doen. De ordegrrootte waaraan gedacht kan worden is een halve dag tot twee dagen. Langer dan twee dagen lijkt zelden reëel, omdat er nagenoeg altijd twee keermiddelen aanwezig zijn en reparatie van een van deze twee of een alternatieve sluiting binnen twee dagen gerealiseerd kan zijn (een en ander in afstemming met de waterstandsvoorspellingen). Alleen in situaties waarbij slechts één keermiddel aanwezig is en de eigenschappen van het kunstwerk de reparatietijd sterk beïnvloeden kan worden gedacht over langere hersteltijden. Er mag worden verondersteld dat signalering van een gefaalde sluiting binnen enkele uren plaats zal vinden.

In Riskeer is de maximale waarde voor P_{open} gelijk aan 1. Het kan echter voorkomen (zie ook onderstaande voorbeelden) dat een waarde groter dan 1 gevonden wordt voor deze parameter. In dat geval (en alleen in dat geval) kan dit worden gecompenseerd (work-around) door voor P_{open} een waarde van 1 in te vullen en de gevonden waarde voor P_{ns} te vermenigvuldigen met de waarde van P_{open} (voorbeeld $P_{open} = 3$; invoer Riskeer is $P_{open} = 1$ en $P_{ns} = 3 \times P_{ns}$).

Voorbeelden

Hieronder worden voor de situaties A, B en C van kunstwerken, die in relatie tot P_{open} gedefinieerd kunnen worden, enkele voorbeelden gegeven.

Altijd hoogwater kerend gesloten kunstwerken

Voor dit type, zoals schut- en keersluizen geldt dat ze ook bij het uitoefenen van hun primaire functie altijd hoogwater kerend gesloten zijn. Kijkend naar het model voor P_{open} geldt dat N_{open} en T_{open} gelijk zijn aan 0 en daarmee ook P_{open} gelijk wordt aan 0.

$$P_{open} = N_{open} \cdot (T_{open} + T_{rep}) = 0 \cdot (0 + T_{rep}) = 0$$

Te openen op aanvraag

Het gaat hierbij om kunstwerken die standaard gesloten staan en die alleen op aanvraag openen, zoals gemalen en uitwateringssluizen.

Voorbeeld 1

Een uitwateringssluus in het bovenrivierengebied welke 50 keer per jaar geopend wordt om onder vrij verval water te lozen en waarbij dit ook bij hogere buitenwaterstanden nog plaatsvindt. De gemiddelde openingsduur is 1 dag. Indien de sluiting faalt, is de hersteltijd (signalering, mobiliseren, repareren) gelijk aan 2 dagen. De maximaal toelaatbare buitenwaterstand bij een geopend kunstwerk, wordt gemiddeld 3 keer per jaar overschreden gedurende een viertal dagen (duur hoogwatergolf). Gedurende een hoogwater blijft dit kunstwerk gesloten. In feite zijn er drie momenten per jaar waarop het kunstwerk gesloten moet zijn dan wel worden. De kans dat het object niet hoogwaterkerend gesloten staat (P_{open}) kan als volgt worden bepaald:

N_{open}	50 /jaar	De uitwateringssluus wordt 50 keer per jaar geopend (en ook weer gesloten)
T_{open}	1/365 jaar	Gemiddelde openingsduur is 1 dag
T_{rep}	2/365 jaar	De reparatietijd bij een falende sluiting bedraagt twee dagen

$$P_{open} = N_{open} \cdot (T_{open} + T_{rep}) = 50 \cdot \left(\frac{1}{365} + \frac{2}{365}\right) = 0,411$$

Opgemerkt wordt dat de faaloorzaken tussen de diverse openingsperioden als onafhankelijk worden beschouwd. Dit is gebaseerd op het feit dat de uitwateringssluits weer gesloten wordt, ten einde de binnenwaterstand niet te ver te laten zakken (handhaven binnenpeil). Indien de sluiting faalt in deze situatie, wordt dit gesignaleerd en kan er actie worden ondernomen.

Voorbeeld 2

Een gemaal in het bovenrivierengebied heeft één uitstroomkoker door de dijk. Afhankelijk van de buitenwaterstand¹⁹ zijn er gemiddeld 100 maalvragen per jaar met een gemiddelde maalduur van een halve dag. Het herstel van een gefaalde sluiting duurt een dag. De maximaal toelaatbare buitenwaterstand bij een geopend kunstwerk wordt gemiddeld 3 keer per jaar overschreden gedurende een viertal dagen (duur hoogwatergolf). Gedurende een hoogwater wordt er niet uitgemalen en voorafgaand aan een hoogwater dient het gemaal dus gesloten te zijn/worden. De opvoerhoogte van de pomp is dusdanig groot dat ook bij hoogwater uitgemalen zou kunnen worden. Echter indien de pompen uit staan, kunnen de pompen niet tegen een eventuele instroming worden opgestart (in de praktijk geldt dit voor de meeste pompen). In feite zijn er gemiddeld drie momenten per jaar waarop het kunstwerk gesloten moet zijn dan wel worden. De kans dat het object niet hoogwaterkerend gesloten staat (P_{open}) kan als volgt worden bepaald:

N_{open}	100 /jaar	Het gemaal wordt 100 keer per jaar ingezet
T_{open}	0 jaar	Tijdens het uitmalen is er geen gevaar voor instroming, ook niet bij een hoogwater. Als er niet wordt uitgemalen staat het gemaal standaard dicht.
T_{rep}	1/365 jaar	De reparatietijd bij een falende sluiting bedraagt een dag

$$P_{open} = N_{open} \cdot (T_{open} + T_{rep}) = 100 \cdot (0 + \frac{1}{365}) = 0,274$$

Voorbeeld 3

Hetzelfde gemaal als in voorbeeld 2, alleen vindt het spuien van water onafhankelijk van de buitenwaterstand plaats en is de reparatietijd een halve dag. De opvoerhoogte van de pomp is dusdanig groot dat ook bij hoogwater uitgemalen kan worden. In feite is er dus tijdens een maalperiode geen gevaar voor instroming (tenzij de pomp het begeeft en de afsluitmiddelen vervolgens niet sluiten). Deze kans is verwaarloosbaar klein bij een goed onderhouden kunstwerk. Dit kunstwerk vergt een getrapte benadering.

De maximaal toelaatbare buitenwaterstand bij geopend kunstwerk wordt drie keer per jaar overschreden. De kans dat er op een willekeurige dag gemalen wordt is 100/365. Aangezien een hoogwaterperiode gemiddeld 4 dagen duurt, betekent dit dus dat de gemiddelde frequentie van maalperioden (en daarmee sluitingen) per hoogwaterperiode $4 \times 100/365 = 1,10$ bedraagt. Dit is feitelijk P_{open} (in dit geval een frequentie). Een kans op herstel is niet aanwezig omdat sluiting plaatsvindt bij hoogwatercondities.

Voor de overige 96 maalvragen (afronden naar boven van 3 hoogwaterperioden met gemiddelde sluitfrequentie van 1,1) geldt dat deze in een periode van $365 - 12 = 353$ dagen plaatsvinden. De kans dat het gemaal bij een naderend hoogwater, 3 keer per jaar dus, geopend is, is nu:

¹⁹ Het gemaal wordt niet tijdens hoogwater ingezet.

N_{open}	96 /jaar	Het gemaal wordt 96 keer per jaar buiten het hoogwater ingezet
T_{open}	0 jaar	Tijdens het uitmalen is er geen gevaar voor instroming, ook niet bij een hoogwater.
T_{rep}	1/730 jaar	De reparatietijd bij een falende sluiting bedraagt een halve dag

$$P_{open} = \frac{400}{365} + N_{open} \cdot (T_{open} + T_{rep}) = 110 + 96 \cdot (0 + \frac{1}{730}) = 122$$

Hier wordt het bijzondere karakter van P_{open} (zie bijlage D) zichtbaar, omdat er hier een soort frequentie (kans groter dan 1) wordt bepaald. Voor de frequentie geldt dat vermenigvuldiging met het aantal hoogwaters (3) resulteert in het gemiddeld aantal sluitingen per jaar tijdens een hoogwater.

Voorbeeld 4

Het gaat om een schutsluis in het bovenrivierengebied. Alleen het buitenhoofd is voorzien van stormvloeddeuren welke ook in het schutproces worden gebruikt. De sluis kent gemiddeld 7.300 schuttingen per jaar met een gemiddelde openingstijd van de stormvloeddeuren van 15 minuten per schutting en wordt lokaal bediend. De overschrijdingsfrequentie van de maximaal toelaatbare buitenwaterstand bij niet hoogwaterkerend gesloten kunstwerk bedraagt 1/100 per jaar en is gerelateerd aan de keermiddelen in het binnenhoofd. Het maximale schutpeil (stremmen van de sluis) ligt uiteraard onder deze maximaal toelaatbare buitenwaterstand. De beschikbare tijd tussen sluitpeil (maximale schutpeil) en overschrijding van deze maximaal toelaatbare buitenwaterstand bedraagt 12 uur. De reparatietijd van een falende sluiting bedraagt maximaal 24 uur. In dit geval dient te worden gekeken naar de kans op open staan binnen de reparatietijd van 24 uur. Bij open staan als gevolg van schutten of falen van de sluiting buiten de reparatietijd zal er altijd alsnog op tijd gesloten zijn. Het openstaan als gevolg van het primaire proces van schutten is binnen de reparatietijd van 24 uur niet van belang. De kans op open staan kan daarmee worden beschouwd binnen een reparatieperiode.

N_{open}	20 / T_{rep}	In een reparatietijd van 24 uur vinden $7.300/365 = 20$ schuttingen plaats
T_{open}	0 T_{rep}	Het open staan vanuit de primaire functie is niet van belang, omdat het alleen om de sluitingen binnen de reparatietijd van 24 uur gaat. De duur van de opening vanuit de primaire functie doet er niet toe.
T_{rep}	1 T_{rep}	De reparatietijd is al verwerkt in het aantal sluitingen dat binnen één reparatietijd valt.

$$P_{open} = N_{open} \cdot (T_{open} + T_{rep}) = 20 \cdot (0 + 1) = 20$$

In dit geval wordt de kans op openstaan een frequentie, welke middels vermenigvuldiging met P_{ns} in Z23 uiteindelijk de kans wordt dat het kunstwerk ongewenst open blijft staan en ook niet meer gesloten kan worden. In feite wordt de faalkans met betrekking tot het sluitproces (zie 7-20) gelijk aan:

$$P_{f;sluitproces} = n \cdot P_{ns} \cdot P_{open} = 1 \cdot P_{ns} \cdot 20 = 20 \cdot P_{ns}$$

Door de kans van voorkomen van een buitenwaterstand hoger dan de maximaal toelaatbare waterstand met betrekking tot de binnendeuren te vermenigvuldigen met bovenstaande faalkans van het sluitproces, wordt uiteindelijk de faalkans voor *betrouwbaarheid sluiting* bepaald.

Te sluiten bij hoogwater

Voor deze kunstwerken geldt dat ze normaal gesproken openstaan en alleen worden gesloten als dit vanuit het oogpunt van hoogwater keren nodig is. Een reparatieperiode vanuit een andere functie is dan ook niet aan de orde. Indien een sluiting faalt, wordt reparatie/herstel onmiddellijk in gang gezet.

Voorbeeld 1

Een coupure die normaal altijd openstaat en alleen in het geval van hoogwater gesloten wordt.

N_{open}	1 /jaar	Kijkend naar een periode van een jaar kan gesteld worden dat de coupure aan het begin van die periode open gezet wordt voor de duur van 1 jaar.
T_{open}	1 jaar	Omdat de coupure altijd zijn primaire functie uitvoert, doorlaten van verkeer en mensen, staat deze in principe het hele jaar open
T_{rep}	0 jaar	De reparatietijd voor falen vanuit de primaire functie speelt hier geen rol.

$$P_{open} = N_{open} \cdot (T_{open} + T_{rep}) = 1 \cdot (1 + 0) = 1$$

Voorbeeld 2

Een keersluis voor een recreatiehaven, die in het stormseizoen (1 oktober tot 1 april) altijd gesloten is omdat er dan geen vaarbewegingen zijn. Buiten het stormseizoen staat de keersluis altijd open.

N_{open}	1 /jaar	Kijkend naar een periode van een jaar kan gesteld worden dat de keersluis aan het begin van die periode opengezet wordt voor de duur van $\frac{1}{2}$ jaar.
T_{open}	$\frac{1}{2}$ jaar	De keersluis staat gedurende de periode van 1 jaar de helft van de tijd open
T_{rep}	0 jaar	De reparatietijd voor falen vanuit de primaire functie speelt hier geen rol.

$$P_{open} = N_{open} \cdot (T_{open} + T_{rep}) = 1 \cdot (\frac{1}{2} + 0) = \frac{1}{2}$$

In bovenstaand voorbeeld komt duidelijk naar voren dat in het model in principe ervan uitgegaan wordt dat de hoogwaters gelijkelijk verdeeld zijn binnen een jaar. Indien gebruik wordt gemaakt van de aanname dat circa 10% van de hoogwaters per jaar zich buiten het stormseizoen voordoen en de overige 90% in het stormseizoen, dan kan dit gegeven in het model worden ingebracht via de kans op openstaan²⁰. Geredeneerd vanuit de hoogwaters geldt immers dat dit kunstwerk voor 90% van het jaar een kunstwerk type “altijd hoogwater kerend gesloten” is en voor 10% is het een kunstwerk type “te sluiten bij hoogwater”. Indien dit wordt

²⁰ Wat een hoogwater is, wordt bepaald door die buitenwaterstand die tot substantiële gevolgen in het achterland leidt. Vanuit deze optiek kan bij een keersluis die ook wel eens in het zomerseizoen gesloten moet worden het nodig zijn om de verhouding 90-10 aan te passen.

toegepast kan nog steeds gebruik worden gemaakt van het model voor P_{open} , echter dient T_{open} dan gezien te worden in het licht van verdeling van het aantal hoogwaters:

N_{open}	$1/10$ /jaar	Het aantal openingen per jaar gezien vanuit het perspectief van hoogwaters is $1/10$
T_{open}	1 jaar	De keersluis staat voorafgaand aan de van belang zijnde hoogwaters open
T_{rep}	0 jaar	De reparatietijd voor falen vanuit de primaire functie speelt hier geen rol.

$$P_{open} = N_{open} \cdot (T_{open} + T_{rep}) = \frac{1}{10} \cdot (1 + 0) = \frac{1}{10}$$

Het is duidelijk dat het meenemen van een verdeling van hoogwaters over het jaar kan leiden tot een aanscherping van de kans op openstaan.

7.5.2 Kans mislukken sluiting

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r / σ	Δ_x	p_x	Δ_t	p_t
P_{ns}	[-]	det	Invoer ⁴	-	-	-	-	-

¹ Vaste waarde

² Defaultwaarde of aanbevolen waarde

³ Startwaarde

⁴ Vrije waarde

(zie Tabel 1-1)

De *Kans mislukken sluiting* (P_{ns} [-]) is de kans dat de hoogwatersluiting van het kunstwerk faalt op het moment dat er sprake is van hoogwater. De verwachtingswaarde van deze kans wordt in de berekening gebruikt als deterministische variabele en moet door de gebruiker worden ingevoerd.

Hoe te bepalen

Bij het bepalen van deze kans moet onderscheid worden gemaakt tussen hoogwater kerende keermiddelen die vanuit hun dagelijks functioneren bediend worden en keermiddelen die alleen bij een hoogwater gesloten worden.

Bij de eerste groep keermiddelen is sprake van enkele tot vele sluitingen per jaar. De kans kan worden bepaald met de standaardfaalkansen voor diverse keermiddelen die opgenomen zijn in bijlage B van de Werkwijzer Ontwerpen Waterkerende Kunstwerken [20]. Indien in een toets op maat een nadere bepaling van de faalkans van onderdelen van de keermiddelen benodigd is kan gebruik worden gemaakt de excelsheet "RWS Faaldata voor opdrachtnemers" of gegevens van de producenten.

Voor de tweede groep geldt een veel kleinere sluitfrequentie; het keermiddel sluit alleen bij de jaarlijkse oefening(en) en eventuele daadwerkelijke sluitingen voor hoogwater. Hier is veel minder sprake van automatisme en ervaringen met het keermiddel. De kans op niet sluiten is over het algemeen dan ook groter dan bij frequent sluitende keermiddelen. De faalkans kan op verschillende wijzen worden bepaald. In eerste instantie kan gebruik worden gemaakt van de "Werkwijze bepalen kans op niet sluiten per sluitvraag met scoretabellen" [21]. Deze methode is generiek toepasbaar voor keermiddelen die alleen sluiten voor hoogwater. Wanneer een scherpere inschatting van de kans benodigd is kan een risicoanalyse op maat worden gemaakt.

Aandachtspunten

Bij het bepalen van de kans op niet sluiten (P_{ns}) is het van belang om bij meerdere doorstroomopeningen ($n > 1$, zie paragraaf 7.5.3) de gehele configuratie te beschouwen. In het

instrumentarium kan slechts één waarde van P_{ns} worden ingevuld. Dit betekent dat er de volgende mogelijkheden zijn bij meerdere doorstroomopeningen:

- Voor P_{ns} wordt een waarde ingevuld die representatief is voor één enkele doorstroomopening. Middels de waarde voor n (zie paragraaf 7.5.3) kan vervolgens het aantal doorstroomopeningen worden verdisconteerd. Dit kan in het geval er sprake is van geheel onafhankelijke doorstroomopeningen met eenzelfde kans op falen van de sluiting.
- Voor de kans op niet sluiten wordt van het systeem van doorstroomopeningen één totale faalkans sluiting (P_{ns}) afgeleid. Dit kan voorkomen wanneer doorstroomopeningen een van elkaar afwijkende faalkans voor sluiting hebben of als er sprake is van een behoorlijke mate van afhankelijkheid. De waarde van n dient in dat geval 1 te zijn.

Van belang is om bij meerdere doorstroomopeningen te realiseren dat dit niet alleen invloed heeft op de kans op niet sluiten, maar ook op het totale oppervlak van de doorstroomopeningen. Dit betekent dat bij meerdere doorstroomopeningen per kunstwerk gekeken dient te worden naar mogelijke faalsituaties met betrekking tot niet sluiten. Immers het totale doorstroomoppervlak dat niet afgesloten is, is van invloed op het instromende debiet en hiermee op de gevolgen van niet sluiten. Dit speelt met name als de verschillende doorstroomopeningen verschillende faalkansen voor sluiten hebben.

Bij het betrekken van keermiddelen bij de bepaling van de kans op niet sluiten is het van belang dat de inzet en werking van de keermiddelen helder is. Een secundair keermiddel dat pas gesloten wordt op het moment dat het primaire keermiddel faalt, kan niet zomaar meegenomen worden. Dit is een keermiddel dat wordt ingezet na falen van de reguliere sluiting. Het is dan belangrijk om vast te stellen of dit secundaire keermiddel op stroom gesloten kan worden. Hieruit blijkt dus dat het tijdstip van inzet van een keermiddel van belang kan zijn. Dit dient aantoonbaar vastgelegd te zijn in de protocollen die voor hoogwaterkeren gelden.

Voorbeeld

Eenvoudig enkelvoudig kunstwerk

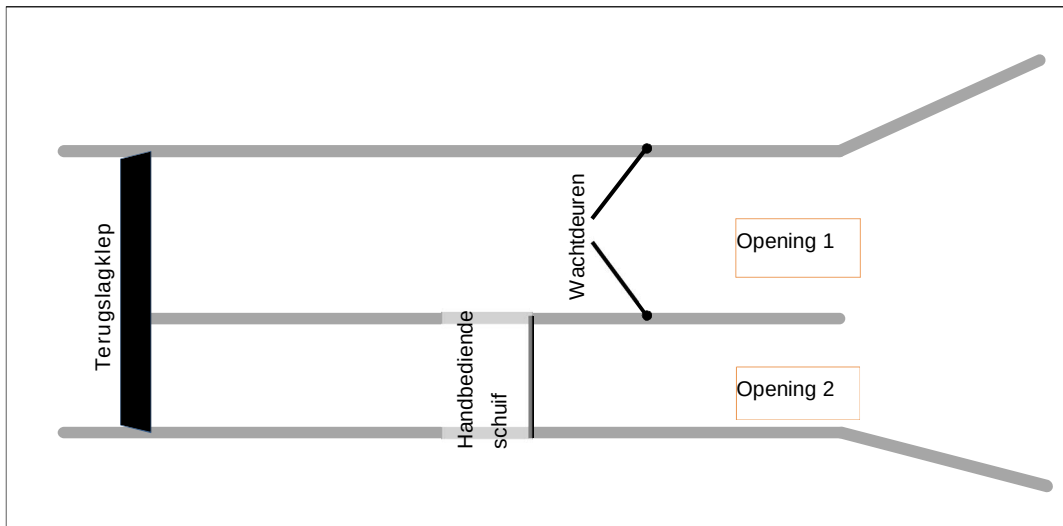
Een kunstwerk heeft een doorstroomopening door de waterkering en is voorzien van een terugslagklep die meerdere keren per dag functioneert vanuit de primaire functie van het kunstwerk en een handbediende spindelschuif. De terugslagklep sluit automatisch na elke lozing. De spindelschuif wordt alleen bediend als een hoogwater nadert.

Voor de terugslagklep kan gebruik worden gemaakt van de standaardfaalkansen die hiervoor beschikbaar zijn. Een faalkans van $1,0 \cdot 10^{-5}$ per vraag kan hier bijvoorbeeld voor worden gebruikt (zie bijlage B uit [20]).

Voor de handbediende schuifafsluiter geldt dat deze alleen als hoogwater kerend keermiddel fungeert. Dit betekent dat zaken als alarmering, mobilisatie en bediening van belang zijn. Ook technisch falen op het moment dat (eindelijk) de schuifafsluiter wordt gebruikt is een aandachtspunt. Met behulp van de scoretabellen uit de “Werkwijze bepalen kans op niet sluiten per sluitvraag met scoretabellen” [21] kan hier een faalkans voor worden afgeleid. Dit wordt hier niet verder uitgewerkt. Stel dat de uitkomst van de scoretabellen is dat voor de schuifafsluiter een faalkans van 10^{-2} per vraag wordt gevonden. Hiermee wordt de totale faalkans voor sluiting gelijk aan $P_{ns} = 1,0 \cdot 10^{-5} \times 1,0 \cdot 10^{-2} = 1,0 \cdot 10^{-7}$ per vraag. Hierbij is gebruik gemaakt van de gehele onafhankelijkheid van sluiting van beide keermiddelen.

Kunstwerk met meerdere doorstroomopeningen

In Figuur 7-9 is schematisch de situatie van een kunstwerk met een tweetal doorstroomopeningen weergegeven. De openingen worden afgesloten door een gezamenlijke terugslagklep en een handbediende schuif dan wel wachtdeuren. De doorstroomopeningen hebben verschillende doorstroomoppervlakken. Het vrije doorstroomoppervlak van opening 1 is twee keer zo groot als dat van opening 2.



Figuur 7-9 Schematische weergave van kunstwerk met verschillende typen keermiddelen

Er wordt rekening gehouden met de volgende faalkans voor sluiting van de diverse keermiddelen:

- Terugslagklep: $1,0 \cdot 10^{-4}$ per vraag (Inschatting op basis van ervaringen)
- Schuif: $1,0 \cdot 10^{-2}$ per vraag (op basis van "Werkwijze bepalen kans op niet sluiten per sluitvraag met scoretabellen" [21])
- Wachtdeuren: $1,0 \cdot 10^{-3}$ per vraag (Inschatting op basis van ervaringen)

Per doorstroomopening kan nu een faalkans van sluiten worden bepaald en gekeken worden welke situatie dan ontstaat:

Opening 1 alleen niet gesloten:

$$P_{ns} = P_{ns; terugslagklep} \times P_{ns; wachtdeuren} \times (1 - P_{ns; schuif}) = 1,0 \cdot 10^{-4} \times 1,0 \cdot 10^{-3} \times (1 - 1,0 \cdot 10^{-2}) = 9,90 \cdot 10^{-8}$$

per vraag

$$A_{doorstroom} = A_1 \text{ m}^2$$

Opening 2 alleen niet gesloten:

$$P_{ns} = P_{ns; terugslagklep} \times P_{ns; schuif} \times (1 - P_{ns; wachtdeuren}) = 1,0 \cdot 10^{-4} \times 1,0 \cdot 10^{-2} \times (1 - 1,0 \cdot 10^{-3}) = 9,97 \cdot 10^{-7}$$

per vraag

$$A_{doorstroom} = A_2 \text{ m}^2 = \frac{1}{2} A_1 \text{ m}^2$$

Opening 1 en 2 beide niet gesloten:

$$P_{ns} = P_{ns; terugslagklep} \times P_{ns; wachtdeuren} \times P_{ns; schuif} = 1,0 \cdot 10^{-4} \times 1,0 \cdot 10^{-3} \times 1,0 \cdot 10^{-2} = 1,0 \cdot 10^{-9} \text{ per vraag}$$

$$A_{doorstroom} = A_1 + A_2 = A_1 + \frac{1}{2} A_1 = 1\frac{1}{2} A_1 \text{ m}^2$$

In het instrumentarium dient nu uiteindelijk die situatie te worden ingevuld die maatgevend is voor dit kunstwerk. Dit kan betekenen dat de bovenstaande drie gevallen apart in Riskeer doorgerekend moeten worden (invoer P_{ns} , n en B), om vervolgens deze keuze te maken. Omdat geen sprake is van identieke onafhankelijk doorstroomopeningen dient voor de parameter n (zie paragraaf 7.5.3) voor alle bovenstaande gevallen de waarde '1' te worden ingevuld.

7.5.3 Aantal identieke doorstroomopeningen

Wat is het

Aanduiding	eenheid		type	μ	V_r/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
n	[-]		det	Invoer ⁴	-	-	-	-	-

¹ Vaste waarde

² Defaultwaarde of aanbevolen waarde

³ Startwaarde

⁴ Vrije waarde

(zie Tabel 1-1)

Indien $n > 1$, zie het kader in de inleiding van hoofdstuk 7.

Het aantal identieke doorstroomopeningen (n [-]) dat in het kunstwerk aanwezig is. Met de parameter wordt de faalkans van sluiting per doorstroomopening gesommeerd over het aantal aanwezige doorstroomopeningen. Hierbij wordt onafhankelijkheid tussen de sluitingen van de verschillende doorstroomopeningen gesuggereerd. Op deze wijze ontstaat een kans op niet sluiten van ten minste één van de doorstroomopeningen. De verwachtingswaarde van dit aantal wordt in de berekening gebruikt als deterministische variabele en moet door de gebruiker worden ingevoerd.

Hoe te bepalen

Het bepalen van de waarde voor n vindt plaats met behulp van de configuratie van het kunstwerk en de daarin aanwezige keermiddelen. Zodra er sprake is van één doorstroomopening, is de waarde van n vanzelfsprekend gelijk aan 1.

Bij meerdere doorstroomopeningen dient bekeken te worden of deze identiek zijn aangaande de kans op falen van de sluiting. Indien dit het geval is en falen van de sluiting van deze doorgangen is onafhankelijk van elkaar, krijgt n de waarde van het aantal doorstroomopeningen.

Wanneer sprake is van meerdere doorstroomopeningen, maar falen van de sluiting per opening is onderling geheel gecorreleerd, dan dient voor n de waarde van 1 te worden ingevuld. Het falen van de sluiting van één van de openingen impliceert dan immers dat de sluiting van alle openingen faalt.

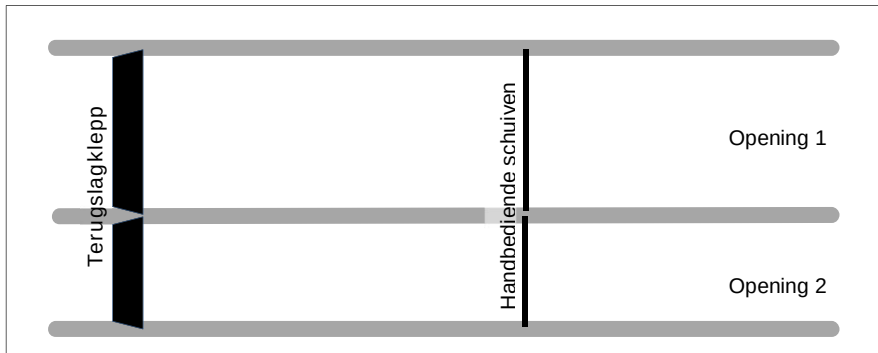
Aandachtspunten

De parameter heeft feitelijk betrekking op de totale kans van falen van de sluiting van het kunstwerk. Dit betekent dat n altijd in samenhang met de parameter P_{ns} moet worden bekeken.

Men dient erop bedacht te zijn dat n geen invloed heeft op het doorstroomoppervlak. Dus indien er twee doorstroomopeningen zijn en n is de waarde 2 toegekend, dient voor het doorstroomoppervlak het totale doorstroomoppervlak te worden ingegeven en niet slechts die van één doorstroomopening.

Voorbeeld

Een kunstwerk met een tweetal kokers door de waterkering. De kokers zijn beide voorzien van dezelfde type keermiddelen, waarbij de belangrijkste faaloorzaken onafhankelijk zijn van elkaar. De doorstroomopeningen hebben verschillende doorstroomoppervlakten. In Figuur 7-10 is een schematisch overzicht gegeven.



Figuur 7-10 Schematische kunstwerk met twee kokers met handbediende schuiven en terugslagkleppen

De maatgevende faaloorzaak voor de terugslagkleppen bestaat uit een obstakel. Voor de handbediende schuiven geldt dat de maatgevende faaloorzaak het aandrijfmechanisme (heugelstang) wordt gezien. De kans op niet sluiten per koker is $P_{ns;k1} = P_{ns;k2} = P_{ns}$.

In eerste instantie is een conservatieve benadering door voor $n = 2$ in te vullen en voor het doorstroomoppervlak de gesommeerde waarde van A_1 en A_2 .

Een scherper beoordeling wordt verkregen als de volgende twee situaties worden geanalyseerd en de met de maatgevende situatie rekening wordt gehouden:

- Een van beide kokers sluit niet; $n = 2$, waardoor $P_{ns;tot} = 2 \times P_{ns}$. Voor het doorstroomoppervlak A kan de grootste waarde van A_1 en A_2 worden ingevuld.
- Beide kokers sluiten niet; $n = 1$ en $P_{ns;tot} = P_{ns}^2$. Voor het doorstroomoppervlak A dient de gesommeerde waarde van A_1 en A_2 te worden ingevuld.

7.6

Deelfaalmechanisme Z_{24} : falen van herstel van het sluitproces

Nadat het primaire sluitproces is gefaald zijn er wellicht nog mogelijkheden om alsnog het kunstwerk hoogwater kerend gesloten te krijgen. Deze mogelijkheid wordt in het instrumentarium ingebracht door het deelfaalmechanisme "falen van herstel van het sluitproces". De kans op het falen van herstel van het sluitproces wordt in het WBI 2017 geschematiseerd middels volgende parameter *Faalkans herstel van gefaalde situatie* ($P_{f,herstel}$).

De faalfunctie voor het falen van het sluitproces is:

$$Z = -\Phi^{-1}(P_{f,herstel}) - u \quad 7-23$$

Waarin:

Φ^{-1} : inverse van de standaardnormale verdeling.

De parameter 'u' in de bovenstaande faalfunctie is een stochastische hulpparameter, die niet ingevuld hoeft te worden. Middels deze hulpparameter wordt de deterministische waarde van de $P_{f,herstel}$ geschikt gemaakt voor een probabilistische berekening.

7.6.1 Faalkans herstel van gefaalde situatie

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r / σ	Δ_x	p_x	Δ_t	p_t
$P_{f,herstel}$	[-]	det	1,0 ²	-	-	-	-	-

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 1-1)

De kans dat het herstel van het falen van de reguliere sluiting mislukt. In sommige gevallen is het mogelijk om op een alternatieve wijze alsnog een sluiting van het kunstwerk te forceren. De parameter $P_{f,herstel}$ kan in die situaties de kans is dat dit herstel faalt modelleren. De parameter heeft standaard een waarde van 1 (herstel faalt altijd) en kan middels een onderbouwing een waarde kleiner dan 1 krijgen (de faalkans van herstel is kleiner dan 1; oftewel er is een kans dat het betreffende kunstwerk alsnog (af)gesloten kan worden ondanks dat de reguliere sluiting gefaald is

Er zijn verschillende mogelijkheden om de faalkans herstel van gefaalde situatie te modelleren in Riskeer. Wanneer de faalkans van de reguliere sluiting P_{ns} middels de Werkwijze bepalen kans op niet sluiten per sluitvraag met scoretabellen [21] is bepaald, is deze faalkans herstel van gefaalde situatie reeds opgenomen in P_{ns} . In dat geval kan de parameter $P_{f,herstel}$ gelijk worden gesteld aan '1,0'²¹.

Wanneer een risicoanalyse op maat is gemaakt voor het bepalen van P_{ns} , kan het ook zijn dat de faalkans herstel van gefaalde situatie reeds is opgenomen in P_{ns} . Dit dient goed nagegaan te worden, om dubbel tellen te voorkomen.

Hoe te bepalen

Wanneer de faalkans herstel van gefaalde situatie niet is opgenomen in P_{ns} kan deze middels de parameter $P_{f,herstel}$ worden gerealiseerd. De volgende aandachtspunten zijn hierbij van belang:

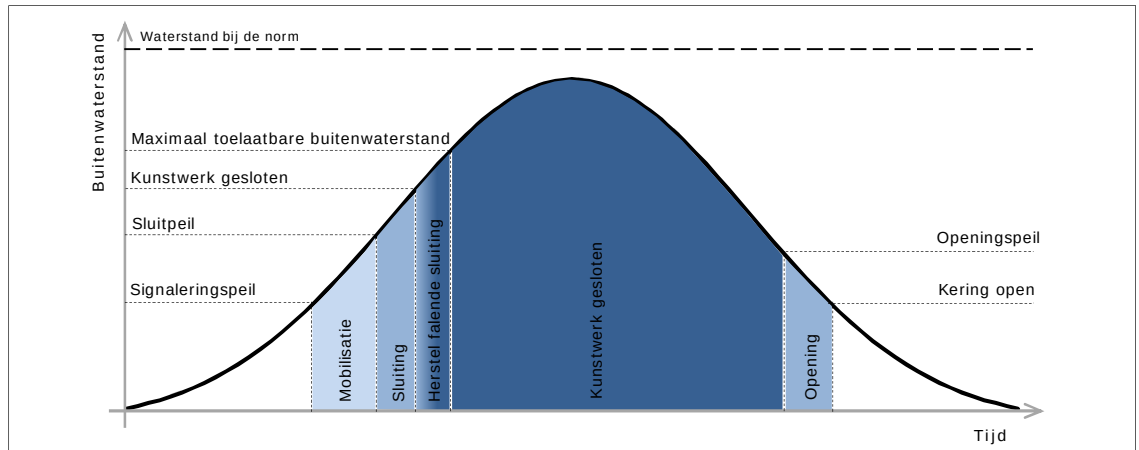
1. De beschikbare tijd tussen het moment dat geconstateerd wordt dat de reguliere sluiting faalt en het moment dat sluiting van het kunstwerk door instromend water niet meer uitgevoerd kan worden.
2. De tijdsduur van herstel
3. De bereikbaarheid van het kunstwerk.
4. De afmetingen van het kunstwerk.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

ad 1. Voor een niet gesloten kunstwerk is de buitenwaterstand die maximaal gekeerd kan worden, die waterstand waarbij dusdanig veel water instroomt dat dit net niet leidt tot het falen²² van de waterkering. Deze buitenwaterstand 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

²¹ Het kan voorkomen dat er voor een kunstwerk meerdere mogelijkheden tot herstel van een gefaalde sluiting zijn. Dit kan dan niet in de scoretabellen worden verwerkt en in dat geval kan middels een gedegen onderbouwing voor $P_{f,herstel}$ nog een kleinere waarde dan 1 worden gehanteerd

²² 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

van achterliggende boezemkaden. Het sluitproces van een kunstwerk dient feitelijk te worden georganiseerd om de genoemde maximale waterstand heen, waarbij het verloop van de hoogwatergolf in de tijd wordt meegenomen. In Figuur 7-11 is een en ander schematisch weergegeven.



Figuur 7-11 Schematisch verloop sluitingsprocedure bij een hoogwatergolf

Toelichting bij Figuur 7-11:

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. Indien er voldoende tijd is tussen het sluitpeil en het bereiken van de maximaal toelaatbare buitenwaterstand bij niet hoogwaterkerend gesloten kunstwerk, 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 dan wel geen nut meer heeft, 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.

- ad 2. De tijdsduur van een herstelmaatregel is van belang in relatie tot de beschikbare tijd voor het herstel. Het plaatsen van een aantal bigbags kan in 2 uur plaatsvinden, terwijl het verwijderen van een obstakel voor een sluisdeur veel meer tijd in beslag kan nemen.
- ad 3. 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 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 4. Kunstwerken met kleinere afmetingen laten zich gemakkelijker op een alternatieve wijze sluiten dan kunstwerken met grotere afmetingen.
- ad 5. 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 6. De oorzaak van falen van de reguliere sluiting kan van invloed zijn op de kans van herstel. Het falen van het reguliere sluitproces kan op diverse aspecten optreden. In lijn met de scoretabellen zijn dit Alarmering, Mobilisatie, Bediening en Technisch falen. Bij het in rekening brengen van $P_{f,herstel}$ is het van belang om te kijken op welk(e) aspect(en) de herstelmaatregelen van invloed zijn. In veel gevallen zullen herstelmaatregelen voornamelijk van invloed zijn op Technisch falen en/of Bediening. Wanneer deze aspecten niet dominant zijn voor de faalkans van sluiten (P_{ns}), zullen deze herstelmaatregelen niet of nauwelijks een reductie van de faalkans opleveren.

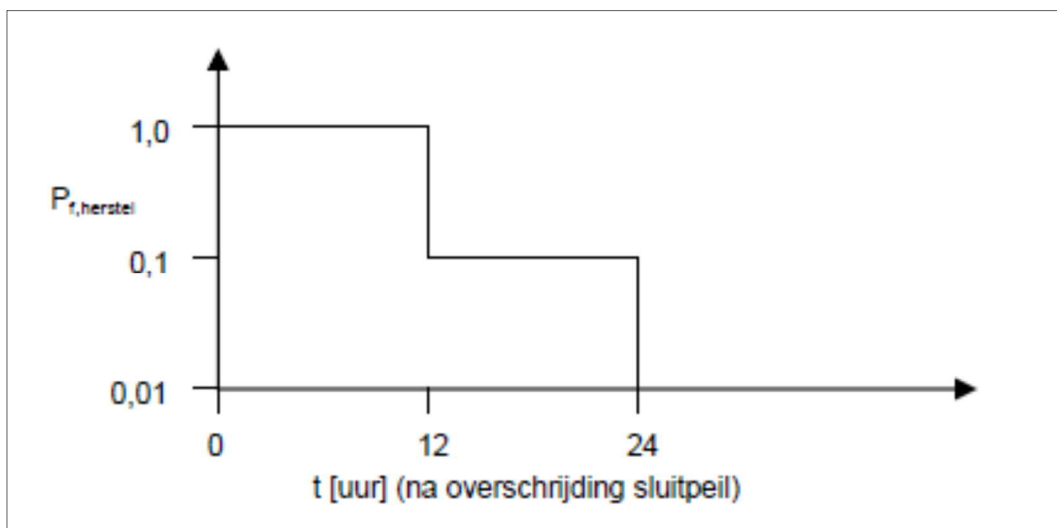
Aan de hand van de bovenstaande punten worden handreikingen gegeven voor inschatting van de faalkans van herstel. Deze handreikingen zijn met name gekoppeld aan het tijdsaspect (punt 1).

Handreiking 1

Een faalkans voor herstel van de reguliere sluiting kan alleen worden afgeleid als de primaire sluiting faalt als gevolg van een gebrek in de mobilisatie, bediening of de daadwerkelijke sluiting (technisch falen). Falende alarmering wordt hiermee niet afgedekt.

Handreiking 2

Binnen het WBI 2017 kan ter indicatie van orde van grootte van de faalkans van herstel van een gefaalde situatie gebruik gemaakt worden van onderstaande Figuur 7-12.



Figuur 7-12 Faalkans van herstel op basis van beschikbare tijd t [uur] voordat niet meer kan worden gesloten

Er dient wel rekening gehouden te worden met de overige aandachtspunten die hierboven zijn opgesomd. Tevens dient per kunstwerk van tevoren te worden bepaald welke praktisch realiseerbare vormen van alternatieve sluiting er zijn. Het jaarlijks testen en oefenen hiervan hoeft niet plaats te vinden, echter de bedieners van het kunstwerk moeten het wel 'in de vingers hebben'.

Voorts wordt opgemerkt dat Figuur 7-12 niet meer dan een eenvoudige handreiking vormt, die gevoelsmatig vrij conservatief is. Omdat de sluiting van ieder kunstwerk uniek is en maatwerk vereist kan de beheerder te allen tijde hiervan afwijken. De achterliggende gedachte dat de kans op herstel toeneemt naarmate er meer tijd beschikbaar is, is natuurlijk wel generiek.

Handreiking 3

Een falende sluiting bij kunstwerken met grote afmetingen kan vaak minder eenvoudig worden hersteld dan bij kunstwerken met kleine afmetingen. Hieronder volgen een aantal richtgetallen. Deze richtgetallen geven de maximale maat aan waarbij een herstel van een falende sluiting met eenvoudige middelen als zandzakken en bigbags nog realistisch wordt geacht. Bij kunstwerken die afwijken van deze richtgetallen moet beoordeeld worden of het herstel van een falende sluiting mogelijk is (maatwerk). Indien een kans op herstel in rekening wordt gebracht moet dit worden onderbouwd middels een concreet en geïmplementeerd handelingsplan waarin de te treffen noodmaatregel(en) nader is (zijn) uitgewerkt.

Type kunstwerk	Afmetingen	toelichting
Coupure	Max. breedte: 20 m	Des te groter de breedte, des te meer materiaal en materieel benodigd is. Ook de benodigde tijd voor sluiting wordt langer. Ten slotte is de kans ook groter dat de alternatieve sluiting mislukt doordat er bijvoorbeeld obstakels zijn.
	Max. kerende hoogte: 1,5 m	Bij grotere kerende hoogten wordt het toepassen van bijvoorbeeld bigbags lastiger. Een bigbag is standaard 1 m hoog en het stapelen hiervan moet zorgvuldig gebeuren wil het stabiel blijven.
Duikers en gemalen	Maximale diameter 1,0 m	Hoe groter de diameter, hoe meer materiaal benodigd is om een 'prop' in de leiding te veroorzaken die in staat is het verval te keren. Ook de toegankelijkheid van zo'n leiding voor het aanbrengen van het materiaal is wat afmetingen betreft beperkt (bijvoorbeeld schuivenschacht)

Handreiking 4 (toets op maat)

Het nader specificeren van een faalkans van herstel is mogelijk door een goede risicoanalyse uit te voeren met betrekking tot de sluiting van het object. Hierbij moet naast organisatorische kennis ook specifieke kennis omtrent het feitelijk sluiten worden ingebracht. Bij een dergelijke risicoanalyse kunnen globaal de volgende stappen worden genomen:

- Inventariseren van de gebeurtenissen die kunnen leiden tot een falende reguliere sluiting van het kunstwerk.
- Inventariseren (en opstellen) van beheersmaatregelen. Welke maatregelen zijn voorzien om de faalgebeurtenissen in de eerste stap te herstellen en hoeveel tijd is hiervoor beschikbaar?
- In overleg met betrokkenen (toetser, beheerder, calamiteiten coördinator, bedienaar) kwantificeren wat de kans van optreden is van de gedefinieerde faalgebeurtenissen en wat de faalkans is van de beheersmaatregelen. Het is hierbij handig om te spreken in termen van eens in de 10 keer of eens in de 100 keer, in plaats van een tiende of een honderdste kans. Het eerste spreekt de meeste mensen wat beter aan.

Met deze gegevens kan vervolgens een kans op herstel worden berekend door de faalgebeurtenissen door te rekenen met de gekwantificeerde kansen van faalgebeurtenissen en faalkansen van beheersmaatregelen.

Aandachtspunten

Er moet constant worden bedacht welke mogelijkheden voor herstel er zijn en of deze realistisch zijn. De mogelijkheden mogen niet worden overschat maar de menselijke inventiviteit wordt ook nog wel eens onderschat. Een gesprek met de man in het veld die de sluiting moet uitvoeren of coördineren kan in dit opzicht tot verhelderende inzichten leiden. De kans op falen van herstelmaatregelen is kleiner als de mogelijkheden tot herstel in een draaiboek zijn omschreven en er periodieke oefeningen plaatsvinden.

Voorbeeld

Voor een coupure in het bovenrivierengebied geldt dat de tijd tussen het sluitpeil en de maximaal toelaatbare buitenwaterstand bij niet hoogwaterkerend gesloten kunstwerk gelijk is aan 16 uur. De coupure is 4,0 m breed en de kerende hoogte van de aluminium schotbalken bedraagt 1,0 m. Daarmee wordt de kerende hoogte van de coupure gelijk aan die van het aangrenzende dijklichaam. Achter de coupure is direct een binnenstad aanwezig, zodat instroming door de coupure direct minimaal tot overlast leidt.

Op een gegeven moment komt er een hoogwatergolf aan. Op het moment dat het sluitpeil optreedt, tracht men de coupure te sluiten. Men komt er op dat moment achter dat de schotbalkspanning aan één zijde zojuist kapot is gereden, waardoor een reguliere sluiting niet mogelijk is. De schotbalken kunnen aan de kapotte zijde immers niet worden opgelegd.

Het betrokken waterschap is voorbereid op een dergelijke calamiteit en heeft nagedacht over mogelijke reële oplossingen en deze ook op papier gezet. De eerste keuze die wordt aangegeven is het laten aanrukken van 5 bigbags waarmee de coupure alsnog gesloten kan worden. Gelet op de breedte van de coupure zouden wellicht 4 bigbags ook kunnen volstaan, maar men kiest ervoor om zeker voldoende bigbags te hebben. De bigbags liggen in een loods op 10 km afstand en kunnen in de loods gevuld worden met zand. Er wordt direct contact opgenomen met de loods om de bigbags te gaan vullen. Voor transport en plaatsing van de bigbags maakt men gebruik van een vrachtwagen met kraan. Deze vrachtwagen is onderdeel van een waakvlam-contract. Het mobiliseren van de vrachtwagen neemt 1 uur in beslag. Inmiddels zijn de bigbags gevuld met zand en staan klaar in de loods. Het opladen, transporteren en plaatsen, kost uiteindelijk nog 2 uur tijd. Na 3 uur is de coupure gesloten met bigbags. Gelet op de beschikbare tijd tussen sluitpeil en overschrijding van de maximaal toelaatbare buitenwaterstand bij niet hoogwaterkerend gesloten kunstwerk (circa 16 uur) is dit een goede alternatieve sluiting voor het aangetroffen gebrek. Zelfs bij een sneller opkomende hoogwatergolf is er nog voldoende marge. In de analyse van *niet sluiten* kan op basis van bovenstaande analyse rekening gehouden worden met een faalkans van herstel ($P_{f;herstel}$) van 0,1. Vermoed wordt dat dat in dit geval nog aan de conservatieve kant is.

8. Voorbeeld

8.1 Coupure in bovenrivierengebied

De coupure heeft een opening van 4 m breed en een kerende hoogte (hoogteverschil drempel en bovenkant schotbalken) van 2,0 m. De drempelhoogte (NAP +12,00 m) van de coupure wordt circa eens in de vijf jaar overschreden. Achter de coupure bevindt zich een terrein dat is voorzien van stelconplaten. Deze sluiten ook aan op de coupure. Onder de coupure is een lang kwelscherm aanwezig. Er is geen sprake van relevante bebouwing direct in de omgeving van de coupure. Het terrein achter de coupure wordt door een zandhandel gebruikt en wordt omgeven door wat hogere weglichamen. De oppervlakte van het terrein is beperkt (4.000 m²). De bovenkant van de weglichamen ligt met NAP +12,50 m circa 0,5 m hoger dan het terrein zelf. De weglichamen zijn breed en voorzien van grasbekleding op de taluds en een asfaltverharding op de kruin.

De schotbalken kunnen met de hand geplaatst worden en liggen opgeslagen bij een gemaal dat op 30 km afstand van de coupure is gesitueerd. De aanrijtijd bedraagt 45 minuten. Het daadwerkelijke sluitpeil bevindt zich 0,50 m onder de drempelhoogte van de coupure. Sluiting van de coupure wordt eens in de 2 jaar geoefend.

8.1.1 Schematisering sluitproces

Het gaat hier om keermiddelen die alleen gesloten worden in het geval van een hoogwater. Met behulp van de Werkwijze bepalen kans op niet sluiten per sluitvraag met scoretabellen [21] wordt daarom de faalkans van de sluiting bepaald. De uitkomst hiervan is: $P_{ns} = 1,0 \cdot 10^{-2}$ per vraag.

In het geval van de coupure is sprake van één enkele doorgang en dus is $n = 1$.

8.1.2 Schematisering kans op open staan

De kans dat de coupure geopend is op het moment dat een hoogwater zich aandient is in dit geval gelijk aan 1. De primaire functie van de coupure is het doorlaten van verkeer en vanuit die functie staat de coupure altijd open.

Gebruik makend van paragraaf 7.5.1 kan de waarde van P_{open} worden bepaald:

N_{open}	Kijkend naar een periode van een jaar kan gesteld worden dat de coupure aan het begin van die periode opengezet wordt voor de duur van 1 jaar [1 /jaar].
T_{open}	Omdat de coupure altijd zijn primaire functie uitvoert, doorlaten van verkeer en mensen, staat deze in principe het hele jaar open = 1 [jaar].
T_{rep}	De reparatietijd voor falen vanuit de primaire functie speelt hier geen rol, omdat de primaire functie geen sluiting kent = 0,0 [jaar].

$$P_{open} = N_{open} \cdot (T_{open} + T_{rep}) = 1 \cdot (1 + 0) = 1$$

8.1.3 Schematisering faalkans van herstel

Conservatief wordt in eerste instantie uitgegaan van een faalkans van herstel ($p_{f;herstel}$) van 1. Dit is gelet op het relatief beperkte verschil tussen sluitpeil en het niveau van de drempel in eerste instantie ook een redelijke aanname. Er is een kans dat er bij enige verdere stijging van het waterpeil golven water over de drempel slaan wanneer deze niet gesloten is. Dat maakt de sluiting bij hogere waterstanden een stukje lastiger.

8.1.4

Schematisering gevolgen

In eerste instantie wordt gekeken welke gevolgen gemodelleerd moeten worden. Hierbij wordt gebruik gemaakt van hetgeen in paragraaf 6.3.2 is vermeld.

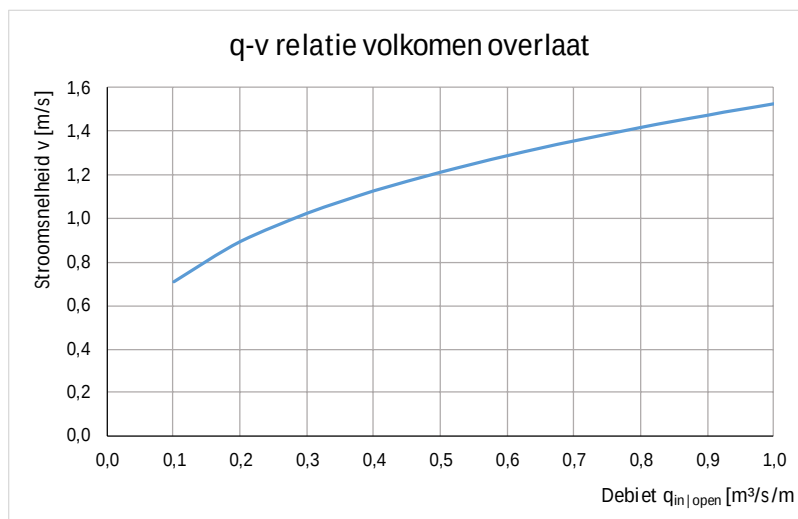
Omdat het wordt aanbevolen om van grof naar fijn te werken wordt in eerste instantie alleen het terrein als komberging aangeduid. Als bij deze modellering het kunstwerk voldoet, dan kan de inspanning voor de beoordeling beperkt blijven. Het is immers een conservatieve benadering. Uit de gegevens van de weglighamen om het terrein en het relatief kleine verval dat deze weglighamen zouden moeten keren op het moment dat het terrein onderloopt (maximaal 0,50 m zonder overloop) is het verdedigbaar om te stellen dat deze weglighamen waterstanden tot NAP +12,5 m kunnen keren.

Er is in dit geval sprake van een zeer kleine komberging. Kijkend naar de bodem achter de coupure, dan is deze middels de stelconplaten zeer goed beschermd. Hogere stroomsnelheden zijn toelaatbaar. De zwakste plek hierin zal de aansluiting tussen coupure en stelconplaten zijn. Er wordt conservatief uitgegaan van een toelaatbare stroomsnelheid van 1,5 m/s. Het instromende debiet per strekkende meter behorende bij 1,5 m/s wordt benaderd met de formule voor de volkomen overlaat (paragraaf 7.3.7, welke hieronder is afgebeeld).

$$q_{in|open} = m_{OL} \cdot 0,55 \cdot \sqrt{g \cdot (h - h_{dr})^3}$$

In Figuur 8-1 is de relatie tussen debiet en stroomsnelheid weergegeven welke met bovenstaande formule wordt gevonden. Hieruit kan worden afgelezen dat bij een stroomsnelheid van 1,5 m/s een debiet hoort van circa 0,95 m³/s/m (= q_c). De hoogte van de waterschijf die dan binnenstroomt, is circa 0,63 m.

m_{OL}	1,1 -	
g	9,81 m/s ²	
$q_{in open}$	$h-h_{dr}$	v
[m ³ /s/m]	[m]	[m/s]
0,1	0,14	0,71
0,2	0,22	0,90
0,3	0,29	1,03
0,4	0,35	1,13
0,5	0,41	1,22
0,6	0,46	1,29
0,7	0,51	1,36
0,8	0,56	1,42
0,9	0,61	1,48
1.0	0,65	1,53



Figuur 8-1 Voorbeeld van relatie tussen debiet en stroomsnelheid bij een volkomen overlaat

Bij een instromend debiet van 1 m³/s/m, een doorstroombreedte van 4 m en een directe berging achter de coupure van circa 4.000×0,50 = 2.000 m³, is deze berging in circa 8,5 minuten gevuld. Bovenstaande geeft aan dat in eerste instantie ervoor gekozen kan worden om komberging op voorhand maatgevend te stellen, waarbij deze komberging nog niet gekoppeld is aan grote gevolgen.

Nu bekend is hoe om wordt gegaan met de gevolgen kan een model voor het instromende debiet worden gekozen. In dit geval heeft dit instromende debiet betrekking op de situatie die

ontstaat als de buitenwaterstand hoger komt dan de kerende hoogte van de weglichamen. Omdat het een klein kommetje betreft zal de binnenwaterstand de buitenwaterstand direct volgen bij binnenstromend water. We gaan ervan uit dat de bodembescherming van stelconplaten sterk genoeg is om dit te laten gebeuren zonder dat deze bezwijkt. In deze eerste conservatieve benadering wordt ervan uit gegaan dat bij een waterstand boven het weglichaam het kommetje bezwijkt. Dit is in deze eerste slag het faalcriterium. Dit betekent dat een klein beetje meer instroming bij waterstanden iets groter dan de kerende hoogte van de weglichamen al falen betekent. Er gaat dan immers water over de weglichamen stromen. De kering faalt dan dus. Daarom wordt een willekeurig klein kritiek debiet als invoer aangehouden. Het model voor instroming wordt gekoppeld aan het model van lage drempel (zie paragraaf 7.3.7) ter plaatse van de opening van de coupure. De volgende waarden worden nu ingevuld:

h_{bi} kerende hoogte weglichamen = NAP + 12,50 m.
 h_{dr} NAP + 12,00 m.
 q_c 0,1 m³/s/m.
 B_v 4,0 m (breedte coupure).

Omdat komberging middels het instroomdebiet en de hoogte van de binnenwaterstand gemodelleerd wordt, kunnen voor de komberging zelf onrealistisch grote waarden worden ingevuld in het model, zodat het kombergingsmodel in Riskeer komberging verder geen rol meer speelt. Bijvoorbeeld de volgende waarden kunnen worden gehanteerd:

$\Delta H_{kom} = 2,0$ m.
 $A_{kom} = 1,0 \cdot 10^6$ m².
 $t_s = 6$ uur (=standaardwaarde).

8.1.5

Analyse

Nadat de invoergegevens in Riskeer zijn ingevoerd kan er een som worden gemaakt. Afhankelijk van de uitkomst hiervan kan bepaald worden of er scherper geschematiseerd moet worden. Mogelijke aanscherpingen zijn:

- Komberging achter de weglichamen meenemen, dus rekening houden met grotere gevolgen.
- De faalkans van herstel nader bepalen. In hoeverre dat hier mogelijk is, is de vraag aangezien het waterstandsverschil tussen sluitpeil en drempelniveau niet heel erg groot is. Er moet dan ook inzicht komen in de stijgsnelheid en de benodigde tijd om een alternatieve sluiting te realiseren. In hoeverre de alternatieve sluiting met 2 meter kerende hoogte gerealiseerd kan worden dient ook te worden onderzocht. Indien de beheerder zelf geen analyse heeft gemaakt van mogelijke herstelmaatregelen en deze ook niet heeft vastgelegd, kan geen rekening worden gehouden met de aanscherping van de faalkans van herstel.

Verantwoording

Deze *Schematiseringshandleiding betrouwbaarheid sluiting kunstwerk* is in opdracht van Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving opgesteld als onderdeel van het WBI 2023.

Schrijver:	R.C.M. Delhez (Greenrivers B.V.). B. van Bree (Bob van Bree - Waterbouwkundig advies en projectmanagement).
Regie:	A. Casteleijn (RWS WVL).
Review versie 3:	B. van Bree (Bob van Bree - Waterbouwkundig advies en projectmanagement).
Review versie 2:	B. van Bree (Bob van Bree - Waterbouwkundig advies en projectmanagement). H. de Waal (Deltares).
Review versie 1:	E.O.F. Calle (Deltares). R. Jongejan (Jongejan RMC). D. Pereboom (Deltares). J.D. Stoop (HHRS van Schieland en de Krimpenerwaard). M.M. de Visser (Arcadis).
Eindcontrole:	R. Slomp (RWS WVL).

A Literatuur

- [1] *Aanbeveling "Overloop van coupures en sluisdeuren"*. A. Vrijburcht, Rijkswaterstaat, Concept 3A, 2004.
- [2] *Achtergrondrapport toetsspoor Betrouwbaarheid Sluiting I – Verbeteren gedetailleerde toets*. J. Niemeijer (Arcadis). Deltares kenmerk 1220087-002-GEO-0012. Delft, februari 2016.
- [3] *Achtergrondrapport toetsspoor Betrouwbaarheid Sluiting III Kennisbasis Omgang met komberging*. R.C.M. Delhez. Deltares kenmerk 1220087-002-GEO-0010. Delft, december 2015.
- [4] *Achtergrondrapport toetsspoor hoogte kunstwerk II - Bepaling kritiek overslag-/overloopdebiet (WTI 2017)*. Deltares kenmerk 1220087-001-GEO-0011. Delft, december 2015.
- [5] *Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage III Sterkte en veiligheid*. Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Rijkswaterstaat - Water, Verkeer en Leefomgeving
- [6] *Fenomenologische beschrijving, faalmechanismen WBI*. Rijkswaterstaat - Water, Verkeer en Leefomgeving. Lelystad, september 2016.
- [7] *Gebruikershandleiding Waterstandsverloop, Versie 2.0*. HKV. A. Ansink, R. Kamp, C.M.P. Geerse. 2017.
- [8] *Geosynthetics and Geosystems in Hydraulic and Coastal Engineering*. K.W. Pilarczyk. Rijkswaterstaat, Delft, ISBN 90 5809 302 6. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 2000.
- [9] *Handleiding datamanagement WBI 2017*. Rijkswaterstaat - Water, Verkeer en Leefomgeving. Lelystad, september 2016.
- [10] *Handreiking Toets op Maat voor demontabele keringen (WTI 2017 Kunstwerken-Achtergrondrapport)*. Deltares 1220087-002-GEO-0008, februari 2016.
- [11] *Leidraad Kunstwerken*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. ISBN 90-369-5544-0. Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Delft, mei 2003.
- [12] *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen*. U. Förster, G. van den Ham, E.O.F. Calle, G.A.M. Kruse. Deltares rapport 1202123-003-GEO-0002, Delft, Maart 2012.
- [13] *Ontwerp van schutsluizen*. Rijkswaterstaat, Bouwdienst, deel 1: ISBN 90-369-3305-6, deel 2: ISBN 90-369-3306-4. Utrecht, juni 2000.
- [14] *Scour Manual*. G.J.C.M. Hoffmans en H.J. Verheij, ISBN 90-5411-0673-5. January 1997.
- [15] *Toegepaste vloeistofmechanica, hydraulica voor waterbouwkundigen*. Nortier, ISBN 90-401-0318-6, 1996.

- [16] *Toetsspoorrapport betrouwbaarheid sluiting (WTI 2017 Kunstwerken)*. Deltares rapport 1220087-002-GEO-0009-vD1. Delft, december 2015. Dit document is op te vragen bij de Helpdesk Waterkeren
- [17] *Schematiseringshandleiding hoogte kunstwerk, WBI 2017*, Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 1 maart 2019, Definitief
- [18] *Waterstandsverlopen zoete en zoute wateren*. HKV, PR2803, april 2014.
- [19] *Grondslagen voor hoogwaterbescherming*. ENW rapport, november 2017
- [20] *Werkwijzer Ontwerpen Waterkerende Kunstwerken- Ontwerpverificaties voor de hoogwatersituatie*, Groene versie, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, Rijkwaterstaat, 1 november 2018, versie D2
- [21] *Werkwijze bepalen kans op niet sluiten per sluitvraag met scoretabellen*, definitief v1.2, RWS rapport, A. Casteleijn, Bob van Bree, november 2017
- [22] *Handreiking borging betrouwbaarheid sluiting in draaiboeken*, Achtergrondrapport bij het gebruik van de scoretabellen voor het faalmechanisme niet sluiten, definitief, v1.0, RWS rapport, B. van Bree, 1 november 2017
- [23] *Hoe om te gaan met waterbezwaar als gevolg van hoge overslagdebieten?*, KPR-factsheet d.d. 15-10-2018 versie 2

B Begrippen-, afkortingen en symbolen

Voor begrippen en afkortingen wordt verwezen naar Appendix B van het *WBI 2017 Bijlage I Procedure*.

C Parameterlijst uitgebreid

Hieronder is de parameterlijst met betrekking tot betrouwbaarheid sluiting gegeven, waarbij ook de benaming van de parameters is toegevoegd en tevens de aanduiding van de parameters in het csv-bestand dat als invoer dient voor Riskeer.

symbool	benaming	eenheid	type	μ	V_r of σ	Groep	Δ_x	p_x	Δ_t	p_t	Par.	CSV-bestand Riskeer
$P_{f,kw erosie\ bodem}$	Faalkans gegeven erosie bodem	[-]	det	1,0	-	2(μ)	-	1	-	1	7.2.1	-
m_{kom}	Modelfactor kombergend vermogen	[-]	logn	1,0	$\sigma=0,20$	1(μ) en 1(σ)	-	0	-	1	7.3.1	-
A_{kom}	Kombergend oppervlak	[m ²]	logn	Invoer	$V_r=0,10$	4(μ) en 2(V_r)	-	0	-	1	7.3.2	KW_BETSLUIT1
Δh_{kom}	Toegestane peilverhoging komberging	[m]	logn	Invoer	$\sigma=0,10$	4(μ) en 2(σ)	-	0	-	1	7.3.3	KW_BETSLUIT2
m_{in}	Modelfactor instromend volume	[-]	det	1,0	-	1(μ)	-	-	-	1	7.3.4	-
$f_{ts open}$	Factor voor stormduur hoogwater	[-]	det	1,0	-	2(μ)	-	-	-	1	7.3.5	-
t_s	Stormduur	[uur]	logn	6,0	$V_r=0,25$	2(μ) en 1(V_r)	-	1	-	0	7.3.6	-
ψ_{kw}	Oriëntatie	[°]	det	invoer	-	4(μ)	-	0	-	1	7.3.7.1	KW_BETSLUIT3
B	Breedte van doorstroomopening	[m]	nor	invoer	$\sigma=0,05$	4(μ) en 2(σ)	-	0	-	1	7.3.7.2	KW_BETSLUIT4
m_{OL}	Modelfactor overloopdebiat volkomen overlaat	[-]	nor	1,1	$\sigma=0,05$	2(μ) en 1(σ)	-	0	-	1	7.3.7.3	-
m_{OS}	Modelfactor overslagdebiat	[-]	logn	0,09	$\sigma=0,06$	1(μ) en 1(σ)	-	0	-	1	7.3.7.4	-
$h_{kr,NS}$	Kruinhoogte niet gesloten kering	[m+NAP]	nor	invoer	$\sigma=0,05$	4(μ) en 2(σ)	-	0	-	1	7.3.7.5	KW_BETSLUIT5
m_{vl}	Modelfactor lange overlaat	[-]	nor	0,9	$\sigma=0,05$	1(μ) en 1(σ)	-	0	-	1	7.3.7.6	-
h_{bi}	Binnenwaterstand	[m+NAP]	nor	Invoer	$\sigma=0,10$	4(μ) en 2(σ)	-	0	12uur	0	7.3.7.7	KW_BETSLUIT6
h_{dr}	Drempelhoogte	[m+NAP]	nor	Invoer	$\sigma=0,10$	4(μ) en 2(σ)	-	0	-	1	7.3.7.8	KW_BETSLUIT7
μ	Afvoercoëfficiënt	[-]	logn	1,0	$\sigma=0,20$	2(μ) en 2(σ)	-	0	-	1	7.3.7.9	-
A	Doorstroomoppervlak	[m ²]	nor	Invoer	$\sigma=0,01$	4(μ) en 2(σ)	-	0	-	1	7.3.7.10	KW_BETSLUIT8
q_c	Kritiek instromend debiet	[m ³ /s/m]	logn	Invoer	$V_r=0,15$	4(μ) en 2(V_r)	-	0	-	1	7.4.1	KW_BETSLUIT9
B_{sv}	Stroomvoerende breedte bodembescherming	[m]	logn	Invoer	$\sigma=0,05$	4(μ) en 2(σ)	-	0	-	1	7.4.2	KW_BETSLUIT10
P_{open}	Kans op open staan bij naderend hoogwater	[-]	det	Invoer	-	4(μ)	-	-	-	-	7.5.1	KW_BETSLUIT11
P_{ns}	Kans mislukken sluiting	[-]	det	Invoer	-	4(μ)	-	-	-	0	7.5.2	KW_BETSLUIT12
n	Aantal identieke doorstroomopeningen	[-]	det	Invoer	-	4(μ)	-	-	-	-	7.5.3	KW_BETSLUIT13
$P_{f,kherstel}$	Faalkans herstel van gefaalde situatie (niet sluiten)	[-]	det	1,0	-	2(μ)	-	-	-	-	7.6.1	KW_BETSLUIT14

* ¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 1-1)

D Afleiding formulepark voor kans op falen door niet sluiten

Deze bijlage geeft de theoretische basis van de kans op falen door niet sluiten en afleiding van het WBI-formulepark van dit faalmechanisme.

Inleiding

Hieronder volgt een toelichting op de faalkans voor het faalmechanisme voor betrouwbaarheid sluiting. Eerst wordt de meest algemene formulering afgeleid. Vervolgens worden enkele aannamen/bijzondere omstandigheden genoemd die leiden tot de WBI-formules.

De formules ogen misschien complex maar ze zijn weinig anders dan een bondig en nogal precies taalgebruik. De formules moet je steeds als volgt lezen:

- $P(A)$ betekent "de kans op A"
- $P(A|B)$ betekent "de kans op A gegeven B"
- $P(\{A \text{ of } B\} | C)$ betekent "de kans op A of B, gegeven C"
- $P(A \text{ of } \{B | C\})$ betekent "de kans op A, of B gegeven C"
- Etc.

In de formules zijn bewust wat uitgebreide omschrijvingen van gebeurtenissen opgenomen. Daardoor passen de formules soms niet op een enkele regel.

De volgende parameters komen geregeld terug en worden hier gedefinieerd.

$P_{fa;ns}$	$P(\text{falen door niet sluiten}) = \text{Faalkans kunstwerk als gevolg van het faalmechanisme}$ <i>betrouwbaarheid sluiting</i> [1/jaar]
h :	buitenwaterstand [+mNAP]
$h_{bui;toel}$	Maximaal toelaatbare buitenwaterstand bij een niet hoogwaterkerend gesloten kunstwerk zonder dat er overstromingsgevolgen optreden [+mNAP]

De afkorting KW staat voor 'kunstwerk'.

Algemeen toepasbare formules

In de meest algemene zin geldt:

$$P(\text{falen door niet sluiten}) = P(\text{buitenwaterstand gevaarlijk hoog EN kunstwerk staat open}) = P_{fa;ns} \quad D-1$$

Met $P(\text{buitenwaterstand gevaarlijk hoog}) = P(h > h_{bui;toel})$ wordt dit

$$P_{fa;ns} = P(h > h_{bui;toel}) \times P(KW \text{ staat open} | h > h_{bui;toel}) \quad D-2$$

De eerste term van het rechterlid is een kans per jaar, de tweede is een voorwaardelijke kans zonder eenheid. Deze term wordt nu verder ontrafeld:

$$P(KW \text{ staat open} | h > h_{bui;toel}) = P \left(\left(\left\{ KW \text{ stond open EN } \{ \text{Niet in reparatie EN sluiting faalt} \} \right\} \right) \text{ OF } \left(\left\{ KW \text{ stond open EN } \{ \text{In reparatie EN sluiting onmogelijk} \} \right\} \right) \middle| h > h_{bui;toel} \right)$$

Omdat een kunstwerk in reparatie is of niet (dit zijn disjuncte (elkaar uitsluitende) gebeurtenissen) kan bovenstaande formulering worden omschreven naar:

$$P(KW \text{ staat open} | h > h_{bui;toel}) = P(\{KW \text{ stond open EN } \{Niet \text{ in reparatie EN sluiting faalt}\}\} | h > h_{bui;toel}) + P(\{KW \text{ stond open EN } \{In \text{ reparatie EN sluiting onmogelijk}\}\} | h > h_{bui;toel})$$

Onder “reparaties” worden hierna alleen de werkzaamheden verstaan die ertoe leiden dat een sluiting niet meer mogelijk is. Reparaties die werkzaamheden betreffen, die alleen van invloed zijn op andere functies van het kunstwerk en dus geen invloed hebben op de waterkerende functie, vallen hier niet onder (bv reparatie hekwerk op deur van sluis). Deze definitie-afspraken maakt de notatie een stuk simpeler. In plaats van “In reparatie EN sluiting onmogelijk” kan dan eenvoudigweg worden geschreven “In reparatie”.

Doe nu de vereenvoudigende aanname dat de kans relatief klein is dat een kunstwerk in reparatie is. Dit is voor kunstwerk dat goed beheerd en onderhouden wordt en dat met enige regelmaat bediend wordt een zeer valide aanname. Deze aanname betekent dat de kans dat het kunstwerk niet in reparatie is nagenoeg gelijk is aan 1. Dit leidt tot het volgende:

$$P(\{Niet \text{ in reparatie EN sluiting faalt}\} | h > h_{bui;toel}) \approx P(\text{Sluiting faalt} | h > h_{bui;toel}) \quad D-3$$

Er ontstaat dan:

$$P(KW \text{ staat open} | h > h_{bui;toel}) = P(\{KW \text{ stond open EN Sluiting faalt}\} | h > h_{bui;toel}) + P(\{KW \text{ stond open EN in reparatie}\} | h > h_{bui;toel}) \quad D-4$$

Bij onafhankelijkheid van het open staan en het niet-sluiten, wat bij het overgrote deel van de kunstwerken van toepassing is, volgt:

$$P(KW \text{ staat open} | h > h_{bui;toel}) = P(KW \text{ stond open} | h > h_{bui;toel}) \times P(\text{Sluiting faalt} | h > h_{bui;toel}) + P(\{KW \text{ stond open EN in reparatie}\} | h > h_{bui;toel}) \quad D-5$$

Dit is een behoorlijk algemeen toepasbare formule. Deze formule zou dan ook als basis kunnen dienen voor beoordelingen voor allerlei typen kunstwerken/situaties.

De verdere uitwerking van deze formule rond het “EN”-statement is afhankelijk van de mogelijke oorzaken van de noodzaak tot reparatie. Als de noodzaak van reparaties onafhankelijk is van het sluiten van het kunstwerk (bijv. veroorzaakt door brand of aanrijding/aanvaring niet gesloten kunstwerk), dan kunnen we schrijven:

$$P(KW \text{ staat open} | h > h_{bui;toel}) = P(KW \text{ stond open} | h > h_{bui;toel}) \times P(\text{Sluiting faalt} | h > h_{bui;toel}) + P(KW \text{ stond open} | h > h_{bui;toel}) \times P(\text{In reparatie} | h > h_{bui;toel}) \quad D-6$$

Ofwel:

$$P(KW \text{ staat open} | h > h_{bui;toel}) = P(KW \text{ stond open} | h > h_{bui;toel}) \times (P(Sluiting \text{ faalt} | h > h_{bui;toel}) + P(In \text{ reparatie} | h > h_{bui;toel})) \quad D-7$$

Als reparaties echter alleen het gevolg kunnen zijn van problemen bij pogingen om het kunstwerk te sluiten, dan is het zeker dat een kunstwerk dat in reparatie is open staat. Bij benadering is dit in de meeste situaties het geval (zeker de eerste tijd nadat falen van de sluiting heeft plaatsgevonden). We vinden dan de volgende uitdrukking:

$$P(KW \text{ staat open} | h > h_{bui;toel}) = P(KW \text{ stond open} | h > h_{bui;toel}) \times P(Sluiting \text{ faalt} | h > h_{bui;toel}) + P(In \text{ reparatie} | h > h_{bui;toel}) \quad D-8$$

Relatie met het BOI/Riskeer

Hieronder worden nog een aantal aannamen geïntroduceerd om uit te komen op de formules zoals deze in voorliggende schematiseringshandleiding zijn opgenomen. Zo wordt duidelijk wat er in het WBI impliciet wordt verondersteld. Om op de WBI-formules uit te komen, moeten we het volgende aannemen:

- Aanname 1 Sluitingen vinden door het hele jaar verspreid plaats, ongeacht de kans op hoogwater.
- Aanname 2 De kans op niet-sluiten per sluitvraag is zonder hoogwaterstress hetzelfde als met hoogwaterstress, noem deze kans P_{ns} .
- Aanname 3 Reparaties (waardoor de kering niet dicht kan) worden alleen getriggerd door het mislukken van een sluiting. Andere oorzaken (onderhoud, aanvaring, etc.) worden niet beschouwd vanuit de gedachte dat bij dit type reparaties de waterkering altijd op een alternatieve wijze geborgd wordt.
- Aanname 4 Bij reparaties blijft de kering altijd in geopende toestand.

Aanname 1 impliceert:

$$P(KW \text{ stond open} | h > h_{bui;toel}) = N_{open} \times T_{open} \quad D-9$$

Hierin is:

- N_{open} Aantal sluitvragen per jaar vanuit de primaire functie(s) van een hoogwaterkerend keermiddel [1/jaar].
- T_{open} De gemiddelde tijdsduur per cyclus van openen en sluiten waarin de hoogwaterkerende keermiddelen vanuit hun primaire functie(s) geopend staan [jaar].

Aanname 2 impliceert:

$$P(Sluiting \text{ faalt} | h > h_{bui;toel}) = P(Sluiting \text{ faalt} | \text{willekeurige sluitvraag}) = P_{ns} \quad D-10$$

Aannames 1,2 en 3 impliceren:

$$P(In \text{ reparatie} | h > h_{bui;toel}) = P(In \text{ reparatie} | \text{willekeurige sluitvraag}) = N_{open} \times P_{ns} \times T_{rep} \quad D-11$$

Hierin is:

- T_{rep} De gemiddelde tijdsduur benodigd om een gefaalde sluiting van de hoogwaterkerende keermiddelen vanuit de primaire functie(s) te herstellen/repareren [jaar].

In het voorgaande is de volgende, tamelijk algemeen toepasbare formule geïntroduceerd (zie formule D-2):

$$P_{fa;ns} = P(h > h_{bui;toel}) \times P(KW \text{ staat open} | h > h_{bui;toel})$$

met (zie formule D-8):

$$P(KW \text{ staat open} | h > h_{bui;toel}) = P(KW \text{ stond open} | h > h_{bui;toel}) \times P(Sluiting faalt | h > h_{bui;toel}) + P(In reparatie | h > h_{bui;toel})$$

Invullen geeft:

$$P_{fa;ns} = P(h > h_{bui;toel}) \times ((N_{open} \times T_{open}) \times P_{ns} + (N_{open} \times T_{rep} \times P_{ns})) \quad D-12$$

Het herschikken van termen geeft:

$$P_{fa;ns} = P(h > h_{bui;toel}) \times N_{open} \times P_{ns} \times (T_{open} + T_{rep}) \quad D-13$$

We introduceren nu de volgende term:

$$P_{open} = N_{open} \times (T_{open} + T_{rep}) \quad D-14$$

Dit leidt tot de basis formule zoals die in het WBI2017 is opgenomen:

$$P_{fa;ns} = P(h > h_{bui;toel}) \times P_{ns} \times P_{open} \quad D-15$$

Dit is de formule die in het WBI2017 is opgenomen in de schematiseringshandleiding voor betrouwbaarheid sluiting.

De afleiding maakt duidelijk dat:

1. De WBI-formule berust op aannamen die niet altijd valide zijn. De vier voornaamste aannamen zijn:
 - Aanne 1: Sluitingen vinden door het hele jaar verspreid plaats, ongeacht de kans op hoogwater.
 - Aanne 2: De kans op niet-sluiten is zonder hoogwaterstress hetzelfde als met hoogwaterstress, noem deze kans P_{NS} .
 - Aanne 3: Reparaties (waardoor de kering niet dicht kan) worden alleen getriggerd door het mislukken van een sluiting. Andere oorzaken (onderhoud, aanvaring, etc.) worden niet beschouwd.
 - Aanne 4: Bij reparaties blijft de kering altijd in geopende toestand.
2. De term P_{open} is een wat verwarrende term omdat dit niet de kans is dat het kunstwerk open staat voorafgaand aan een waterstand hoger dan $h_{bui;toel}$. Het is eigenlijk een 'samenraapsel' van elementen uit de kans op niet-sluiten gegeven $h > h_{bui;toel}$ en de kans op de onmogelijkheid van een sluiting vanwege het in reparatie zijn van het kunstwerk gegeven $h > h_{bui;toel}$.
3. Het zal moeilijk of zelfs onmogelijk zijn om met alleen de gebruikelijke variabelen zoals P_{ns} , N_{open} en P_{open} recht te doen aan alle mogelijke situaties (dus waarbij de vier aannamen hierboven onterecht zijn). Soms zullen we dan woorden (variabelen) tekortkomen en/of trucs moeten uithalen met bijvoorbeeld P_{open} om op het juiste antwoord uit te komen.

E Definitie falen komberging

Binnen het WBI 2017 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 de *gedetailleerde toets* 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 0,2 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.

Binnen het WBI wordt ten behoeve van de gedetailleerde toets aangesloten op de pragmatische werkwijze uit de Grondslagen voor hoogwaterbescherming [19] waarbij wordt gewerkt met een bepaalde toelaatbare waterdiepte, welke voor zowel bebouwd als landelijk gebied dezelfde is:

als de gemiddelde waterdiepte in minimaal één gebied of buurt met gelijke viercijferige postcode (op basis van de wijk- en buurtkaart van het CBS) groter is dan 0,2 meter, is er sprake van een overstroming.

In de Waterwet is deze waterdiepte overigens niet opgenomen en wordt alleen gesproken van substantiële schade en kans op slachtoffers. De vuistregel van 0,20 m uit de Grondslagen is vooral bedoeld om aan te geven wanneer er zeker géén sprake is van een overstroming, namelijk bij geringere waterdiepte dan 0,20 m.

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 soms ook lagere) waterdiepte achter een kunstwerk substantiële economische schade optreedt en/of tenminste 1 slachtoffer valt. Dit kan in de *toets op maat* gebeuren. Het KPR-factsheet *Hoe om te gaan met waterbezwaar als gevolg van hoge overslagdebieten?* [23] kan behulpzaam zijn om tot verdere aanscherping te komen.

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

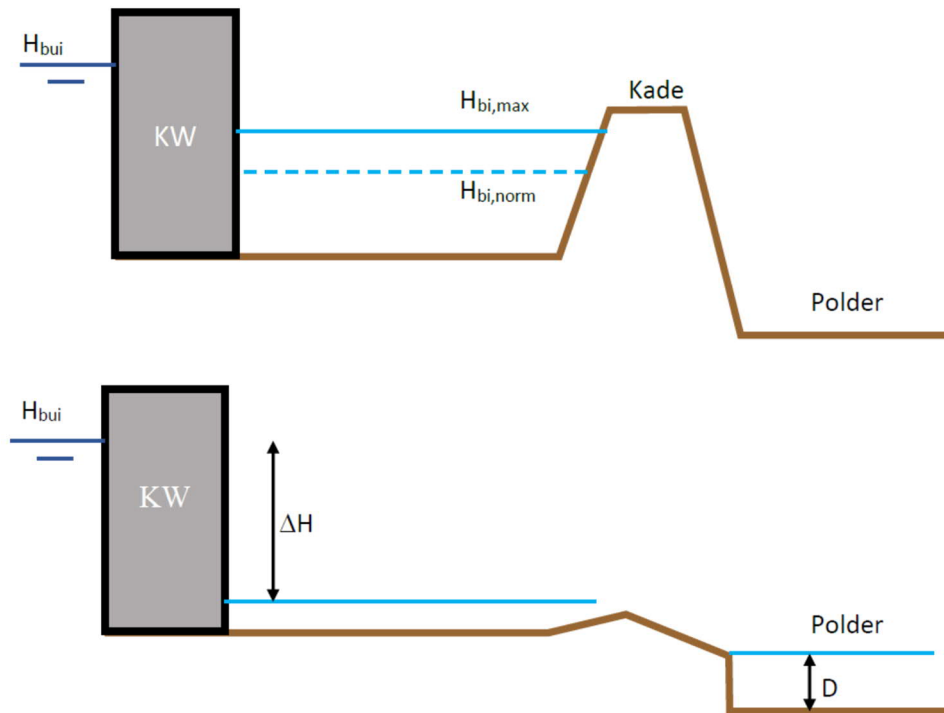
1. Het achterliggend watersysteem wordt omringd met zachte kades (grondlichamen). Hier is sprake van significante gevolgen als de kades bezwijken of overlopen, waarna (een deel van) het watersysteem leeg loopt in het achterliggende gebied. Hierbij moet het in principe gaan om een zodanig watervolume dat dit leidt tot substantiële economische schade en/of tenminste 1 slachtoffer. Ook hierbij kan de praktische maat van 0,20 m water op straat of in landelijk gebied gehanteerd worden. De *gedetailleerde toets* beperkt zich tot het bezwijken van de kades en de gevolgen die daarna optreden worden nog niet beschouwd. Dat vindt plaats in de *toets op maat*. Voor de waterstand waarbij bezwijken van de kades optreedt wordt in de *gedetailleerde toets* 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 substantiële economische schade en/of tenminste 1 slachtoffer. In de *gedetailleerde toets* wordt een pragmatische werkwijze gehanteerd waarin wordt gesteld dat bij een waterdiepte van 0,20 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 substantiële economische schade en/of tenminste 1 slachtoffer. Ook hier kan in de *gedetailleerde toets* de praktische maat van 0,20 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 de *toets op maat*. Aanscherping van het oordeel 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 E.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 de *toets op maat* 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 0,20 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 de *gedetailleerde toets* 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)
- 0,20 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 de *toets op maat*, 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 als eerste stap het kombergend volume zodanig verruimd worden dat in het achter de kom gelegen gebied gemiddeld 0,20 m water op straat/maaiveld komt te staan.

F Falen bij hoogfrequente waterstanden

In deze bijlage wordt ingegaan op de aandachtspunten met betrekking tot de analyses in Riskeer op het moment dat bij een gefaalde sluiting bezwijken van de bodembescherming en/of vollopen van de komberging optreedt bij hoogfrequente waterstanden (herhalingstijd groter dan eens in de 10 jaar).

Inleiding

Bij het faalmechanisme *betrouwbaarheid sluiting* kan het voorkomen dat bij het niet gesloten zijn van een kunstwerk de bodembescherming bezwijkt dan wel de komberging ontoereikend is bij waterstanden die relatief vaak voorkomen. De probabilistische belastingmodellen in het BOI zijn niet ontwikkeld voor dergelijke hoogfrequente waterstanden (grootweg frequenties groter dan 1/10 per jaar). Dit leidt ertoe dat gangbare analyses met het instrumentarium tot verkeerde uitkomsten kunnen leiden. Het wordt dan ook aanbevolen om in gevallen waarbij hoogfrequente waterstanden een rol spelen, de uitkomsten van Riskeer goed te analyseren en indien nodig de analyse naar aanleiding daarvan aan te passen, dan wel over te gaan op een toets op maat buiten het instrumentarium om.

Voor het bepalen van overschrijdingskansen van hoogfrequente waterstanden wordt aanbevolen om gebruik te maken van lokale waterstandsmetingen van meerdere jaren (hoe meer hoe beter) om de overschrijdingskansen van deze waterstanden inzichtelijk te maken.

In deze bijlage wordt gebruik gemaakt van onderstaande algemene formule voor *betrouwbaarheid sluiting* welke ook in het model van Riskeer zit opgenomen.

$$P(F)_{BS} = P(H > h_{crit}) \cdot P_{open} \cdot n \cdot P_{ns} \cdot P_{f;herstel} \quad F-1$$

Hierin is:

$P(F)_{BS}$	Faalkans betrouwbaarheid sluiting per jaar
$P(H > h_{crit})$	Kans op overschrijding van kritieke buitenwaterstand per jaar vanuit tekort aan komberging en/of bezwijken bodembescherming
P_{open}	Kans dat het kunstwerk bij een naderend hoogwater geopend staat (zie §7.5.1)
n	Aantal identieke doorstroomopeningen (zie §7.5.3)
P_{ns}	Kans op niet sluiten per sluitvraag (zie §7.5.2)
$P_{f;herstel}$	Faalkans herstel van gefaalde situatie (zie §7.6)

Afvoergedomineerde watersystemen

Voor afvoergedomineerde watersystemen geldt dat wordt aanbevolen om het ontwerppunt in Riskeer nader te analyseren. Dat bestaat globaal uit de volgende stappen:

1. Bepaal het maatgevende deelfaalmechanisme in Riskeer. Indien de deelfaalmechanismen *overschrijden bergend vermogen* en *bezwijken bodembescherming* een vergelijkbare faalkans hebben wordt aanbevolen om beide deelfaalmechanismen nader te analyseren.
2. Haal uit Riskeer de waterstand in het illustratiepunt van het maatgevende deelfaalmechanisme. Indien deze waterstand als hoogfrequent kan worden aangeduid, kunnen de volgende stappen worden doorlopen. Indien dit niet het geval is, is nadere analyse van de uitkomst in het kader van hoogfrequente waterstanden niet nodig.
3. Bepaal met behulp van de faalkans uit Riskeer, formule F-1 en de ingevoerde waarden voor P_{open} , P_{ns} , n en $P_{f;herstel}$ de in Riskeer aangehouden overschrijdingskansen van de kritieke buitenwaterstand ($P(H > h_{crit})$).
4. Vergelijk de gevonden overschrijdingskansen van de kritieke buitenwaterstand met de overschrijdingskansen die volgt uit een analyse van lokale waterstandsmetingen. Indien beide overschrijdingskansen voldoende met elkaar overeenkomen kan de uitkomst van Riskeer worden gehandhaafd. Indien dit niet het geval is kan ervoor worden gekozen om de analyse in

Riskeer zodanig te bewerken dat de uitkomst overeenkomt met hetgeen wordt verwacht, dan wel om de analyse geheel buiten Riskeer te houden en de met de handsom gevonden faalkans (invullen van formule F-1) rechtstreeks in Riskeer in te voeren.

Getij-gedomineerde watersystemen

In getij-gedomineerde watersystemen kan overschrijding van de kritieke buitenwaterstand (h_{crit}) wel meerdere getijdeperioden per jaar maar niet elke getijdeperiode voorkomen. In dergelijke gevallen leidt een analyse met Riskeer tot te conservatieve faalkansen. Indien het kunstwerk zich in een getijdegebied bevindt, maar overschrijding van de kritieke buitenwaterstand minder dan eens per 10 jaar optreedt, kan gebruik gemaakt worden van hetgeen vermeld staat bij afvoer-gedomineerde watersystemen.

De oorzaak van de foutief bepaalde faalkans met Riskeer is de wijze waarop kansen van waterstanden per getij worden vertaald naar kansen per jaar. Bij een waterstand die meerdere getijdeperioden per jaar voorkomt leidt dat binnen Riskeer tot een overschrijdingskans per jaar die (nagenoeg) gelijk is aan 1. Feitelijk komt het erop neer dat Riskeer 'denkt' dat de kering elke getijdeperiode gesloten moet zijn om een overstroming te voorkomen, waardoor uiteindelijk gerekend wordt met $P(H > h_{crit}) = 705$ (getijdeperioden per jaar).

Middels een analyse buiten Riskeer kan een correcte faalkans worden afgeleid. Daarbij kan gebruik gemaakt worden van formule F-5, die hieronder wordt afgeleid. Met behulp van Riskeer kan wel de buitenwaterstand in het illustratiepunt worden bepaald, waarbij de bodembescherming bezwijkt dan wel de komberging niet toereikend is. Het is echter nog zuiverder om in gevallen waarbij de kritieke buitenwaterstand meerdere getijdeperioden per jaar wordt overschreden de kritieke buitenwaterstand buiten Riskeer om te bepalen, omdat als gevolg van de 'foutieve' berekening binnen Riskeer deze ook niet helemaal het juiste illustratiepunt van de kritieke buitenwaterstand zal bepalen.

Per getijdeperiode is de kans op een overstroming als gevolg van het niet sluiten van de kering en vervolgens het falen van de bodembescherming dan wel een tekort aan komberging gelijk aan:

$$P(F)_{getij} = P(H > h_{crit})_{getij} \cdot P_{open, getij} \cdot n \cdot P_{ns} \cdot P_{f; herstel} \quad F-2$$

Hierin is:

$P(F)_{getij}$	Faalkans betrouwbaarheid sluiting per getijdeperiode
$P(H > h_{crit})$	Kans op overschrijding van kritieke buitenwaterstand per <u>getijdeperiode</u> vanuit tekort aan komberging en/of bezwijken bodembescherming
P_{open}	Kans dat het kunstwerk bij een komende vloedperiode geopend staat

Voor een heel jaar is de kans of falen dan:

$$P(F)_{1jr} = 1 - \left(1 - P(F)_{getij}\right)^m \quad F-3$$

Hierin is:

m	Aantal getijdeperioden per jaar
---	---------------------------------

Bij voldoende kleine waarden van $P(F)_{getij}$ is dit bij benadering gelijk aan:

$$P(F)_{1jr} = m \cdot P(F)_{getij} \quad F-4$$

Invullen van deze uitdrukking in formule F-1 geeft nu:

$$P(F)_{BS} = m \cdot P(H > h_{crit})_{getij} \cdot P_{open, getij} \cdot n \cdot P_{ns} \cdot P_{f;herstel} \quad F-5$$

In formule F-5 is zichtbaar dat het van belang is om de overschrijdingskans van de kritieke buitenwaterstand per getijdeperiode te bepalen en daarnaast ook de kans op open staan per getijdeperiode.

De middels bovenstaande formule F-5 bepaalde faalkans kan in een beoordelingsproces rechtstreeks in Riskeer worden ingevoerd, dan wel middels de aanpassing van de parameter(s) P_{ns} en P_{open} in de analyse met Riskeer worden gestopt.

Voorbeeld getijde-gedomineerd gebied

Het betreft een kunstwerk langs de kust, waarvan de volgende gegevens beschikbaar zijn:

- Het kunstwerk staat gemiddeld 450 eb-perioden open.
- De kritieke buitenwaterstand waarbij bij een niet gesloten kunstwerk overstromingsgevolgen optreden bedraagt NAP +1,80 m. Deze waterstand is bepaald middels een analyse van de bodembescherming. Komberging is geheel niet maatgevend.
- Uit een analyse van lokale waterstandsmetingen blijkt dat de kritieke buitenwaterstand circa 120 getijdeperioden per jaar wordt overschreden.
- De kans op niet sluiten (P_{ns}) bedraagt 10^{-5} per sluitvraag.
- Het aantal doorstroomopeningen (n) is gelijk aan 1.
- De faalkans van herstel van een gefaalde sluiting ($P_{f;herstel}$) is aangehouden op 1.

De faalkans voor betrouwbaarheid sluiting per jaar is met formule F-5 te bepalen.

$$P(F)_{BS} = m \cdot P(H > h_{crit})_{getij} \cdot P_{open, getij} \cdot n \cdot P_{ns} \cdot P_{f;herstel} = 705 \cdot \frac{120}{705} \cdot \frac{450}{705} \cdot 1 \cdot 10^{-5} \cdot 1 = \frac{1}{1.305} \text{ per jaar}$$

Bovenstaand resultaat kan ook middels Riskeer worden benaderd door bijvoorbeeld de volgende invoer in te geven:

$$P_{ns}: 450 \times 10^{-5} = 4,5 \cdot 10^{-3}$$

$$P_{open}: 120/705 = 0,17$$

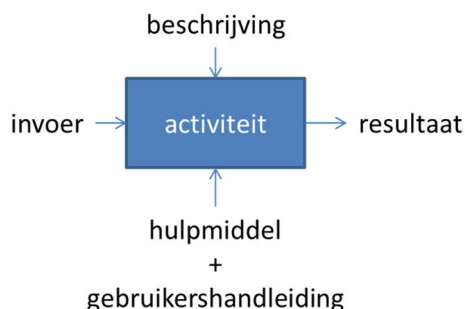
Zoals al aangegeven kan het resultaat van de analyse zonder analyse in Riskeer ook direct in Riskeer worden ingevoerd.

G Schema werkwijze beoordeling betrouwbaarheid sluiting kunstwerk

Hieronder is schematisch de werkwijze van de beoordeling van het toetsspoor Betrouwbaarheid sluiting kunstwerk (BSKW) weergegeven (Figuur F.1).

G.1 Toelichting op het schema werkwijze beoordeling

De werkwijze bestaat uit opvolgende activiteiten waarbij het resultaat van de voorgaande activiteit de invoer is van de volgende activiteit. Deze activiteiten moeten doorlopen worden om te komen tot een oordeel. Per activiteit kan worden beschreven hoe men van de invoer komt tot de benodigde uitvoer. Daarnaast wordt aangegeven of een activiteit door hulpmiddelen wordt ondersteund. Het schema van een activiteit ziet er in het algemeen uit zoals Figuur F.1.

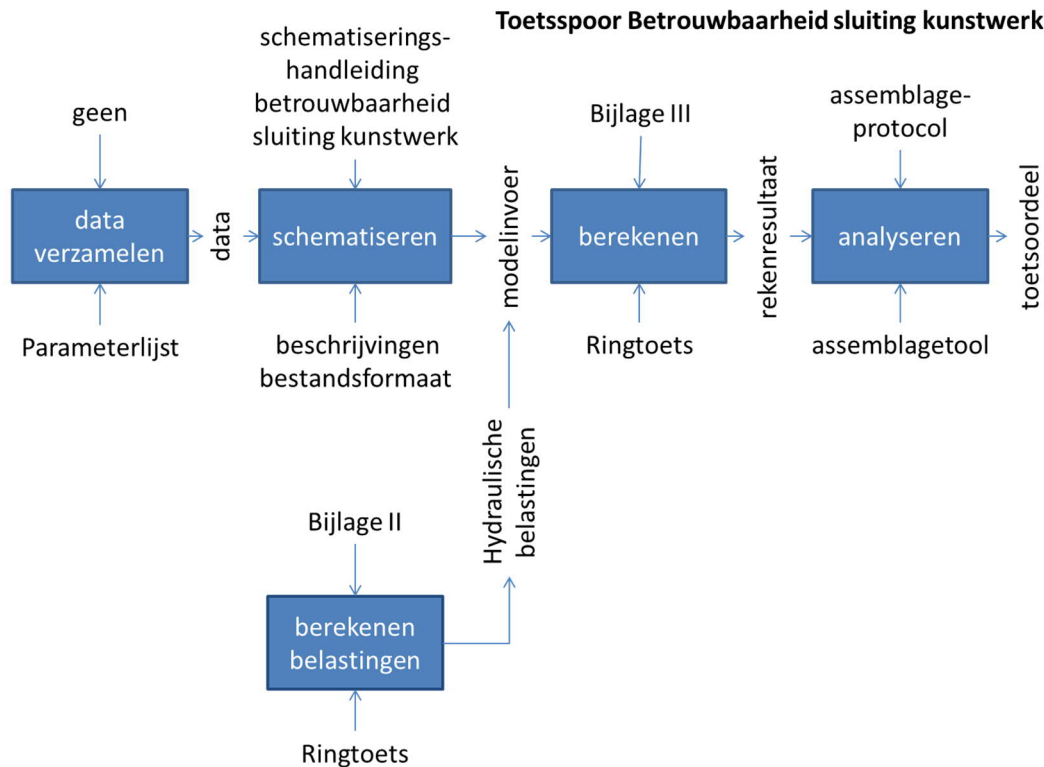


Figuur F.1 Het algemene schema van een activiteit. Een aaneenschakeling van benodigde activiteiten bij een beoordeling geeft de schematische werkwijze van de beoordeling weer.

Het beoordelingsinstrumentarium bestaat uit verschillende documenten en tools/software om te komen tot een oordeel. In het schema is aangegeven welke (hoofd) documenten en tools/software betrekking hebben op een activiteit. Bij de activiteit wordt in de referenties na het schema gerefereerd naar beschikbare documenten en/of tools/software behorende bij de activiteit. Op deze manier kan de beoordelaar bij elke activiteit achterhalen welke documenten en/of tools/software van het beoordelingsinstrumentarium relevant zijn om die activiteit uit te kunnen voeren. Er wordt in het schema niet uitsluitend verwezen naar documenten en/of tools/software van het beoordelingsinstrumentarium.

Benadrukt wordt dat dit schema niet het beoordelingsproces beschrijft. Het beoordelingsproces wordt beschreven in *Bijlage I Procedure* van de Ministeriële Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017. Het beoordelingsproces is iteratief waarbij één of meerdere activiteiten uit het schema meerdere malen kan worden doorlopen. Afhankelijk van waar men zich bevindt in het beoordelingsproces, kan de invulling van de activiteit anders zijn. Bijvoorbeeld bij de activiteit 'berekenen' kan dit door middel van een eenvoudige toets, gedetailleerde toets per vak of een toets op maat. Verder wordt benadrukt dat de beschrijvingen en hulpmiddelen niet uitputtend zijn. Niet alle invullingen van een activiteit zijn beschreven of worden ondersteund (denk hierbij aan toets op maat).

G.2 Schema werkwijze beoordeling Betrouwbaarheid sluiting kunstwerk (BSKW)



Figuur F.2 Schema werkwijze beoordeling Betrouwbaarheid sluiting kunstwerk (BSKW). In het schema zijn alleen de belangrijkste documenten en/of tools/software genoemd. De lijst met alle beschikbare documenten en tools/software die betrekking hebben op een activiteit wordt hieronder beschreven.

G.3 Referenties bij het schema werkwijze beoordeling Betrouwbaarheid sluiting kunstwerk (BSKW)

G.3.1 Activiteit 'data verzamelen'

Referenties beschrijving activiteit

- Voor de beschrijving van deze activiteit wordt verwezen naar de algemeen geaccepteerde en van toepassing zijnde protocollen, voorschriften en normen in de grond-, water- en wegenbouw die te vinden zijn bij CROW en NEN.

Referenties hulpmiddel activiteit

- WBI-Parameterlijst (bijlage A uit Handleiding Datamanagement WBI 2017). K.S. Lam, Deltares-rapport 209432-002-GEO-0002, Delft, september 2016.

G.3.2 Activiteit 'schematiseren'

Referenties beschrijving activiteit

- Schematiseringshandleiding Betrouwbaarheid Sluiten kunstwerk, WBI 2017. Rijkswaterstaat, Water, Verkeer en Leefomgeving. Lelystad, mei 2021.

Referenties hulpmiddel activiteit

- geen

G.3.3 Activiteit 'berekenen hydraulische belastingen'

Referenties beschrijving activiteit

- Ministeriële Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage II Voorschriften bepaling hydraulische belastingen primaire waterkeringen. Rijkswaterstaat, Water, Verkeer en Leefomgeving. Lelystad, september 2016.

Referenties hulpmiddel activiteit

- *Riskeer, Software voor de beoordeling van primaire waterkeringen*. Deltares, Delft, september 2016.
- *Riskeer, Installatiehandleiding, Wettelijk Toets Instrumentarium 2017*. Deltares, Delft, september 2016.
- *Riskeer, Gebruikershandleiding, Wettelijk Toets Instrumentarium 2017*. Deltares, Delft, september 2016.
- *Tool Waterstandsverloop*
- *Gebruikershandleiding Waterstandsverloop, Versie 2.0*. J. Ansink, R. Kamp, C.P.M. Geerse. HKV, Rapport PR2803.10. Lelystad, mei 2014.

G.3.4 Activiteit 'berekenen toetsoordeel'

Referenties beschrijving activiteit

- *Ministeriële Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage III Voorschriften bepaling sterkte en veiligheid primaire waterkeringen*. Rijkswaterstaat, Water, Verkeer en Leefomgeving. Lelystad, september 2016.

Referenties hulpmiddel activiteit

- *Riskeer, Software voor de beoordeling van primaire waterkeringen*. Deltares, Delft, september 2016.
- *Riskeer, Installatiehandleiding, Wettelijk Toets Instrumentarium 2017*. Deltares, Delft, september 2016.
- *Riskeer, Gebruikershandleiding, Wettelijk Toets Instrumentarium 2017*. Deltares, Delft, september 2016.
- *Fenomenologische beschrijving faalmechanismen WBI*. Rijkswaterstaat, Water, Verkeer en Leefomgeving. Lelystad, september 2016.

G.3.5 Activiteit 'analyseren'

Referenties beschrijving activiteit

- *Ministeriële Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage III Voorschriften bepaling sterkte en veiligheid primaire waterkeringen*. Rijkswaterstaat, Water, Verkeer en Leefomgeving. Lelystad, september 2016.
- *Assemblageprotocol WBI2017, Nadere uitwerking van het beoogde assemblageprotocol voor het wettelijke beoordelingsinstrumentarium*. F. Diermans, K.S. Lam, H. Knoeff, Deltares rapport 1230086-010-GEO-0001, Delft, juni 2016.

Referenties hulpmiddel activiteit

- -

G.3.6 Toelichting bij de referenties

Het softwareprogramma Ringtoets kan verschillende (sub)activiteiten ondersteunen bij het berekenen van de hydraulische belastingen en bij het berekenen van het rekenresultaat. Daarom wordt Ringtoets meerdere malen genoemd bij de referenties.

De bestandsformaten behorende tot een software of tool zijn beschreven in de handleiding van de betreffende software of tool.

H Analyse buiten Riskeer: afhankelijkheid van falen sluiten van meerdere doorstroomopeningen

In deze bijlage wordt een werkwijze beschreven voor het bepalen van de faalkans voor Betrouwbaarheid Sluiten (BS) voor een kunstwerk dat meerdere openingen heeft, die op onafhankelijk en afhankelijke wijze kunnen falen. Dit type kunstwerken kan niet in Riskeer worden geschematiseerd, vanwege de vele mogelijke scenario's van falen. Riskeer kan slechts één scenario uitwerken, terwijl alle scenario's een faalkansbijdrage hebben.

Het is wel mogelijk een (zeer) conservatieve benadering te kiezen, waarbij wordt uitgegaan van volledige afhankelijkheid van falende doorstroomopeningen en een totaal doorstroomoppervlak bestaande uit de sommatie van de doorstroomoppervlakken van alle aanwezige. Deze werkwijze wordt in Hoofdstuk 6 besproken.

Een tweede methode is het uitvoeren van een handberekening en geen gebruik te maken van Riskeer, waarbij met alle faalscenario's rekening wordt gehouden en met in acht name van de mate van afhankelijk falen tussen kokers. Een voorbeeld van een dergelijke berekening voor een spuisluis met drie kokers wordt hier toegelicht.

Inleiding casus

In dit voorbeeld wordt uitgegaan van een spuisluis met drie kokers ($n=3$). Elke koker bevat twee keermiddelen: een schuif en een wachtdeur. De schuif wordt automatisch door een hydraulische cilinder aangedreven wanneer deze wordt geopend en gesloten. Er is geen alternatieve bediening beschikbaar. De wachtdeur sluit door de stroming die ontstaat bij negatief verval, een stroming van zee naar het kanaal, en is in gesloten toestand waterkerend. Bij positief verval zal de wachtdeur weer vanzelf openen.

De sluis bevindt zich in een getijdegebied en heeft een dusdanig groot kombergend gebied achter zich dat bij ongewenst openstaan van een of meerdere kokers dit niet leidt tot overstromingsgevolgen in dit achterliggende gebied. Het verval waarbij de bodembescherming achter een ongewenst geopende koker bezwijkt wordt elke getijdeperiode overschreden. De kans op bezwijken van het kunstwerk t.g.v. bezwijken bodembescherming is echter afhankelijk van het aantal kokers dat open blijft staan, zie Tabel 1 ($P_{f,kw|erosie}$). Hoe meer kokers er ongewenst open blijven staan, des te groter de kans dat het kunstwerk bezwijkt.

Tabel 5 Kans bezwijken kunstwerk gegeven erosie bodem ($P_{f,kw|erosie}$) afhankelijk van het aantal ongewenst openstaande kokers

Aantal ongewenst openstaande kokers	$P_{f,kw erosie} [-]$	Beschrijving
$n=1$	0,5	Faalkans gegeven erosie bodem [-]
$n=2$	1	Faalkans gegeven erosie bodem [-]
$n=3$	1	Faalkans gegeven erosie bodem [-]

Niet elke getijdeperiode worden alle kokers ingezet/geopend. De kans op openstaan van 1 t/m 3 kokers (P_{open}) is in Tabel 2 opgenomen. In deze casus is de kans op open staan van alle kokers bij elkaar opgeteld niet 1. Dat betekent dat er soms helemaal geen koker open staat tijdens een getij, omdat het op dat moment niet nodig was om water af te voeren naar zee. In het geval dat er geen koker geopend is, kan er ook geen falen optreden t.g.v. niet sluiten van het kunstwerk.

Tabel 6 Kans op open staan bij naderend hoogwater/kans op aantal geopende kokers per getij

Aantal ingezette kokers per getij	$P_{open} [-]$	Beschrijving
$n=1$	0,4	Kans op open staan bij naderend hoogwater [-]
$n=2$	0,2	Kans op open staan bij naderend hoogwater [-]
$n=3$	0,1	Kans op open staan bij naderend hoogwater [-]

Onafhankelijk en afhankelijk falen

De onderlinge afhankelijkheid in falen van de doorstroomopeningen zit in de aandrijving van de drie schuiven. Een schuif wordt aangedreven door een hydraulisch systeem. Het systeem bestaat uit een centraal oliereservoir (hydraulische drukvat) en voor elke schuif een oliepomp, elektromotor en een beweegbare cilinder. Het hydraulische systeem van elke schuif werkt onafhankelijk van dat van de andere schuiven. Alleen het oliereservoir vormt een gedeelde component. Wanneer het oliereservoir faalt, bijvoorbeeld door lekkage, kan bij geen van de cilinders voldoende oliedruk worden gerealiseerd. Een tweede afhankelijkheid in falen van de schuiven is de voeding. Deze wordt geleverd door het nationale elektriciteitsnet of het noodaggregaat. Indien er een uitval van het net optreedt én het noodaggregaat faalt, kan de spuisluis niet meer bediend worden.

De wachtdeuren hebben geen voeding nodig en werken autonoom, hun falen is in dit voorbeeld als volledig onafhankelijk van elkaar aangenomen.

Berekening van de faalkans voor betrouwbaarheid sluiting per jaar

De spuisluis kent meerdere faalscenario's voor wat betreft *betrouwbaarheid sluiting*. Elk scenario bestaat uit een combinatie van mogelijke gebeurtenissen en elk van deze gebeurtenissen hebben een bepaalde kans van voorkomen. Per getijdeperiode gaat het om de volgende kansen:

- P_{open} : De kans per getij dat n kokers open staan. Feitelijk is dit de kans op een bepaalde uitgangssituatie.
- P_{ns} : de kans dat bij i van de n geopende kokers de sluiting faalt.
- $P_{f,kw|erosie}$: De kans dat het kunstwerk bezwijkt als gevolg van bezwijken van de bodembescherming bij i niet gesloten kokers

De faalkans per getij voor een bepaald scenario wordt daarmee beschreven als:

$$P_{BS, getij} = P_{open} \cdot P_{ns} \cdot P_{f, KW|erosie} \cdot P(h > OKP)_{getij} \quad [1/\text{getij}] \quad \text{H-1}$$

Bij deze casus is $P(h > OKP)_{getij}$ gelijk aan 1. Oftewel, bij elk getij zal het OKP worden overschreden. Dit heeft als gevolg dat in elk getij de bodembescherming achter een koker bij ongewenst openstaan zal bezwijken.

De kans per jaar per scenario²³:

$$P_{BS, jaar} = m \cdot P_{open} \cdot P_{ns} \cdot P_{f, KW|erosie} \cdot P(h > OKP)_{getij} \quad [1/\text{jaar}] \quad \text{H-2}$$

Met m het aantal getijdeperiode per jaar, h de hoogte van het buitenwater en OKP de buitenwaterstand welke bij open afsluitmiddelen nog juist niet tot een ontoelaatbaar instromend volume buitenwater, dan wel bezwijken van de bodembescherming leidt. $P_{f, kw|erosie}$ en P_{open} uit respectievelijk Tabel 1 en Tabel 2.

Faalkans keermiddelen per sluitvraag (P_{ns})

A. *Faaloorzaak 1: De kans per sluitvraag dat i van de n openstaande kokers niet gesloten kunnen worden bij volledig onafhankelijk falen (niet sluiten) van de kokers*

$$P_{ns, i \text{ kokers onafh}} = \binom{n}{i} P_{ns, koker, onafh}^i (1 - P_{ns, koker, onafh})^{n-i} \quad [1/\text{vraag}] \quad \text{H-3}$$

Waarbij:

$$P_{ns, koker, onafh} = P_{ns, schuif} \cdot P_{ns, deur} \quad [1/\text{vraag}] \quad \text{H-4}$$

²³ De vergelijking voor $P_{BS, jaar}$ is een benadering. In dien de faalkans per getijperiode te groot is, gaat deze benadering niet meer op en dient gebruik gemaakt te worden vergelijking F-3 en de methode beschreven in Bijlage F.

Met $P_{ns,i}$ kokers onafh de kans op niet sluiten bij volledig onafhankelijk falen, i het aantal kokers met een gefaalde sluiting en n het aantal openstaande kokers.

B. Faaloorzaak 2: De kans per sluitvraag dat i van de n openstaande kokers niet gesloten kunnen worden bij deels afhankelijk falen (niet sluiten) van de kokers.

$$P_{ns,i \text{ kokers, deels afh.}} = P_{ns, \text{schuif afh.}} \cdot \binom{n}{i} P_{ns, \text{deur}}^i (1 - P_{ns, \text{deur}})^{n-i} \quad [1/\text{vraag}] \quad \text{H-5}$$

Waarbij:

$$P_{ns, \text{schuif, afh.}} = P_{f, \text{drukvat}} + P_{f, \text{voeding}} \quad [1/\text{vraag}] \quad \text{H-6}$$

$$P_{f, \text{voeding}} = P_{f, \text{stroomvoorziening}} \cdot P_{f, \text{noodaggregaat}} \quad [1/\text{vraag}] \quad \text{H-7}$$

Met i het aantal niet gesloten kokers en n het aantal openstaande kokers.

In de bijgevoegde Excelsheet wordt de faalkans per getij per n initieel openstaande kokers, per aantal gefaalde kokers en per faaloorzaak (1 en 2) berekend. Vervolgens wordt deze gecombineerd tot de faalkans per jaar per initieel openstaande kokers. Dit wordt voor $n = 1$ t/m 3 gedaan, waarna deze worden opgeteld tot de totale faalkans per jaar. Zie voor een overzicht van de invoerparameters Tabel 3 specifiek voor deze casus. Het wordt aanbevolen om deze waardes voor andere casussen en objecten opnieuw te beschouwen.

Tabel 7 Gebruikte variabelen bij de casus

Variabele	Waarde	Beschrijving
n	3	Aantal openingen [-]
P_{es}		Faalkans Betrouwbaarheid Sluiten [1/jaar]
$P_{ns, \text{schuif}}$	1,00E-4	Faalkans per sluitvraag schuif ²⁴ , falen schuif t.g.v. gebeurtenissen anders dan falen voeding en drukvat [1/vraag]
$P_{ns, \text{deur}}$	1,00E-2	Faalkans per sluitvraag wachtdeur ²⁵ [1/vraag]
$P_{ns, \text{koker, onafh.}}$	1,00E-6	Faalkans per sluitvraag één koker, koker faalt onafhankelijk: falen wachtdeur én falen schuif (gebeurtenissen anders dan falen voeding en drukvat) [1/vraag], zie formule H-4
$P_{f, \text{drukvat}}$	3,00E-5	Faalkans hydraulische drukvat per vraag. De faalfrequentie = 5,00E-6 [kans per uur] ²⁶ . In een getij van 12 zijn 2 testmomenten, namelijk voor openen en sluiten. Uitgaande dat de periode daartussen een half getij beslaat, is het testinterval gelijk aan 6 uur. De kans per vraag is dan gelijk aan $6 \times 5,00E-6 = 3,00E-5$ [1/vraag]
$P_{f, \text{stroomvoorziening}}$	1,00E-4	Faalkans per vraag stroomvoorziening ²⁷ [1/vraag]
$P_{f, \text{noodaggregaat}}$	1,00E-2	Faalkans per vraag noodaggregaat ²⁸ [1/vraag]
$P_{f, \text{voeding}}$	1,00E-6	Faalkans voeding (elektriciteitsnet en noodaggregaat) [1/vraag], zie formule H-7
$P_{ns, \text{schuif, afh.}}$	3,10E-5	Faalkans schuif per sluitvraag t.g.v. drukvat óf voeding [1/vraag], zie formule H-6
OKP	0,50	Open Keerpeil [+mNAP]
h		Hoogte van buitenwater [+mNAP]
$P(h > OKP)$	705	Frequentie van buitenwaterstand hoger dan OKP [1/jaar]

²⁴ Uit: Bijlage B van de Werkwijzer Ontwerpen Waterkerende Kunstwerken [20]

²⁵ Faalkans op basis van expert judgement.

²⁶ Uit: Tabel B3.9 van Leidraad Kunstwerken (mei 2003) [11]

²⁷ Faalkans op basis van uitspraak van netbeheerder Liander.

²⁸ Uit: Tabel B3.8 van Leidraad Kunstwerken (mei 2003) [11]

Resultaat handberekening

Het combineren van de faalkansen leidt tot een kans voor Betrouwbaarheid sluiting kunstwerk (BSKW) van $5,08E-04$ per jaar of met herhalingsjijd van 1 op 1.969 jaar, zie de onderstaande Excelsheet.

Wat opvalt uit de uitwerking van dit voorbeeld is dat het falen van meer dan één schuif nauwelijks effect heeft op de faalkans. De faalkansbijdragen van die scenario's zijn vele ordes kleiner dan bij het falen van één schuif.

Bovendien zorgt een toename van het aantal doorstroomopeningen voor een relatief kleine toename in de faalkans. De faalkans met 1 schuif initieel geopend is slechts een factor ~ 3 zo klein dan het scenario waarbij alle drie de schuiven open staan. Wanneer je deze casus uitbreidt naar een hoger aantal doorstroomopeningen, dan zal deze factor maar beperkt toenemen.

Dit resultaat komt tot stand door de gehanteerde variabelen van deze casus. Variabelen zijn specifiek voor het object en de situatie ter plaatse, en hiermee kan ook de conclusie voor toetsspoor Betrouwbaarheid sluiting per kunstwerk verschillen.

N.B.: in deze casus beschikt het object niet over een alternatieve bediening in het geval van storing in de aandrijving. Bij veel objecten is dit wel aanwezig en kunnen schuiven middels handbediening of onder eigen gewicht worden gesloten. De handberekening kan worden uitgebreid door het *deelfaalmecanisme Z₂₄: falen van herstel van het sluitproces* wel mee te nemen, zie paragraaf 7.6.

kokers open (n)

1

 P_{open}

0,4

aantal gefaalde kokers (i)

 P_{ns} $P_{f,KW|erosie}$ $P_{BS, getij}$ $P_{BS, jaar}$

Faaloorzaak 1	Faaloorzaak 2
1	1
1,00E-06	3,10E-07
0,5	0,5
2,00E-07	6,20E-08
1,41E-04	4,37E-05

 $P_{BS, jaar, 1 \text{ koker open}}$

1,85E-04

kokers open (n)

2

 P_{open}

0,2

aantal gefaalde kokers (i)

aantal mogelijkheden (binomiaalcoëfficiënt)

 P_{ns} $P_{f,KW|erosie}$ $P_{BS, getij, scenario}$ $P_{BS, jaar, scenario}$

Faaloorzaak 1	Faaloorzaak 2
1	1
2	2
2,00E-06	6,14E-07
0,5	0,5
2,00E-07	6,14E-08
1,41E-04	4,33E-05

Faaloorzaak 1	Faaloorzaak 2
2	2
1	1
1,00E-12	3,10E-09
1	1
2,00E-13	6,20E-10
1,41E-10	4,37E-07

 $P_{BS, jaar \sum scenario}$

1,84E-04

4,37E-07

 $\sum P_{BS, 2 \text{ kokers stonden initieel open}}$

1,85E-04

kokers open (n)

3

 P_{open}

0,1

aantal gefaalde kokers (i)

aantal mogelijkheden (binomiaalcoëfficiënt)

 P_{ns} $P_{f,KW|erosie}$ $P_{BS, getij, scenario}$ $P_{BS, jaar, scenario}$

Faaloorzaak 1	Faaloorzaak 2
1	1
3	3
3,00E-06	9,11E-07
0,5	0,5
1,50E-07	4,56E-08
1,06E-04	3,21E-05

Faaloorzaak 1	Faaloorzaak 2
2	2
3	3
3,00E-12	9,21E-09
1	1
3,00E-13	9,21E-10
2,11E-10	6,49E-07

Faaloorzaak 1	Faaloorzaak 2
3	3
1	1
1,00E-18	3,10E-11
1	1
1,00E-19	3,10E-12
7,05E-17	2,19E-09

 $P_{BS, jaar \sum scenario}$

1,38E-04

6,49E-07

2,19E-09

 $\sum P_{BS, 3 \text{ kokers stonden initieel open}}$

1,39E-04

 $\sum P_{BS, totaal}$

Kans [1 / jaar]	Herhalingstijd [jaar]
5,08E-04	1.969