



KUNSTWERKEN

Handleiding Overstromingskansanalyse





Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

RWS INFORMATIE

Handleiding Overstromingskansanalyse - Kunstwerken

Colofon

Uitgegeven door
Informatie
Versie

Rijkswaterstaat
www.iplo.nl
Juli 2023

Voorwoord

Beste lezer,

Deze handleiding Overstromingskansanalyse - Kunstwerken is onderdeel van het Beoordelings- en ontwerpinstrumentarium (BOI) voor primaire waterkeringen.

Deze handleiding Overstromingskansanalyse Zandige keringen is onderdeel van het Beoordelings- en ontwerpinstrumentarium (BOI) voor primaire waterkeringen.

Een van de doelstellingen van het programma BOI is het denken vanuit het gedrag van de kering en het werken met overstromingskansen beter mogelijk te maken. De inzet van het instrumentarium is flexibeler geworden. De beheerder maakt zelf de afweging welk model het meest geschikt is voor zijn kering. Ook wordt het volledige faalpad dat leidt tot een overstroming beschouwd.

Het 'papieren' instrumentarium is daarom opnieuw ingericht en bestaat nu uit de handleidingen Overstromingskansanalyse voor de verschillende typen keringen en de verschillende faalmechanismen én de Technische leidraden. De nog relevante onderdelen uit het WBI2017 uit bijlage III, de schematiseringshandleidingen en de leidraden en technische rapporten zijn hierin opgenomen.

Het gedrag van de kering centraal zetten klinkt logisch en past bij de ervaringen uit LBO-1. Deze stap lijkt dan ook eenvoudig: het basisinstrumentarium wijzigt inhoudelijk nauwelijks, de kering blijft hetzelfde en er zijn weinig nieuwe inzichten van de fysica. Toch hebben we bij de ontwikkeling van het instrumentarium en het opstellen van de handleidingen ervaren dat het in de praktijk lastig en soms theoretisch is. Het 'gedrag van de kering centraal' werkt namelijk door in het hele instrumentarium en vraagt dat er met een nieuwe blik naar wordt gekeken. Het kostte tijd om de nieuwe begrippen te doorgronden en op te schrijven. We zijn dan ook verschillende keren opnieuw begonnen.

Deze eerste groene versies zijn daarom nog niet perfect. De theoretische discussies zijn gevoerd, maar voor verdere aanvulling is het nodig dat praktijkervaring wordt opgedaan. Daarbij is het belangrijk dat we de nieuwe begrippen die steeds aan het eind van elke handleiding staan, consistent en eenduidig gebruiken.

We houden rekening met een continue doorontwikkeling van deze handleiding. Door praktijkervaringen toe te voegen gaan we ervan uit dat we de handleiding steeds completer en gebruiksvriendelijker kunnen maken. We willen u daarom vragen om zoveel mogelijk ervaringen, positief en negatief, met ons te delen. Dat kan via [het vragenformulier op de IPLO](#). Op Iplo, de pagina van het BOI-portaal, zal periodiek een samenvatting van opmerkingen, vragen en antwoorden worden gepubliceerd en waar nodig een lijst met errata. Op basis van de opmerkingen en ontwikkelingen van kennis en instrumenten wordt jaarlijks een afweging gemaakt of een nieuwe versie nodig is.

Deze eerste groene versie van de handleiding is gezamenlijk opgesteld door Rijkswaterstaat, Deltares en marktpartijen. De kwaliteit is geborgd door een interne inhoudelijke review en controle op de consistentie over alle handleidingen vanuit het programma BOI. In 2024 worden nieuwe versies verwacht aangevuld met de eerste ervaringen en ook opmerkingen en aanbevelingen van ENW.

Het BOI-team

Inhoud

1	Inleiding	8
1.1	Het Beoordelings- en ontwerpinstrumentarium (BOI)	8
1.1.1	Procesinstrumentarium	8
1.1.2	Basisinstrumentarium	9
1.1.2.1	Handleidingen	9
1.1.2.2	Technische leidraden	9
1.1.2.3	Software en databases	10
1.1.3	Werkatelier	10
1.2	Verhaal van de kering	10
1.3	Uitgangspunten	11
1.3.1	Generieke uitgangspunten	11
1.3.2	Uitgangspunten faalmechanisme sterkte en/of stabiliteit puntconstructies	11
1.3.3	Uitgangspunten faalmechanisme niet sluiten	11
1.4	Leeswijzer van deze handleiding	12
2	Beschrijving faalmechanisme	14
2.1	Keertoestanden en scenario's	14
2.2	Algemene opmerkingen bij fenomenologische beschrijvingen en faalpaden	17
2.2.1	Fenomenologische beschrijvingen	17
2.2.2	Faaldefinitie voor alle faalmechanismen	17
2.2.3	Foutenbomen versus gebeurtenissenbomen	17
2.2.4	Noodzaak voor complete faalpadanalyse	17
2.3	Fenomenologische beschrijving en faalpaden overslag en/of overloop kunstwerk	18
2.3.1	Fenomenologische beschrijving overslag en/of overloop kunstwerk	18
2.3.2	Overzicht faalpaden en belangrijkste aspecten	18
2.3.3	Beknopte beschrijving deelfaalmechanismen	19
2.4	Fenomenologische beschrijving en faalpaden niet sluiten	21
2.4.1	Fenomenologische beschrijving niet sluiten kunstwerk	21
2.4.2	Overzicht faalpaden en belangrijkste aspecten	22
2.4.3	Beknopte beschrijving deelfaalmechanismen	23
2.5	Fenomenologische beschrijving en faalpaden sterkte en/of stabiliteit puntconstructies	23
2.5.1	Fenomenologische beschrijving sterkte en/of stabiliteit puntconstructies	23
2.5.2	Overzicht faalpaden en belangrijkste aspecten	24
2.5.3	Beknopte beschrijving deelfaalmechanismen	25
2.6	Fenomenologische beschrijving en faalpaden piping bij kunstwerk	27
2.6.1	Fenomenologische beschrijving piping bij kunstwerk	27
2.6.2	Overzicht faalpaden en belangrijkste aspecten	27
2.6.3	Beknopte beschrijving deelfaalmechanismen	28
3	Bepalen relevantie met beslisregels	29
3.1	Beslisregels faalmechanisme overslag en/of overloop	29
3.2	Beslisregels faalmechanisme niet sluiten	29
3.3	Beslisregels faalmechanisme sterkte en/of stabiliteit puntconstructies	32
3.4	Beslisregels faalmechanisme piping bij kunstwerk	32
3.4.1	Beslisregels waarmee het hele faalmechanisme als niet relevant kan worden aangemerkt	32
3.4.2	Beslisregels voor de afzonderlijke deelfaalmechanismen onderloopsheid en achterloopsheid	33

4	Eerste inschatting overstromingskans	35
4.1	Overzicht beschikbare instrumenten	35
4.1.1	Algemeen	35
4.1.2	Introductie Riskeer	35
4.1.3	Introductie Hydra-NL	36
4.1.4	Introductie Waterstandsverloop	37
4.1.5	HB Havens	37
4.1.6	Introductie WOWK	38
4.2	Stappenschema voor analyse relevante faalmechanismen	38
4.3	Belastinggevallen en hydraulische belasting	41
4.3.1	Hydraulische belastingen in het instrumentarium	41
4.3.2	Belastinggevallen en hydraulische belastingen overslag en/of overloop	42
4.3.2.1	Dominante hydraulische belastingen	42
4.3.2.2	Belastinggevallen	43
4.3.3	Belastinggevallen en hydraulische belasting niet sluiten	43
4.3.3.1	Dominante hydraulische belasting	43
4.3.3.2	Belastinggevallen	44
4.3.4	Belastinggevallen en hydraulische belastingen sterkte en/of stabiliteit puntconstructies	44
4.3.4.1	Dominante hydraulische belastingen	45
4.3.4.2	Binnenwaterstanden	45
4.3.4.3	Eigengewichtsbelasting	45
4.3.4.4	Windbelastingen	45
4.3.4.5	IJsbelasting	46
4.3.4.6	Grond- en grondwaterbelastingen	46
4.3.4.7	Veranderlijke belastingen	46
4.3.4.8	Aanvaarbelastingen	47
4.3.4.9	Bijzondere belastingen	47
4.3.4.10	Vermoeiingbelasting	47
4.3.5	Belastinggevallen en hydraulische belasting piping bij kunstwerk	47
4.3.5.1	Relevante belastingsituaties	48
4.3.5.2	Bepaling hydraulische belastingen	48
4.3.5.3	Tijdsafhankelijkheid	48
4.3.5.4	Waterstandsverloop tijdens hoogwater	50
4.4	Inventarisatie beschikbare gegevens	50
4.4.1	Praktijkgegevens	51
4.4.1.1	Veldbezoek	52
4.4.1.2	Ervaringsgegevens werking van het kunstwerk	53
4.4.1.3	Inspectiegegevens	53
4.4.1.4	Beheer en onderhoudsgegevens	54
4.4.2	Gebruiksgegevens en sluitingsprotocollen	54
4.4.2.1	Gebruiksgegevens	54
4.4.2.2	Sluitingsprotocollen	55
4.4.3	Geometrie kunstwerk	55
4.4.3.1	Geometrie overslag en/of overloop	56
4.4.3.2	Geometrie niet sluiten	56
4.4.3.3	Geometrie sterkte en stabiliteit	56
4.4.3.4	Geometrie piping bij kunstwerk	57
4.4.4	Gegevens bodembescherming	57
4.4.5	Gegevens komberging	59
4.4.6	Toegepaste materialen	60
4.4.7	Grondgegevens	60
4.4.8	Overige relevante gegevens piping bij kunstwerk	60
4.5	Bepalen (kansen op) keerscenario's	61

4.6	Uitwerking schematisering	62	
4.6.1	Algemeen	63	
4.6.1.1	Schematisering per vak (kunstwerk)	63	
4.6.1.2	Havendammen en voorlanden	64	
4.6.2	Schematisering faalmechanisme overslag en/of overloop	64	
4.6.2.1	Schematisering geometrie voor bepaling optredend overslag-/overloopdebiet	64	
4.6.2.2	Schematisering bodembescherming voor bepaling kritiek debiet	65	
4.6.2.3	Schematisering toelaatbaar overslag-/overloopdebiet i.v.m. dynamische effecten op het keermiddel	67	
4.6.2.4	Schematisering komberging	67	
4.6.3	Schematisering faalmechanisme niet sluiten	68	
4.6.3.1	Schematisering situatie voorafgaand aan sluiting	70	
4.6.3.2	Schematisering sluitproces	71	
4.6.3.3	Schematisering herstel van een gefaalde sluiting	71	
4.6.3.4	Schematisering gevolgen na falen sluiting	72	
4.6.4	Schematisering faalmechanisme sterkte en/of stabiliteit puntconstructies	75	
4.6.4.1	Falen door bezwijken waterkerende constructieonderdelen (STCO)	75	
4.6.4.2	Falen ten gevolge van aanvaring	80	
4.6.4.3	Falen door instabiliteit constructie en grondlichaam (STCG)	84	
4.6.5	Schematisering faalmechanisme piping bij kunstwerk	87	
4.6.5.1	Identificatie van mogelijk maatgevende kwelwegen	87	
4.6.5.2	Geotechnische en geohydrologische schematisatie van de ondergrond	90	
4.6.5.3	Bepaal maatgevende kwelwegen	94	
4.6.5.4	Evaluatie waarnemingen	95	
4.7	Bepalen faalkans / uitvoeren beoordeling	96	
4.8	Plausibiliteitscontrole en mogelijke aanscherpingen	96	
4.8.1	Plausibiliteitscontrole	96	
4.8.2	Controle uitkomsten analyses middels alternatieve faalkansberekeningen	97	
4.8.3	Aanscherpen schematisering piping bij kunstwerk	98	
5	Mogelijkheden voor aanscherping overstromingskans	99	
5.1	Algemeen	99	
5.2	Kansrijke optimalisaties faalmechanisme <i>overslag en/of overloop</i>	99	
5.2.1	Falen door erosie bodembescherming	99	
5.2.2	Nadere inschatting van het kritieke debiet	100	
5.2.3	Nadere bepaling kombergend vermogen	100	
5.2.4	Nadere bepaling overslag-/overloopdebiet.	101	
5.3	Kansrijke opties faalmechanisme <i>niet sluiten</i>	101	
5.3.1	Nadere analyse kans op niet sluiten	101	
5.3.2	Falen door erosie bodembescherming	102	
5.3.3	Nadere bepaling kombergend vermogen	102	
5.4	Kansrijke opties faalmechanisme <i>sterkte en/of stabiliteit puntconstructies</i>	102	
5.4.1	Nadere analyse sterkte constructieonderdelen	102	
5.4.2	Nadere analyse stabiliteit constructie en grondlichaam	102	
5.4.3	Nadere analyse aanvaren	103	
5.4.4	Nadere analyse komberging	103	
5.4.5	Nadere analyse bodembescherming	103	
5.5	Kansrijke opties faalmechanisme piping bij kunstwerk	104	
5.5.1	Peilbuismetingen	104	
5.5.2	Geavanceerde grondwaterstromingsmodellen	104	
5.5.3	Bewezen sterkte	105	
5.5.4	Probabilistische piping of heave analyse	105	
5.6	Benutten kennisontwikkeling	105	

6 Voorbeelden 107

6.1	Faalmechanisme <i>niet sluiten</i> - coupure in bovenrivierengebied	107
6.1.1	Schematisering sluitproces	107
6.1.2	Schematisering kans op open staan	107
6.1.3	Schematisering faalkans van herstel	108
6.1.4	Schematisering gevolgen (uitwerking met Riskeer)	108
6.1.5	Analyse	110

Referenties 111

Bijlage A Begrippenlijst 114

Bijlage B Definitie falen komberging 116

Bijlage C Van foutenboom naar gebeurtenissenboom 118

Bijlage D Analyse: afhankelijkheid van falen sluiten van meerdere doorstroomopeningen 121

Bijlage E Veiligheidsfilosofie constructieve veiligheid en haar historie 126

Bijlage F Vereenvoudigde beoordeling sterkte en/of stabiliteit aan de hand van de WOWK130

1 Inleiding

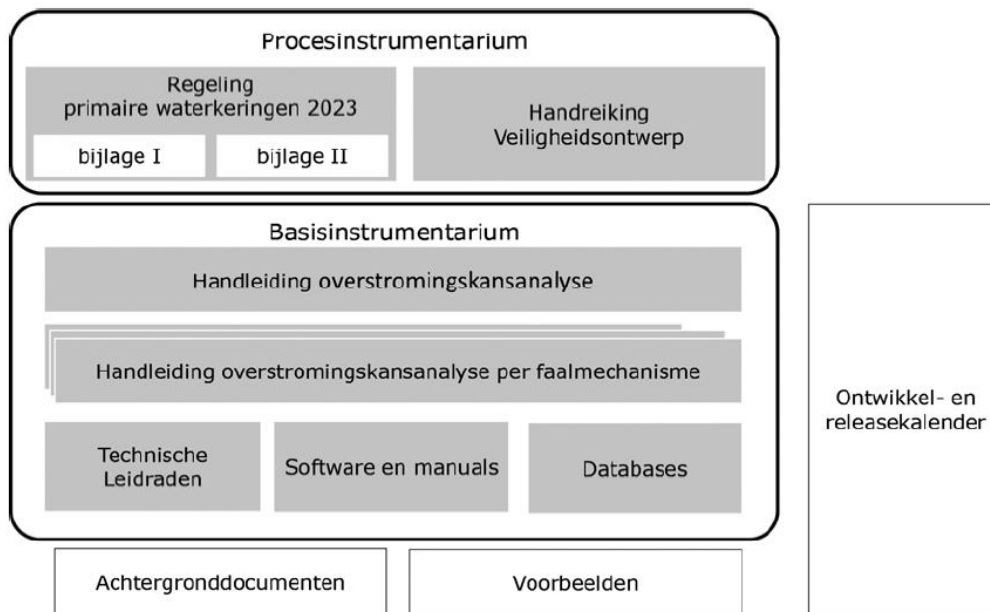
Deze handleiding beschrijft de aanpak om te komen tot een geloofwaardige, herleidbare en stabiele bepaling van de bijdrage aan de overstromingskans van een waterkerend kunstwerk in een dijktraject. Daarbij wordt gebruik gemaakt van faalpadanalyses. Het verhaal van de kering (in dit geval het kunstwerk), waarbij de kering in samenhang met het omliggende systeem wordt beschouwd, staat daarbij centraal.

De begrippenlijst in deze handleiding is hetzelfde als bijlage I en II van de Regeling primaire waterkeringen 2023, zie Bijlage A.

1.1 Het Beoordelings- en ontwerpinstrumentarium (BOI)

Het Rijk stelt de regels voor het uitvoeren van de veiligheidsbeoordeling op en stelt leidraden, handleidingen en software beschikbaar voor het ontwerp en het beheer van primaire keringen. Onder het beheer van een waterkering vallen alle activiteiten die erop gericht zijn de bestaande kering zijn functies duurzaam te laten uitvoeren.

Als hulpmiddel bij de veiligheidsbeoordeling en het opstellen van een ontwerp voor een versterking stelt het Rijk het Beoordelings- en ontwerpinstrumentarium (BOI) beschikbaar. Het BOI bestaat uit proces- en basisinstrumenten, zie Figuur 1.



Figuur 1: Overzicht BOI

1.1.1 Procesinstrumentarium

Voor het beoordelen bestaat het procesinstrumentarium uit de Regeling Veiligheid primaire waterkeringen 2023 en twee bijlagen:

- Bijlage I Procedure beoordeling primaire waterkeringen
Deze bijlage beschrijft de te volgen procedure in de beoordeling van een dijktraject. Ook zijn de eisen aan de rapportage opgenomen.
- Bijlage II Randvoorwaarden beoordeling primaire waterkeringen
In deze bijlage worden de randvoorwaarden beschreven voor het bepalen van de overstromings- of faalkans van een dijktraject.

De handreiking Veiligheidsontwerp is het procesinstrumentarium dat vanuit BOI beschikbaar wordt gesteld. Deze handleiding geeft ondersteuning en licht de keuzes toe die voor waterveiligheid moeten worden gemaakt. Zowel in het ontwerpproces van het definiëren van de dijkversterkingsopgave in de trajectaanpak, als voor het realiseren van dijkversterkingsmaatregelen.

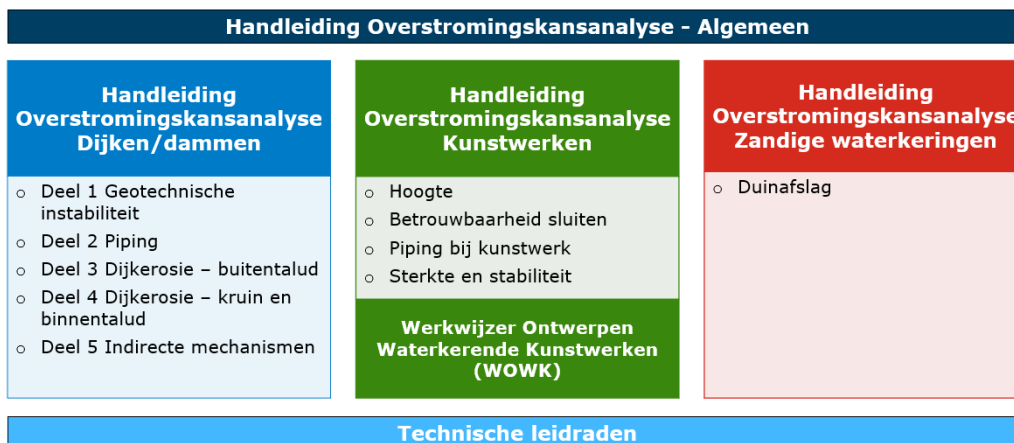
1.1.2 Basisinstrumentarium

Het basisinstrumentarium bestaat uit handleidingen, technische leidraden, software-applicaties en databases. Deze instrumenten kunnen worden gebruikt om de overstromingskans van een dijktraject te bepalen.

1.1.2.1 Handleidingen

De handleidingen van het BOI ondersteunen bij het uitvoeren van de analyses om de overstromingskans van een dijktraject te bepalen, zowel voor het uitvoeren van een beoordeling als een ontwerpverificatie. In de handleidingen worden alle keuzes, overwegingen en activiteiten beschreven die op basis van het verwachte gedrag van de waterkering nodig zijn om de overstromingskans te bepalen.

Figuur 2 geeft een overzicht van deze verschillende handleidingen.



Figuur 2: Overzicht van de verschillende handleidingen

De handleiding Overstromingskansanalyse - Algemeen [1] beschrijft de algemene aanpak van de bepaling van de overstromingskans van primaire waterkeringen. Daarnaast staan er handvatten in voor het opstellen van het verhaal van de kering (zie paragraaf 1.1.2.3), waarmee de waterkering in de context van de omgeving wordt bekeken. Hierbij is uitgegaan van drie leidende principes:

1. Een stabiel eindresultaat en transparant handelingsperspectief.
2. Een geloofwaardige overstromingskans.
3. Het systeem staat centraal.

Deze handleiding geeft handvatten voor de bepaling van de overstromingskans voor kunstwerken en is een concrete uitwerking van de aanpak zoals beschreven in de handleiding overstromingskansanalyse.

1.1.2.2 Technische leidraden

Naast handleidingen voor faalmechanismen, maken ook technische leidraden onderdeel uit van het BOI. Technische leidraden bevatten informatie over onderdelen van de waterkering, mechanismen, sterkte en belastingen die samen bepalend zijn voor de overstromingskans. Ook gaan de technische leidraden in op

rekenmodellen en rekentechnieken die kunnen worden gebruikt voor het berekenen van overstromingskansen. De technische leidraden zijn te vinden op <https://tl.iplo.nl/>.

1.1.2.3 Software en databases

De modellen en applicaties die onderdeel uitmaken van het BOI, kunnen gebruikt worden om de kans van optreden van bepaalde mechanismen te berekenen. *Riskeer* is de user interface (UI) van de applicaties van het BOI. Riskeer voegt de resultaten van de verschillende faalpadanalyses samen om een inschatting te kunnen maken van de overstromingskans van het dijktraject.

De databases bevatten de hydraulische belastingen voor de verschillende watersystemen en de scenario's voor de schematisatie van de ondergrond (SOS).

1.1.3 *Werkatelier*

Deze handleiding is vooral gericht op de bepaling van de overstromingskans en *niet* op het proces. Daarvoor wordt verwezen naar bijlage I en II van de Regeling en de afspraken die hierover zijn gemaakt in het draaiboek [2]. In het draaiboek is een werkatelier gedefinieerd waarin een groep specialisten en beheerders onder leiding van een voorzitter een doelmatig en uitvoerbaar advies opstellen voor de bepaling van de overstromingskans van het dijktraject van de beheerder. Het doel hiervan is een verklaarbaar, consistent en stabiel resultaat van de beoordeling. Ook kan dit aanbevelingen geven voor het BOI.

1.2 Verhaal van de kering

Het verhaal van de kering draagt bij aan het begrijpen en kunnen duiden van de functie van het dijktraject in het systeem. Het geeft per dijktraject ook inzicht in de gebeurtenissen die leiden tot een overstroming. Gebeurtenissen- en foutenbomen zijn methoden die daarbij kunnen helpen.

Het verhaal bestaat uit een beschrijving van de waterkering, de ondergrond en de belastingen. Het wordt opgesteld op basis van bestaande informatie en geeft een overzicht van de ordening en interpretatie van de gegevens in het data- en informatiesysteem van de waterkering waar het een onderdeel van is. Dit verhaal bepaalt de ordening en de aard van gegevens die nodig zijn voor een analyse van de overstromingskans. Een actueel en volledig data- en informatiesysteem, waarin continu de laatste inzichten worden verwerkt, is een voorwaarde voor een plausibele uitkomst van een overstromingskansanalyse. Het verhaal van de kering is nooit af. Door nieuwe inzichten en ervaringen kan het verhaal wijzigen of worden aangescherpt.

Het verhaal van de kering bevat een aantal basiselementen:

- **Beschrijving van de waterkering:** De beschrijving van de eigenschappen van de waterkering die van belang zijn voor een overstromings- of faalkansanalyse. Hierbij wordt ook de relatie gelegd met de historische achtergrond van de kering. Het gaat onder andere om de geometrie en de opbouw van de waterkering. Zoals bijvoorbeeld type bekledingen, waterkerende constructies en kunstwerken en niet-waterkerende objecten die de overstromings- of faalkans kunnen beïnvloeden.
- **Geologische en geohydrologische analyse:** Het analyseren van geologische tijdvakken en de geohydrologische en geotechnische eigenschappen van het ondergrondsysteem kwalitatief beschrijven.
- **Hydrologische en hydraulische analyse:** Het beschrijven van de hydraulische belasting van het dijktraject vanuit het watersysteem, waar

nodig in combinatie met hydrologische gebeurtenissen, zoals extreme neerslag.

- **Kennis en ervaring van de keringbeheerder:** Inspecties van de waterkering hebben inzicht gegeven in het optreden van schade en vervormingen van de waterkering. Daarnaast heeft de keringbeheerder de waterkering eerder beoordeeld en mogelijk versterkt.

1.3 Uitgangspunten

1.3.1 Generieke uitgangspunten

In deze handleiding Kunstwerken worden de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- In de Omgevingswet is de overstromingskans gedefinieerd als *de kans op verlies van waterkerend vermogen van een dijktraject waardoor het door het dijktraject beschermde gebied 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 bij de beoordeling van kunstwerken echter wel van belang, specifiek als het gaat om falen bij een standzeker kunstwerk. Binnen het BOI is dit daarom nader uitgewerkt volgens Bijlage B.
- Deze handleiding is opgesteld voor kunstwerken die geen onderdeel zijn van een voorliggende kering. Hoewel grote delen van deze handleiding ook voor kunstwerken in voorliggende keringen bruikbaar zijn, verloopt op onderdelen de beoordeling voor kunstwerken in een voorliggende kering net even anders. Hiervoor is binnen het programma Rijkskeringen van Rijkswaterstaat een werkwijze op maat ontwikkeld.
- In dit document wordt onder andere gesproken over de sterkte van bodembeschermingen. Onder deze term vallen ook de aansluit- en overgangsconstructies van bodembeschermingen. Alhoewel hiervoor geen specifieke sterktemodellen beschikbaar zijn, dienen deze constructies kwalitatief te worden meegenomen in de beschouwingen voor zover dit mogelijk is. Dit betekent dat bij indicaties van slechte aansluitingen (bijvoorbeeld uit inspecties) de rekenwaarde van de sterkte van de bodembescherming gereduceerd moet worden.
- Deze handleiding heeft uitsluitend betrekking op zogenaamde puntconstructies zoals sluisen, gemalen, coupures en dergelijke. Zij heeft geen betrekking op langsconstructies (zoals damwanden en kademuren) en demontabele wanden. Voor langsconstructies wordt verwezen naar *Toets op maat langsconstructies* [18] en voor demontabele keringen wordt verwezen naar *Toets op maat demontabele keringen* [19].

1.3.2 Uitgangspunten faalmechanisme sterkte en/of stabiliteit puntconstructies

Specifiek voor het faalmechanisme *sterkte en/of stabiliteit puntconstructies* geldt dat binnen het BOI een semi-probabilistische ontwerpverificatie op vakniveau beschikbaar is welke staat beschreven in de Werkwijzer Ontwerpen Waterkerende Kunstwerken [12]. Alhoewel deze werkwijzer met name geschreven is voor het *ontwerpen* van kunstwerken voor de hoogwatersituatie kan deze ook worden toegepast voor het beoordelen hiervan. In bijlage E wordt dit nader uitgewerkt.

1.3.3 Uitgangspunten faalmechanisme niet sluiten

Specifiek voor het faalmechanisme *niet sluiten* gelden de volgende uitgangspunten:

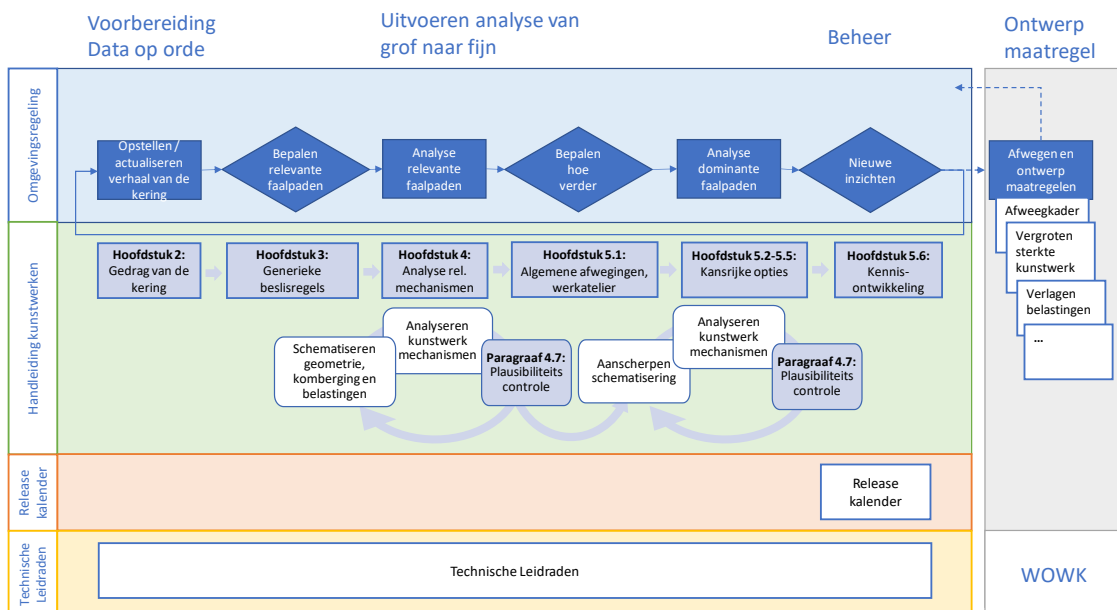
- In tegenstelling tot andere faalmechanismen binnen het BOI wordt bij *niet sluiten* gekeken naar de tijdsperiode van waterstanden gedurende het gehele jaar en niet alleen naar het hoogwaterseizoen. Dat komt omdat het niet sluiten van een kunstwerk bij sommige kunstwerken ook bij dagelijkse waterstanden kan leiden tot het falen van de kering. Tevens wordt hiermee voorkomen dat kunstwerken die in het winterhalfjaar gesloten zijn, ten onrechte 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 BOI uitgaan van een winterhalfjaar is het bij de beoordeling van de laatste categorie kunstwerken eventueel nodig om een correctie hiervoor mee te nemen in de modellering. Een globale wijze om dit te doen is door in de modellering te verwerken dat circa 10% van de hoogwaters zich voordoen in de zomer.
- **Voor het faalmechanisme *niet sluiten* kan niet genoeg benadrukt worden dat de exacte werking en toepassing van het kunstwerk bekend moeten zijn. Niet alleen bij de mensen die het kunstwerk daadwerkelijk bedienen, maar ook bij de personen die de beoordeling uitvoeren.**

1.4 Leeswijzer van deze handleiding

Deze handleiding is gericht op de faalpaden die voor kunstwerken relevant zijn. Daarbij is de algemene opzet van de Omgevingswet specifiek gemaakt voor de faalmechanismen *overslag en/of overloop, niet sluiten, piping bij kunstwerk en sterkte en/of stabiliteit*. Deze handleiding gaat niet in op het combineren van faalkansen tot een faalkans op trajectniveau. Hiervoor wordt verwezen naar handleiding Overstromingskansanalyse [29].

Opbouw van deze handleiding

Zoals in Figuur 3 wordt geïllustreerd, volgt de opbouw van deze handleiding in grote lijnen het proces uit de Omgevingsregeling.



Figuur 3: Relatie tussen proces Omgevingsregeling en opbouw van deze handleiding

De opbouw van deze handleiding is als volgt:

Onderwerp	Locatie
Beschrijving faalpaden	Hoofdstuk 2
Generieke beslisregels	Hoofdstuk 3
Generieke analyse per kunstwerk	Hoofdstuk 4
Analyse dominant faalpad	Hoofdstuk 5
Duiding	Hoofdstuk 6
Analyse met behulp van Riskeer	Gebruikershandleiding Riskeer – Faalmechanismen kunstwerken [31]

De handleiding begint met een beknopte beschrijving van het gedrag van de kering (in dit geval: het kunstwerk) en een beschrijving van de faalpaden bij kunstwerken (hoofdstuk 2).

Vervolgens staan in hoofdstuk 3 de generieke beslisregels die het mogelijk maken snel te filteren welke faalpaden (on)waarschijnlijk zijn.

Hoofdstuk 4 beschrijft de uitwerking van een eerste generieke analyse van de overstromingskans. Deze geeft samen met de technische leidraden de handvatten voor het schematiseren en doorrekenen van kunstwerken. Als een beoordeling noodzakelijk is, wordt in hoofdstuk 4 aangegeven welke stappen moeten worden gezet om tot een beoordelingsresultaat te komen. Het *stappenschema* vormt hiermee de basis van deze handleiding en geeft een overzicht van de te volgen stappen voor het schematiseren. Per stap wordt een verwijzing gegeven naar een paragraaf of hoofdstuk van deze handleiding waarin dit verder wordt uitgewerkt. Het stappenschema kan dus als leeswijzer of leidraad voor het toepassen van deze handleiding worden gebruikt.

De eerste inschatting van de overstromingskans analyse uit hoofdstuk 4 gebruikt methodes met een zeker geldigheidsgebied. Onder andere voor situaties die hierbuiten vallen, kunnen verdere analyses handvatten bieden om de overstromingskans aan te scherpen (hoofdstuk 5). Hoofdstuk 5 bevat aanknopingspunten voor een verder analyse als blijkt dat de faalkansbijdrage van (een van de faalmechanismen van) het kunstwerk aan de overstromingskans op dijktrajectniveau substantieel is.

Tot slot beschrijft hoofdstuk 6 de duiding van de resultaten.

In een separate gebruikershandleiding Riskeer – Faalmechanismen kunstwerken [31] wordt in meer detail ingegaan op de diverse parameters die bij de beoordeling van de relevante faalmechanismen bij kunstwerken – *overslag en/of overloop, betrouwbaarheid sluiting, piping bij kunstwerk en sterkte en/of stabiliteit puntconstructies* - een rol spelen. Dit is gedaan aan de hand van de modellering van het faalmechanisme in Riskeer. In de toelichting bij de diverse parameters zijn in dit document ook diverse voorbeelden opgenomen.

2 Beschrijving faalmechanisme

Dit hoofdstuk beschrijft kort het gedrag van het kunstwerk bij de verschillende faalmechanismen die voor kunstwerken relevant zijn (*overslag en/of overloop, betrouwbaarheid sluiting, piping bij kunstwerk en sterkte en/of stabiliteit puntconstructies*). Voor een uitgebreide fenomenologische beschrijving wordt verwezen naar de beschrijvingen per faalmechanisme in de technische leidraden. Op basis van de beschrijving van het faalpad en de eigenschappen van het kunstwerk kan voor een specifiek kunstwerk de relevantie van het faalmechanisme (hoofdstuk 3), de toepasbaarheid van de eerste analyses (hoofdstuk 4) en de mogelijke vervolganalyses (hoofdstuk 5) worden bepaald.

Het verhaal van de kering is het resultaat van een analyse van de waterkering (in dit geval: het kunstwerk) gericht op het begrijpen van de overstromings- of faalkans door de beschrijving van de eigenschappen van de waterkering, de ondergrond en de belastingen. Het resultaat van het verhaal van de kering is een ordening en interpretatie van de gegevens rondom de gebeurtenissen die kunnen leiden tot een overstroming.

Mogelijke faalpaden volgen logischerwijs uit de fenomenologische beschrijvingen waarin de gebeurtenissen worden beschreven die tot een overstroming kunnen leiden. Daarom is ervoor gekozen om de fenomenologische beschrijving en de beschrijving van de faalpaden per faalmechanisme bij elkaar te houden. Welke faalpaden relevant zijn, hangt mede af van de keertoestand (open of gesloten) waarin het kunstwerk zich bevindt. Daarom wordt als eerste ingegaan op een beschrijving van de keertoestanden en scenario's die daarbij horen.

2.1 Keertoestanden en scenario's

Een kunstwerk in een waterkering heeft als primaire functie het laten passeren van water, mensen, goederen, materialen en voertuigen door de waterkering. Vanuit die functie staat het kunstwerk dan ook in principe soms, regelmatig of vaak geopend. Wanneer het kunstwerk zijn primaire functie niet uitoefent staat deze vaak (hoogwaterkerend) gesloten. In die situatie hoeft het kunstwerk niet meer te worden gesloten wanneer een hoogwater zich aandient. Staat het kunstwerk daarentegen voorafgaand aan een hoogwater geopend, dan kunnen bij geopend kunstwerk er (grote) gevolgen achter het kunstwerk optreden.

(Partieel) falen van de sluiting

Wanneer het kunstwerk geopend staat bij een naderend hoogwater dan moeten de keermiddelen die de hoge waterstand kunnen keren worden gesloten. Er is echter een kans dat het sluiten van de keermiddelen niet lukt. In principe spelen vier aspecten hierbij een rol: alarmering, mobilisatie, bediening en technisch falen. Alle faaloorzaken zijn onder te brengen bij een van deze vier aspecten. De kans dat het ergens fout gaat in het proces kan worden ingeschat met behulp van fouten- of gebeurtenissenbomen (al is dat laatste minder gangbaar). Wanneer de hoogwatersluiting van het kunstwerk mislukt staat het kunstwerk dus vooralsnog ongewenst open en kan water ongewenst naar binnen stromen.

Bij een kunstwerk met meerdere keermiddelen die in serie geplaatst zijn, kan het ook nog zo zijn dat het ene keermiddel wel en het andere niet gesloten kan worden.

Afhankelijk van de eigenschappen van het keermiddel en de configuratie van de constructie kan dit ertoe leiden dat het kunstwerk dan nog steeds een zeker waterkerend vermogen heeft, maar minder dan wanneer alle keermiddelen gesloten zouden zijn. Het meest voor de hand liggende voorbeeld hiervan is een schutsluis met een hoge buitendeur en een lagere binnendeur. Als de sluiting van de buitendeur mislukt, is niet direct sprake van een overstroming maar is de kans hierop wel toegenomen.

Herstel gefaalde sluiting

Wanneer de reguliere sluiting van het kunstwerk is mislukt kan nog worden getracht het kunstwerk op alternatieve wijze te sluiten. Een alternatieve sluitingswijze is bijvoorbeeld het via de schuifput dichtgooien van een leiding met behulp van klei of zandzakken. Of het plaatsen van schotbalken in een sluis. Wanneer ook de sluiting op alternatieve wijze mislukt dan stroomt buitenwater ongewenst naar binnen en wordt de achter het kunstwerk gelegen bodembescherming en/of komberging belast. Dit kan leiden tot falen van het kunstwerk.

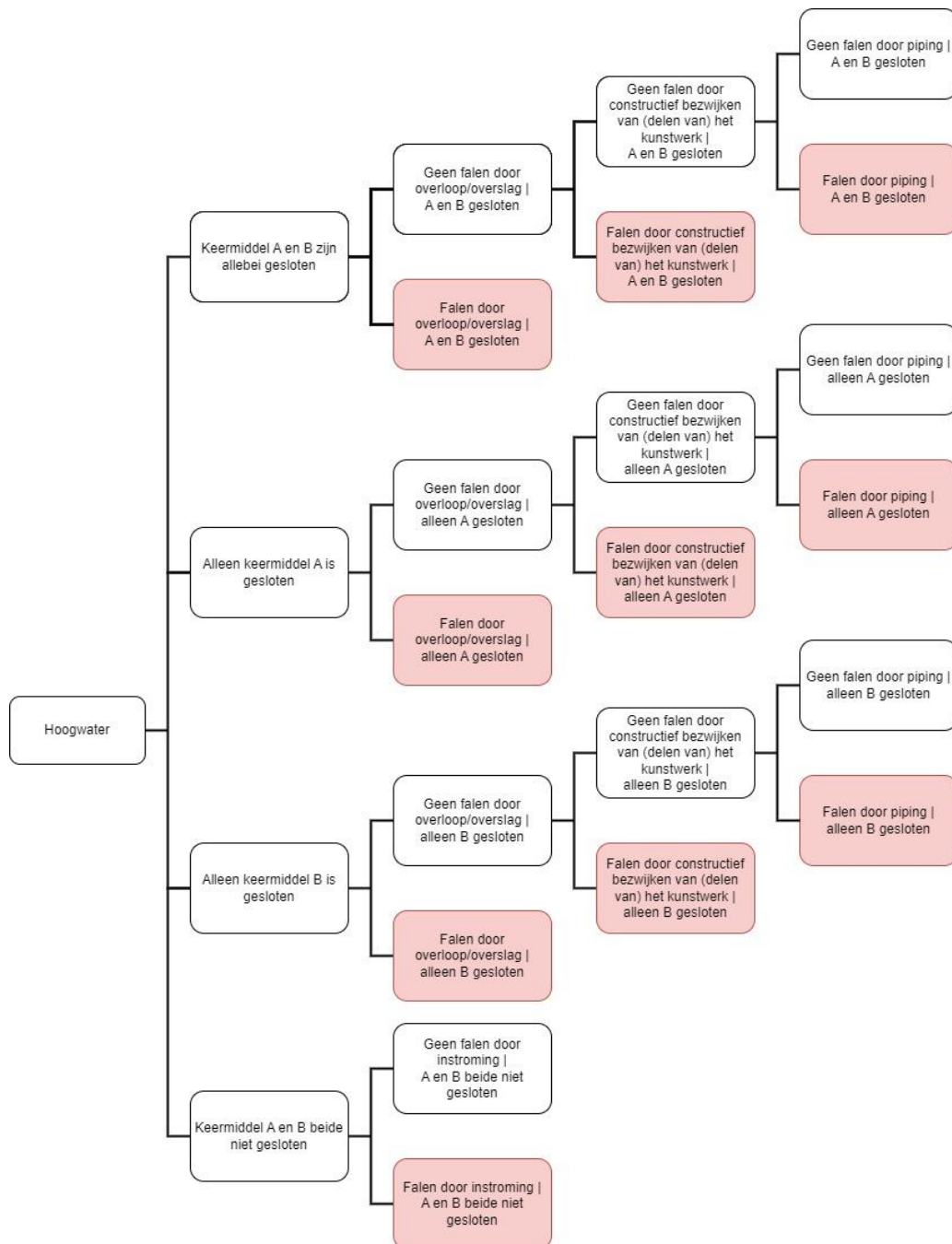
Keertoestanden

Uit bovenstaande beschrijving blijkt dat het kunstwerk zich in verschillende toestanden kan bevinden op het moment dat zich een hoogwater aandient. Stel dat een kunstwerk twee ongelijkwaardige keermiddelen A en B heeft en een alternatieve sluitingswijze niet beschikbaar is ingeval de sluiting van beide keermiddelen faalt. In dat geval zijn er vier keertoestanden mogelijk:

1. keermiddel A en B zijn beide gesloten
2. keermiddel A is gesloten en keermiddel B is niet gesloten
3. keermiddel B is gesloten en keermiddel A is niet gesloten
4. keermiddel A en B zijn beide niet gesloten

Voor alle vier de toestanden verschilt de mate van waterkerendheid. Per keertoestand moet dus worden nagelopen op welke wijze falen kan optreden en wat de relevante eigenschappen van het kunstwerk zijn die horen bij de betreffende keertoestand. Zo kan bijvoorbeeld de weerstand tegen piping anders zijn als alleen keermiddel A gesloten is dan wanneer A en B beide gesloten zijn of wanneer alleen keermiddel B gesloten is. Per keertoestand moeten dus de faalmechanismen *overslag en/of overloop, piping bij kunstwerk en sterkte en/of stabiliteit puntconstructies* worden nagelopen, behalve voor het geheel geopende kunstwerk. In dat geval is alleen falen door instroming relevant.

In Figuur 4 is het bovenstaande middels een gebeurtenissenboom gevisualiseerd. Hierin is te zien dat er verschillende faalpaden zijn die leiden tot falen van het kunstwerk. De faalpaden per faalmechanisme worden uitgewerkt in paragrafen 2.3 tot en met 2.4.



Figuur 4: Overzicht faalmechanismen per keerscenario met in rood de potentiële faalgebeurtenissen

Scenario's

De keertoestanden kunnen worden opgevat als scenario's waarvan de scenariokansen worden bepaald door de kans op niet-sluiten van de betreffende keermiddelen en de kans op falen van herstel van een gefaalde sluiting. Om te komen tot een faalkans voor het kunstwerk worden de kansen gegeven een bepaalde keertoestand vermenigvuldigd met de kans dat de betreffende keertoestand zich voordoet (kans op scenario). Omdat de scenario's elkaar uitsluiten, kunnen de berekende faalkansen per keerscenario vervolgens

gesommeerd worden tot een totale faalkans voor het kunstwerk. Dit is in lijn met de werkwijze uit de handleiding Overstromingskansanalyse [29].

2.2 Algemene opmerkingen bij fenomenologische beschrijvingen en faalpaden

2.2.1 *Fenomenologische beschrijvingen*

In de volgende paragrafen wordt een beknopte fenomenologische beschrijving gegeven van alle faalmechanismen die een rol spelen bij het falen van kunstwerken:

- falen door overslag en/of overloop
- falen door instroming als gevolg van niet sluiten van het kunstwerk
- falen door constructief bezwijken
- falen door piping

Voor een uitgebreide fenomenologische beschrijving wordt verwezen naar de technische leidraden voor de verschillende faalmechanismen ([5], [6], [7] en [8]).

2.2.2 *Faaldefinitie voor alle faalmechanismen*

Aansluitend wordt ingegaan op de faalpaden die leiden tot falen van het kunstwerk. Hierbij geldt voor alle faalmechanismen de volgende faaldefinitie:

Falen van het kunstwerk treedt op indien er, door welke oorzaak dan ook, zoveel water onder, door of over het geopende, bezweken of standzekere kunstwerk gaat dat dit leidt tot substantiële schade en/of slachtoffers (overstromingsgevolgen).

2.2.3 *Foutenbomen versus gebeurtenissenbomen*

In de navolgende paragrafen worden foutenbomen gebruikt om aan te geven hoe uit de kansen op de onderscheiden gebeurtenissen kan worden gekomen tot de kans op de ongewenste topgebeurtenis: de kans op falen van het waterkerend kunstwerk. Binnen het BOI is het gebruikelijk de relevante faalpaden die leiden tot de topgebeurtenis te onderscheiden op basis van gebeurtenissenbomen. Opgemerkt wordt dat zowel fouten- als gebeurtenissenbomen niet meer dan hulpmiddelen zijn om tot een bepaling van de kans op een overstroming te komen. Ter illustratie is in bijlage B de foutenboom voor het faalmechanisme *overslag en/of overloop* in Figuur 5 omgewerkt naar een gebeurtenissenboom en zijn de relevante faalpaden onderscheiden. Omwille van de herkenbaarheid en herleidbaarheid van de resultaten uit de eerste wettelijke beoordelingsronde LBO1 wordt in deze handleiding verder gewerkt met foutenbomen (zie Figuur 5 tot en met Figuur 6).

2.2.4 *Noodzaak voor complete faalpadanalyse*

Het zal niet altijd noodzakelijk zijn de faalkansbijdragen voor de diverse faalmechanismen met een complete faalpadanalyse inzichtelijk te maken. Zo is bij piping bij kunstwerken vaak sprake van één faalpad bestaande uit meerdere gebeurtenissen die moeten optreden om tot falen te komen. Als de faalkansbijdrage van één gebeurtenis in het faalpad al afdoende klein is, is verdere kwantificering van het faalpad niet nodig. Toelichting op de in de aanpak te maken keuzes is beschreven in het document handleiding Overstromingskansanalyse [29].

2.3 Fenomenologische beschrijving en faalpaden overslag en/of overloop kunstwerk

2.3.1 *Fenomenologische beschrijving overslag en/of overloop kunstwerk*

Falen als gevolg van overslag en/of overloop treedt op als:

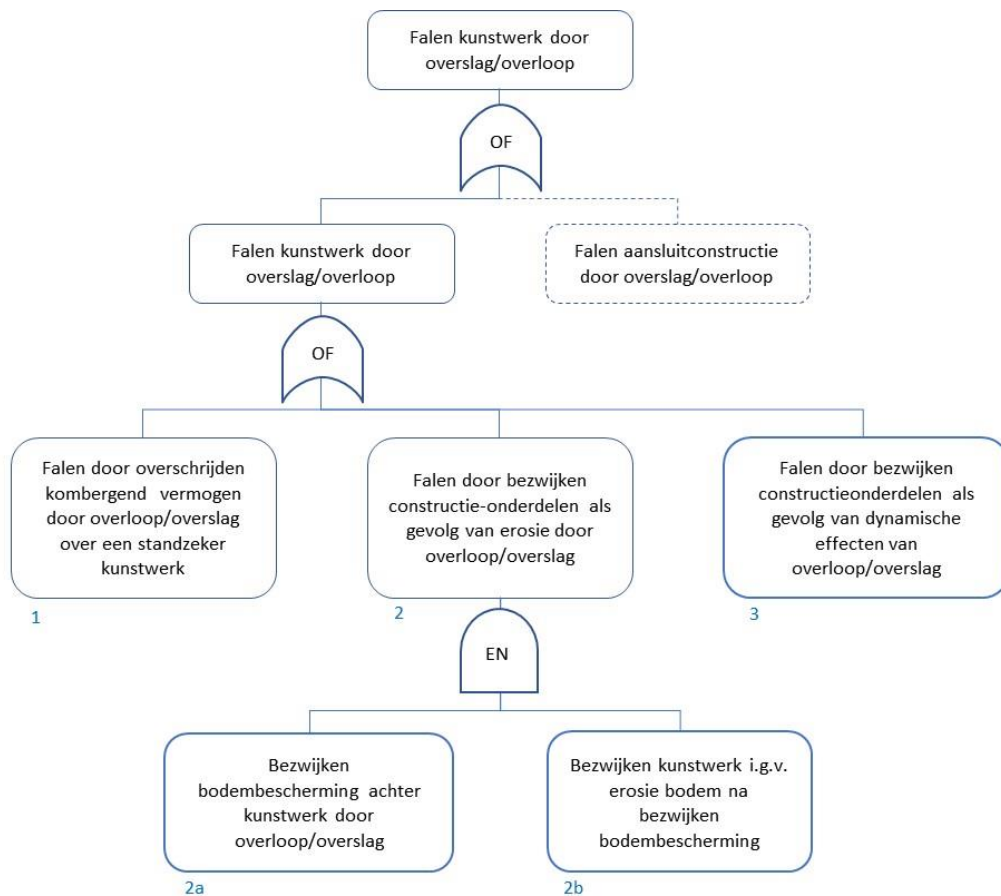
- Zich een hoogwater aandient en het kunstwerk (in ieder geval partieel) is gesloten
- EN (1) Het kunstwerk zelf intact blijft maar het instromend volume over het kunstwerk kan niet worden geborgen in het achterliggende (water)systeem zonder dat dit leidt tot substantiële schade en/of slachtoffers (overstroming).
 - OF (2) Het kunstwerk zelf bezwijkt als gevolg van bezwijken van de bodembescherming aan de binnenzijde van het kunstwerk (2a). Vervolgens ontstaan ontgrondingskuilen in de (niet meer beschermde) ondergrond, waarna de standzekerheid van het kunstwerk verloren gaat met als gevolg een (voortschrijdende) bres in de waterkering (2b). Aangenomen wordt dat deze situatie altijd leidt tot substantiële schade en/of slachtoffers (overstroming)¹.
 - OF (3) De keermiddelen bezwijken als gevolg van dynamische effecten door het overslag-/overloopdebiet. Aangenomen wordt dat deze situatie altijd leidt tot substantiële schade en/of slachtoffers (overstroming)¹.

De nummers in blauw geven de plaats van de gebeurtenis aan in de foutenboom in Figuur 5.

2.3.2 *Overzicht faalpaden en belangrijkste aspecten*

De faalpaden voor *overslag en/of overloop* bij kunstwerken zijn in onderstaande foutenboom te herkennen. In paragraaf 2.3.1 zijn de diverse stappen in deze foutenboom al kort toegelicht. Hierbij wordt opgemerkt dat het deelfaalmechanisme *falen door het bezwijken van constructieonderdelen als gevolg van dynamische effecten* expliciet in de foutenboom is opgenomen. Dit is een toevoeging ten opzichte van de foutenbomen uit het WBI2017. Met dit deelfaalmechanisme werd altijd al impliciet rekening gehouden in de beoordeling. Omwille van de transparantie is het nu expliciet in de foutenboom opgenomen.

¹ In principe kan een kunstwerk bezwijken als gevolg van het overslaande water, zonder dat dit tot overstromingsgevolgen (substantiële schade en/of slachtoffers) leidt. Dat komt dan doordat de komberging heel groot is en de bresgroei beperkt blijft. In de praktijk is het erg lastig om dit aannemelijk te maken, vandaar de aanname dat bezwijken van (delen van) het kunstwerk altijd leidt tot overschrijden van het kombergend vermogen. Indien gewenst kan dit aspect natuurlijk door de beoordelaar alsnog in de beoordeling betrokken worden.



Figuur 5: Foutenboom overslag en/of overloop kunstwerk

Opgemerkt wordt dat falen van de aansluitingsconstructie² door een tekort aan kerende hoogte niet in de modellen van dit faalmechanisme is opgenomen. Wel is hiervoor een handreiking opgesteld die gebruikt kan worden voor aansluitconstructies [1]. Daarnaast wordt in hoofdstuk 8 van de WOWK [12] aandacht besteed aan aansluitingsconstructies. In deze handleiding wordt alleen ingegaan op falen door een tekort aan kerende hoogte van het kunstwerk zelf.

2.3.3

Beknopte beschrijving deelfaalmechanismen

In de foutenboom in Figuur 5 worden de volgende deelfaalmechanismen onderscheiden:

- Bezwijken bodembescherming achter kunstwerk
- Kans bezwijken kunstwerk in geval van erosie bodem na bezwijken bodembescherming
- Falen door overschrijden bergend vermogen door overslag en/of overloop over standzeker kunstwerk³

² Binnen het BOI is een aansluitingsconstructie gedefinieerd als een constructie met als primair doel om de aansluiting tussen twee verschillende typen waterkeringen (dijk, duin, kunstwerk en hoge gronden) te kunnen realiseren.

³ In vorige versies van de schematiseringshandleidingen werd dit faalmechanisme *Overschrijden bergend vermogen* genoemd

- Falen door bezwijken constructieonderdelen als gevolg van dynamische effecten van overslag en/of overloop

Bezwijken bodembescherming achter kunstwerk

Dit deelfaalmechanisme betreft het bezwijken van de bodembescherming achter het kunstwerk als gevolg van overslag en/of overloop. Dit kan optreden door hoge stroomsnelheden boven de bodembescherming als gevolg van het overslaande of overlopende water of doordat de bodembescherming rechtstreeks door de overstortende straal wordt belast. Bij toenemende overslagdebieten neemt de stroomsnelheid boven de bodembescherming toe. Dit leidt tot bezwijken van de bodembescherming als de kritieke stroomsnelheid van de bodembescherming wordt overschreden. In de praktijk is dit veelal het begin van een geleidelijk erosieproces, waarbij steeds grotere schade aan de bodembescherming ontstaat en uiteindelijk de ondergrond onder de bodembescherming bloot komt te liggen. Hierdoor kan zodanig materiaaltransport uit de ondergrond plaatsvinden dat erosiekuilen ontstaan (zie deelfaalmechanisme *Bezwijken kunstwerk in geval van erosie bodem na bezwijken bodembescherming*).

Kans bezwijken kunstwerk in geval van erosie bodem na bezwijken bodembescherming

Dit deelfaalmechanisme betreft de kans dat het kunstwerk als geheel bezwijkt (onderuit gaat) door erosie van de onbeschermd bodem nadat bezwijken van de bodembescherming heeft plaatsgevonden. Dit leidt tot ontgrondingskuilen direct achter het kunstwerk. Deze ontgrondingskuilen worden groter en dieper naarmate de ondergrond langer belast wordt door de stroming als gevolg van het instromende debiet. Uiteindelijk kunnen deze ontgrondingskuilen dermate groot en diep worden dat een afschuiving optreedt aan de rand van deze ontgrondingskuil. Als vervolgens een instabiliteit van deze ontgrondingskuil optreedt waarvan de inscharing het kunstwerk bereikt, kan de overall-stabiliteit van het kunstwerk onvoldoende worden. Dit kan gebeuren door kantelen of afschuiven van het hele kunstwerk, of door een proces waarbij successievelijk delen van het kunstwerk constructief bezwijken met het bezwijken van het totale kunstwerk als uiteindelijke gevolg. Dit kan leiden tot een bres in de waterkering, met bresgroei tot gevolg: de waterkering faalt.

Nadat de bodembescherming is bezweken moeten er dus nog andere gebeurtenissen optreden voordat het kunstwerk als geheel bezwijkt en er een bres in de waterkering ontstaat:

- Optreden van erosie van de onbeschermd bodem als gevolg van de optredende stroomsnelheden. Dit proces leidt uiteindelijk tot het ontstaan van ontgrondingskuilen.
- Optreden van een dusdanige afschuiving aan de rand van deze ontgrondingskuilen, dat de inscharing hiervan het kunstwerk bereikt.
- Optreden van dusdanige afmetingen (diepte, breedte) van de ontgrondingen ter plaatse van het kunstwerk dat dit leidt tot instabiliteit (kantelen, verschuiven) van het kunstwerk. Dit kan optreden door het wegvallen van de passieve gronddruk aan de binnenzijde, maar ook door het uitspoelen van gronddeeltjes onder de binnenzijde van het kunstwerk. Hierdoor kunnen (delen van) het kunstwerk mogelijk steeds verder vervormen dan wel verplaatsen.
- Het totale kunstwerk bezwijkt als gevolg van kantelen en/of verschuiven van het geheel of het opeenvolgend bezwijken van onderdelen van de constructie.

Falen door overschrijden kombergend vermogen door overslag en/of overloop over standzeker kunstwerk

Bij dit deelfaalmechanisme treedt falen op bij een standzeker kunstwerk. Er is geen sprake van bezwijken van het kunstwerk, met bresgroei tot gevolg. In theorie

kunnen situaties voorkomen waarbij overslag en/of overloop over het standzekere kunstwerk gebeurtenissen in het achterland initiëren die leiden tot bezwijken van het kunstwerk. Bijvoorbeeld als de waterstand in het watersysteem zover oploopt dat een regionale kering bezwijkt en instantaan een dusdanig verval over het beschouwde kunstwerk ontstaat, dat de keermiddelen bezwijken of de waterdiepte zo klein wordt dat de kritieke stroomsnelheid voor de bodembescherming wordt overschreden. Dit zal in de praktijk echter nauwelijks voorkomen.

Falen is gedefinieerd als het instromen van dusdanig veel water in het achterliggende watersysteem of gebied dat sprake is van overstromingsgevolgen (substantiële schade en/of slachtoffers) in het achterliggende gebied. In bijlage A wordt nader ingegaan hoe aan deze faaldefinitie invulling kan worden gegeven. Voor het overschrijden van het kombergend vermogen geldt dat dit overeenkomt met falen van de waterkering en daarmee is het einde van het faalpad bereikt.

Falen door bezwijken constructieonderdelen als gevolg van dynamische effecten
Bij grote overslag- en/of overloopgebieden kunnen dynamische belastingen optreden (zoals het trillen van de deuren door bijvoorbeeld insluiting van lucht onder de overstortende straal) die kunnen leiden tot het bezwijken van constructieonderdelen (met name keermiddelen). Dit leidt tot een openstaand kunstwerk waarover instantaan een groot verval staat. Enerzijds kan de instroming die hier het gevolg van is al leiden tot overstromingsgevolgen. Anderzijds kan het leiden tot bezwijken van de bodembescherming en na het optreden van vervolgprocessen tot het bezwijken van het kunstwerk als geheel en een bres in de waterkering.

In deze handleiding wordt ervan uitgegaan dat het plotselinge grote verval nagenoeg altijd leidt tot bezwijken van de bodembescherming en/of overschrijden van het kombergend vermogen. Om die reden zijn vervolgprocessen na bezwijken van het keermiddel door dynamische effecten niet opgenomen in de foutenboom in Figuur 5. Er zijn situaties denkbaar dat dit mogelijk niet passend is; in dat geval kunnen vervolgprocessen natuurlijk expliciet beschouwd worden als het beoordelingsresultaat hier aanleiding toe geeft.

2.4 Fenomenologische beschrijving en faalpaden niet sluiten

2.4.1 Fenomenologische beschrijving niet sluiten kunstwerk

Falen van de waterkering treedt bij *niet sluiten* op als (de nummers in blauw tussen haakjes geven de plaats van de gebeurtenis aan in de foutenboom in Figuur 6):

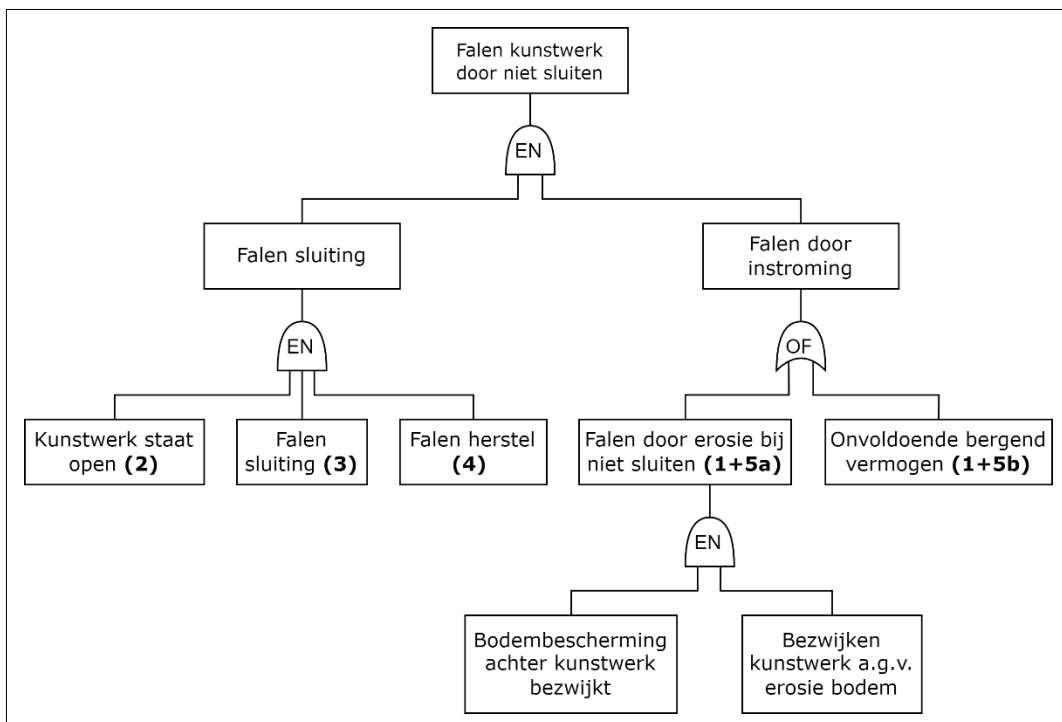
- (1) Zich een (relatief) hoogwater aandient (dusdanige waterstand dat bij niet gesloten zijn grote gevolgen optreden; dat kan ook bij 'dagelijkse' waterstanden zijn in geval van bijvoorbeeld een getijdeduiker),
- EN (2) Het kunstwerk voorafgaand aan dit hoogwater geopend staat,
- EN (3) De (reguliere) sluiting van het kunstwerk faalt, waardoor ongewenst buitenwater naar binnen kan stromen,
- EN (4) (Provisorisch) herstel van de gefaalde sluiting mislukt, waardoor buitenwater ongewenst naar binnen kan blijven stromen

- OF (5a) Het kunstwerk zelf bezwijkt als gevolg van bezwijken van de bodembescherming met substantiële schade en/of slachtoffers (overstroming) als gevolg. Hiervoor moet eerst de bodembescherming achter het kunstwerk bezwijken. Vervolgens ontstaan ontgrondingskuilen in de (niet meer beschermde) bodemondergrond, waarna de standzekerheid van het kunstwerk verloren gaat met als gevolg een (voortschrijdende) bres in de waterkering. Aangenomen wordt dat deze situatie altijd leidt tot het overschrijden van het kombergend vermogen.
- EN
- OF (5b) Het kunstwerk zelf blijft standzeker maar het instromend volume door het niet gesloten kunstwerk kan niet worden geborgen in het achterliggende (water-) systeem wat vervolgens leidt tot substantiële schade en/of slachtoffers (overstroming).

Merk op dat bovenstaande beschrijving feitelijk het falen door instroming door het volledig geopende kunstwerk beschrijft (het onderste faalpad uit Figuur 4).

2.4.2 Overzicht faalpaden en belangrijkste aspecten

De diverse faalpaden voor *niet sluiten* bij kunstwerken zijn in onderstaande foutenboom te herkennen. In paragraaf 2.4.1 zijn de diverse stappen in deze foutenboom al nader toegelicht. Opgemerkt wordt dat onderstaande foutenboom geënt is op het model dat in Riskeer aanwezig is.



Figuur 6: Foutenboom niet sluiten kunstwerk

2.4.3 *Beknopte beschrijving deelfaalmechanismen*

In de foutenboom in Figuur 6 worden de volgende deelfaalmechanismen onderscheiden:

- Kunstwerk staat open (2)
- Falen van de sluiting (3)
- Herstel gefaalde sluiting (4)
- Bezwijken bodembescherming achter kunstwerk (5a)
- Bezwijken kunstwerk als gevolg van erosie bodem (5a)
- Overschrijden bergend vermogen (5b)

Kunstwerk staat open (2), Falen van de sluiting (3) en Herstel gefaalde sluiting (4)
Hiervoor wordt verwezen naar de beschrijving in paragraaf 2.1.

Overschrijden bergend vermogen, Bezwijken bodembescherming achter kunstwerk, Bezwijken kunstwerk als gevolg van erosie bodem (5a en 5b)

Voor een beschrijving van deze deelfaalmechanismen wordt verwezen naar paragraaf 2.3.3.

2.5 **Fenomenologische beschrijving en faalpaden sterkte en/of stabiliteit puntconstructies**

2.5.1 *Fenomenologische beschrijving sterkte en/of stabiliteit puntconstructies*

Onder het faalmechanisme *sterkte en/of stabiliteit puntconstructies* vallen de deelfaalmechanismen *sterkte waterkerende constructieonderdelen (STCO)* en *stabiliteit constructie en grondlichaam (STCG)*. Aanvaringen van het geopende kunstwerk vallen onder niet sluiten.

Falen door aanvaren van het gesloten kunstwerk

In eerdere WBI-schematiseringshandleidingen van *sterkte en/of stabiliteit* werd falen door een aanvaring uitgebreid behandeld als belastingsituatie. In deze handleiding is dat niet het geval, enerzijds omdat de kans op falen door een aanvaring in de meeste gevallen zeer klein is en anderzijds omdat het bepalen van een realistische faalkans niet goed mogelijk is. Over het algemeen is er te weinig data om de belastingparameters realistisch te kunnen kwantificeren en vraagt realistisch modelleren van de sterkte (EEM berekeningen) het betrekken van specialistische kennis, wat een grote investering is en waarvan het resultaat ook nog bewerkelijk is. In de praktijk blijkt dat men hier vaak aan voorbij gaat, wat resulteert in zeer conservatieve faalkansschattingen. Het lijkt daarom verstandig om met stakeholders een kwalitatieve inschatting te maken of aanvaren een reëel risico is en vervolgens te bepalen of deze door maatregelen kan worden verkleind óf dat gekozen wordt voor een projectmatige aanpak, waarbij data wordt genereerd en sterktemodellen worden opgezet. In paragraaf 4.6.4.2 wordt hier nader op ingegaan.

Hieronder zijn de gebeurtenissen beschreven die leiden tot falen van de waterkering als gevolg van een tekort aan sterkte (STCO). Falen treedt op als:

- (1) Zich een hoogwater aandient en het kunstwerk (in ieder geval partieel) is gesloten

- EN (2) Er als gevolg hiervan dusdanig grote belastingen optreden dat de sterkte van de waterkerende constructieonderdelen niet meer toereikend is en deze bezwijken.
- EN (4) Herstel van de bezweken waterkering mislukt
- EN (5a+5b) Het kunstwerk bezwijkt als gevolg van bezwijken van de bodembescherming met substantiële schade en/of slachtoffers (overstroming) als gevolg⁴. Hiervoor moet dan eerst de bodembescherming achter het kunstwerk bezwijken.
 - (5a) Vervolgens ontstaan ontgrondingskuilen in de (niet meer beschermde) ondergrond, waarna de standzekerheid van het kunstwerk verloren gaat met als gevolg een
 - (5b) (voortschrijdende) bres in de waterkering. Aangenomen wordt dat deze situatie altijd leidt tot het overschrijden van het kombergend vermogen.
- OF (5c) Het kunstwerk zelf blijft staan maar het instromend volume door het deels gefaalde kunstwerk niet kan worden geborgen in het achterliggende (water-) systeem zonder dat dit leidt tot substantiële schade en/of slachtoffers (overstroming).

Falen van de waterkering als gevolg van een tekort aan stabiliteit (STCG) treedt op als:

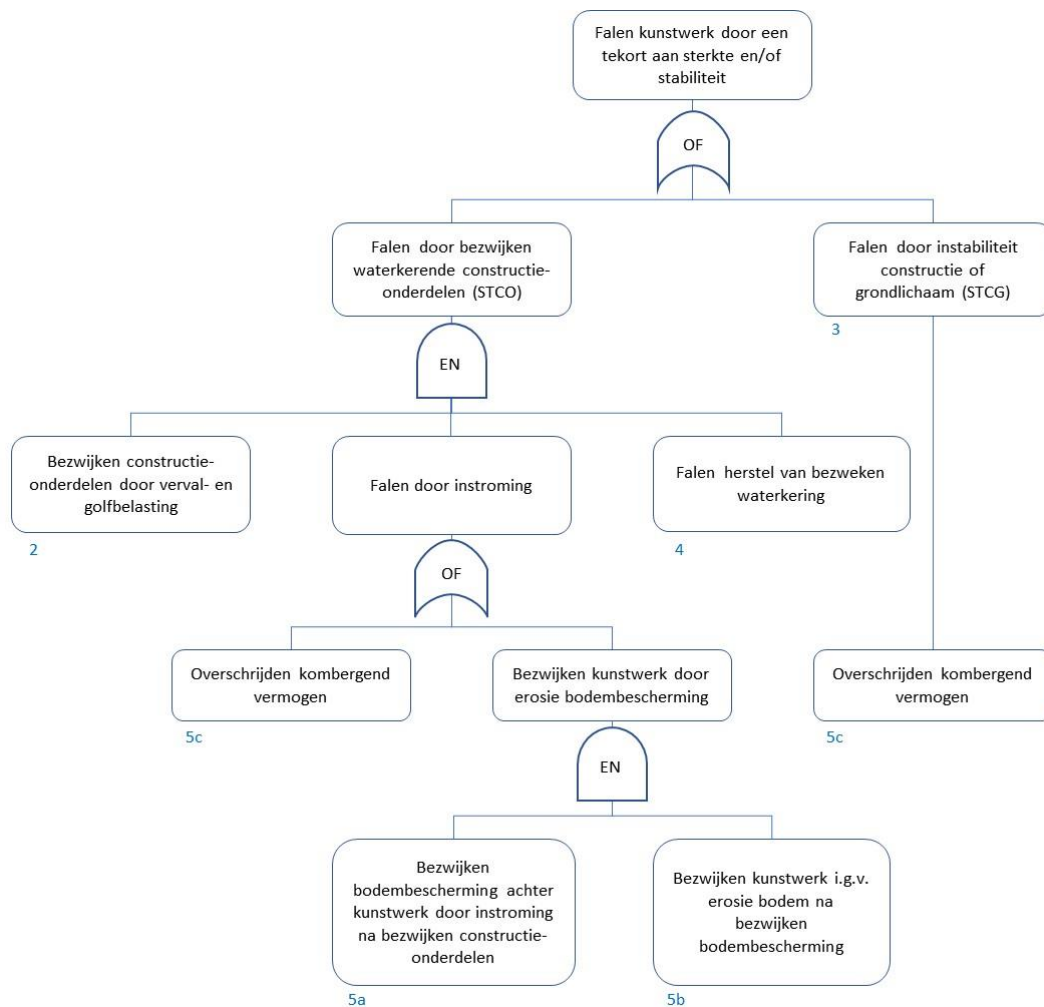
- (1) Zich een hoogwater aandient en het kunstwerk (in ieder geval partieel) is gesloten
- EN (3) Er als gevolg hiervan dusdanige belastingen op het kunstwerk en het aansluitende grondlichaam optreden dat instabiliteit in de vorm van verticaal of horizontaal verplaatsen dan wel kantelen optreedt. De instabiliteit leidt tot bezwijken van grote delen van de constructie en verlies van standzekerheid.
- EN (5c) Het instromend volume door het bezweken kunstwerk en/of de omringende grondconstructie niet kan worden geborgen in het achterliggende (water-) systeem zonder dat dit leidt tot substantiële schade en/of slachtoffers (overstroming).

De nummers in blauw geven de plaats van de gebeurtenis aan in de foutenboom in Figuur 7.

2.5.2 *Overzicht faalpaden en belangrijkste aspecten*

De faalpaden voor *sterkte en/of stabiliteit puntconstructies* zijn in navolgende foutenboom te herkennen. In paragraaf 2.5.1 zijn de diverse stappen in deze foutenboom al kort toegelicht.

⁴ In praktische zin kan het zijn dat een kunstwerk bezwijkt als gevolg van het instromende water, zonder dat dit tot grote gevolgen (schade en/of slachtoffers) leidt. Dat komt dan doordat de komberging heel groot is en de bresgroei beperkt blijft. Vanuit de primaire functie van het kunstwerk zal een dergelijke benadering bij het ontwerp echter niet gewenst zijn. In geval van een beoordeling vanuit waterveiligheid kan het wel worden gebruikt om aan te tonen dat wordt voldaan aan de eisen.



Figuur 7: Foutenboom sterkte en/of stabiliteit puntconstructies

2.5.3

Beknopte beschrijving deelfaalmechanismen

In de foutenboom in Figuur 7 worden de volgende deelfaalmechanismen onderscheiden:

- Bezwijken constructie door verval- en golfbelasting (2)
- Stabiliteit constructie en grondlichaam (STCG) (3)
- Falen herstel van bezwaken waterkering (4)
- Bezwijken bodembescherming achter kunstwerk (5a)
- Bezwijken kunstwerk als gevolg van erosie bodem (5b)
- Overschrijden bergend vermogen (5c)

Bezwijken constructie door verval- en golfbelasting (2)

Onderdelen of elementen van een kunstwerk kunnen falen als gevolg van waterdruk door verval en golven welke het betreffende onderdeel of element belasten. Grotere vervallen treden op wanneer een hoogwater zich voordoet. Daarmee is dit falen dan ook direct aan een hoogwater gekoppeld. Bij een toename van het verval zullen de spanningen in het onderdeel of het element eerst toenemen totdat de maximaal toelaatbare spanning ergens wordt overschreden en bezwijken optreedt. Als gevolg van het bezwijken van het element of onderdeel ontstaat uiteindelijk een opening in

de waterkering, waardoor ongecontroleerd water naar binnen kan stromen. Afhankelijk van de kenmerken van deze opening (afmetingen, locatie et cetera) en het aanwezige verval kan de opening wellicht nog worden gedicht. Indien dat niet mogelijk is kan vervolgens het kunstwerk verder bezwijken (bijvoorbeeld bezwijken bodembescherming en instabiel worden kunstwerk) dan wel kan het beschikbare kombergend vermogen worden overschreden. Dit leidt dan uiteindelijk tot falen van de waterkering.

Stabiliteit constructie en grondlichaam (STCG) (3)

Falen treedt hierbij op wanneer het kunstwerk en het grondlichaam ter plaatse van het kunstwerk niet meer in staat zijn om bij stijgende buitenwaterstand de vervalbelasting en golfbelasting te keren zonder dat dit tot substantiële vervormingen leidt. Als gevolg van deze vervormingen gaat het waterkerende vermogen van het kunstwerk verloren, bezwijkt het kunstwerk, ontstaat een bres en kan bresgroei optreden. In principe is dan sprake van een oncontroleerbare situatie en zal het instromende debiet leiden tot overschrijding van het kombergend vermogen. Theoretisch kan het zo zijn dat zelfs nadat het kunstwerk is bezweken en er een bres is ontstaan, het instromende water nog goed geborgen kan worden in het achterliggende gebied (kombergend vermogen) zonder dat dit tot grote gevolgen leidt. De kans hierop zal in de praktijk echter vrijwel altijd zeer beperkt zijn.

Falen herstel van bezweken waterkering (4)

In sommige gevallen is het mogelijk de waterkering te herstellen nadat de keermiddelen zijn bezweken. Met name bij kunstwerken met een kleine doorstroomopening zijn er herstelmogelijkheden. Hierbij valt te denken aan het afsluiten van een kokerconstructie met big bags. Voor kunstwerken met grote afmetingen is dit veel minder realistisch.

Bezwijken bodembescherming achter kunstwerk (5a)

Voor een beschrijving wordt verwezen naar paragraaf 2.3.3. Specifiek voor het faalmechanisme *sterkte en/of stabiliteit puntconstructies* gelden de volgende aandachtspunten:

- In het geval van falen als gevolg van een tekort aan sterkte waterkerende constructieonderdelen is sprake van een groot verval bij bezwijken. Daardoor zullen de optredende stroomsnelheden bij instroming hoog zijn en zal de bodembescherming in veel gevallen ook bezwijken.
- Bij falen door een tekort aan *stabiliteit van constructie en grondlichaam* is het kunstwerk reeds bezweken en doet het er niet meer toe of de bodembescherming is bezweken of niet.

Bezwijken kunstwerk als gevolg van erosie bodem (5b)

Zie paragraaf 2.3.3.

Overschrijden bergend vermogen (5c)

Het overschrijden van het kombergend vermogen bestaat uit het instromen van dusdanig veel water in het achterliggende watersysteem of gebied dat sprake is van substantiële schade en/of slachtoffers in het achterliggende gebied. In geval van *sterkte en/of stabiliteit puntconstructies* wordt er meestal vanuit gegaan dat het kombergend vermogen na bezwijken niet toereikend is, omdat bij bezwijken in veel gevallen sprake is van een substantiële opening in de waterkering in combinatie met een substantieel verval. Daar waar dit een conservatief uitgangspunt is, kan uiteraard kombergend vermogen wel verder worden beschouwd.

2.6 Fenomenologische beschrijving en faalpaden piping bij kunstwerk

2.6.1 Fenomenologische beschrijving piping bij kunstwerk

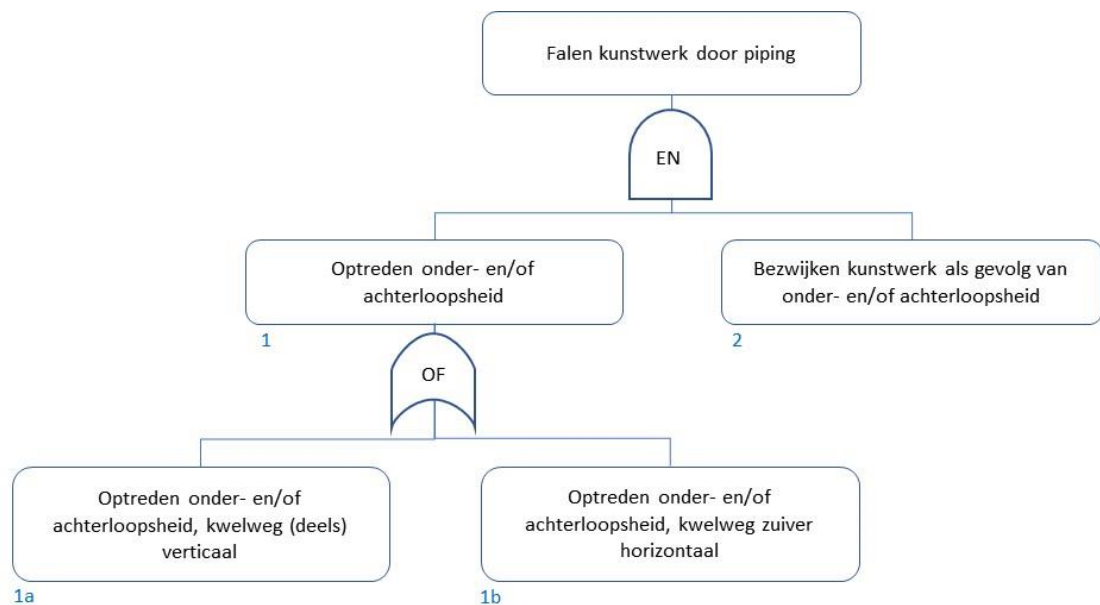
Falen als gevolg van piping bij kunstwerken treedt op als:

- Zich een hoogwater aandient en het kunstwerk (in ieder geval partieel) is gesloten
- EN (1) Er door een geconcentreerde kwelstroming als gevolg van een verval over het kunstwerk een zodanige uitspoeling van grondeeltjes
 - (1a) onder het kunstwerk ontstaat (onderloopsheid)
 - OF (1b) rondom het kunstwerk ontstaat (achterloopsheid) dat een doorgaand erosiekanaal (pipe) ontstaat.
 - EN (2) Het kunstwerk bezwijkt door deze pipevorming waardoor een bres in de waterkering ontstaat met substantiële schade en/of slachtoffers (overstroming) als gevolg.

De nummers in blauw geven de plaats van de gebeurtenis aan in de foutenboom in Figuur 8.

2.6.2 Overzicht faalpaden en belangrijkste aspecten

De faalpaden voor *piping* bij kunstwerken zijn in onderstaande foutenboom te herkennen. In paragraaf 2.6.1 zijn de diverse stappen in deze foutenboom al kort toegelicht.



Figuur 8: Foutenboom piping kunstwerk

2.6.3 *Beknopte beschrijving deelfaalmechanismen*

In de foutenboom in Figuur 8 worden de volgende deelfaalmechanismen onderscheiden:

- Optreden onder- en/of achterloopsheid (1)
- Bezwijken kunstwerk als gevolg van onder- en/of achterloopsheid (2)

Optreden onder- en/of achterloopsheid

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

Het verval over het kunstwerk waarbij in een stationaire situatie het pipingproces niet meer stopt, wordt het kritieke verval genoemd. Overschrijding van het kritieke verval wordt in de modellen doorgaans als faaldefinitie voor het optreden van onder- en/of achterloopsheid gehanteerd.

Bezwijken kunstwerk als gevolg van onder- en/of achterloopsheid

Uiteindelijk kan de erosie onder en naast het kunstwerk zodanig groot worden dat het kunstwerk als geheel instabiel wordt en bezwijkt, met als gevolg een bres in de waterkering. Voordat het kunstwerk als geheel bezwijkt na het overschrijden van het kritieke verval moet een aantal vervolprocessen zijn beslag krijgen. Allereerst moet een doorgaande pipe worden gevormd onder of naast het kunstwerk. Zodra het kanaaltje dat vanaf de benedenstroomse zijde stroomopwaarts is gegroeid en contact maakt met het water aan de bovenstroomse zijde van de dijk treedt het ruimproces op. Zodra het ruimproces de benedenstroomse zijde heeft bereikt, resulteert dit in een forse toename van zandtransport en debiet. Hierdoor zal als gevolg van erosie van grond onder en langs het kunstwerk de algehele stabiliteit van het kunstwerk onvoldoende worden, waarna het kunstwerk of een deel daarvan kantelt of afschuift. Ook kan het bij kwelwegen naast het kunstwerk zo zijn dat het kunstwerk wel blijft staan, maar de aansluitende dijk inzakt als gevolg van het erosieproces en uiteindelijk bezwijkt.

3 Bepalen relevantie met beslisregels

Middels generieke beslisregels kan op voorhand bekeken worden of een faalmechanisme relevant (substantieel bijdragend aan de overstromingskans) is of niet. In deze paragraaf worden voor alle faalmechanismen die bij de beoordeling van kunstwerken relevant zijn enkele beslisregels gegeven.

3.1 Beslisregels faalmechanisme overslag en/of overloop

Het faalmechanisme *overslag en/of overloop* is alleen relevant als de kerende hoogte wordt verzorgd door het kunstwerk zelf. Voorbeelden van kunstwerken die de kerende hoogte verzorgen zijn schutsluizen, keersluizen en coupures. Er zijn in dat geval geen beslisregels op basis waarvan de faalkans op voorhand als verwaarloosbaar klein kan worden aangemerkt.

Indien de kerende hoogte wordt verzorgd door een dijklichaam dan is het faalmechanisme *overslag en/of overloop* niet relevant bij de beoordeling van het kunstwerk. In dat geval wordt de beoordeling van de hoogte van het dijklichaam uitgevoerd binnen het dijkenpoor (faalmechanisme *grasbekleding erosie kruin en binnentalud* (GEKB)). De beoordeling van het faalmechanisme overslag en/of overloop bij het betreffende kunstwerk is dan niet van toepassing. Bij leidingen en duikers die door een dijklichaam heen voeren, wordt de kerende hoogte bepaald door het dijklichaam ter plaatse van het kunstwerk.

3.2 Beslisregels faalmechanisme niet sluiten

De beslisregels voor het faalmechanisme *niet sluiten* hebben betrekking op diverse knopen in het faalpad. Enerzijds zijn er regels die ingaan op de kans dat een kunstwerk ongewenst open staat en anderzijds zijn er regels die ingaan op de beperkte gevolgen bij ongewenst open staan. De regels zijn daarbij gekoppeld aan de diverse typen kunstwerken. Hieronder zijn de beslisregels gegeven inclusief de onderbouwing en een voorbeeld.

Indien voldaan wordt aan een van deze beslisregels dan hoeft het scenario dat het kunstwerk geheel open staat niet beschouwd te worden.

De onderstaande regels zijn alleen toepasbaar wanneer voldaan wordt aan de volgende voorwaarden:

- Beheer en onderhoud van de kunstwerken is dusdanig geregeld dat de conditie van de keermiddelen en hun bewegingswerken goed is en dat er (nagenoeg) geen storingen van betekenis optreden (een storing die in een paar minuten is verholpen (bv resetten systeem) wordt niet gezien als een storing van betekenis, maar bijvoorbeeld de aanwezigheid van slib waardoor keermiddelen niet gesloten kunnen worden is dit wel).
- De werking van de keermiddelen wordt regelmatig gecontroleerd (bijvoorbeeld door een veldbezoek)
- Sluitingsprocedures zijn op orde en worden ook periodiek getest en geoefend (minimaal één keer per jaar).

- 1 Beslisregel De binnen onderkant bodem van de doorstroomopening(en) van een kunstwerk ligt op het hoogste punt gelijk of hoger dan de buitenwaterstand met een overschrijdingsfrequentie die getalsmatig gelijk is aan de norm (ondergrens) en daarnaast is/zijn er nog één of meer keermiddelen aanwezig die automatisch sluiten op het moment dat het kunstwerk zijn functie niet vervult.
- Onderbouwing Als het product van de kans op een waterstand boven de drempel en de kans op niet-sluiten kleiner is dan $1/1000 \cdot \text{norm}$, dan is de bijdrage verwaarloosbaar. De faalkans van de in het primaire proces opgenomen keermiddelen is over het algemeen kleiner dan $1/1.000$ per vraag. Op basis van bovenstaande wordt dan geconcludeerd dat het scenario 'kunstwerk staat geheel open' voor het betreffende kunstwerk dan niet substantieel zal bijdragen aan de trajectkans.
- Voorbeeld Hevelling voorzien van terugslagklep aan buitenzijde.
- 2 Beslisregel De binnen onderkant bodem van de doorstroomopening(en) van een kunstwerk ligt op het hoogste punt gelijk of hoger dan de buitenwaterstand met een overschrijdingsfrequentie die getalsmatig gelijk is aan de signaleringswaarde van de norm en daarnaast is/zijn er nog één of meer keermiddelen aanwezig welke alleen bij hoogwater worden gesloten. Het/de keermiddel(en) dienen onder hogere waterstanden bereikbaar te zijn.
- Onderbouwing De overschrijdingskans van een buitenwaterstand bij de norm conform de signaleringswaarde is meestal kleiner dan de norm. De aanwezigheid van een of meerdere keermiddelen die alleen bij hoogwater worden gesloten, die in goede conditie verkeren en waarvan de sluiting jaarlijks wordt beproefd, leidt ertoe dat de kans dat het kunstwerk niet gesloten kan worden $1/100$ per vraag of kleiner is. Daarmee wordt de kans op het scenario 'kunstwerk staat geheel open' meer dan een factor 100 kleiner dan de norm van het dijktraject. Op basis van bovenstaande wordt geconcludeerd dat dit niet substantieel zal bijdragen aan de trajectkans.
- Voorbeeld Hevelling voorzien van handbediende afsluiter in de kruin van de kering.
- 3 Beslisregel Het kunstwerk beschikt over één watervoerend element (bv leiding) door de waterkering, waarvan het doorstroomoppervlak kleiner of gelijk is aan $0,20 \text{ m}^2$ (bijvoorbeeld een leiding met een diameter van $0,5 \text{ m}$) en is voorzien van minimaal één keermiddel. Het/de keermiddel(en) dienen onder hogere waterstanden bereikbaar te zijn. Indien de keermiddelen automatisch gesloten zijn op het moment dat het kunstwerk zijn primaire functie niet vervult, zijn de eisen ten aanzien van alarmering, mobilisatie en bediening en het bereikbaar zijn bij hogere waterstanden niet aan de orde.
- Onderbouwing Bij kleine afmetingen van een leiding zijn de gevolgen van niet sluiten zeer beperkt. Zelfs wanneer het achterliggend komberegend vermogen klein is, zullen bij een bres in de achterliggende keringen nog steeds geen grote hoeveelheden water naar het achterland stromen (klein komberegend vermogen en dus beperkte hoeveelheid water in die kom). De kans op grote schade en slachtoffers is dan ook verwaarloosbaar klein. Doordat er minimaal één keermiddel in de leiding aanwezig moet zijn, is de kans in ieder geval al kleiner dan of gelijk aan $1/100$ per vraag dat de achterliggende kombereging wordt aangesproken. Daarnaast is het gelet op de kleine afmetingen in veel

		gevallen ook mogelijk om instroming door de leiding te voorkomen door bijvoorbeeld klei, bigbags of zandzakken aan te brengen. De eis met betrekking tot de aanwezigheid van minimaal één keermiddel is ook ingegeven om te voorkomen dat dit soort kunstwerken bij een ontwerp zonder keermiddel worden uitgerust, terwijl dat vanuit het oogpunt van bijvoorbeeld mogelijke wateroverlast ongewenst is.
	Voorbeeld	Uitwateringsduiker
4	Beslisregel	Gemaal waarvan de persleidingen voorzien zijn van twee of meer onafhankelijk werkende keermiddelen (aansturing, aandrijving, energievoorziening) die met het pompbedrijf zijn geschakeld (bij uitmalen automatisch open en bij stoppen uitmalen automatisch sluiten). Een van de keermiddelen dient onafhankelijk van externe energievoorziening te sluiten (bijvoorbeeld terugslagklep). De werking van de keermiddelen dient gemonitord te kunnen worden middels bijvoorbeeld een storingsprogramma dat automatisch een storing meldt wanneer een keermiddel niet sluit.
	Onderbouwing	De kans dat een dergelijk kunstwerk niet gesloten staat bij een naderend hoogwater is behoorlijk klein (ordegrootte 10^{-6} – 10^{-7} per vraag). Daarnaast is er in het watervoerende element ook nog een pomp aanwezig, die een eventueel ongewenste instroming behoorlijk reduceert. Op basis hiervan zal de betrouwbaarheid sluiting van een dergelijk kunstwerk geen substantiële bijdrage hebben aan de overstromingskans van het dijktraject.
	Voorbeeld	Gemaal met een persleiding voorzien van een terugslagklep en een met het pompbedrijf geschakelde schuifafsluiter.
5	Beslisregel	Gemaal met persleidingen met een doorstroomoppervlak van maximaal 0,80 m ² (bv ronde leiding met diameter van 1 m) en waarvan elke persleiding is voorzien van minimaal één keermiddel dat met het pompbedrijf is geschakeld (bij uitmalen automatisch open en bij stoppen uitmalen automatisch sluiten). Daarnaast dient er een reële mogelijkheid te zijn om bij niet gesloten zijn van een persleiding door falende keermiddel(en) de leidingen eenvoudig en snel provisorisch te sluiten (bijvoorbeeld het aan brengen van klei/zandzakken of bigbags in een eventueel aanwezig schuivenhuis in de kruin van de dijk). Deze mogelijkheid dient ook in de protocollen te zijn vastgelegd en het eventueel benodigde materiaal en materieel dient ook goed voorhanden te zijn.
	Onderbouwing	In dit geval is de kans dat het kunstwerk niet gesloten staat bij een naderend hoogwater ordegrootte 10^{-4} per vraag. Daarnaast heeft de doorstroomopening bij niet gesloten zijn beperkte afmetingen en is er door de aanwezigheid van de pomp in het watervoerend element een reductie van het eventueel instromende debiet. Ten slotte is er een reële kans dat een alternatieve sluiting van de niet gesloten persleiding succesvol is, waardoor de kans dat het kunstwerk gedurende langere tijd ongewenst openstaat verder wordt gereduceerd. Dit alles leidt ertoe dat de kans voor betrouwbaarheid sluiting niet substantieel zal bijdragen aan de overstromingskans van het dijktraject.
	Voorbeeld	Gemaal voorzien van een automatische spindelschuif in een schuifput in de kruin van de kering.

3.3 Beslisregels faalmechanisme sterkte en/of stabiliteit puntconstructies

Voor het faalmechanisme *sterkte en/of stabiliteit puntconstructies* wordt in deze handreiking slechts een beslisregel gegeven (inclusief onderbouwing) waarmee aangetoond kan worden dat voor een specifiek kunstwerk de bijdrage aan de overstromingskans als gevolg van constructief bezwijken of instabiel worden van het kunstwerk niet substantieel is. Opgemerkt wordt dat er meer eenvoudige beslisregels te bedenken zijn, maar dat hieraan dusdanig veel voorwaarden moeten worden gekoppeld dat dit (nagenoeg) geen winst in inspanning oplevert ten opzichte van een normale analyse.

1	Beslisregel	Het bezwijken van een constructief element leidt niet tot een overstroming met substantiële schade en/of slachtoffers vanwege de afmetingen van de doorstroomopening die dan ontstaat in relatie tot het beschikbare kombergend vermogen.
	Onderbouwing	De onderbouwing van bovenstaande beslisregel is gebaseerd op de beperkte gevolgen die optreden bij bezwijken van de maatgevende onderdelen van de constructie. Doordat deze gevolgen beperkt blijven is er geen sprake van een overstroming.
	Voorbeeld	Bezwijken keermiddel in een kleine uitwateringsduiker

3.4 Beslisregels faalmechanisme piping bij kunstwerk

3.4.1 *Beslisregels waarmee het hele faalmechanisme als niet relevant kan worden aangemerkt*

Als aan één van de volgende beslisregels wordt voldaan dan kan op voorhand worden aangegeven dat de kans van optreden van het faalmechanisme *piping bij kunstwerk* verwaarloosbaar klein is.

1	Beslisregel	Aan de uittredezijde van het kunstwerk is een filter aanwezig waarin uitstroming plaatsvindt. Indien dit filter voldoet aan de filterregels en de conditie is goed, dan is de veiligheid met betrekking tot piping gewaarborgd.
	Onderbouwing	Een goed functionerend filter zorgt ervoor dat het water uittreedt in het filter en dat hierbij geen zanddeeltjes worden meegevoerd. Voor een overzicht van de 'filterregels' waaraan moet worden voldaan wordt verwezen naar paragraaf 5.4.3 en paragraaf 8.6 van het Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen [23]. Het filter moet op zowel de locaties met betrekking tot onderloopsheid als tot achterloopsheid zijn aangebracht.
2	Beslisregel	De kruising met de waterkering bestaat uit een leiding waarvan de leidingdiameter kleiner is dan 0,50 m.
	Onderbouwing	Bij kleine leidingen is het 'afdak' boven de pipe niet groot genoeg om een doorgaande pipe van substantiële afmetingen te laten ontstaan, omdat de pipe vanaf de zijkanten en bovenkant weer wordt dichtgedrukt. De maat van 0,50 meter is een arbitrair gekozen maat op basis van een inschatting door deskundigen op dit vakgebied.

- | | | |
|---|--------------|---|
| 3 | Beslisregel | Er is sprake van een gemaal of hevelleiding waarvan de onderzijde van de leiding op het niveau van de waterstand met een overschrijdingskans die getalsmatig gelijk is aan de ondergrens van de norm of hoger door de dijk gaat en de kwelweg de leiding volgt. |
| | Onderbouwing | In dit geval is op het hoogste punt van de leiding geen grondwaterstroming meer aanwezig omdat de aandrijvende kracht ontbreekt. Wel moet praktisch zeker zijn dat de kwelweg tussen in- en uittredepunt onder de leiding langs loopt en niet via een samenspel tussen leiding en cohesieve grondlagen een andere kwelweg mogelijk is. Dit is het geval als de onderzijde van de leiding op het niveau ligt van de waterstand met een overschrijdingskans die getalsmatig gelijk is aan de ondergrens van de norm. Als gevolg van intrede- en stromingsweerstand is er namelijk altijd een bepaald verval nodig over de leiding om tot piping te leiden en dit vergt bij een dergelijke hoogteligging van de leiding een zeer extreme buitenwaterstand. |

3.4.2 *Beslisregels voor de afzonderlijke deelfaalmechanismen onderloopsheid en achterloopsheid*

Daarnaast zijn er drie beslisregels waarmee de kans op *onderloopsheid* of *achterloopsheid* als verwaarloosbaar klein kan worden aangemerkt. Let op: bij gebruik van een van deze beslisregels moet dus altijd worden geverifieerd of de bijdrage van het andere deelfaalmechanisme mogelijk wel relevant is. Als de kans op zowel *onderloopsheid* als *achterloopsheid* op basis van onderstaande beslisregels als verwaarloosbaar klein kan worden aangemerkt, dan is de kans van optreden van *piping* verwaarloosbaar klein. Anders kan op grond van deze generieke beslisregels geen oordeel worden geveld en moet het faalmechanisme piping toch beschouwd worden in de analyse van relevante faalpaden (zie hoofdstuk 4).

- | | | |
|---|--------------|--|
| 4 | Beslisregel | De faalkans door onderloopsheid is verwaarloosbaar klein als de constructie is voorzien van kwelschermen die tot in een ondoorlatende laag reiken. Opdrijven of opbarsten van deze laag kan worden uitgesloten door het eigen gewicht en het gewicht van de bovenliggende grond. |
| | Onderbouwing | In dit geval worden kwelwegen door het watervoerende pakket afgesloten en kan een doorgaande kwelweg onder het kwelscherm door niet optreden. |
| 5 | Beslisregel | De faalkans door onderloopsheid is verwaarloosbaar klein als één van de kwelschermen een lengte heeft die groter is dan twee keer het verval over het kunstwerk bij de waterstand met een overschrijdingskans die getalsmatig gelijk is aan de overstromingskansnorm (ondergrens). |
| | Onderbouwing | Als één van de kwelschermen een lengte heeft die groter is dan twee keer het verval over het kunstwerk bij deze waterstand, dan is het kritieke verhang over het benedenstroomse kwelscherm altijd kleiner dan 0,5. Hiermee wordt voldaan aan het heave-criterium uit het Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen [23]. |
| 6 | Beslisregel | De faalkans door achterloopsheid is verwaarloosbaar klein als het kunstwerk is opgenomen in een dijklichaam met een zandkern; in deze situatie dient microstabiliteit van het aansluitende grondlichaam geverifieerd te worden. Tevens dienen de achterloopsheidschermen |

een bepaalde minimummaat buiten het kunstwerk te zijn doorgezet; aanbevolen wordt hier als praktische maat de lengte van het kwelscherm onder de constructie voor te hanteren.

Onderbouwing Als sprake is van een dijk met een zandkern, dan ontbreekt een scheidende laag waaronder zich langs het kunstwerk een pipe kan vormen. Wel moet naast het kunstwerk een kwelscherm aanwezig zijn om de grondwaterstroming ook door het dijklichaam te dwingen. De praktische maat van de lengte van het kwelscherm onder de constructie kan bij diepe kwelwanden mogelijk onnodig groot worden; een lengte van enkele meters lijkt afdoende om ervoor te zorgen dat de kwelweg echt door het dijklichaam loopt.

Daarnaast geldt natuurlijk dat de afzonderlijke deelfaalmechanismen *onderloopsheid* en *achterloopsheid* kunnen worden uitgesloten als uitstroming van de bijbehorende kwelwegen plaatsvindt in een filter .

4 Eerste inschatting overstromingskans

Dit hoofdstuk beschrijft de analyse van een kunstwerk waarvan op voorhand niet kan worden gesteld dat het geen substantiële bijdrage heeft aan de overstromingskans van het dijktraject waarin het gelegen is (voldoet niet aan de generieke beslisregels uit hoofdstuk 3). Ten grondslag aan deze analyse liggen de diverse rekenmodellen waarmee de diverse knopen van het faalpad (foutenbomen, zie paragraaf 2.3 tot en met 2.4) kunnen worden uitgewerkt. Voor de modellen zelf wordt verwezen naar de diverse technische leidraden per faalmechanisme ([5]-[8]).

Het resultaat van de eerste analyse is een overstromings- of faalkans per kunstwerk. De analyses hiervan worden gefaciliteerd in Riskeer. Deze kunnen ook op alternatieve wijze bepaald worden, bijvoorbeeld met een spreadsheet. De data, de schematisatie, het model en de benodigde informatie (doel/beslissing) hangen nauw met elkaar samen. In dit hoofdstuk zijn op een wat hoger abstractieniveau handvatten en kaders gegeven voor deze analyse. Vanuit praktisch oogpunt zijn vervolgens in de gebruikershandleiding Riskeer – Faalmechanismen kunstwerken [31] handvatten voor de concrete parameterbepaling verder uitgewerkt op basis van de modellen die in Riskeer zijn geïmplementeerd.

Begonnen wordt met een overzicht van de belangrijkste tools en hulpmiddelen die in de beoordeling gebruikt kunnen worden (paragraaf 4.1). Vervolgens wordt een overzicht gegeven van de verschillende activiteiten bij de analyse van de relevante faalmechanismen in een stappenschema (paragraaf 4.2). De stappen uit dit stappenschema worden aansluitend nader uitgewerkt (paragrafen 4.3 - 4.8).

4.1 Overzicht beschikbare instrumenten

4.1.1 Algemeen

Hieronder volgt een korte introductie van enkele hulpmiddelen bij de beoordeling, te weten de programma's Hydra-NL, Waterstandsverloop, Riskeer en HB Havens en de *Werkwijzer Ontwerpen Waterkerende Kunstwerken* [12]. Voor gedetailleerde informatie wordt verwezen naar de respectievelijke gebruikershandleidingen van Hydra-NL [15], Waterstandsverloop [14], Riskeer [16] en HB Havens [17].

4.1.2 Introductie Riskeer

Riskeer is een softwareapplicatie die de beoordeling ondersteunt. Met Riskeer kunnen hydraulische belastingen worden bepaald en voor de faalmechanismen *overslag en/of overloop, niet sluiten en sterkte en/of stabiliteit* kan een faalkans worden berekend⁵. Hierbij voert de gebruiker in Riskeer een schematisering van de sterkte van (onderdelen van) het kunstwerk in, waarna met het faalmechanisme-model in Riskeer de kans kan worden bepaald dat de sterkte kleiner is dan de belastingen voor het betreffende faalmechanisme.

Met Riskeer is het alleen mogelijk om voor een gegeven constructie een faalkans te bepalen. Het is niet mogelijk om een doelfaalkans op te geven en hiermee de benodigde waarde van een van de invoerparameters (bijvoorbeeld de kritieke stroomsnelheid van de bodembescherming of de benodigde sterkte van een constructieonderdeel) vast te stellen.

⁵ Voor piping is geen probabilistisch model aanwezig in Riskeer

In Riskeer kunnen ook de beoordelingsresultaten van alle faalmechanismen worden geadmistreerd en geassembleerd tot een oordeel op dijktrajectniveau. Riskeer is dan ook het 'standaard' beoordelingsinstrument. Daarom is hier een aparte handleiding voor opgesteld, de gebruikershandleiding Riskeer – Faalmechanismen kunstwerken [31]. In deze handleiding wordt daarom uitgebreid ingegaan op de concrete parameterbepaling voor de modellen die in Riskeer zijn geïmplementeerd. Tevens vormen de modellen in Riskeer het vertrekpunt bij de bespreking van schematiseringskeuzes in paragraaf 4.5.

4.1.3 *Introductie Hydra-NL*

Hydra-NL is een probabilistisch model, waarbij de onzekere parameters (zeewaterstanden, windsnelheid, meerpeilen, afvoer, enz.) die bepalend zijn voor de hydraulische belasting op waterkeringen (waterstand en golven) stochastische variabelen zijn. Voor ieder belastingsysteem⁶ zijn databases fysica en statistiek beschikbaar. De databases fysica geven het verband tussen de lokale waterstand en de basisstochasten (bijvoorbeeld zeewaterstand, afvoer, windsnelheid). De statistiekbestanden beschrijven de marginale statistiek⁷ van de basisstochasten. Hydra-NL brengt deze marginale statistieken samen tot de belastingstatistiek ter plaatse van de uitvoerlocaties, ofwel de gecombineerde statistiek van waterstand en golven. Daarbij wordt rekening gehouden met de correlaties tussen variabelen en de correlaties in de tijd. Voor een berekening ter plaatste van een kunstwerk moet een oeverlocatie worden gekozen in Hydra-NL, waarna het model de gecombineerde belastingstatistiek voor het kunstwerk genereert.

Hydra-NL kent drie modi, waarvan voor beoordelen uiteraard alleen de beoordelingsmodus relevant is:

- Beoordelingsmodus, waarbij met de databases fysica (dit zijn de hydraulische randvoorwaarden databases) uit het BOI wordt gerekend.
- Ontwerpmodus, waarbij voor zichtjaren 2050 en 2100 met aangepaste statistiekbestanden en soms ook aangepaste databases fysica wordt gerekend.
- Testmodus, waarbinnen met eigen klimaatscenario's (door de gebruiker te verwerken in aangepaste statistiekbestanden) kan worden gewerkt.

De belangrijkste functionaliteit van Hydra-NL verschilt per faalmechanisme:

- Ten behoeve van het faalmechanisme *overslag en/of overloop* bepaalt het programma het Hydraulisch Belasting Niveau (HBN), oftewel de hoogte van een dijklichaam of kunstwerk die hoort bij een opgegeven overslag-/overloopdebiet en bijbehorende overschrijdingskans. De sterkteparameter (het kritiek overslag- of overloopdebiet) wordt in het model als deterministische variabele behandeld. Andersom kan het programma ook de faalkans berekenen als de kruinhoogte en overslag-/overloopdebiet worden opgegeven. Dit is bruikbaar voor de beoordeling.
- Ten behoeve van het faalmechanisme *sterkte en/of stabiliteit puntconstructies* kan met Hydra-NL de overschrijdingskanslijn van buitenwaterstanden en golven worden bepaald. In combinatie met de binnenwaterstand is het dan mogelijk om een verval te bepalen. Ook gecombineerde statistiek van waterstand en golven kan middels een omweg worden bepaald. Vervolgens kan met behulp van de beschikbare kennis omtrent de sterkte van het kunstwerk en de WOWK de faalkans van het kunstwerk met betrekking tot *sterkte en/of stabiliteit puntconstructies* worden bepaald.
- Ten behoeve van het faalmechanisme *piping bij kunstwerk* kan met Hydra-NL de overschrijdingskanslijn van de buitenwaterstand worden bepaald. In

⁶ Kust, merengebied, bovenrivierengebied, enz.

⁷ Dit is de statistiek van de afzonderlijke stochastische variabelen

combinatie met de binnenwaterstand is het dan mogelijk om het verval waarop moet worden beoordeeld te bepalen.

- Ten behoeve van het faalmechanisme *niet sluiten* kan met Hydra-NL de overschrijdingskans van buitenwaterstanden worden bepaald. Wanneer de buitenwaterstand bekend is, die bij een ongewenst niet gesloten kunstwerk leidt tot overstromingsgevolgen binnendijs, kan de overschrijdingskans van deze buitenwaterstand worden afgeleid met Hydra-NL. Hiermee kan in combinatie met de faalkans van de sluiting van het kunstwerk de faalkans voor het faalmechanisme *niet sluiten* worden bepaald.

4.1.4 *Introductie Waterstandsverloop*

De tool Waterstandsverloop genereert voor zes watersystemen⁸ per uitvoerlocatie één verloop van de buitenwaterstand bij een opgegeven piekbuitenwaterstand. In werkelijkheid kennen rivieren vele mogelijke vormen van de afvoergolf, afhankelijk van invloeden zoals mate van smeltwater en hoeveelheid, periode en locatie(s) van de neerslag. Aan de kust is de variatie van het hoogwaterstandsverloop kleiner vanwege het astronomisch getij, maar kan het hoogwaterstandsverloop variëren tussen een of meerdere getijden door variatie in stormduur en windrichting. Om te komen tot één waterstandsverloop wordt in de tool Waterstandsverloop gebruik gemaakt van een combinatie van trage (afvoer) en snelle (windsnelheid) stochasten. Omdat de tool Waterstandsverloop bedoeld is voor geotechnische faalmechanismen ligt de nadruk op de trage stochasten. Hierbij wordt bij het bepalen van het waterstandsverloop een combinatie van trage en snelle stochasten gekozen die niet het meest waarschijnlijk is, maar wat aan de extreme kant gericht op langdurige belasting van de waterkering.

De Waterstandsverlooptool is bruikbaar voor het bepalen van het instromend volume over het gesloten kunstwerk (faalmechanisme *overslag en/of overloop*) of door het ongewenst niet gesloten kunstwerk (faalmechanisme *niet sluiten*) of bezweken kunstwerk (faalmechanisme *sterkte en/of stabiliteit puntconstructies*) ten behoeve van bepalen van de kans op overschrijden van het maximaal kombergend vermogen. Omdat de tool de nadruk legt op de trage stochasten, leidt gebruik ervan tot een voorzichtige inschatting van het instromend volume. De tool kan ook gebruikt worden om het niet-stationaire karakter van het hoogwater in rekening te brengen bij het faalmechanisme *piping bij kunstwerk*.

4.1.5 *HB Havens*

Het komt vaak voor dat kunstwerken gelegen zijn achter havendammen die de golven op het buitenwater reduceren. De uitvoerpunten van de hydraulische belastingdatabases liggen echter doorgaans buiten deze havendammen. In eerste instantie kan ervoor gekozen worden te beoordelen met de belastingcombinaties buiten de haven. Er wordt dan geen rekening gehouden met fysische processen zoals golftransmissie, reflectie, refractie, diffractie en lokale golfgroei die de golfcondities in de haven kunnen beïnvloeden. Overigens kunnen de golfcondities voor een locatie ín de haven ook ongunstiger zijn dan de golfcondities op de locatie vóór de haveningang (door specifieke eigenschappen van een haven in combinatie met genoemde fysische processen). Als een beoordeling met golfbelastingen buiten de haven een onrealistisch grote (of in bijzondere gevallen: onrealistisch kleine) faalkans oplevert kan in meer detail naar de hydraulische belastingen in de haven worden gekeken. Enig gevoel hiervoor kan worden verkregen door de oriëntatie van het kunstwerk te variëren.

⁸ Kust (inclusief Waddenzee en Westerschelde, maar niet de Oosterschelde), Meren (IJssel- en Markermeer), Vecht- en IJsseldelta, Benedenrivieren, Bovenrivieren Maas (ook aangeduid als Bovenmaas) en Bovenrivieren Rijn (ook aangeduid als Bovenrijn).

In dat geval moeten de hydraulische randvoorwaarden ter plaatse van de uitvoerlocatie vertaald worden naar randvoorwaarden ter plaatse van het kunstwerk. Hiervoor is de tool Hydraulische belastingen Havens (HB Havens) beschikbaar. Met behulp van deze tool kan een eenvoudige en een geavanceerde analyse gemaakt worden van de hydraulische belastingen in het havenbekken. Met name de geavanceerde analyse vergt een uitgebreide en multidisciplinaire aanpak. Aanbevolen wordt hiervoor specialistische hulp in te schakelen.

Opgemerkt wordt dat als de havendammen in de beoordeling betrokken worden, de standzekerheid ervan onder extreme condities ook in de beoordeling betrokken moet worden.

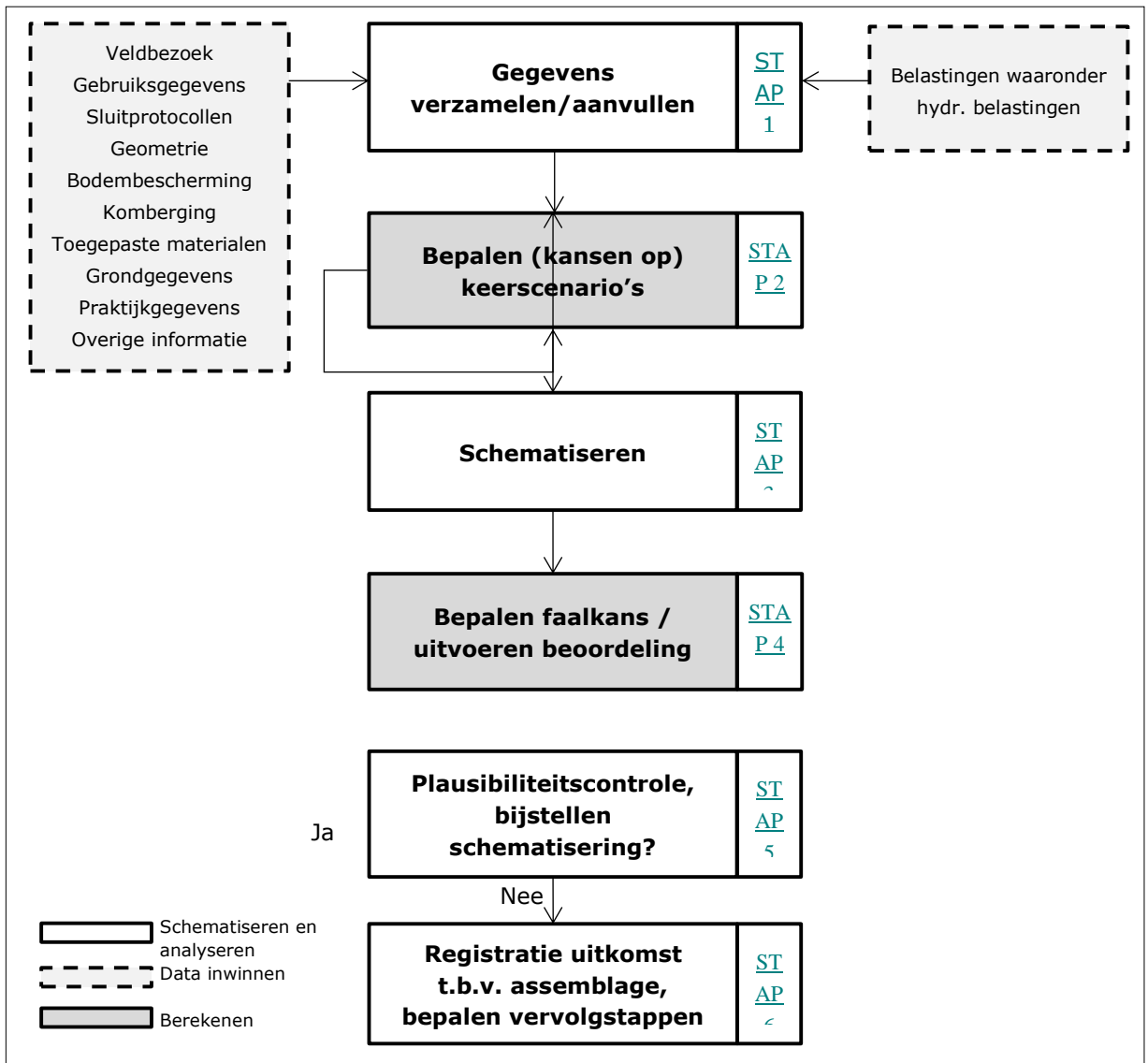
4.1.6 *Introductie WOWK*

De Werkwijzer Ontwerpen Waterkerende Kunstwerken (WOWK, [12]) is de opvolger van de Leidraad Kunstwerken 2003 [9]. De WOWK is in eerste instantie gericht op het ontwerp van waterkerende kunstwerken, waarbij de verschillende faalmechanismen allemaal worden behandeld. Ook *sterkte en/of stabiliteit puntconstructies* komt daarin terug. Er is voor dit faalmechanisme een semi-probabilistisch format in het document opgenomen, waarmee ten aanzien van waterveiligheid een ontwerp kan worden gemaakt op basis van een doelfaalkans. Deze werkwijze is vergelijkbaar met die voor andere belastingsituaties in de Eurocodes. Dit format kan ook gebruikt worden om een bestaande constructie mee te beoordelen. Dit is in bijlage E nader uitgewerkt.

4.2 **Stappenschema voor analyse relevante faalmechanismen**

Voor de analyse van de relevante faalmechanismen kan als hulpmiddel gebruik worden gemaakt van het generieke stappenschema in Figuur 9. Onder de figuur zijn de diverse stappen kort beschreven. Het stappenschema is geënt op de faalpaden zoals in Figuur 5 tot en met Figuur 6 en paragrafen 2.3 tot en met 2.4 is weergegeven. Per aspect is een verwijzing opgenomen naar het hoofdstuk in deze handleiding waar verdere informatie over dit aspect te vinden is.

De invulling van de stappen uit het generieke stappenschema verschilt per faalmechanisme. Soms is er ook voor een specifiek faalmechanisme nog een extra stap toegevoegd aan het stappenschema. Op basis van het generieke stappenschema in Figuur 9 is daarom voor de eerste twee stappen een overzicht gemaakt van de relevante aspecten.



Figuur 9: Stappenschema beoordeling kunstwerk

In het schema van Figuur 9 is weergegeven met welke stappen er gekomen kan worden van data naar beoordelingsresultaat. De diverse onderdelen van dit schema worden in komende paragrafen behandeld. Onderstaand zijn de verschillende stappen kort beschreven.

Stap 1. Gegevens verzamelen (paragraaf 4.4).

Om tot een goede schematisering voor alle faalmechanismen te komen, moet een veelheid aan gegevens van het kunstwerk worden verzameld. Dit betreft zowel gegevens aangaande de sterkte van het kunstwerk als gegevens betreffende de belastingen op het kunstwerk. Het verschilt per faalmechanisme welke gegevens precies benodigd zijn, hier wordt in paragraaf 4.4 nader op ingegaan. Middels een veldbezoek/inspectie wordt een beeld gekregen van de daadwerkelijke situatie. Het kan dan gaan om zaken als aanwezigheid voorland, exacte locatie van de keermiddelen en de bereikbaarheid onder hoogwateromstandigheden, conditie van

keermiddelen en andere constructieonderdelen en een beeld bij het achterland.

Van groot belang zijn ook de gegevens over het dagelijks functioneren van het kunstwerk vanuit zijn primaire functie, niet zijnde waterkeren⁹. Samen met de protocollen voor sluiting in hoogwatersituaties dient dit altijd bekend te zijn omdat dit van grote invloed is voor de kans op overstroming door niet sluiten. Indien deze gegevens niet voorhanden zijn, kan doorgaans geen goede beoordeling worden uitgevoerd. Een beschrijving van het dagelijks gebruik moet dan ook altijd in de rapportage worden opgenomen.

Daarnaast kan het voor meerdere faalmechanismen nodig zijn om hydraulische belastingen te bepalen. Denk aan de vervalbelasting bij piping, de combinatie van verval- en golfbelasting bij een semi-probabilistische beoordeling van sterkte en stabiliteit of de statistiek van frequent voorkomende waterstanden bij niet sluiten. Bij het faalmechanisme sterkte en/of stabiliteit puntconstructies spelen ook andere belastingen een rol bij de beoordeling. In paragraaf 4.3 wordt daarom nader ingegaan op de hydraulische en overige belastingen.

Stap 2. Bepalen keerscenario's (paragraaf 4.5)

Nadat de gegevensverzameling heeft plaatsgevonden vindt een beschouwing plaats in welke keertoestanden het kunstwerk zich kan bevinden, wat de bijbehorende kansen op de verschillende keerscenario's zijn en welke consequenties dit heeft voor de uit te voeren analyses. Omdat de kans op een keerscenario invloed kan hebben op de wijze (diepgang) van sommige analyses is het aan te bevelen dit vroeg in het proces te doen (bijvoorbeeld bij een scenario met een hele kleine kans en op voorhand beperkte gevolgen voor de overige faalmechanismen kan mogelijk met een hele grove schematisering volstaan worden).

Stap 3. Schematiseren (paragraaf 4.5)

Onder schematiseren wordt verstaan het proces van het versimpelen van de (complexe) werkelijkheid naar een vereenvoudigde weergave en vervolgens tot specifieke modelinvoer. In dit proces is het belangrijk om onzekerheden expliciet mee te nemen en hier bewust mee om te gaan. In de analyse wordt dit onder andere gedaan door het gebruik van scenario's (bijvoorbeeld voor ondergrond). Dit beperkt de stapeling van maatgevende combinaties van uitgangspunten, wat voor een overschatting van de faalkans kan zorgen.

Bij het schematiseren wordt doorgaans van grof naar fijn gewerkt. Na de analyse van de resultaten kan blijken dat het zinvol is om aanvullend onderzoek te doen om aanvullende gegevens te verzamelen. Afhankelijk van de uitkomsten worden uitgangspunten aangescherpt en kunnen de daaropvolgende stappen opnieuw worden doorlopen.

Het schematiseren betreft een veelheid van aspecten, die per faalmechanisme verschillend zijn. Daarom wordt in paragraaf 4.5 per

⁹ Kunstwerken in waterkeringen zijn bijna altijd aangelegd om een andere functie dan waterkeren te faciliteren. Daarnaast dient ook de functie waterkeren vervuld te worden.

faalmechanisme aangegeven welke aspecten geschematiseerd moeten worden en welke aandachtspunten daarbij van toepassing zijn.

- Stap 4. Bepalen faalkans / uitvoeren beoordeling (paragraaf 4.7)
 Voor de berekening die nodig is voor de analyse van de relevante faalpaden zijn meerdere hulpmiddelen beschikbaar (zie paragraaf 4.1). Hierbij worden de diverse parameters ingevoerd, waarna een faalkans wordt berekend. Op de wijze van bepaling van deze parameters wordt in de gebruikershandleiding Riskeer – Faalmechanismen kunstwerken [31] nader ingegaan aan de hand van de modellen die in Riskeer zijn geïmplementeerd.

Voor het faalmechanisme *piping bij kunstwerk* wordt geen faalkans bepaald. Voor dit faalmechanisme wordt een kritiek verval berekend en vervolgens vergeleken met het optredende verval bij normomstandigheden. Ook voor dit faalmechanisme worden in de gebruikershandleiding Riskeer – Faalmechanismen kunstwerken [31] handvatten gegeven voor de wijze van bepaling van de parameters voor de modellen die voor de beoordeling beschikbaar zijn.

- Stap 5. Plausibiliteitscontrole (paragraaf 4.8)
 In deze stap worden de berekeningsresultaten geanalyseerd. Indien de uitkomst ertoe leidt dat het faalmechanisme mogelijk een substantiële bijdrage heeft aan de faalkans op trajectniveau dan moet worden nagegaan of het inwinnen van meer gegevens en het aanscherpen van de schematisering mogelijk tot een scherpere bepaling van de faalkans leidt.

Als aanvullende gegevens met een aangescherpte schematisering mogelijk tot een scherpere faalkans leiden, dienen deze aanvullende gegevens te worden ingewonnen, waarna een nieuwe cyclus van schematiseren, berekenen en analyseren kan worden doorlopen.

- Stap 6. Registratie beoordelingsresultaat
 Het uiteindelijke berekeningsresultaat wordt vastgelegd ten behoeve van de assemblage op dijktrajectniveau. Dit kan in Riskeer gebeuren, maar ook in de Assemblagetool of met Hydra-Ring.

4.3 Belastinggevallen en hydraulische belasting

In deze paragraaf wordt ingegaan op de hydraulische belastingen en de overige belastinggevallen die bij de relevante faalmechanismen van belang kunnen zijn. Dit laatste geldt met name voor het faalmechanisme *sterkte en/of stabiliteit puntconstructies*. Ook de dominante hydraulische belastingen verschillen per faalmechanisme. Daarom wordt hierop per faalmechanisme apart ingegaan. Begonnen wordt met een korte algemene introductie van de hydraulische belastingen in het instrumentarium.

4.3.1 Hydraulische belastingen in het instrumentarium

In de Wet is de veiligheidsnorm voor primaire waterkeringen per dijktraject vastgelegd als een maximaal toelaatbare overstromingskans per jaar. Voor het berekenen van de overstromingskansen van dijktrajecten en als onderdeel daarvan

de faalkansen per faalmechanisme voor de kunstwerken, zijn gegevens nodig omtrent de duur en hoogte van buitenwaterstanden en de hoogte en richting van golven onder diverse omstandigheden. Deze gegevens staan bekend als de Hydraulische belastingen (HB)¹⁰. In het instrumentarium van het BOI zijn de hydraulische belastingen opgenomen, zodat met behulp van dit instrumentarium overstromingskansen kunnen worden bepaald.

De hydraulische belastingen kunnen voor een groot aantal uitvoerlocaties worden bepaald met Hydra-Ring (toegankelijk via Riskeer) en Hydra-NL. Daarbij kan het nog nodig zijn om 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.

Voor de faalmechanismen *overslag en/of overloop, niet sluiten* en *sterkte en/of stabiliteit puntconstructies* kan een volledig probabilistische berekening (zowel de belasting- als sterkteparameters zijn stochastische variabelen) worden gemaakt in Riskeer of een vereenvoudigde berekening (enkel de belastingparameters zijn stochastische variabelen) met behulp van Hydra-NL. Hierdoor is het niet nodig om rekenwaarden van de hydraulische belastingen te bepalen gerelateerd aan de wettelijke veiligheidsnorm uit de Omgevingswet, waarmee vervolgens de beoordeling op semi-probabilistische wijze wordt uitgevoerd. Aangezien de hydraulische belastingen reeds in Riskeer/Hydra-NL zijn opgenomen, is een uitgebreide schematisering van de belastingen niet aan de orde.

Voor het faalmechanisme *piping bij kunstwerk* kan met het BOI-instrumentarium geen probabilistische berekening worden gemaakt en dus ook geen faalkans worden bepaald. Voor dit faalmechanisme wordt een kritiek verval berekend en vervolgens vergeleken met het optredende verval bij normomstandigheden. Hiervoor is het wel nodig de hydraulische belastingen te relateren aan de wettelijke veiligheidsnorm met betrekking tot overstroming, zoals die is vastgelegd in de Omgevingswet.

Duur en tijdsverloop van waterstand en golfbelasting

Ook de duur en het tijdsverloop van de golfbelasting en de buitenwaterstand is bij alle faalmechanismen van belang. Voor de faalmechanismen *overslag en/of overloop, niet sluiten* en *sterkte en/of stabiliteit puntconstructies* bepaalt de tijdsduur van de belasting mede hoeveel water er gedurende een periode van hoogwater over het gesloten kunstwerk (*overslag en/of overloop*) of door het onterecht open staande (*niet sluiten*) of bezweken kunstwerk (*sterkte en/of stabiliteit puntconstructies*) naar binnen stroomt. Dit volume van instromend water is van belang om te kunnen beoordelen of het kombergend vermogen wordt overschreden. Daarnaast bepaalt het verloop samen met het verloop van de binnenwaterstand het verval dat optreedt over het kunstwerk en daarmee de kans dat de stroomsnelheden dusdanig hoog zijn dat de bodembescherming bezwijkt. Bij *piping bij kunstwerk* is de duur van de belasting van invloed op de ontwikkeling van de waterspanningen in de watervoerende en pipinggevoelige lagen onder en achter het kunstwerk.

4.3.2 *Belastinggevallen en hydraulische belastingen overslag en/of overloop*

4.3.2.1 Dominante hydraulische belastingen

De dominante hydraulische belasting voor *overslag en/of overloop* is de meest waarschijnlijke combinatie van buitenwaterstand en golven waarbij er dusdanig veel

¹⁰ Het gaat hierbij om de waterstanden op het buitenwater, dus aan de buitenzijde van de primaire waterkering.

water over de keermiddelen en/of de constructie van het hoogwaterkerend gesloten kunstwerk stroomt dat:

- óf het kombergend vermogen wordt overschreden
- óf de bodembescherming bezwijkt met als gevolg instabiliteit van het kunstwerk
- óf het keermiddel bezwijkt als gevolg van dynamische effecten van het overstortende water.

Het gaat hierbij altijd om een combinatie van waterstand en golven. Zo kan een hoge waterstand met kleine golven een veel kleiner overslag-/overloopdebiet geven dan een lagere waterstand met hoge golven.

4.3.2.2 Belastinggevallen

Het overslag-/overloopdebiet leidt tot een belasting op de achterliggende bodembescherming, het aanwezige kombergend vermogen en een dynamische belasting op de keermiddelen. Indien het faalcriterium dat hoort bij één van deze deelfaalmechanismen wordt overschreden, is sprake van falen van het kunstwerk.

De geometrie van het kunstwerk speelt een rol bij de belasting op de bodembescherming, de komberging en de keermiddelen. Zo leidt een groot overslag-/overloopdebiet bij een smal kunstwerk tot een beperkt instroomvolume en hiermee beperkte belasting van de komberging. Daarentegen kan een relatief klein overslag-/overloopdebiet toch tot bezwijken van de bodembescherming leiden als het natte oppervlak ter plaatse van de bodembescherming klein is. Hierin speelt de binnenwaterstand ook een rol (voor aanwijzingen omtrent de bepaling hiervan wordt verwezen naar paragraaf 2.2 van de gebruikershandleiding Riskeer – Faalmechanismen kunstwerken [31]).

4.3.3 *Belastinggevallen en hydraulische belasting niet sluiten*

In deze paragraaf wordt ingegaan op de hydraulische belastingen en de belastinggevallen die voor het faalmechanisme *niet sluiten* van belang kunnen zijn.

4.3.3.1 Dominante hydraulische belasting

De dominante hydraulische belasting is het verval over het kunstwerk 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. Dit verval bestaat uit het verschil tussen de (meestal verhoogde) buitenwaterstand en binnenwaterstand. De term 'hoogwater' is in het geval van niet sluiten een verwarrend 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 drempel van een hooggelegen coupure. Eventuele instroming van water bij het niet gesloten zijn van het hoogwaterkerend keermiddel kan dan plaatsvinden middels golfoverslag over deze drempel. Opgemerkt wordt dat er op een hooggelegen voorland reductie van de golfhoogte kan optreden, waardoor de golven die de drempel bereiken aanzienlijk lager kunnen zijn. In de modellen van het instrumentarium (Hydra-Ring, Hydra-NL) wordt hier geen standaard geen

rekening mee gehouden. Als eerste grove benadering kan hiermee worden volstaan als desondanks een voldoende kleine faalkans wordt gevonden. Indien nodig kan in een nadere analyse de golfreductie op het voorland in rekening worden gebracht door het toevoegen van een voorlandmodule.

Hydraulische belastingen kunnen ook een rol spelen in het sluitproces. Bijvoorbeeld wanneer het sluiten plaatsvindt op het moment dat er water (met grote snelheid) door het kunstwerk stroomt. In de meeste gevallen zal een kunstwerk echter ontworpen zijn op het sluiten bij instroming dan wel doet een dergelijke situatie zich hooguit voor wanneer het normale sluitproces gefaald is. In het laatste geval dient dan bij een eventuele noodsluiting gekeken te worden of deze ook daadwerkelijk in stromend water kan worden uitgevoerd.

4.3.3.2 Belastinggevallen

Bij het ongewenst open staan van een kunstwerk is het optredende instromende debiet nagenoeg altijd alleen afhankelijk van de buitenwaterstand. Dit instromende debiet leidt tot een belasting op de achterliggende bodembescherming en legt beslag op het aanwezige kombergende vermogen. Indien na het falen van de sluiting het faalcriterium van één of beide deelfaalmechanismen optreedt, is sprake van falen van het kunstwerk. Alleen in uitzonderingssituaties spelen golven ook een rol (bijvoorbeeld bij een hooggelegen drempel van een coupure).

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 kan leiden tot een hele kleine kans van het optreden van één van de genoemde deelfaalmechanismen. Daarentegen kan een klein verval in combinatie met een grote doorstroomopening leiden tot een grote kans op substantiële gevolgen doordat bijvoorbeeld de komberging niet toereikend is.

4.3.4 *Belastinggevallen en hydraulische belastingen sterkte en/of stabiliteit puntconstructies*

In deze paragraaf wordt ingegaan op de belastingen die een rol kunnen spelen bij het toetspoot *sterkte en/of stabiliteit puntconstructies*. Ofwel: alle belastingen die kunnen bijdragen aan een overstroming bij *Falen door bezwijken waterkerende constructieonderdelen (STCO)* of bij *Falen door instabiliteit van constructie en grondlichaam (STCG)*. Het definiëren van algemeen toepasbare belastinggevallen (gelijk voor elke constructie) is niet mogelijk, als gevolg van de unieke situatie per object. Wel kan worden aangegeven welke soorten belastingen altijd meegenomen moeten worden in de beoordeling en welke afwegingen een rol spelen bij het schematiseren van deze belastingen. Voor zover relevant worden hier in hoofdstuk 4 van de gebruikershandleiding Riskeer – Faalmechanismen kunstwerken [31] bij de beschrijving van de parameters van Riskeer meer handvatten voor gegeven. Voor een uitgebreidere beschouwing wanneer welke belastingen beschouwd dienen te worden wordt verwezen naar hoofdstuk 7 van de Werkwijzer Ontwerpen Waterkerende Kunstwerken (WOWK) [12].

Een belangrijk uitgangspunt dat wordt gehanteerd binnen het BOI is dat onderhoudssituaties bij kunstwerken niet beoordeeld hoeven te worden. Dit is gestoeld op het feit dat in geval van onderhoudssituaties altijd apart bekeken wordt in hoeverre de waterkerende functie gewaarborgd is tijdens dit onderhoud. Dit is

dus een ontwerppunt van de onderhoudssituatie, welke moet worden beoordeeld op het moment dat onderhoud uitgevoerd gaat worden¹¹.

Het tweede belangrijke uitgangspunt is dat bezwijken van onderdelen van de constructie als gevolg van vallend water na een hoogwater alleen wordt meegenomen in de beoordeling als wordt ingeschat dat bezwijken van dit element kan leiden tot falen van het kunstwerk als geheel en als er kort daarna een volgend hoogwater optreedt. Bij bijvoorbeeld vleugelwanden kan het zijn dat door vallend water de naar buiten gerichte belasting tijdelijk dusdanig hoog is dat dit element sterk vervormt of bezwijkt. Het is echter onwaarschijnlijk dat het bezwijken van een vleugelwand direct tot een dusdanige reductie van de sterkte zal leiden, dat bij een volgend hoogwater bresvorming optreedt. Daarnaast geldt dat er tussen opeenvolgende hoogwaters meestal dusdanig veel tijd zit dat herstel van de vervormde vleugelwand al gerealiseerd dan wel provisorisch aangepakt is.

4.3.4.1 Dominante hydraulische belastingen

Bij *sterkte en/of stabiliteit puntconstructies* is met name het verval over het kunstwerk in combinatie met de golfbelasting dominant met betrekking tot de functie waterkeren. Naast de buitenwaterstand speelt dus ook de binnenwaterstand een rol.

Voor faalkansberekeningen voor *sterkte en/of stabiliteit puntconstructies* dienen deze verval- en golfbelasting te worden vertaald naar een belastingeffect, namelijk de waterdruk op de constructie. Riskeer gebruikt de gecorreleerde statistiek van waterstand en golven bij het bepalen van dit belastingeffect in de faalkansberekening. De dominante hydraulische belasting is dus de meest waarschijnlijke combinatie van buitenwaterstand, binnenwaterstand en golven die leidt tot het grootste belastingeffect op de waterkerende constructieonderdelen. Zo kan een hoge buitenwaterstand met kleine golven in combinatie met een 'normale' binnenwaterstand een kleiner belastingeffect geven dan een lagere buitenwaterstand met hoge golven en een relatief lage binnenwaterstand.

4.3.4.2 Binnenwaterstanden

Bij *sterkte en/of stabiliteit puntconstructies* is met name het verval over het kunstwerk dominant met betrekking tot de functie waterkeren. Naast de buitenwaterstand speelt dus ook de binnenwaterstand een rol. De binnenwaterstand kan worden beïnvloed door het gehanteerde peilbeheer (streefpeilen), maar ook door op- of afwaaien gedurende een hoogwater. Daarnaast speelt uiteraard neerslag en eventuele aanvoer vanuit het achterland een rol.

4.3.4.3 Eigengewichtsbelasting

Het eigen gewicht van een constructie, inclusief eventueel aanwezige installaties et cetera, behoren tot de categorie van permanente belastingen. Deze permanente belastingen spelen met name een rol bij faalpaden ten aanzien van verticale stabiliteit. Bij hoogwaterkerende elementen zoals keermiddelen heeft eigengewicht nagenoeg altijd een verwaarloosbare bijdrage aan de faalkans.

4.3.4.4 Windbelastingen

Door wind kunnen aanvullende belastingen worden uitgeoefend. De invloed hiervan tijdens een hoogwater is meestal zeer beperkt. Deels doet de wind al indirect mee middels de golfbelastingen en opzet van de waterstand. Daarnaast geldt dat zich bij

¹¹ Opgemerkt wordt dat anderzijds de belastingen bij een voorgekomen onderhoudssituatie in bepaalde gevallen informatie in de vorm van bewezen sterkte kunnen opleveren (veiligheid bij extreme omstandigheden).

hoogwaterstanden doorgaans nog maar een relatief klein deel van de constructie boven water bevindt, dat kan worden belast door windbelasting. Vooral nog wordt er dan ook geen rekening gehouden met deze belasting bij de beoordeling van de kunstwerken.

4.3.4.5 IJselasting

IJselasting op waterkeringen kan een rol spelen op het moment dat een dergelijke ijsselasting in combinatie met een bepaalde waterstand (niet persé hoogwater) dominant is voor de waterveiligheid van de kering. In veel gevallen is de kans op een ijsselasting tijdens extreme hoogwaterstanden verwaarloosbaar klein. IJselastingen zijn in het BOI daarom niet nader uitgewerkt. Indien ijsselastingen wel relevant zijn, dienen ze uiteraard wel te worden beschouwd.

4.3.4.6 Grond- en grondwaterbelastingen

Belastingen uit omringende grondlichamen op kunstwerken zijn onder dagelijkse omstandigheden ook aanwezig. Deze belastingen worden beïnvloed door de aanwezige grondwaterstand(en), welke op hun beurt weer mede door de binnen- en buitenwaterstand worden bepaald. Indien grond- en grondwaterbelastingen relevant zijn, dient hiermee rekening te worden gehouden.

4.3.4.7 Veranderlijke belastingen

Er zijn meerdere veranderlijke belastingen die bij kunstwerken een rol kunnen spelen. In de meeste gevallen gaat het dan om dagelijkse situaties. Aanvullende veranderlijke belastingen spelen onder hoogwateromstandigheden vaak nauwelijks een rol, omdat ze dan niet aanwezig kunnen zijn. Dit wordt in Tabel 1 nader beschreven. Men dient zich er wel van bewust te zijn dat de belastingen op zich wellicht wel kunnen zorgen voor het bezwijken van onderdelen, waardoor ook in situaties waarin geen hoogwatergolf voorbij komt, grote gevolgen op kunnen treden. Voor meer informatie zie WOWK [12].

Tabel 1: Overwegingen voor het betrekken van veranderlijke belastingen bij de beoordeling

Veranderlijke belasting	Overwegingen
Stroming	Dit gaat om stromingen als gevolg van overloop/overslag of het ongewild open staan van een kunstwerk (bijvoorbeeld als gevolg van niet sluiten, maar ook als gevolg van bezwijken van waterkerende constructieonderdelen). Deze stromingen dienen te worden beschouwd bij beoordeling van de kunstwerken (bijvoorbeeld sterkte bodembescherming).
Scheepsgolven	Scheepsgolven zijn relatief kortdurend en leveren naar verwachting geen dominante belastingen. Tijdens hoogwater omstandigheden vindt bijna altijd geen of zeer beperkt scheepvaart plaats.
Scheepsstroming	Stromingen als gevolg van schepen worden bij de beoordeling in het kader van waterkeren niet beschouwd, omdat er onder maatgevende omstandigheden nauwelijks sprake is van scheepvaart. Voor normale bedrijfssituaties kunnen deze belastingen een grote rol spelen voor bijvoorbeeld bewegingswerken of bodemverdedigingen, maar omdat de kans op bezwijken bij hoogwateromstandigheden bijzonder klein is wordt de kans op een overstroming hierdoor op voorhand als verwaarloosbaar klein ingeschat.
Troskrachten	Troskrachten zijn niet relevant bij een hoogwater, omdat kunstwerken (en met name sluizen) onder maatgevende omstandigheden gesloten zijn.
Temperatuur	Temperatuurbelastingen zullen op zichzelf niet leiden tot het bezwijken van een waterkering. Ten tijde van maatgevende omstandigheden zullen zich geen extreme temperaturen (zowel hoog als laag) voordoen.

Verkeersbelasting	Verkeersbelastingen zijn alleen relevant voor zover ze aanwezig kunnen zijn onder hoogwateromstandigheden en de kritieke vervalbelasting kunnen beïnvloeden. Uitgangspunt hiervan is dat alle voorkomende verkeersbelastingen onder normale omstandigheden afgedekt zijn in het ontwerp en dat hier daarom niet in de beoordeling van dit toetspoot meegenomen hoeft te worden. Feitelijk behoort dit tot het beheer en onderhoud van de kering.
-------------------	--

4.3.4.8

Aanvaarbeastingen

Specifiek voor schutsluizen en keersluizen kan het aanvaren van een keermiddel leiden tot grote gevolgen. Voor schutsluizen kan dit optreden onder dagelijkse omstandigheden en dus onafhankelijk van het optreden van hoogwater. Voor keersluizen geldt dat een eventuele aanvaring van het gesloten keermiddel met name van belang is bij hoogwaters¹².

Aanvaren betreft een deelfaalmecanisme dat onderdeel is van het faalmecanisme *Falen door bezwijken waterkerende constructieonderdelen* (STCO).

Aanvaarbeastingen zijn met name afhankelijk van het type scheepvaart, tonnage en vaarsnelheid. Ook de afmetingen van het doorstroomprofiel van een schutkolk kunnen een rol spelen.

4.3.4.9

Bijzondere beastingen

Zowel aanvaren als ijsbelasting worden ook wel aangeduid als een bijzondere beasting. Daarnaast zijn nog andere bijzondere beastingen mogelijk, zoals beastingen voortkomend uit vandalisme/sabotage/terrorisme, aardbevingen, brand en explosies. Alleen in bijzondere gevallen worden deze beastingen beschouwd bij de beoordeling van de primaire waterkeringen.

4.3.4.10

Vermoeiingbeasting

Vermoeiing kan optreden als een beasting, zoals druk, trek, buiging, wringing of combinaties daarvan, herhaaldelijk optreedt. In het algemeen moet daarbij gedacht worden aan een aantal beastingwisselingen dat ruwweg ligt tussen duizend en enkele miljoenen in de levensduur. Bij waterbouwkundige constructies kan schade door vermoeiing ontstaan aan met name deuren en schuiven, en daarmee samenhangend aan de bewegingswerken daarvan.

Vooralsnog wordt bij beoordelingen het uitgangspunt gehanteerd dat middels inspecties zicht is op de ontwikkeling van vermoeiingsverschijnselen zoals scheuren. Daarnaast geldt dat aanvullende aandacht voor vermoeiing is geboden bij staalconstructies die onder dagelijkse omstandigheden worden blootgesteld aan grote beastingen (groot verval) en/of waarbij zich bij dagelijks gebruik trillingen van de constructie voordoen. Voor meer informatie omtrent vermoeiing zie WOWK [12].

4.3.5

Beastinggevallen en hydraulische beasting piping bij kunstwerk

In deze paragraaf wordt ingegaan op de hydraulische beastingen en de beastinggevallen die bij het faalmecanisme *piping* bij kunstwerk van belang kunnen zijn. Naast hydraulische beastingen spelen andere beastingen geen rol bij dit faalmecanisme.

¹² Sommige keersluizen (vaak bij recreatiehavens) zijn standaard gedurende de winterperiode gesloten. Theoretisch gezien is dan dus ook bij dagelijkse omstandigheden aanvaren mogelijk. In de praktijk is deze kans verwaarloosbaar klein, omdat in het winterseizoen nauwelijks recreatievaart aanwezig is en recreatievaartuigen niet in staat worden geacht keermiddelen eruit te varen.

4.3.5.1 Relevante belastingsituaties

Piping kan optreden bij hoge buitenwaterstanden, waarbij het verval over de waterkering langdurig groot is. Golven en stroming spelen geen rol in de modellen die worden gebruikt bij de beoordeling op piping.

Het verval wordt bepaald door de combinatie van buitenwaterstand en binnenwaterstand. In hoofdstuk 5 van de gebruikershandleiding Riskeer – Faalmechanismen kunstwerken [31] worden aanwijzingen gegeven hoe de rekenwaarde van het verval bepaald kan worden ten behoeve van beoordelingen met de voor piping relevante modellen. Opgemerkt wordt dat in de beoordeling alleen belastingcombinaties worden beschouwd die gerelateerd zijn aan hoogwateromstandigheden. Belastingsituaties die samenhangen met beheer en onderhoud van het object vallen buiten het kader van de wettelijke veiligheidsbeoordeling. Deze moeten beschouwd worden voorafgaand aan het uitvoeren van de werkzaamheden.

4.3.5.2 Bepaling hydraulische belastingen

Piping is een verschijnsel dat kan optreden bij hoge waterstanden van het buitenwater (rivier, meer of zee), waarbij het verval (het verschil tussen buitenwaterstand en binnenwaterstand) zo groot is dat zandtransport plaatsvindt als gevolg waarvan terugschrijdende erosie onder of naast het kunstwerk optreedt en een open kanaal ontstaat. Als gevolg van terugschrijdende erosie treden zandmeevoerende wellen op. Als de erosie voortschrijdt, dan kan dit leiden tot het bezwijken van het kunstwerk en een overstroming.

De hydraulische belastingen zijn:

- Buitenwaterstand. Dit is de lokale waterstand aan de buitenzijde van het kunstwerk.
- Binnenwaterstand. Dit is de lokale waterstand aan de binnenzijde van het kunstwerk onder hoogwateromstandigheden. Deze wordt buiten Riskeer om bepaald, in hoofdstuk 5 van de gebruikershandleiding Riskeer – Faalmechanismen kunstwerken [31] worden nadere aanwijzingen hiervoor gegeven.
- Waterstandsverlooptij voor het in rekening brengen van het niet-stationaire karakter van de belasting op de grondwaterstroming. Hierbij kan gebruik worden gemaakt van het programma Waterstandsverloop (zie ook paragraaf 4.3.5.4).

De belasting bij controle op opbarsten en heave wordt gevormd door de stijghoogte in het watervoerend zandpakket. Met behulp van geohydrologische rekenmodellen kan deze stijghoogte bepaald worden. Hierbij spelen onzekerheden een belangrijke rol, omdat parameters voor de rekenmodellen moeilijk zijn te schatten. Die onzekerheden kunnen verminderd worden door het afregelen van deze parameters met behulp van waterspanningsmetingen.

4.3.5.3 Tijdsafhankelijkheid

De duur van de belasting is van invloed op de ontwikkeling van de waterspanningen in de watervoerende en pipinggevoelige lagen onder en achter het kunstwerk.

- Bij waterstanden van 'lange' duur, veroorzaakt door trage stochasten zoals afvoeren en meerpeilen, is sprake van quasi-stationaire grondwaterstroming.
- Bij waterstanden van 'beperkte' duur, veroorzaakt door snelle stochasten zoals wind (stormopzet), is sprake van niet-stationaire ofwel tijdsafhankelijke grondwaterstroming.

Het is belangrijk te realiseren dat de trage stochasten bij de meren, delta's, benedenrivieren en kust veel lagere maximale waterstanden veroorzaken dan de snelle stochasten. Het verschil kan lokaal (bijvoorbeeld het Ketelmeer) oplopen tot meer dan een meter.

Bij niet-stationaire grondwaterstroming zal de waterspanning in de watervoerende bodemlagen onder en achter de kering bij een gelijke top(buiten)waterstand minder hoog zijn dan bij stationaire grondwaterstroming. Dit is afhankelijk van het bergend vermogen van de bodemlagen (freatische berging in de onverzadigde grondlagen en elastische berging binnen het korrelskelet), de doorlatendheid en dikte van de bodemlagen en de duur van de belasting. Dit betekent dat de kracht op de korrels kleiner is dan bij stationaire grondwaterstroming. In het benedenriviereengebied, de meren, de estuaria en langs de kust is bij hoogwateromstandigheden vrijwel altijd sprake van een niet-stationaire grondwaterstroming. In onderstaande tekstbox wordt per belastingsysteem aangegeven of tijdsafhankelijkheid een rol speelt.

Bovenriviereengebied

Bij dijken in het bovenriviereengebied is piping een belangrijk aspect, vooral doordat de hoge waterstanden relatief lang aanhouden. In het algemeen treedt één langdurig hoogwater op. Het waterpeil stijgt langzaam tot aan de piekwaarde en bouwt zich dan langzaam weer af. De hele hoogwatergolf kan ongeveer twee tot drie weken duren. Hier speelt tijdsafhankelijkheid voor maatgevende omstandigheden dus nauwelijks een rol en kan stationair worden gerekend.

Benedenriviereengebied

In het benedenriviereengebied ten westen van Schoonhoven, Gorinchem en Waalwijk kan tijdsafhankelijkheid een rol spelen. Hier wordt de waterstand deels bepaald door de rivierafvoer en deels bepaald door de waterstand op zee, waardoor de invloed van het getij enigszins merkbaar is en bovendien een kortdurende waterstandsverhoging door een storm boven zee kan optreden. Dit is het begin van het bergingsgebied van de benedenrivieren waar lagere afvoeren in combinatie met storm aan zee de meest bedreigende situatie opleveren.

IJsselmeergebied, Zeeuwse wateren

In de meren wordt de waterstand voornamelijk door windopzet bij storm bepaald. Er is dus sprake van een korte belastingduur en dus van tijdsafhankelijkheid. Hiervoor zijn waterstanden bij de norm afgeleid en zijn waterstandsverlooptlijnen beschikbaar. In de westelijke delen van de meren, waar opwaaiing vooral optreedt bij oostelijke windrichtingen, kan het echter ook gebeuren dat de extreme waterstanden primair bepaald worden door het meerpeilverloop.

Zee

Aan zee speelt tijdsafhankelijkheid een grote rol. Bij zeedijken wordt tijdens stormcondities de waterstand in het algemeen bepaald door de getijbeweging en de stormopzet. De getijamplitude varieert van springtij tot doortij. Bovenop het getij moet nog de invloed van de storm opgeteld worden: de stormopzet. Het verloop in de tijd van de stormopzet kan van storm tot storm sterk verschillen. Een korte storm met een opzet gedurende enkele uren zal slechts één hoogwater beïnvloeden en dus één extreme piek in de waterstand tot gevolg hebben. Een storm van enkele dagen zal meerdere pieken veroorzaken, die echter niet allemaal even hoog hoeven te zijn. Er is geen relatie tussen de duur van de opzet en de hoogte van de opzet.

Voor een goede inschatting van de invloed van de duur wordt aanbevolen peilbuizen te plaatsen.

4.3.5.4 Waterstandsverloop tijdens hoogwater

Bij het beoordelen van waterkeringen die alleen een beperkte tijd worden belast kan gebruik worden gemaakt van waterstandsverlooptlijnen. Een waterstandsverloop geeft voor een locatie de waterstand als functie van de tijd tijdens het passeren van een storm of hoogwatergolf.

De waterstandsverlooptlijnen voor extreme waterstanden kunnen met het programma Waterstandsverloop worden bepaald (zie paragraaf 4.1.4). Met dit programma kunnen eenvoudig waterstandsverlopen op een bepaalde locatie in Nederland worden opgevraagd en geëxporteerd. De waterstandsverlopen uit het programma Waterstandsverloop zijn specifiek van toepassing voor de beoordeling van geotechnische faalmechanismen waarbij langdurig aanhoudende hoge waterstanden bedreigend zijn, zoals piping bij kunstwerken.

Het niet-stationaire karakter van de grondwaterstroming leidt bij een kortdurend hoogwater tot lagere stijghoogten in het watervoerende pakket dan bij een langdurig hoogwater. Het niet-stationaire karakter van het hoogwater kan in rekening worden gebracht bij het bepalen van de stijghoogte op een bepaalde plek (uittredepunt) bij hoogwater. Hiervoor zijn in het *TR Waterspanningen bij Dijken* ([25]) aanwijzingen gegeven.

Paragraaf 5.7 van het Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen [23] gaat in op de invloed van tijdsafhankelijkheid op piping bij dijken en kunstwerken.

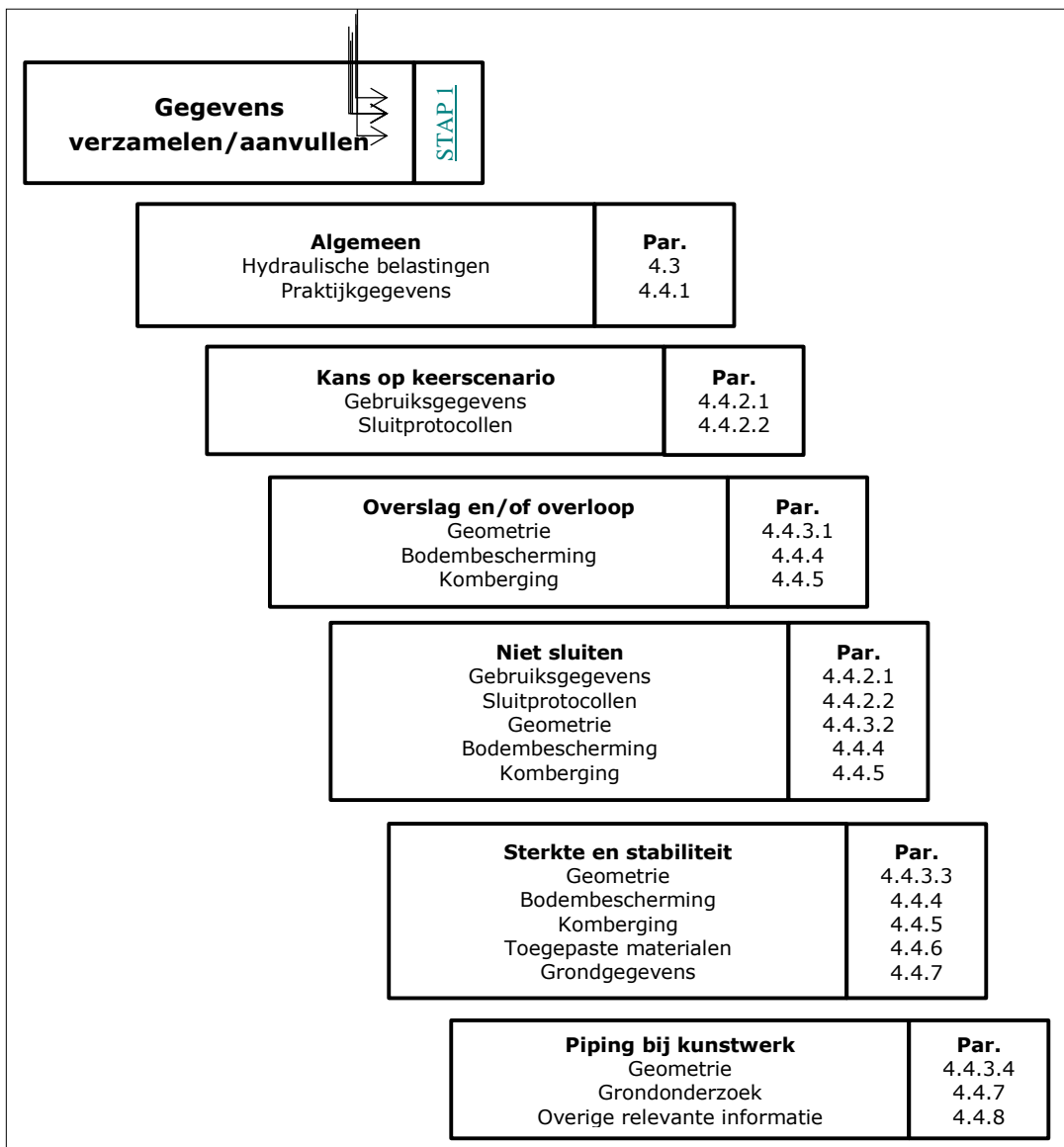
De respons van de waterspanningen op de buitenwaterstand bij hoogwater-omstandigheden kan ook worden benaderd met behulp van peilbuismetingen in doorlatende lagen onder en landwaarts van de dijk. Omdat deze peilbuismetingen bij lagere buitenwaterstanden gemeten worden dan de extreme waterstanden die de waterkeringen nog moeten kunnen weerstaan, moeten de meetresultaten altijd worden geëxtrapoleerd. Voor de analyse van deze metingen en een voorspelling van de respons zijn meerdere methoden voor de gedetailleerde toets per vak beschikbaar. Zie hiervoor o.a. het *TR Waterspanningen bij Dijken* [25].

4.4 Inventarisatie beschikbare gegevens

De inventarisatie van beschikbare gegevens bestaat uit het verzamelen van alle gegevens die nodig zijn voor de beoordeling. In algemene zin kan gesteld worden dat voor het faalmechanisme overslag en/of overloop de minste gegevens nodig zijn en voor het faalmechanisme sterkte en/of stabiliteit puntconstructies de meeste. Dit komt doordat de faalpaden per faalmechanisme steeds complexer worden. Dit blijkt ook uit de foutenbomen in Figuur 5 tot en met Figuur 6. In Figuur 10 is per faalmechanisme aangegeven welke gegevens voor de beoordeling benodigd zijn. Hieruit valt te zien dat gegevens omtrent hydraulische belastingen (zie vorige paragraaf), geometrie, komberging en bodembescherming voor meerdere faalmechanismen nodig zijn.

De gegevens die nodig zijn voor de beoordeling van het faalmechanisme *piping bij kunstwerk* komen in het geheel niet bij de andere faalmechanismen terug. Daarom worden deze gegevens als laatste behandeld. Begonnen wordt met het verzamelen van algemene gegevens die voor alle faalmechanismen van belang zijn, zoals

inspectiegegevens en gegevens uit het veldbezoek. Aansluitend wordt ingegaan op de gegevens die de kans op het geheel of gedeeltelijk open staan van het kunstwerk bepalen. Deze horen eigenlijk bij het faalmechanisme niet sluiten, maar omdat deze gegevens ook nodig zijn voor de bepaling van de kans op de diverse keerscenario's die in de beoordeling beschouwd moeten worden zijn ze naar voren gehaald. Als uit deze gegevens namelijk blijkt dat de kans op een bepaald scenario al verwaarloosbaar klein is, dan hoeven voor dit scenario geen aanvullende gegevens verzameld te worden.



Figuur 10: Nadere uitwerking stap 1: verzamelen/aanvullen gegevens ten behoeve van de beoordeling

Veel van de benodigde gegevens kunnen worden gevonden in de rapportage van de vorige beoordelingsronde. Het is dan wel zaak om te verifiëren dat deze gegevens nog actueel zijn.

4.4.1 *Praktijkgegevens*

Onder praktijkgegevens worden verstaan: de gegevens omtrent de constructie zoals die buiten aanwezig is op het moment van de beoordeling.

De praktijkgegevens kunnen uit verschillende soorten gegevens bestaan:

- I. Globale gegevens uit het veld (veldbezoek).
- II. Ervaringsgegevens werking van het kunstwerk.
- III. Inspectiegegevens vanuit specifieke inspecties.
- IV. Beheer en onderhoudsgegevens voorafgaand en gedurende de beschouwde beoordelingsperiode.

De gegevens die in de praktijk (buiten) worden aangetroffen geven een beeld van de actuele conditie en opbouw van het kunstwerk en kunnen daarom van wezenlijk belang zijn.

4.4.1.1 Veldbezoek

Voorafgaand aan de beoordeling van een kunstwerk is een veldbezoek wenselijk voor een goed inzicht in de lokale situatie. Tijdens dit veldbezoek wordt onder andere de algehele conditie van het kunstwerk beschouwd en wordt gekeken of er sprake is van schade en/of gebreken die de (krachts)werking van de constructie (onderdelen) kunnen beïnvloeden of die een indicatie kunnen zijn voor een tekort aan sterkte. Het veldbezoek dient ook om een indruk te krijgen van met name de afmetingen van het object en de omgeving waarin het object zich bevindt.

Het veldbezoek kan worden gebruikt voor de volgende punten:

- Verificatie/vaststellen van locatie en dimensies (hoogte en breedte) van de hoogwaterkerende keermiddelen en de waterkerende constructiedelen in relatie tot informatie uit tekeningen en berekeningen.
- Vaststellen plaats en afmetingen van eventuele sparingen in de constructie (bijvoorbeeld bij toegangsluiken), die ertoe kunnen leiden dat bepaalde keermiddelen niet relevant zijn zolang de buitenwaterstand onder een bepaalde waarde blijft.
- Inzicht verkrijgen in het gebruik van het kunstwerk en de diverse keermiddelen, met name in dagelijkse omstandigheden.
- Inzicht verkrijgen in de conditie van de keermiddelen, bewegingswerken en andere voorzieningen die van belang zijn voor het verrichten van een sluiting bij een overstromingsdreiging.
- Inzicht verkrijgen 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.
- Een eventuele demonstratie van sluiten van de keermiddelen.
- Een indruk krijgen van de algehele staat van het object en de betrokkenheid en expertise van het bedienend personeel.
- Uitvoeren van eenvoudige metingen, zoals het opmeten met een meetlint van eenvoudig bereikbare onderdelen (afmetingen doorstroomopeningen, onderdelen van keermiddelen etc.). Onder het veldbezoek vallen geen uitgebreidere metingen, zoals het bepalen van staaldikten of wapeningsdiameters. Het gaat dus om eenvoudige visuele (en wellicht auditieve) waarnemingen zonder specialistische hulpmiddelen.
- Waarnemen van schaden/gebreken die relevant zijn voor de beoordeling. Schaden/gebreken die de krachtswerking kunnen beïnvloeden zijn bijvoorbeeld het ontbreken van een oplegging (bijvoorbeeld sponning is deels afgebrokkeld) of het (deels) ontbreken van bodembescherming.

Alhoewel deze schadebeelden op zichzelf voldoende reden kunnen zijn om over te gaan tot reparatie, is het mogelijk dat deze schadebeelden niet substantieel bijdragen aan de faalkans van het kunstwerk. Verzakkingen of doorgaande scheuren kunnen duiden op een tekort aan sterkte of uitspoeling van gronddeeltjes rondom de constructie.

- Inzicht krijgen in de omgeving van het kunstwerk en de situatie van het achterland. Hiermee kan een indruk worden verkregen in de eerste gevolgen bij falen van het kunstwerk. Ook kan de mogelijkheid/waarschijnlijkheid worden ingeschat dat omwonenden waarschuwen bij problemen met het sluiten van het kunstwerk.
- Visuele waarneming doen van eventuele bodembeschermingen voor zover mogelijk¹³. Vooral op de taluds kan soms de aanwezige bodembescherming worden waargenomen.

Bij het veldbezoek zijn bij voorkeur volgende personen aanwezig:

- De beoordelaar. 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 een verslag van het veldbezoek toe te voegen aan de rapportage van de beoordeling van het kunstwerk.

4.4.1.2 Ervaringsgegevens werking van het kunstwerk

Gegevens omtrent de werking van het kunstwerk kunnen bijdragen aan inzicht in de constructie en tevens een beeld geven van de werking van belastingafdracht bij hoogwater. Zo kan substantieel lekken van een keermiddel erop duiden dat deze (onder belasting) niet geheel goed opgelegd is. Dit kan het gevolg zijn van een obstakel bij de opleggingen, een gebrek van het keermiddel zelf of het gevolg zijn van de optredende vervormingen van het keermiddel onder belasting. Over het algemeen zullen deze gegevens met betrekking tot *sterkte en/of stabiliteit puntconstructies* beperkt zijn.

Ervaringsgegevens die met name bij schutsluizen van belang kunnen zijn, zijn gegevens omtrent de passerende scheepsvaart. Aantallen, klasse(s), tonnage en vaarsnelheden zijn direct van invloed op de risico's met betrekking tot aanvaren. Vaak zijn deze gegevens direct op de sluis beschikbaar.

4.4.1.3 Inspectiegegevens

Vanuit beheer en onderhoud is het verstandig om het kunstwerk met enige regelmaat te inspecteren. Deze reguliere inspecties kunnen gebreken van de constructie aan het licht brengen. Wanneer inspecties uit verschillende jaren naast elkaar worden gelegd, zijn wellicht ook trends te herkennen. Aan de hand van de gegevens uit reguliere inspecties kunnen globale maar met name ook gedetailleerde gegevens omtrent de actuele conditie van constructie-(onderdelen) worden gehaald. Deze kunnen direct van invloed zijn op de beoordeling van de diverse faalmechanismen.

¹³ Het ontbreken van bodembescherming kan niet altijd visueel vanaf de kant worden waargenomen. Wel kunnen soms indicaties worden waargenomen, zoals losliggende stenen.

Het kan nodig zijn om het kunstwerk te inspecteren indien dit recentelijk niet is gedaan. Met behulp van deze inspectiegegevens kan dan een onderbouwde uitspraak worden gedaan over de conditie van de diverse onderdelen van het kunstwerk. Indien gedetailleerde inspectiegegevens reeds voorhanden zijn, kan hiermee in de analyses direct rekening worden gehouden. Gedetailleerde gegevens kunnen bijvoorbeeld bestaan uit:

- Staaldiktemetingen.
- Bepaling betonsterkte.

Opgemerkt wordt dat er niet altijd voldoende aandacht is voor de bodembescherming aansluitend aan het kunstwerk. Deze wordt vaak niet geïnspecteerd. In het BOI wordt de overstromingskansbenadering gehanteerd en krijgt sterkte van de bodembescherming als aanvullende sterkte een prominentere plek. Monitoring van de bodembescherming wordt daarmee belangrijker. Ook met het oog op de levensduur van dit constructie-element is monitoring van belang.

4.4.1.4 Beheer en onderhoudsgegevens

De beoordeling richt zich op de verwachte conditie op de peildatum. Beheer en onderhoud zijn hierbij van wezenlijk belang voor de conditie van het kunstwerk aan het einde van de beoordelingsperiode. Voor de beoordeling dient de actuele situatie onder de aanname van goed beheer te worden vertaald naar de situatie op peildatum. Indien blijkt dat het beheer en onderhoud dusdanig is ingericht dat achteruitgang van de conditie actief wordt tegengegaan, kan dit dienen als onderbouwing voor het uitgangspunt dat de conditie van het kunstwerk aan het einde van de beoordelingsperiode minimaal gelijk is aan de conditie die ten tijde van de beoordeling is aangetroffen. In dat geval hoeft er wellicht geen rekening gehouden te worden met achteruitgang van de sterkte.

Uitgangspunt voor de beoordeling is dat de beheerder middels inspectieresultaten inzicht heeft in de actuele conditie van (onderdelen) van het kunstwerk. Indien deze inspectiegegevens niet voorhanden zijn kan een globale actuele staat op basis van visuele waarneming, gebruikservaringen en ouderdom van de constructie worden ingeschat. Als vertrekpunt kan bij de beoordeling - daar waar twijfels zijn over de staat van het kunstwerk - worden uitgegaan van conservatieve waarden. Dit kan nader verfijnd worden als de bijdrage aan de overstromingskans hierdoor substantieel blijkt te zijn en uit een gevoeligheidsanalyse blijkt dat dit een substantiële reductie van de faalkans op kan leveren. Vaak bestaat er met name van de bodembescherming, maar ook soms van kerende constructieonderdelen, geen inzicht in de actuele staat.

4.4.2 *Gebruiksgegevens en sluitingsprotocollen*

Voor de bepaling van de kans op niet sluiten van de keermiddelen van het kunstwerk – en hiermee voor de bepaling van de scenariokansen bij de verschillende keertoestanden waarin een kunstwerk kan verkeren – is inzicht in het gebruik van het kunstwerk van belang. Daarnaast is het belangrijk tot in detail te weten hoe de sluiting van het kunstwerk in zijn werk gaat, met name bij kunstwerken die vanuit de primaire functie altijd open staan en alleen bij nadering van hoogwater gesloten worden.

4.4.2.1 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(s) 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 (hoog)waterkerend 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 laat zien 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 doorgaans niet goed mogelijk.

4.4.2.2 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 een beoordeling voor het faalmechanisme *niet sluiten* kunstwerk doorgaans niet goed mogelijk is.

Met betrekking tot de faalkans van herstel van een gefaalde reguliere sluiting, dient in de sluitingsprotocollen te zijn opgenomen welke vormen van herstel voor een specifiek kunstwerk mogelijk worden geacht. In de *Handreiking borging betrouwbaarheid sluiting in draaiboeken* [28], wordt ingegaan op de borging van dergelijke maatregelen in de protocollen. Indien op voorhand niet is nagedacht over vormen van herstel en dit niet is vastgelegd, dan is de kans op het falen van herstel doorgaans zeer groot.

4.4.3 Geometrie kunstwerk

De geometrie van het kunstwerk en de daarin aanwezige keermiddelen vormen de basis voor de beoordeling van alle faalmechanismen. De precieze gegevens omtrent de geometrie die benodigd zijn voor de beoordeling verschillen echter per faalmechanisme. Daarom wordt in deze paragraaf per faalmechanisme onderscheid gemaakt naar de gegevens omtrent de geometrie.

Gegevens omtrent de geometrie kunnen worden gevonden in ontwerp-, detail- en bestekstekeningen, ontwerprapporten, berekeningen en bestekken. Hiervoor geldt dat deze gegevens zoveel mogelijk moeten overeenkomen met de situatie zoals deze buiten wordt aangetroffen. Dit betekent dus dat bij het gebruik van tekeningen zoveel mogelijk van As-Built tekeningen gebruik gemaakt moet worden.

Aangezien de meeste kunstwerken een lange levensduur kennen, kan het nodig zijn om niet alleen de meest recente tekeningen van bijvoorbeeld een revisie of renovatie te hebben, maar ook te kunnen beschikken over de oorspronkelijke ontwerptekeningen.

Indien de benodigde gegevens niet voorhanden zijn, kan het nodig zijn om deze middels inmetingen zo goed mogelijk te bepalen. Dit kunnen inmetingen zijn van de constructie als geheel, maar ook specifieke metingen van constructiedetails van onderdelen van de constructie. Hierbij dient rekening te worden gehouden met meetonnauwkeurigheden.

4.4.3.1 Geometrie overslag en/of overloop

Zowel voor de bepaling van het overslag-/overloopdebiet als voor de bepaling van het kritieke debiet is informatie nodig over:

- A. Hoogte en breedte van de hoogwater kerende keermiddelen.
 - B. (eventueel) Hoogte en breedte van aangrenzende constructiedelen.
 - C. Horizontaal en verticaal verloop van de doorstroomopeningen achter de hoogwater kerende keermiddelen.
- ad. A. De kerende hoogte van de hoogwater kerende keermiddelen bepaalt het overslag-/overloopdebiet dat per strekkende meter over het hoogwaterkerend gesloten kunstwerk naar binnen stroomt. De breedte van de hoogwater kerende delen van het kunstwerk bepaalt vervolgens het totale debiet dat over het hoogwaterkerend gesloten kunstwerk naar binnen stroomt. De kerende hoogte en breedte van de keermiddelen en aangrenzende constructiedelen kan bepaald worden vanaf tekening of door meting in het veld. In de hoogte moet de verwachte zetting en bodemdaling tot de peildatum van de beoordeling verdisconteerd worden.
- ad. B. Aangrenzende constructiedelen waarvan het overslaand/overlopend water ook achter het kunstwerk terecht komt en hiermee de bodembescherming of de komberging belast dienen eveneens in de beschouwing betrokken te worden.
- ad. C. Het natte oppervlak ter plaatse van de bodembescherming bepaalt de stroomsnelheid boven de bodembescherming. Hierbij moet ook de geometrie bekend zijn; abrupte verwijdingen of verdiepingen kunnen ervoor zorgen dat niet het hele natte oppervlak mag worden meegenomen bij de bepaling van de optredende stroomsnelheid boven de bodembescherming.

4.4.3.2 Geometrie niet sluiten

Voor de beoordeling van het faalmechanisme *niet sluiten* kunstwerk dienen 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.
- 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.

4.4.3.3 Geometrie sterkte en stabiliteit

Ten behoeve van het maken van berekeningen voor *sterkte en/of stabiliteit puntconstructies* zijn afmetingen van (onderdelen van) de constructie van belang. Deze dienen later als basis voor de schematisering. Daarnaast geeft de geometrie ook een eerste inzicht in de van belang zijnde faalmechanismen en faalwijzen. Voor dit faalmechanisme bestaat de relevante geometrie uit de gehele opbouw van de constructie zoals fundering, afmetingen betonwerk, opbouw en detaillering keermiddelen, lengte, breedte en hoogte van het kunstwerk, aanwezigheid van damwandschermen en opleggingen van onderdelen.

4.4.3.4 Geometrie piping bij kunstwerk

Zowel voor de bepaling van de kwelwegen als voor de bepaling van het optredende uittredeverhang (indien een heave-controle wordt gedaan) is informatie nodig over:

- A. De afmetingen van de constructie
- B. De kwelschermen:
 - o Aanwezigheid
 - o Locatie
 - o Dimensies
 - o Conditie/toestand
- C. De wijze waarop de constructie is gefundeerd (bijvoorbeeld de aanwezigheid van funderingspalen).

Omgang met gebrek aan gegevens

Als er geen tekeningen of ontwerpdocumenten beschikbaar zijn, dan kunnen de afmetingen van de constructie meestal worden opgemeten. Informatie over de fundering en kwelschermen, en de aansluiting daarvan op de constructie, is minder eenvoudig te verkrijgen, met name bij historische kunstwerken. In paragraaf 6.3.3 van het *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen* [23] wordt een aantal hulpmiddelen besproken waarmee meer informatie over de kwelschermen kan worden verkregen. Enkele hiervan kunnen ook gebruikt worden om de fundatiewijze vast te stellen.

In paragraaf 6.3.3 van *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen* [23] wordt tevens het STOWA-rapport *Historische kunstwerken* [21] genoemd. Met behulp van dit rapport kan een inschatting gemaakt worden van aantal en lengte van de kwelschermen. Aanbevolen wordt in de beoordeling enigszins terughoudend om te gaan met dit rapport en de in dit rapport genoemde aantallen en afmetingen van kwelschermen niet klakkeloos over te nemen. Wel kunnen deze gegevens worden gebruikt om tot een hypothese te komen aangaande het aantal kwelschermen en de afmetingen hiervan. Deze hypothese moet dan geverifieerd worden middels aanvullend veldonderzoek en/of ervaringen en waarnemingen bij hoog water om voldoende zekerheid te verkrijgen. Het kan dus niet zo zijn dat het eindoordeel enkel en alleen gebaseerd is op de verwachtingen aangaande aantal en afmetingen van kwelschermen op basis van het STOWA-rapport *Historische kunstwerken* [21].

4.4.4 *Gegevens bodembescherming*

Als gevolg van overslag en/of overloop kan water over het gesloten kunstwerk naar binnen stromen. En ook als een kunstwerk ongewenst open blijft staan of als de keermiddelen zijn bezweken 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 over de bodembescherming in te winnen, kan een uitspraak worden gedaan over deze kritieke stroomsnelheid.

Gegevens over de bodembescherming kunnen worden ingewonnen middels tekeningen en bestekken/ontwerprapporten 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. Een inschatting van de actuele conditie van de bodembescherming is nodig om de sterkte van de bodembescherming adequaat in rekening te brengen.

Aandachtspunten bij een inspectie zijn vooral:

- **Opbouw bodembescherming**
Type, lengte en breedte van de bodembescherming. Met name de sortering en dikte van de toplaag is van belang. Met deze gegevens omtrent de bodembescherming kan met behulp van modellen een kritieke stroomsnelheid worden bepaald.
- **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 beoordeling 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 in de beoordeling 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 paragraaf 2.2.1 van de gebruikershandleiding Riskeer – Faalmechanismen kunstwerken [31]).

Een scherper oordeel kan wellicht worden verkregen door de sterkte van de grondslag onder de bodembescherming mee te nemen in de betrouwbaarheidsanalyse. Dit kan onderdeel zijn van de analyse van de dominante faalpaden.

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.

4.4.5

Gegevens komberging

Als gevolg van overslag en/of overloop, een falende sluiting of bezwijken van constructiedelen kan water over of door het kunstwerk naar binnen stromen. Hierdoor wordt de komberging achter het kunstwerk belast/aangesproken. Hoeveel water in de komberging achter het kunstwerk kan worden toegelaten dient te worden bepaald. Hiertoe is het vergaren van enkele gegevens benodigd. Als het 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 4.6.2.4 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 grove inschatting; met name in die situaties waarin de komberging bestaat uit een gevarieerde verzameling van watergangen en waterpartijen wordt aanbevolen niet direct naar een grote nauwkeurigheid te streven.
- *Streefpeil en kritiek peil van het achterliggende (vaak regionale) watersysteem.*
Het verschil tussen deze peilen bepaalt de waterstijging die in het achterland mag plaatsvinden, voordat significante gevolgen optreden, zie Bijlage B. 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 B 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 een faalkans voor het kunstwerk die substantieel bijdraagt aan de overstromingskans van het dijktraject. Indien dit het geval is moet het kritieke binnenpeil scherper worden gekozen in lijn met de definitie van overstroming uit de Omgevingswet.
- *Watertoevoer en -afvoer vanuit het achterland.*
Het kan zijn dat vanuit het achterland water wordt aangevoerd dat op dat moment niet geloosd kan worden. Dit kan natuurlijke aanvoer zijn, maar ook inzet van gemalen die gedurende een hoogwater water op de kom lozen. Dit water reduceert de komberging die beschikbaar is. Er kan ook sprake zijn van gemalen die water vanuit de komberging op het buitenwater lozen. En in sommige gevallen geldt een maalstop boven een bepaald peil. Een inschatting van deze aan- en afvoer van water dient door de beheerder te worden vastgesteld. Het gebruik van ervaringsgegevens uit eerdere hoogwaters is hierbij zinvol.
- *Het waterstandsverloop in de tijd.*

Het verloop van de buitenwaterstand bepaald mede de tijdsduur waarover instroming over/door het kunstwerk plaats vindt en het verval dat over het kunstwerk staat gedurende de hoogwatergolf.

4.4.6 *Toegepaste materialen*

Kunstwerken bevatten vaak onderdelen van verschillende materialen. Beton, staal, hout maar ook kunststof kunnen worden aangetroffen. Ten behoeve van de sterktebepaling is het van belang om de specifieke sterkte-eigenschappen van de toegepaste materialen te achterhalen. Zo kan bij staal worden gedacht aan S235, maar ook aan S355. Voor hout geldt ook dat er veel verschil zit in de sterkte-eigenschappen tussen de diverse houtsoorten. Beton en kunststof kennen net als staal afhankelijk van hun samenstelling ook variërende sterkte-eigenschappen.

Gegevens omtrent de materialen kunnen worden achterhaald uit tekeningen, berekeningen, bestekken en productbladen van leveranciers. Daarnaast kan met behulp van inspectiemethodieken de materiaalklasse van constructieonderdelen worden bepaald. De conditie van de materialen dient in de praktijk te worden vastgesteld (zie paragraaf 4.4.1.1 en paragraaf 4.4.1.3).

Zonder de basisgegevens zoals hierboven aangegeven is een goede analyse niet mogelijk. Het kan echter voorkomen dat er geen gegevens omtrent de materiaalsoort voorhanden zijn. Voor vaststelling van deze gegevens is doorgaans een expert benodigd. In sommige gevallen is onderzoek benodigd waarbij een monster uit het materiaal wordt gehaald.

Bij (in)metingen dient rekening te worden gehouden met meeton nauwkeurigheden en statistische onzekerheden. Bij bepaling van de materiaalsterkte middels metingen/beproevingen (bijv. nemen van monsters) is het van belang om naast de gemiddelde sterkte ook de standaardafwijking te bepalen. Deze standaardafwijking kan vervolgens worden omgerekend naar een variatiecoëfficiënt, die in het instrumentarium ingevuld kan worden.

4.4.7 *Grondgegevens*

Zowel bij de beoordeling van het faalmechanisme *piping bij kunstwerk* als bij *sterkte en/of stabiliteit puntconstructies* zijn gegevens omtrent de ondergrond nodig. Doorgaans zijn deze gegevens opgenomen in grondonderzoeksrapporten, al dan niet als bijlage bij ontwerprapporten of bestekken. Ook komt het voor dat dit grondonderzoek 'verscholen' zit in grondonderzoek dat voor een heel dijktraject is uitgevoerd. Opgepast moet worden met gebruik van grondgegevens 'uit de nabijheid' van een kunstwerk; bij de toetsing van kunstwerken zijn alleen grondgegevens bruikbaar die echt lokaal zijn ingewonnen. In het kader hiervan wordt het gebruik van ondergrondmodellen zoals het SOS afgeraden. Uitzondering hierop is de dikte en doorlatendheid van het watervoerende pakket, hiervoor kan veelal worden teruggevallen op gegevens van de omgeving.

4.4.8 *Overige relevante gegevens piping bij kunstwerk*

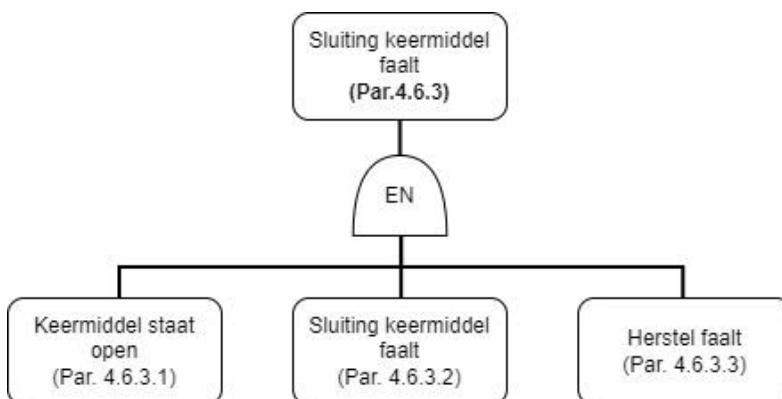
Overige relevante gegevens betreffen gegevens over de bodembescherming die is toegepast aan de binnen- en buitenzijde van het kunstwerk. Voor de beoordeling van piping bij kunstwerk is het van belang te weten of deze zanddicht en/of waterdoorlatend zijn. Daarnaast is het van belang te weten of aan de binnenzijde van het kunstwerk filterconstructies zijn toegepast. Ook deze gegevens zijn doorgaans te vinden op tekeningen en ontwerpdocumenten. Indien gegevens omtrent de bodembescherming ontbreken, kan met behulp van onderwaterinspecties vaak een goede indicatie van aansluiting, opbouw en onderhoudstoestand van de bodembescherming worden verkregen.

Voor filters is het vaak lastiger om middels visuele onderzoek de opbouw en werking van de filterconstructie aan te tonen. In het *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen* [23] paragraaf 6.2.7 wordt hierover het volgende gesteld: *Bij filters dient zowel de zanddichtheid als de waterdoorlatendheid te worden gecontroleerd. Als de filterconstructie noodzakelijk is in verband met de veiligheid tegen piping, dan is ten minste iedere vijf jaar inspectie nodig. Inspectie van filters is niet eenvoudig en er is weinig ervaring mee. Om deze reden worden filters dan ook zelden in een ontwerp toegepast. Als in een bestaande situatie filters voorkomen die van belang zijn voor de beoordeling van piping, wordt aangeraden de situatie door een specialist te laten beoordelen.* Concrete handvatten ontbreken hoe de filterwerking aan te tonen.

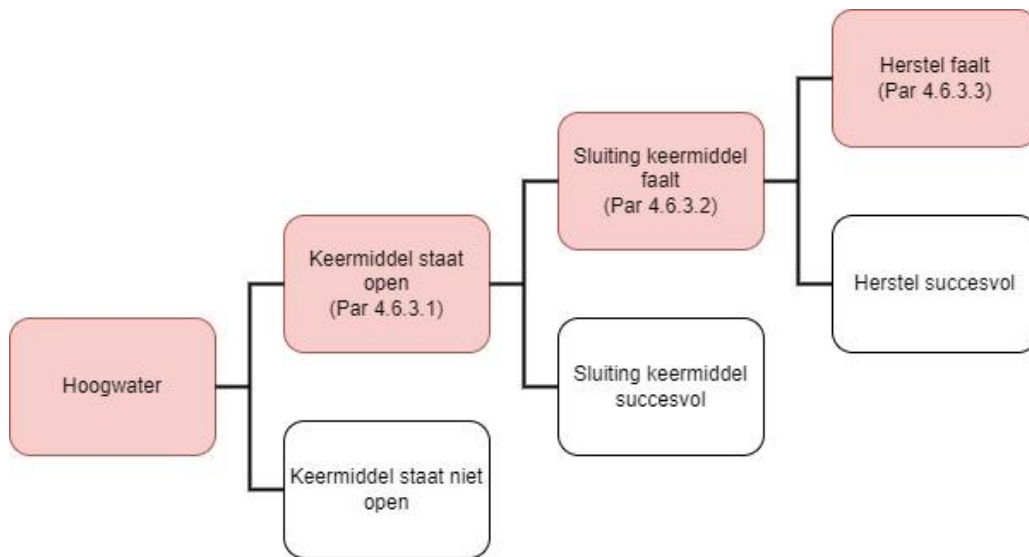
4.5 Bepalen (kansen op) keerscenario's

In deze stap worden alle mogelijke keertoestanden in beeld gebracht en worden de kansen op de relevante keerscenario's bepaald. Op basis van de eenvoudige beslisregels in paragraaf 3.2 kan het scenario 'kunstwerk staat open' in specifieke gevallen als niet relevant worden aangemerkt voor de beoordeling. Het komt ook voor dat het voor de waterkerendheid van een kunstwerk niet uitmaakt welke van de keermiddelen gesloten is. In dat geval kunnen scenario's samen worden genomen en vereenvoudigt de analyse.

De kans op een keerscenario wordt bepaald door de kans op falen van de sluiting van de betreffende keermiddelen, de faalkans van herstel van een falende sluiting en natuurlijk de kans dat het keermiddel überhaupt open staat als zich een hoogwater voordoet. Dit is middels een foutenboom respectievelijk gebeurtenissenboom in Figuur 11 weergegeven. Voor aanwijzingen omtrent de schematisering en kansbepaling wordt verwezen naar paragraaf 4.6.3.



Figuur 11: Foutenboom kans op scenario niet-sluiten keermiddel

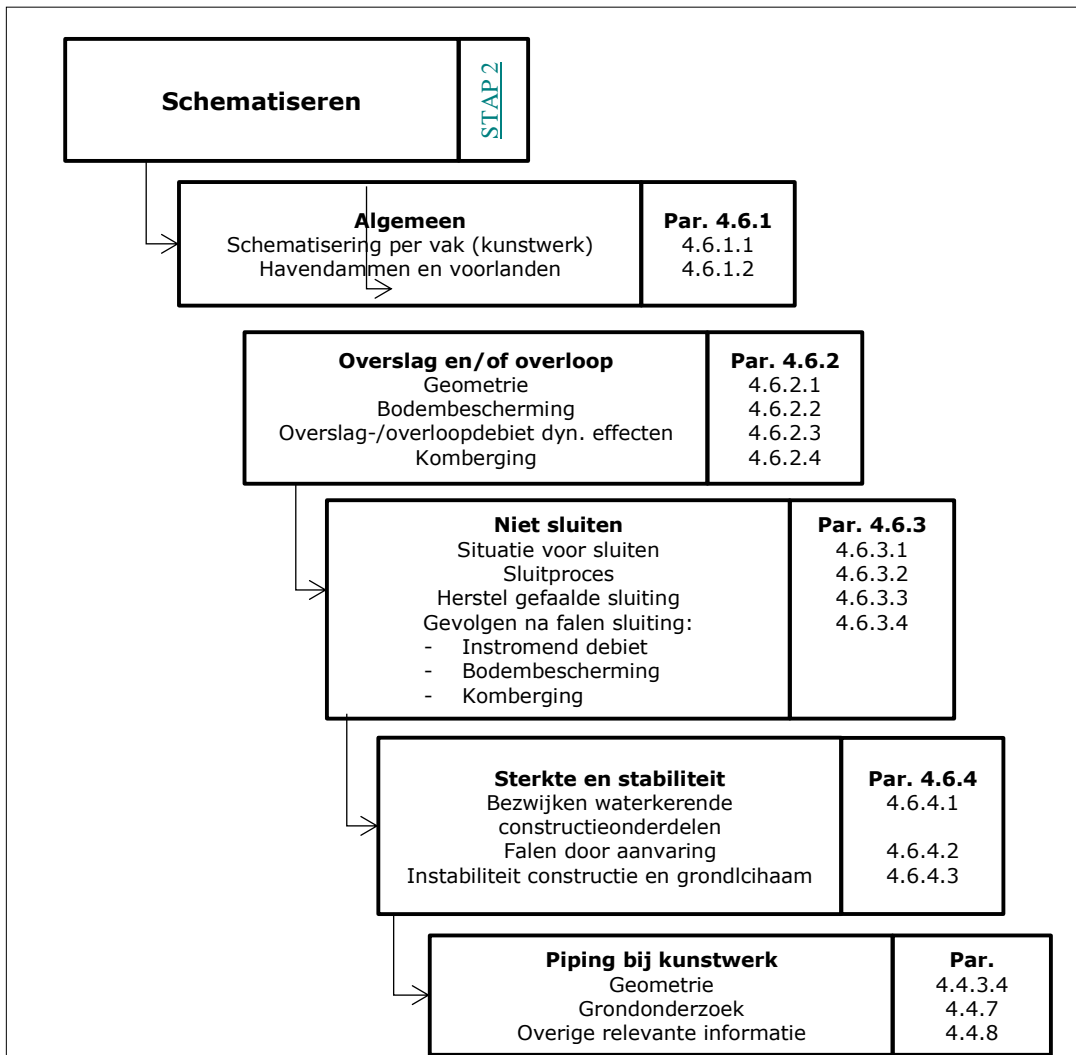


Figuur 12: Gebeurtenisboom kans op scenario niet-sluiten keermiddel met in rood het faalpad dat de kans op het scenario geeft

4.6 Uitwerking schematisering

In deze paragraaf wordt het proces van schematisering nader beschreven. De benodigde gegevens zijn inmiddels verzameld (zie paragraaf 4.4). Een uitgebreide handleiding met betrekking tot schematisering van de parameters per faalmechanisme is in de gebruikershandleiding Riskeer – Faalmechanismen kunstwerken [31] opgenomen.

Het schematiseren betreft een veelheid van aspecten, die per faalmechanisme verschillend zijn. In Figuur 13 is per faalmechanisme aangegeven welke aspecten geschematiseerd moeten worden. De aandachtspunten die daarbij van toepassing zijn worden vervolgens per faalmechanisme nader uitgewerkt.



Figuur 13: Nadere uitwerking stap 2: schematiseren parameters

Algemeen geldt dat bij het schematiseren onderstaand principe van toepassing is: *Bij de schematiseringen wordt aanbevolen om van grof naar fijn te werken. In de eerste stappen is er sprake van voorzichtige keuzen welke leiden tot relatief grote faalkansen. In vervolgstappen worden onzekerheden gereduceerd waardoor scherpere keuzen gemaakt kunnen worden en 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. Wanneer met conservatieve uitgangspunten al (verwaarloosbaar) kleine faalkansen worden bepaald, is een uitgebreidere analyse niet nodig.*

4.6.1 Algemeen

4.6.1.1 Schematisering per vak (kunstwerk)

In Riskeer wordt elk kunstwerk als apart vak behandeld. Samengestelde kunstwerkcomplexen (bijvoorbeeld sluzencomplexen) worden hierbij ontleed, waarbij ieder kunstwerk waar mogelijk apart beoordeeld wordt.

Indien meerdere kunstwerken bij elkaar liggen, gebruik makend van dezelfde achterliggende watergang (komberging) en zo een kunstwerkencomplex vormen (bijvoorbeeld de kering bij IJmuiden), kan het nodig zijn om het complex als geheel te zien en faalpaden af te leiden voor het gehele complex. Voordat hiermee wordt begonnen, wordt aanbevolen om eerst na te gaan of dit daadwerkelijk nodig is vanuit de werking van het betreffende kunstwerkcomplex of dat kan worden volstaan met een aparte analyse per kunstwerk waarbij specifieke keuzes worden gemaakt (bijvoorbeeld op voorhand de beschikbare komberging verdelen over de kunstwerken binnen het complex).

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

1. De aannames "onafhankelijk falen" van vakken/deelkunstwerken kan te optimistisch zijn, de aannames "afhankelijk falen" kan zowel te pessimistisch als te optimistisch zijn. Een goede onderbouwing en verdiscontering van de mate van afhankelijk falen is nodig als dit van invloed is op het beoordelingsresultaat.
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.

Bij grote samengestelde kunstwerkcomplexen moet daarom vaak maatwerk worden geleverd.

4.6.1.2 Havendammen en voorlanden

Bij de faalmechanismen *overslag en/of overloop* en *sterkte en/of stabiliteit puntconstructies* spelen golven een belangrijke rol in de beoordeling. Veel kunstwerken zijn gelegen in havens die zijn afgeschermd met havendammen van het buitenwater. De hydraulische belastingen worden echter doorgaans gegeven voor locaties buiten deze havendammen. Op deze locaties zijn de golven groter dan direct voor het kunstwerk. Hierdoor worden de berekende faalkansen voor de faalmechanismen *overslag en/of overloop* en *sterkte en/of stabiliteit puntconstructies* overschat als geen rekening wordt gehouden met de golfreductie binnen de havendammen.

Wanneer met de buitengaatste hydraulische belastingen al (verwaarloosbaar) kleine faalkansen worden bepaald, is een uitgebreidere analyse uiteraard niet nodig. Als echter blijkt dat de bijdrage aan de overstromingskans hierdoor substantieel is, dan is het wenselijk een vertaalslag te maken van de hydraulische belastingen op de uitvoerlocatie naar de hydraulische belastingen ter plaatse van het kunstwerk. Dit kan worden gedaan door bijvoorbeeld een voorland of damconstructie in de schematisering mee te nemen. Hoe deze geschematiseerd kunnen worden is beschreven in de handleiding voor het gebruik van de dam- en voorlandmodule ter bepaling van de hydraulische condities bij de dijkteen [10] ten behoeve van de probabilistische berekening inclusief hydraulische belastingen.

4.6.2 Schematisering faalmechanisme *overslag en/of overloop*

- ##### 4.6.2.1 Schematisering geometrie voor bepaling optredend *overslag-/overloop*debiet
- Als gevolg van *overslag en/of overloop* kan water over het gesloten kunstwerk naar binnen stromen. In hoeverre het *overslag-/overloop*debiet leidt tot overstromingsgevolgen is afhankelijk van de sterkte van de bodembescherming direct achter het kunstwerk, van het keermiddel van en het kombergend vermogen van het achterliggende watersysteem.

De bepaling van het optredende overslag-/overloopdebiet vindt in Riskeer en Hydra-NL plaats aan de hand van de formules uit de *Leidraad Kunstwerken* [9] voor een verticale wand¹⁴. In het *Achtergrondrapport Modellerings optredend overslag-/overloopdebiet* [2] is de achtergrondinformatie omtrent dit model opgenomen. De benodigde hydraulische belastingen worden door het programma zelf gegenereerd. Dat betekent dat ter bepaling van het optredende overslag-/overloopdebiet alleen de hoogte van het hoogwater kerende keermiddel en/of de constructie ingevoerd hoeft te worden.

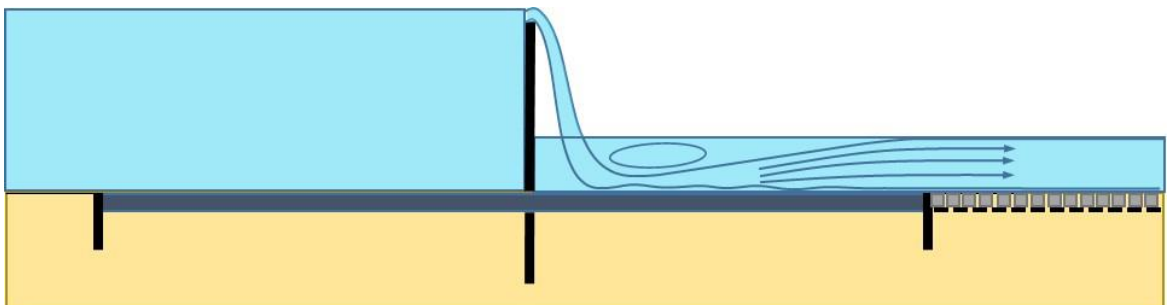
Het optredende overslag-/overloopdebiet dat wordt berekend betreft het debiet per strekkende meter. Door vermenigvuldiging met de breedte van de keermiddelen wordt het totale debiet berekend dat door overslag en/of overloop over het kunstwerk stroomt. De breedte van de keermiddelen en/of de constructie moet daarom ook worden ingevoerd in Riskeer.

4.6.2.2

Schematisering bodembescherming voor bepaling kritiek debiet

Het overslag-/overloopdebiet leidt tot een (mogelijk pulserende) straal over de keermiddelen en/of de constructie van het kunstwerk. Deze straal kan tot twee verschillende belastingsituaties leiden voor de bodembescherming:

1. De bodembescherming wordt belast door een overtrekkende stroming. Dit komt het meeste voor en betreft de situatie dat de overstortende straal in een waterlaag achter de keermiddelen terecht komt. Als dit plaats vindt binnen de contouren van het betonwerk van de constructie, dan spreidt de overstortende straal zich over het natte oppervlak van het kunstwerk. Ter plaatse van de bodembescherming wordt de bodembescherming dan alsnog belast door een overtrekkende stroming met een overwegend 2-dimensionaal stromingsbeeld (zie Figuur 14).



Figuur 14: Overstortende straal binnen contouren betonwerk

2. De overstortende straal belast rechtstreeks de bodembescherming. Dit is het geval als de bodembescherming zich direct achter de keermiddelen bevindt, bijvoorbeeld bij een coupure.

Om de sterkte van de bodembescherming in Riskeer te kunnen invoeren dient er enige pre-processing plaats te vinden buiten Riskeer om. Ten eerste moet de kritieke stroomsnelheid van de bodembescherming bepaald worden. Vervolgens moet dit met behulp van de waterdiepte en de breedte van de bodembescherming

¹⁴ Met behulp van de EurOtop-manual [4] kan in sommige gevallen een nauwkeurigere inschatting van het optredende overslag-/overloopdebiet worden bepaald. Hiervoor wordt verwezen naar paragraaf 5.2.4

worden omgerekend naar een kritiek debiet. De belastingsituatie bepaalt welke modellen gebruikt kunnen worden om de kritieke stroomsnelheid te bepalen. Voor meer achtergrondinformatie hieromtrent wordt verwezen naar het *Achtergrondrapport Bepaling kritiek overslag-/overloop-/instroomdebiet bij kunstwerken* [3].

Belastingsituatie 1: overtrekkende stroming

Voor de eerste belastingsituatie, belasting door overtrekkende stroming, geldt het volgende. Vanuit de kritieke stroomsnelheid van de bodembescherming kan met behulp van de waterdiepte aan de binnenzijde een kritiek debiet per strekkende meter worden bepaald. Om vanuit dit kritieke debiet per strekkende meter een kritiek overslag-/overloopdebiet te kunnen bepalen moet een stroomvoerende breedte worden meegegeven aan het model. De volgende stappen worden genomen om het model te voeden met de diverse parameters.

- 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 in de achterliggende watergang.
 - Overgangen tussen verschillende typen bodembeschermingen.

Elke locatie kan een andere kritieke stroomsnelheid bezitten (als de bodembescherming ten minste varieert over de lengte ervan) en/of een andere stroomvoerende breedte.
- II. *Bepaal per locatie de kritieke stroomsnelheid u_c [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. Bij de bepaling van deze kritieke stroomsnelheid kan gebruik worden gemaakt van de diverse modellen (Izbash, Shields, Pilarczyk) die beschikbaar zijn om de sterkte van bodembeschermingen te bepalen. Voor meer informatie wordt verwezen naar het *Achtergrondrapport Bepaling kritiek overslag-/overloop-/instroomdebiet bij kunstwerken* [3].
- III. *Bepaal per locatie het kritieke debiet per strekkende meter (q_c [m³/s/m]).*
Door vermenigvuldiging van de kritieke stroomsnelheid met de waterdiepte aan de binnenzijde wordt het kritieke debiet voor de bodembescherming gevonden. Zie ook paragraaf 2.2.1 van de gebruikershandleiding Riskeer – Faalmechanismen kunstwerken [31].
- IV. *Bepaal per locatie de stroomvoerende breedte van de bodembescherming (B_{sv} [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 overslag-/overloopdebiet achter de keermiddelen en eventuele vleugelwanden. Zie ook paragraaf 2.2.2 van de gebruikershandleiding

Riskeer – Faalmechanismen kunstwerken [31].

V. *Bepaal per locatie het totale kritieke debiet (Q_c [m^3/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. Uiteindelijk dient de q_c die hoort bij de kleinste waarde van het totale kritieke debiet gehanteerd te worden.

Belastingsituatie 2: overstortende straal

In geval van een overstortende straal volgt het kritieke debiet per strekkende meter direct uit hetzij richtgetallen dan wel uit een eenvoudig model. Hiervoor wordt verwezen naar hoofdstuk 3 van het *Achtergrondrapport Bepaling kritiek overslag-/overloop-/instroomdebiet bij kunstwerken* [3]. Dit debiet wordt dan vermenigvuldigd met de stroomvoerende breedte van de bodembescherming; deze is vaak hetzelfde als de breedte van de keermiddelen.

Vervolgprocessen

Nadat de bodembescherming is geërodeerd moeten vervolgprocessen optreden voordat het kunstwerk faalt. Erosie van de bodem moet eerst leiden tot ontgrondingskuilen, welke tot bij of onder de constructie van het kunstwerk reiken en waardoor uiteindelijk de stabiliteit van het kunstwerk dusdanig verzwakt dat deze bezwijkt. Dit vervolgproces kan in Riskeer worden ingebracht middels de parameter 'kans bezwijken kunstwerk als gevolg van erosie bodem'. Handvatten voor toepassing van deze parameter worden in paragraaf 2.3 van de gebruikershandleiding Riskeer – Faalmechanismen kunstwerken [31] gegeven. In veel gevallen is het eerste grove uitgangspunt in de *generieke analyse* dat erosie van de bodem ook betekent dat het kunstwerk instabiel wordt en bezwijkt. Aanscherpingen vinden in principe bij de *analyse van de dominante faalpaden* plaats.

4.6.2.3 Schematisering toelaatbaar overslag-/overloopdebiet i.v.m. dynamische effecten op het keermiddel

Bij grote overslag-/overloopdebieten kan niet worden uitgesloten dat andere fenomenen gaan optreden zoals het trillen van de deuren door bijvoorbeeld insluiting van lucht onder de overstortende straal. Hierover is nog erg weinig bekend. Schematisering is niet aan de orde; de beoordeling wordt uitgevoerd op basis van een inschatting van het toelaatbaar overslag-/overloopdebiet (zie ook paragraaf 2.5 van de gebruikershandleiding Riskeer – Faalmechanismen kunstwerken [31]).

4.6.2.4 Schematisering komberging

De komberging bestaat uit een maximaal volume te bergen water dat gebaseerd is op het kombergende oppervlak en de maximaal toelaatbare peilstijging. Deze peilstijging is dan gerelateerd aan een binnenwaterstand die leidt tot substantiële schaden en/of slachtoffers.

Het volume water dat de kom instroomt is afhankelijk van het verloop van de hoogwatergolf in de tijd. Dit verloop bepaalt het tijdsverloop van het verval (en dus ook het tijdsverloop van het debiet) gedurende het hoogwater.

Het kombergend volume wordt gemodelleerd door waarden op te geven voor het kombergend oppervlak (A_{kom} [m^2]) en de kritieke peilstijging in het

kombergingsgebied (Δh_{kom} [m]). Voor het instromend volume moet de duur van de hoge waterstanden door rivierafvoer, meerpeil en/of storm (t_s [uur]) geschematiseerd worden. 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 kritieke peilstijging kunnen direct worden verkregen uit de gegevensinzameling (zie paragraaf 4.4.5). Met betrekking tot schematisering van de situatie wordt verwezen naar de specifieke parameterbeschrijving in paragraaf 2.4 van de gebruikershandleiding Riskeer – Faalmechanismen kunstwerken [31].

Overigens kan voor het faalmechanisme *overslag en/of overloop* de komberging vaak op voorhand als zijnde niet maatgevend bestempeld worden. Dit is bijvoorbeeld het geval als achter het kunstwerk een watergang aanwezig is waarvan de boorden op of beneden het omringende maaiveld liggen met daarachter een groot, vlak gebied. In dat geval treedt bij het overschrijden van de boorden in eerste instantie wateroverlast op, maar zijn significante (overstromings)gevolgen pas te verwachten bij een zeer aanzienlijk instromend watervolume. De kans op overschrijding van het kombergend vermogen (een dusdanige instroming dat significante gevolgen optreden) is in dat geval relatief klein, bezwijken van het keermiddel als gevolg van dynamische effecten of bezwijken van de bodembescherming is dan doorgaans maatgevend.

Als het kombergend vermogen niet maatgevend is dan kan dit gemodelleerd worden door voor het kombergend vermogen hele grote waarden in te voeren die niet direct kwantitatief hoeven te worden onderbouwd¹⁵. Voor de andere deelfaalmechanismen kan gewerkt te worden met parameterwaarden die de sterkte realistisch beschrijven. Middels de analyse van de illustratiepunten dient achteraf geverifieerd te worden of de komberging inderdaad niet maatgevend is ten opzichte van de bodembescherming / sterkte keermiddel.

4.6.3 Schematisering faalmechanisme niet sluiten

Een faalpad voor het faalmechanisme *niet sluiten* kent een aantal knopen (zie Figuur 6 in paragraaf 2.4) die voor elk kunstwerk kan worden geschematiseerd. Afhankelijk van het gebruik en de samenstelling van een kunstwerk kan het nodig zijn om meerdere keersituaties uit te werken en die vervolgens te combineren. Om dit verder toe te lichten volgen hieronder een paar voorbeelden:

- VB 1. Een coupure met één doorgang, welke alleen gesloten wordt als het buitenwater hoger dreigt te komen dan de drempel van de coupure, kent één keersituatie. Bij hoogwater moet het gesloten worden om instroming te voorkomen. Voor de coupure dienen de diverse knopen van het faalpad van een waarde (kans) te worden voorzien voor deze ene keersituatie.
- VB 2. Een uitwateringssluis met meerdere doorgangen die niet altijd allemaal gelijktijdig geopend zijn om water uit te laten. De kans dat dit kunstwerk niet is gesloten bij een hoogwater is mede afhankelijk van het aantal openingen dat voorafgaand aan dit hoogwater geopend staan. Vervolgens zijn ook de gevolgen (instromend debiet/volume) afhankelijk van het aantal openingen dat uiteindelijk niet gesloten kan worden. Voor elke vorm van niet-sluiten kan dan een faalpadanalyse worden uitgevoerd. De faalkansen voor deze keersituaties moeten vervolgens worden opgeteld. Optellen is mogelijk omdat elk faalpad een ander faalpad uitsluit

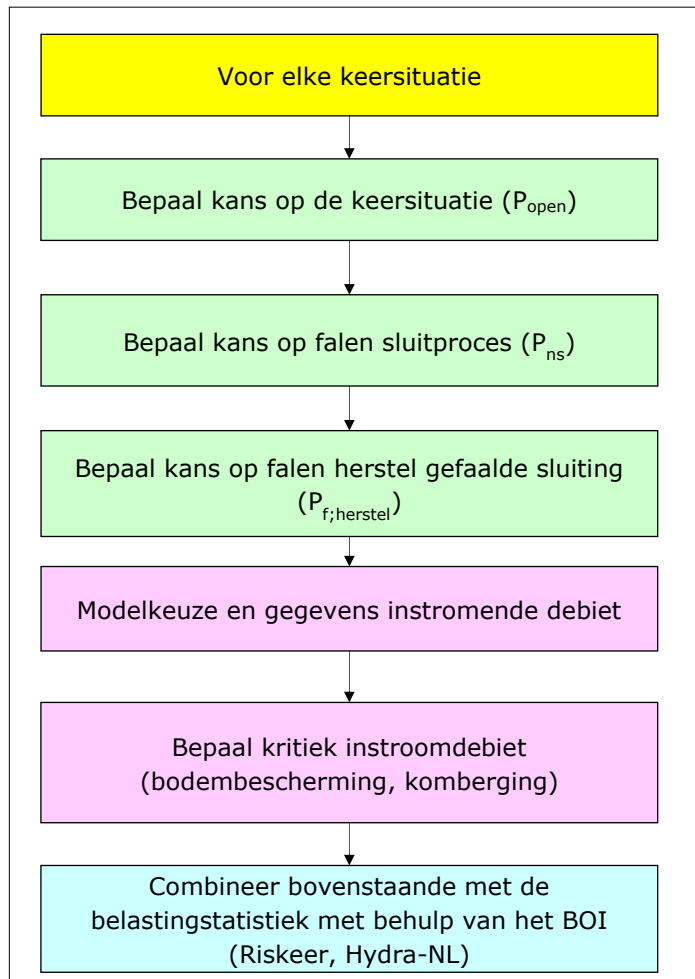
¹⁵ Aanbevolen wordt in dit geval voor de kritieke peilverhoging 10 m aan te houden en voor het kombergend oppervlak 10^{10} m². Zodoende kan direct in de invoerdata bases worden gezien waar komberging als niet maatgevend is aangenomen.

- VB 3. Een kunstwerkcomplex bestaande uit meerdere kunstwerken, bijvoorbeeld een keersluis in combinatie met schutsluizen. De kans dat falen als gevolg van niet sluiten optreedt bij een dergelijk complex is onder andere afhankelijk van de kans dat een van de kunstwerken open staat en de gevolgen die dan optreden. Er zijn dan verschillende keersituaties te onderscheiden.
- VB 4. Een keersluis is voorzien van twee keermiddelen, echter is de kerende hoogte van beide keermiddelen niet gelijk. Er zijn dan vier keersituaties; geen van de keermiddelen is gesloten, alleen het hoogste keermiddel is gesloten (en de laagste dus niet), alleen het laagste keermiddel is gesloten (en het hoogste dus niet) en beide zijn gesloten. De kansen behorende bij deze keersituaties zijn dan afhankelijk van de combinatie van de optredende buitenwaterstand, de betrouwbaarheden van de keermiddelen en hun onderlinge afhankelijkheid.

De uitwerking van de knopen kan plaatsvinden volgens het schema weergegeven in Figuur 15. In principe kunnen de stappen per keersituatie worden doorlopen. In de laatste stap is aangegeven dat gebruik gemaakt kan worden van Riskeer om een faalkans te bepalen voor de betreffende keersituatie. Riskeer legt dan de relatie met de kansen op uiteenlopende hydraulische belastingen. Het kan ook zonder Riskeer, in dat geval moet door een gebruiker handmatig deze relatie worden gelegd (bijv. gebruikmakend van Hydra-NL).

Vanaf Riskeer versie 22.1.1 is het mogelijk om per faalmechanisme met scenario's te werken. Hierdoor kunnen verschillende keersituaties met elkaar gecombineerd worden in Riskeer, zoals nodig bij één van de vier bovenstaande voorbeelden. De kansen op de scenario's kunnen voor de diverse faalmechanismen worden bepaald aan de hand van de groene stappen in Figuur 15. Onder het faalmechanisme *niet sluiten* in Riskeer wordt dan alleen de situatie beschouwd waarin de sluiting volledig gefaald is en het kunstwerk dus onterecht open staat.

Opgemerkt wordt dat keersituaties (faalpaden) ook buiten Riskeer om kunnen worden gecombineerd. Bij elkaar uitsluitende scenario's komt dit combineren neer op het sommeren van de faalkansen per faalpad. In Bijlage D is een voorbeeld van een spuisluis met meerdere openingen opgenomen in een getijdengebied. In het voorbeeld is handmatig de relatie gelegd tussen de ongewenste gevolgen en de kansen op hydraulische belasting en dus niet met Riskeer.



Figuur 15: Schematiseringsschema niet sluiten

In de figuur geeft de groene kleur aan dat het om knopen gaat met betrekking tot het sluitproces. Deze bepalen dus de kans op de keerscenario's. Paars wijst op modelering van de gevolgen bij niet sluiten, terwijl blauw aangeeft dat de analyse (berekening) voor een van de keersituaties kan worden uitgevoerd.

In het vervolg van deze paragraaf wordt kort ingegaan op de stappen (knopen) in bovenstaand schema. Een uitgebreide uitwerking van de knopen binnen het instrumentarium van het BOI (parameters van de diverse modellen) wordt in de gebruikershandleiding Riskeer – Faalmechanismen kunstwerken [31] gegeven.

Algemeen geldt dat bij het schematiseren onderstaand principe van toepassing is:
Bij de schematiseringen wordt aanbevolen om van grof naar fijn te werken. Voor niet sluiten leidt dit ertoe dat de focus in eerste instantie dient te liggen bij het sluitproces. Voor de gevolgen kan wellicht begonnen worden met aan komberging en sterkte bodembescherming geen of nauwelijks sterkte toe te kennen. Wanneer met dit conservatieve uitgangspunt al (verwaarloosbaar) kleine faalkansen worden bepaald, is een uitgebreidere analyse niet nodig.

4.6.3.1 Schematisering situatie voorafgaand aan sluiting

Het schematiseren van de keersituatie voorafgaand aan een hoogwatersluiting vereist in eerste instantie een goed inzicht in de kans dat een sluiting nodig is

wanneer een hoogwater zich aandient. In het instrumentarium van het BOI wordt dit voor het faalmechanisme *niet sluiten* vaak aangegeven met de kans op openstaan (P_{open}). De keuze om dit binnen het instrumentarium van het BOI te schematiseren middels één parameter is in de praktijk niet altijd voor de hand liggend of praktisch. Zo is naast het reguliere gebruik van het kunstwerk ook het aantal en inzet van doorstroomopeningen en de hersteltijd van een gefaalde sluiting vanuit regulier gebruik van belang. Een kunstwerk dat bijvoorbeeld altijd 's nachts hoogwater kerend is gesloten, staat slechts de helft van de tijd geopend. En een kunstwerk waarvan de keermiddelen storingsgevoelig zijn heeft een relatief grote kans om open te staan bij een naderend hoogwater als gevolg van keermiddelen die zijn gefaald of in reparatie zijn.

De faalkans voor *niet sluiten* wordt bepaald als faalkans per jaar, omdat dit ook aansluit bij de eisen in de Omgevingswet. Voor kunstwerken die onder invloed zijn van getijdewerking kan het echter nodig zijn om in eerste instantie de faalkansen per getijdeperiode te bepalen en deze vervolgens op te bossen naar faalkansen per jaar. Bij de kans op open staan wordt dan in eerste instantie gekeken naar de kans op open staan per getij, welke kan worden achterhaald uit de gebruiksgegevens van het kunstwerk.

4.6.3.2 Schematisering sluitproces

Voor het schematiseren van de kans op falen van de sluiting is het van groot belang dat het aantal, type en de aandrijving van de keermiddelen bekend is en de prestaties hiervan binnen het reguliere en het hoogwater kerende proces. Via gebruiksgegevens (bijvoorbeeld storingsgegevens of gegevens van de beheerder) kan dit worden achterhaald. De kans op niet sluiten wordt vaak aangegeven met P_{ns} .

Het bepalen van de faalkans van sluiting kan afhankelijk van de situatie en de beschikbare gegevens op meerdere wijzen worden bepaald. Voor keermiddelen die vanuit de primaire functie van het kunstwerk zeer regelmatig worden gebruikt en ook als hoogwater kerend keermiddel fungeren, is het mogelijk om met kentallen (al dan niet gebaseerd op daadwerkelijk aanwezige storingsgegevens) een inschatting te maken van de kans op niet sluiten (bijvoorbeeld terugslagkleppen bij een gemaal). Voor keermiddelen die alleen gebruikt worden ten behoeve van hoogwaterkeren spelen zaken als alarmering, mobilisatie, bediening en technisch falen (vier aspecten van de sluiting) een rol en kunnen kansen worden ingeschat met bijvoorbeeld de scoretabellen ([27] en [28]). Deze zijn vooral geschikt voor 'reguliere' kunstwerken. Voor grote of relatief complexe kunstwerken (stormvloedkeringen, grotere keersluizen) kan het nodig zijn om een foutenboomanalyse van de keermiddelen op te zetten met betrekking tot de betrouwbaarheid van de sluiting. Ook hierbij gaat het dan om de genoemde vier aspecten van de sluiting.

Bij het bepalen van de kans op niet sluiten van keermiddelen is het altijd van belang om niet alleen de faaloorzaak van de individuele keermiddelen te beschouwen, maar ook oog te hebben voor gemeenschappelijke faaloorzaken zoals bijvoorbeeld het uitvallen van de stroom.

4.6.3.3 Schematisering herstel van een gefaalde sluiting

Nadat een reguliere hoogwatersluiting is gefaald, is in sommige 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 het plaatsen van 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 obstakels. 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, waar dat dan wordt vertaald naar een kans dat het herstel faalt ($P_{f,herstel}$). Een kans gelijk aan 1 per gebeurtenis geeft dus aan dat herstel altijd faalt, terwijl een kans gelijk aan 0,1 per gebeurtenis aangeeft dat er nog 10% kans is dat het kunstwerk ondanks de gefaalde sluiting toch nog hoogwater kerend kan worden gemaakt. Belangrijke aspecten die hierbij een rol spelen zijn:

- Beschikbare tijd tussen sluitpeil en waterstand waarbij daadwerkelijk een groot debiet aan water door een niet gesloten opening naar binnen kan stromen.
- Afmetingen en bereikbaarheid van de doorstroomopeningen/kunstwerk.
- Oorzaak falen van reguliere sluiting.
- De condities (bijv. harde wind) waaronder de herstelactie zou moeten worden uitgevoerd.

Het mee kunnen nemen van een eventueel herstel van de reguliere sluiting vereist dat de beheerder vooraf heeft nagedacht over mogelijke alternatieve sluitingen of het herstellen van een gefaalde sluiting en dat dit ook reëel wordt geacht. Afwegingen hieromtrent dienen vastgelegd te zijn, zodat er ook sprake is van een onderbouwing van de kans op herstel.

Omdat het voor het herstel van gefaalde reguliere sluitingen vaak gaat om alternatieve sluitings- of handelingswijze is het afleiden van een faalkans hiervoor veelal moeilijk. Aanbevolen wordt dan ook om eerder een conservatieve globale kans te bepalen dan een uitgebreide faalboomanalyse hierop los te laten.

Vanuit het principe van grof naar fijn kan het efficiënt zijn om in eerste instantie geen rekening te houden met een kans op herstel. Indien nodig kan dan later nog worden onderzocht of en in welke mate een nadere bepaling van de kans op herstel uitzicht geeft op een ander beoordelingsresultaat.

4.6.3.4 Schematisering gevolgen na falen sluiting

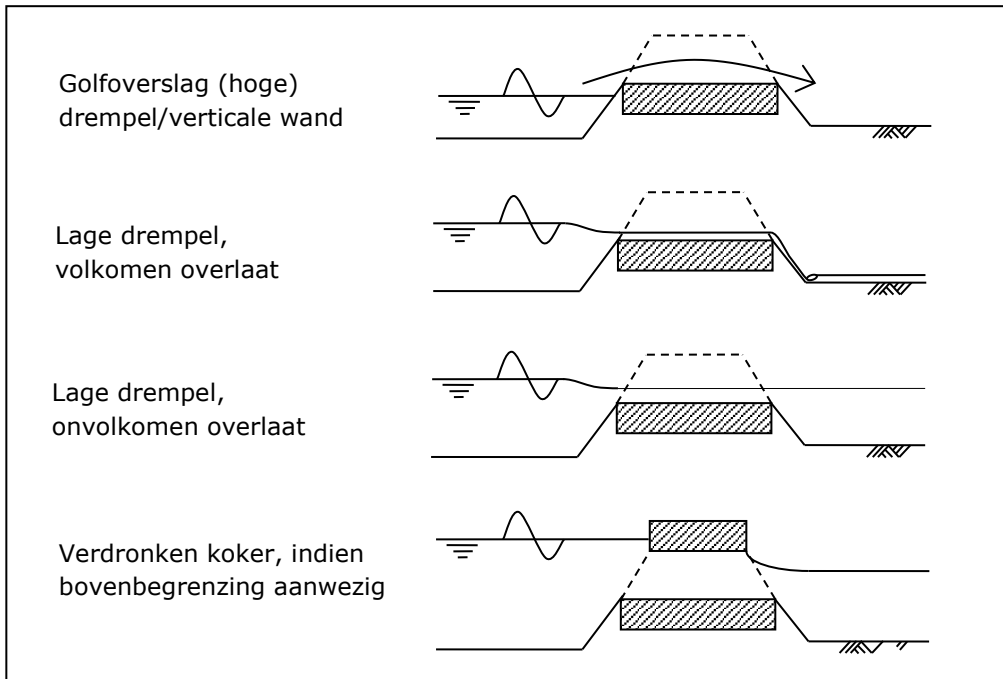
Nadat de hoogwatersluiting van het kunstwerk gefaald is, stroomt er bij een voldoende hoge buitenwaterstand water door het kunstwerk ongewenst naar binnen. Dit instromende debiet is afhankelijk van het verloop, de ligging en de afmetingen van de doorstroomopening(en) die niet gesloten is/zijn. Daarnaast 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 kombegend vermogen van het achterliggende watersysteem.

Modelleren instromend debiet

Het instromende debiet wordt met name bepaalde door het aantal, de afmetingen en de vormgeving van de doorstroomopeningen. Er zijn in principe drie modellen waarmee het instromende debiet kan worden beschreven. De namen van deze modellen corresponderen met de situatie waarop ze van toepassing zijn:

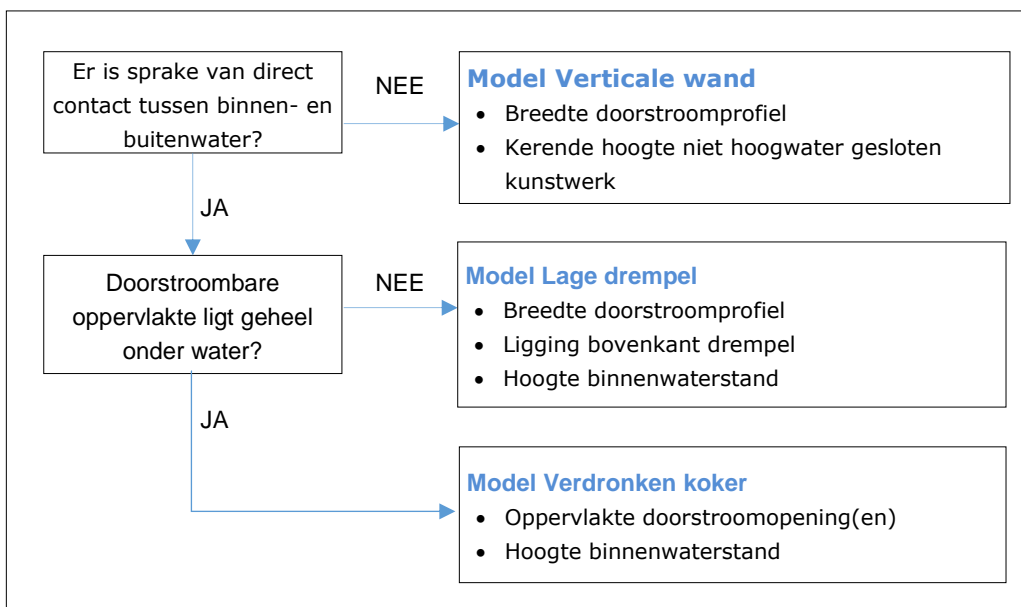
1. Hoge drempel/verticale wand.
2. Lage drempel.
3. Verdronken koker.

In Figuur 16 is een schematische weergave van de diverse instroommodellen 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 is afhankelijk van de hoogte van de waterstand aan de binnenzijde van het kunstwerk en de drempelhoogte van het kunstwerk.



Figuur 16: Instroommodellen in geval van niet sluiten

Het model kan worden gekozen met behulp van het schema in Figuur 17. In deze figuur is tevens aangegeven welke gegevens dan verzameld moeten worden.



Figuur 17: Keuzeschema instroommodel

Het kan voorkomen dat een model dat aan het begin van de analyse wordt gekozen, later moet worden vervangen door een ander model, waarna vervolgens de analyse nogmaals moet worden 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 over de modellen die in Riskeer zijn gebruikt om het instromende debiet te bepalen wordt verwezen naar paragraaf 3.3.7 van de gebruikershandleiding Riskeer – Faalmechanismen kunstwerken [31] en de technische Leidraad voor *betrouwbaarheid sluiting* [8].

Keuze schematisering gevolgen

Welk instromend debiet/volume uiteindelijk leidt 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.
- B. De sterkte van de bodembescherming is maatgevend.
- C. Op voorhand is het maatgevende deelfaalmechanisme niet bekend.

Ad A: kombergend vermogen is maatgevend

Indien sprake is van een (zeer) kleine kom en het aantoonbaar is 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.

Deze situatie kan praktisch gezien gemodelleerd worden in Riskeer door voor de binnenwaterstand direct het kritieke binnenpeil (peil waarboven grote gevolgen ontstaan in het achterland als gevolg van bijvoorbeeld het bezwijken van regionale keringen) aan te houden. Voor het kritieke debiet kan vervolgens een zeer kleine waarde worden ingevuld, zodat bij een kleine instroming boven dit kritieke binnenpeil sprake is van bezwijken volgens Riskeer.

Ad B: 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 zo lang de buitenwaterstand stijgt en daarmee ook de optredende stroomsnelheid ter plaatse van de bodembescherming.

De bovenstaande situatie kan in Riskeer gemodelleerd worden door voor het kombergend vermogen grote (fictieve) waarden aan te houden zodat dit niet maatgevend wordt. Voor de bodembescherming dient gewerkt te worden met sterkteparameters die de sterkte van de bodembescherming realistisch beschrijven. Bij elke analyse van de uitkomsten moet geverifieerd worden of de komberging inderdaad niet maatgevend zal zijn gelet op de buitenwaterstand waarbij de bodembescherming bezwijkt.

Ad C: maatgevende deelfaalmecanisme is op voorhand niet bekend

Indien op voorhand niet te onderbouwen is wat het maatgevende deelfaalmecanisme zal zijn, dient voor zowel de komberging als de sterkte van de bodembescherming de normale schematisering te worden doorlopen met realistische waarden voor de parameters in de betreffende modellen.

Schematisering bodembescherming

Om de sterkte van de bodembescherming te bepalen zijn een aantal stappen nodig. Hiervoor wordt verwezen naar de stappen die zijn beschreven in paragraaf 4.6.2.2. Hoewel deze stappen zijn beschreven voor het model 'verticale wand', zijn ze ook toepasbaar op het model voor de lage drempel en de verdrongen koker.

Schematisering komberging

Hiervoor wordt verwezen naar paragraaf 4.6.2.4.

4.6.4***Schematisering faalmecanisme sterkte en/of stabiliteit puntconstructies***

De schematisering van de faalmecanismen binnen het toetspoot *sterkte en/of stabiliteit puntconstructies* beslaat feitelijk een tweetal stappen. De eerste stap is het afwegen welke constructieonderdelen in combinatie met welke faalwijze worden geanalyseerd en de tweede stap heeft betrekking op uitvoering van de daadwerkelijke beoordeling. Aangezien voor de diverse (deel)faalmecanismen die onder *sterkte en/of stabiliteit puntconstructies* vallen, de stappen van de schematisering niet allemaal gelijk zijn, worden ze apart behandeld. Dit betekent een uitsplitsing naar:

- *Falen door bezwijken waterkerende constructieonderdelen (excl. aanvaren).*
- *Aanvaren.*
- *Falen door instabiliteit constructie en grondlichaam.*

In deze paragraaf wordt met name op procesniveau gekeken hoe een schematisering tot stand komt en welke elementen hierbij een rol spelen. Dat is hier met name geënt op de modellen die in Riskeer aanwezig zijn. Voor de specifieke invulling van de modellen en de bijbehorende parameters wordt verwezen naar hoofdstuk 4 van de gebruikershandleiding Riskeer – Faalmecanismen kunstwerken [31].

4.6.4.1**Falen door bezwijken waterkerende constructieonderdelen (STCO)**

Bij het faalmecanisme *STCO* stroomt een ontoelaatbare hoeveelheid water door het kunstwerk ten gevolge van het bezwijken van waterkerende constructieonderdelen. De eerste paragrafen hebben betrekking op het schematiseren van het deelfaalmecanisme *Bezwijken waterkerende constructieonderdelen* waarbij de constructie wordt belast door verval en golven. De laatste paragraaf beschrijft de vervolgmechanismen benodigd voor het uiteindelijk verkrijgen van een overstroming; falen door instroming en falen herstel.

Het faalmecanisme *Bezwijken waterkerende constructieonderdelen* door verval en golven is nagenoeg altijd gekoppeld aan de sterkte van het keermiddel en de opleggingen die hierbij aanwezig zijn. Andere onderdelen zijn bijvoorbeeld leidingen/kokers (persleidingen van een gemaal) die door de waterkering voeren en niet beweegbare afsluitingen van (delen van de) watervoerende elementen¹⁶.

¹⁶ Bijvoorbeeld een koker die deels door een vaste verhoogde drempel en deels door een keermiddel wordt afgesloten.

Overige constructieonderdelen zoals vleugelwanden en bovenbouw zullen over het algemeen geen dominante bijdragen leveren aan de overstromingskans.

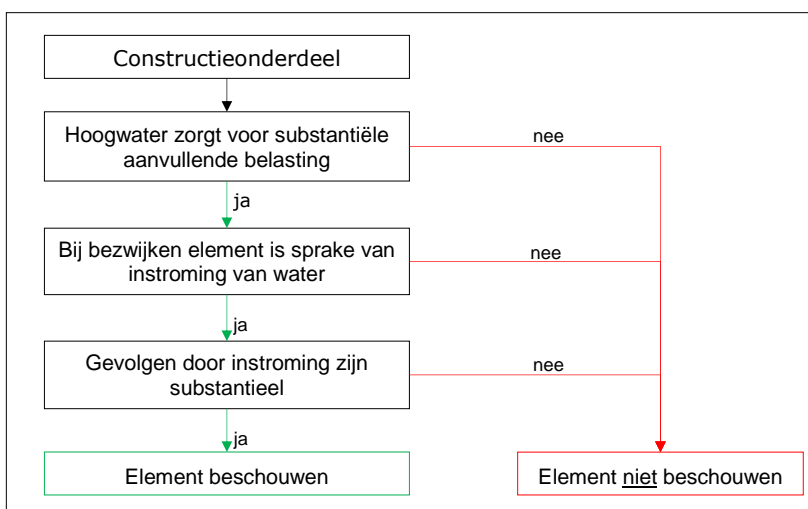
Naast verval- en golfbelastingen kunnen overige belastingen, zie paragraaf 4.3.3, ook van belang zijn. Het beoordelingsinstrumentarium binnen het BOI (Riskeer) voorziet niet in een mogelijke faalkansberekening waarbij de constructie substantieel wordt belast door andere belastingen. Hiervoor kan gebruik worden gemaakt van de Werkwijzer Ontwerpen Waterkerende Kunstwerken (WOWK) [12].

NB: in de rest van deze paragraaf wordt enkel ingegaan op de hoogwaterbelastingssituatie (verval- en golfbelasting).

Bepalen van belang zijnde faalwijzen/onderdelen

In principe zou een faalkans van alle waterkerende (sub-)onderdelen berekend kunnen worden. Het afwegen van faalwijzen/(sub-)onderdelen (van liggers tot complete keermiddelen) is bedoeld om enerzijds de inspanning van de beoordeling zoveel mogelijk te richten op datgene wat daadwerkelijk van belang is (dominant is voor de overstromingskans) en anderzijds te voorkomen dat onderdelen over het hoofd worden gezien. Onderbouwing voor het al dan niet nader beschouwen van mechanismen/onderdelen dient altijd plaats te vinden.

Bij de afweging van de faalwijzen moet gekeken worden naar welke onderdelen van de constructie aanvullend worden belast als gevolg van een hoogwater en daarnaast van belang zijn voor de waterkerende functie van het object. Deze waterkerende functie dient hierbij te worden beschouwd vanuit het gedachtengoed van de overstromingskansbenadering. Alleen als sprake is van substantiële gevolgen (gevolgen behorende bij een overstroming) door het bezwijken van het beschouwde onderdeel, wordt dit nader beschouwd. Een voorbeeld van bovenstaande is een schutsluisje dat uitgerust is met omloopriolen. De schuiven van de omloopriolen worden bij een hoogwater aanvullend belast, maar het is nog maar de vraag of het bezwijken van een schuif zou leiden tot overstromingsgevolgen in het achterland. Ook in de WOWK wordt in hoofdstuk 7 ingegaan op constructief bezwijken van onderdelen en overstromingsgevolgen.



Figuur 18: Schema ten behoeve van eerste selectie uit te werken mechanismen/onderdelen bij het faalmechanisme STCO

Het schema in Figuur 18 geeft de te nemen stappen weer om een eerste selectie van te analyseren waterkerende constructieonderdelen te maken. Hieronder wordt nog kort op deze stappen ingegaan:

1. Hoogwater zorgt voor substantiële aanvullende belasting.
Uitgangspunt bij het beoordelen is dat een hoogwater niet mag leiden tot een overstrooming met substantiële schade of slachtoffers als gevolg. Indien een hoogwater niet of nauwelijks leidt tot aanvullende belastingen op een constructieonderdeel, is een beoordeling in het kader van de Omgevingswet niet nodig. Op grond van de bewezen sterkte van de kering mag dan immers worden verondersteld dat de hoogwaterbelasting gekeerd kan worden.

Voorbeeld 1

Een situatie met een persleiding van een gemaal door een dijk. In geval van hoogwater kan bij een niet gesloten keermiddel aan de buitenzijde de waterdruk in de leiding oplopen. Deze lage-drukleidingen zijn echter ten aanzien van interne druk vaak behoorlijk overgedimensioneerd, omdat met name zettingen dominant zijn voor de sterkte van lage drukleidingen.
Een hoge buitenwaterstand kan daarnaast ook zorgen voor hogere grondwaterstanden in de dijk. Dit leidt tot grotere opwaartse krachten, maar ook de bovenbelasting op de leiding wordt groter. Kijkend naar de globale krachtswerking leidt dit tot ontlasting van de leiding. De aanvullende opwaartse druk is per saldo immers groter dan de aanvullende bovenbelasting. Lokaal gezien (op het niveau van dwarsdoorsnede) wordt de leiding wel aanvullend belast, maar de impact hiervan is relatief meestal zeer beperkt.

2. Bij bezwijken element is sprake van instroming van water
Indien een constructieonderdeel bezwijkt onder invloed van een hoogwater maar dit leidt niet tot substantiële instroming van water doordat zich nog andere 'obstakels' (keermiddelen) zich in de watergang bevinden, dan hoeft het constructieonderdeel niet beoordeeld te worden ten aanzien van de sterkte. Aanvullende randvoorwaarde daarbij is dat er geen sprake mag zijn van een domino-effect dat kan leiden tot overstrooming. Dit houdt in dat bezwijken van het beschouwde constructieonderdeel leidt tot dusdanige belastingen op een ander waterkerend constructieonderdeel dat dit bezwijkt en alsnog leidt tot een overstrooming met substantiële schade of slachtoffers als gevolg.

Voorbeeld 2

Het bezwijken van een stuw in de koker van een uitwateringssluis door een hoogwaterbelasting, zal niet leiden tot overstrooming wanneer de waterkerende functie van de uitwateringssluis gewaarborgd is door andere specifieke keermiddelen.

3. Gevolgen door instroming zijn substantieel.
Indien de gevolgen na het bezwijken van het constructieonderdeel en vervolgens ontstaan van een doorstroomopening substantieel zijn, draagt het constructieonderdeel direct bij aan de overstroomingskans. Als de gevolgen niet substantieel zijn, dan hoeft het constructieonderdeel niet beoordeeld te worden.

Voorbeeld 3

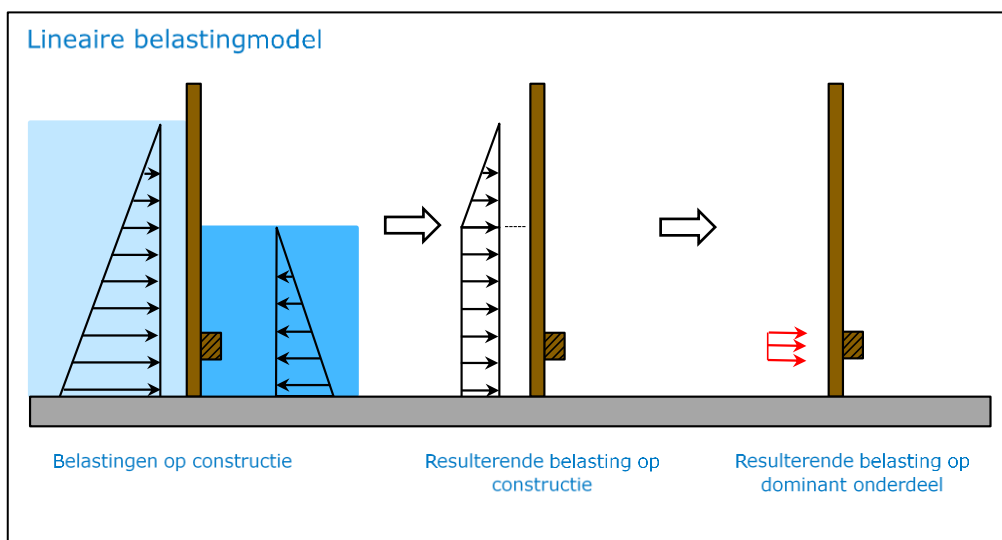
De afsluiters van de omloopriolen van een schutsluis. Indien de afmetingen van de omloopriolen klein zijn, zal instroming tijdens hoogwater niet direct leiden tot substantiële gevolgen. De kans dat de bodembescherming achter de schutsluis erodeert en er vervolgens dusdanige ontgrondingskuilen ontstaan dat de sluis als geheel bezwijkt en er een bres in de waterkering ontstaat zal ook verwaarloosbaar klein zijn.

Keuze belastingmodel

Constructieve schematiseringen en het bepalen van de sterkte van constructies, zijnde het bepalen van de maximaal toelaatbare belasting, kan plaatsvinden aan de hand van de geldende regels en formules uit de constructiemechanica. Het niveau van de schematisering van een constructie-onderdeel kan variëren van zeer eenvoudig (sterktebepaling met behulp van "vergeet-me-nietjes") tot uitermate complex (inzet van Eindige Elementenprogramma's). Voor de wijze waarop dit uitgevoerd wordt, wordt verwezen naar de gangbare praktijk van de constructeur en de documentatie die hiervoor beschikbaar is.

Bij gebruik van Riskeer is het belangrijk om bij de schematisering stil te staan bij de parameter die in Riskeer wordt gebruikt als invoer voor de probabilistische analyse op kunstwerkniveau. Riskeer vraagt namelijk om de sterkte van een constructieonderdeel uitgedrukt in een maximaal toelaatbare belasting¹⁷. Afhankelijk van het van toepassing zijnde belastingmodel (lineair dan wel kwadratisch, zie onder) dient deze druk te worden opgegeven per vierkante meter dan wel per strekkende meter breedte van het constructieonderdeel.

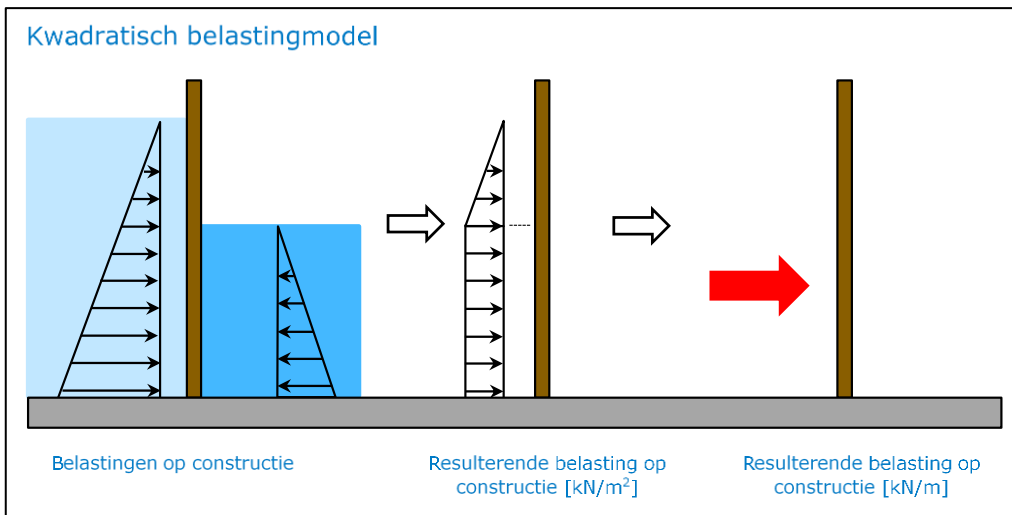
Of het lineaire of het kwadratische belastingmodel moet worden gekozen, wordt met name bepaald door het onderdeel dat wordt beschouwd. Indien bijvoorbeeld een regel van een keermiddel wordt beschouwd, zoals in Figuur 19 weergegeven, dan kan de sterkte van deze regel het beste wordt uitgedrukt in een toelaatbare druk in kN/m^2 .



Figuur 19: Lineair belastingmodel bij schematisering van sterkte waterkerende constructieonderdelen

¹⁷ Belasting kan hier worden gezien als een resulterende waterdruk als gevolg van verval en golven.

Wanneer echter de totale sterkte van het keermiddel wordt beschouwd, dan is een resulterende kracht per strekkende meter breedte van het keermiddel van belang. In Figuur 20 bestaat de resulterende belasting uit een deel met een (over de verticaal) constante druk en een deel met een verlopende druk. In dat geval wordt gebruik gemaakt van het kwadratische model en dus wordt de toelaatbare druk ingevoerd als kN/m^2 .



Figuur 20: Kwadratisch belastingmodel bij schematisering van sterkte waterkerende constructieonderdelen

Van grof naar fijn

Het wordt aanbevolen om zoveel mogelijk van grof naar fijn te werken. Dit kan worden gerealiseerd door zowel in de constructieve schematisering als de afleiding van de gemiddelde waarde van de sterkte te starten met behulp van eenvoudige, grove regels. Hierbij is het van belang dat er voldoende inzicht in de constructie en de afdracht van belastingen is. Wanneer dit inzicht aanwezig is, zijn voor de meeste constructies eenvoudige schematiseringen te maken.

Voorbeeld 4

Bij de analyse van een middels één dwarsdrager horizontaal verstijfd keermiddel is óf de horizontale verstijver (dwarsdrager) óf de beplating maatgevend voor de sterkte. Een eerste analyse is mogelijk door verstijver en beplating los van elkaar te zien en hiervoor apart de sterkte te bepalen op basis van elastisch rekenen. Hierbij kan de verstijver als tweezijdig vrij opgelegde staaf worden benaderd. Voor de beplating kan in eerste instantie gekozen worden voor een twee of vierzijdig opgelegde plaat. Dit levert een (zeer) conservatieve benadering van de sterkte op. Indien dit niet leidt tot een verwaarloosbaar kleine faalkans kan een volgende stap worden gemaakt door uit te gaan van een samengesteld profiel (verstijver en beplating) en hiervan de sterkte-eigenschappen te bepalen. Een daaropvolgende stap kan zijn om middels een Eindige Elementen model de sterkte af te leiden. Bij alle stappen is aandacht voor de stabiliteit (bijvoorbeeld kipstabiliteit) van elementen benodigd.

Het toepassen van eenvoudige schematiseringen leidt bij constructief bezwijken vaak al tot voldoende kleine faalkansen omdat waterkerende constructieonderdelen

in de meeste gevallen behoorlijk overgedimensioneerd zijn. Voor bepaalde keermiddelen geldt dat andere factoren de sterkte bepalen. Voorbeelden hiervan zijn (standaard) terugslagkleppen en schuiven, waarbij vervormingsaspecten als gevolg van eisen aan het lekpercentage¹⁸ vaak maatgevend zijn.

Bepalen dominante element

Van de in de eerste stap gekozen selectie constructie(onderdelen) dient een analyse te worden gemaakt. Aan de hand van de uitkomsten hiervan wordt uiteindelijk het dominante element ingevoerd in het instrumentarium. Het dominante element is dat constructie(onderdeel) dat leidt tot de grootste faalkansbijdrage voor het faalmechanisme *Falen door bezwijken waterkerende constructieonderdelen*.

Falen door instroming en falen herstel sluiting

Nadat een waterkerend element is bezweken en water ongewenst naar binnenstroomt kan falen van de waterkering optreden door (1) het bezwijken van de bodembescherming leidende tot het bezwijken van het kunstwerk dan wel (2) het overschrijden van het kombergend vermogen (zie ook de foutenboom in Figuur 7). Algemeen geldt dat het kombergingscriterium leidend is in geval van een relatief kleine kom en robuuste bodembescherming. Het bodembeschermingscriterium is vaak leidend in geval van een grote kom.

Om de bijbehorende modellen te kunnen gebruiken zijn ook invoergegevens nodig. Voor de bodembescherming geldt dat bekend dient te zijn bij welke stroomsnelheid deze gaat eroderen, terwijl voor de komberging gegevens omtrent de beschikbare waterberging in het achterland voorhanden moeten zijn.

Aangezien de gegevens voor de schematisering voor deze deelfaalmechanismen lang niet altijd direct voorhanden zijn, wordt aanbevolen om ook hier van grof naar fijn te werken. Zo vindt het bezwijken van constructie(onderdelen) nagenoeg altijd plaats bij erg hoge waterstanden, waardoor het verstandig kan zijn om in eerste instantie voor dit faalmechanisme¹⁹ de schematiseringsinspanning voor de bodembescherming te beperken. Immers: bij bezwijken van de constructie zal door het grote verval doorgaans direct uitspoeling van de bodembescherming plaatsvinden, zodat op voorhand al duidelijk is dat dit nagenoeg geen aanvullende sterkte oplevert. Een en ander kan worden vormgegeven door een zeer lage sterkte toe te kennen aan de bodembescherming.

Voor de komberging geldt dat een eerste uitgangspunt kan zijn om uit te gaan van geen komberging. Dit is conservatief. Een volgende stap is het globaal inschatten van de komberging. Eventueel benodigde vervolgstappen kunnen bestaan uit het steeds nauwkeuriger bepalen van de beschikbare komberging en de modellering daarvan in het model waarmee de beoordeling wordt uitgevoerd.

4.6.4.2 Falen ten gevolge van aanvaring

Falen (van onderdelen) van de constructie als gevolg van een aanvaring maakt onderdeel uit van het faalmechanisme *Falen door bezwijken waterkerende constructieonderdelen (STCO)*. De belastingsituatie verschilt echter dusdanig van het bezwijken als gevolg van verval- en golfbelasting, dat het in deze paragraaf apart beschreven wordt.

¹⁸ Eisen ten aanzien van lekpercentages kunnen zijn gebaseerd op bijvoorbeeld het voorkomen van instroming van zout water, vuil water of wateroverlast. Hierbij speelt de overstromingsgedachte dus geen rol.

¹⁹ Voor andere faalmechanismen (bijvoorbeeld betrouwbaarheid sluiting en hoogte) kan het wel van belang zijn om meer te weten te komen over de bodembescherming en de actuele conditie hiervan.

Falen als gevolg van aanvaren beperkt zich tot het aanvaren door reguliere scheepvaart van constructieonderdelen, welke direct verantwoordelijk zijn voor het waterkerende vermogen van het kunstwerk. In de praktijk gaat het hier om het aanvaren van keermiddelen die op het moment van aanvaring gesloten zijn. Het aanvaren van onderdelen van de waterkering als gevolg van een losgeslagen schip valt ook onder dit faalmechanisme. De kans hierop is in veruit de meeste gevallen dusdanig klein dat deze kan worden beschouwd als verwaarloosbaar. Immers, tijdens hoogwater wordt de scheepvaart doorgaans stilgelegd. Daarnaast betreffen de kunstwerken relatief kleine elementen in de waterkering, wat de kans op aanvaren van een kunstwerk door een losgeslagen schip ook aanzienlijk reduceert.

Afweging of aanvaren beoordeeld moet worden

Het beschouwen van het deelfaalmechanisme aanvaren is vrijwel alleen relevant voor constructies waar scheepvaart kan passeren en waarbij sprake is van momenten waarop slechts één enkele kering aanwezig is. Dit impliceert dat het vooral van toepassing is op keersluizen en schutsluizen.

In Riskeer is specifiek een model opgenomen dat gebruikt kan worden om de faalkans als gevolg van aanvaren bij schutsluizen te bepalen. In de praktijk is echter gebleken dat het bepalen van een realistische faalkans met dit model niet goed mogelijk is. Over het algemeen is er te weinig data om de diverse knopen in het faalpad realistisch te kunnen kwantificeren en vraagt het realistisch modeleren van de sterkte een onevenredig grote inspanning. In de praktijk blijkt dat men hier vaak aan voorbij gaat, wat resulteert in zeer conservatieve faalkansschattingen. In het Programma Rijkskeringen (PRK) is daarom uitgebreid gekeken naar de relevantie van aanvaren voor het overstromingsrisico. Hierin is het hele faalpad beschouwd. Op basis hiervan is geconcludeerd dat het overstromingsrisico als gevolg van constructief falen na een aanvaring voor het areaal van RWS verwaarloosbaar is, tenzij sprake is van een situatie waarbij de volgende punten van toepassing zijn:

Schutsluis:

- Groot dagelijks verval
- Geen aanvaarbescherming aanwezig
- Sluiting van het tweede keermiddel op stroming is niet mogelijk²⁰
- Zware schepen (CEMT V en groter)

Keersluis:

- Enkel keermiddel
- Grote doorvaartbreedte
- Beperkte komberging

In het BOI wordt aangesloten bij deze pragmatische werkwijze. Nadrukkelijk wordt hierbij opgemerkt dat het overstromingsrisico als gevolg van aanvaren niet 'klakkeloos' kan worden weggeschreven. In de beoordeling moet hier altijd expliciet aandacht aan besteed worden. Aspecten als aanwezigheid aanvaarbeveiliging,

²⁰ Met name de waaierdeur, de sectordeur, de segmentdeur en (in iets mindere mate) de hefdeur kunnen op stroming worden gesloten.

- Waaierdeuren zijn inherent stromingsbestendig en kunnen bij grote stroomsnelheden zeer gecontroleerd worden gesloten, evenals sector- en segmentdeuren met horizontale of verticale as.
- Hefdeuren kunnen, gebruik makend van hun eigen gewicht, en al dan niet gebruikmakend van vergrendeling op afdrukinrichtingen, bij grote stroomsnelheden gesloten worden. Wel bestaat de kans op ongecontroleerde verplaatsingen door onderdruk onder de deur als gevolg van de grote stroomsnelheden als de deur bijna dicht is. De doorstroomopening is dan echter al grotendeels gesloten waardoor het instromend debiet dan al sterk is verkleind.

Rol-, punt- en draaideuren zijn niet of nauwelijks geschikt om onder stroming te sluiten. Bij deze deurtypen moet er dus vanuit worden gegaan dat sluiting na aanvaring niet mogelijk is.

stremming scheepvaart bij extreme waterstanden, scheepsbreedte in relatie tot sluisbreedte, grootte van de passerende scheepvaart en mate waarin het tweede keermiddel bij instroming kan worden gesloten zijn aspecten die in een dergelijke beschouwing betrokken kunnen worden.

Een hulpmiddel hierbij kan zijn om voor die objecten waarbij het aanvaarrisico vanuit de praktijk toch relevant wordt geacht, met alle betrokkenen een (kwalitatieve) risicosessie te houden waarbij in ieder geval beheerder, assetmanager, vaarwegbeheerder en vaarweggebruikers betrokken zijn. Op basis van beschikbare informatie wordt vanuit de diverse aspecten naar aanvaren van het object gekeken. Het is hierbij uiteraard waardevol als ervaringscijfers omtrent aanvaren van het object bekend zijn (vastgelegd, dan wel in de hoofden van betrokkenen). Daarnaast gaat het bij aanvaren naast technische aspecten van de vaarweg (zicht, windgevoeligheid, beelden op radar) en de kering ook om menselijke aspecten van de bedienaar en de schipper. Ook speelt de onderhoudstoestand van de schepen een rol. Juist dit soort praktische zaken kunnen in meer of mindere maten worden nagelopen tijdens een risicosessie.

Een en ander is nader verwoord en onderbouwd in de (interne) RWS memo *Werkwijze overstromingsrisico als gevolg van aanvaren - Omgang aanvaren van gesloten waterkerende kunstwerken binnen het Programma Rijkskering* [32].

Wanneer één van de hiervoor aangegeven situaties voor een schutsluis dan wel keersluis wel van toepassing is, dient een stapje dieper op aanvaren in te worden gegaan. Dat impliceert niet dat er dan direct een kwantitatieve faalkans voor aanvaren moet worden berekend. In eerste instantie wordt een nadere analyse gemaakt van het lokaal specifieke faalpad dat leidt tot een overstroming. Indien dit faalpad aanleiding geeft tot het maken van uitgebreide analyses dan kan dat vervolgens nader worden uitgewerkt.

Schematisering kans van aanvaren

Indien toch besloten wordt dat het nodig is om een faalkans te bepalen met betrekking tot aanvaren, dient een schematisering voor aanvaren te worden opgesteld. Hiertoe worden een aantal gegevens verzameld over de scheepvaart, de schutsluis en de keermiddelen. Voor de beschrijving van het model van het faalmechanisme in het instrumentarium van BOI (Riskeer) wordt verwezen naar paragraaf 4.5 van de gebruikershandleiding Riskeer – Faalmechanismen kunstwerken [31].

Om de energie van een botsend schip te kunnen bepalen zijn gegevens omtrent verdelingen van vaarsnelheid, afmetingen en massa (beladen en onbeladen) van de passerende vloot benodigd. Ook gegevens omtrent aantallen schepen zijn benodigd, zodat de kans op aanvaren bepaald kan worden (zie paragraaf 4.6 van de gebruikershandleiding Riskeer – Faalmechanismen kunstwerken [31]).

Voor de schutsluis zelf geldt dat gegevens omtrent breedte en diepte van de doorvaartopening van belang zijn. Dit kan in relatie tot de afmetingen van de passerende schepen van belang zijn om een inschatting van vaarsnelheden te maken. Tevens kan het leiden tot aanscherping van de kans op aanvaren, omdat bij een schip dat maar net in de kolk past (bijvoorbeeld 10-20 cm speling in de breedte), het zeer onwaarschijnlijk is dat deze het gesloten keermiddel aanvaart of dat dit met een substantiële snelheid plaatsvindt. Ten eerste vindt de nadering van de sluis al met lage snelheid plaats, opdat bij het binnenvaren niet al direct een botsing met de sluis optreedt. Daarnaast zal het schip door het opstuwende water in de kolk worden afgeremd.

Schematisering van de opneembare energie van het keermiddel

De aanvaarbestedigheid van deuren is in het algemeen, in aflopende volgorde van aanvaarbestedigheid: roldeuren-hefdeuren-draaideuren-puntdeuren-waaierdeuren.

Achtergrond:

- Roldeuren zijn in het algemeen (maar niet altijd) zwaar, stijf, voorzien van 2-zijdige beplating en afdragend op lijnopleggingen en veelal bestemd tot het keren van verval in 2 richtingen.
- Hefdeuren zijn (een stuk) lichter, maar ook stijf en veelal op lijnopleggingen afdragend.
- Hetzelfde geldt voor draaideuren, die echter slechts in 1 richting op lijnopleggingen kunnen afdragen; voor negatief keren zijn bij draaideuren grendels nodig (meestal puntopleggingen).
- Puntdeuren en waaierdeuren zijn tegen de puntstand in redelijk resp. matig aanvaringsbestendig, waaierdeuren minder dan puntdeuren omdat ze in tegenstelling tot veel puntdeuren, vaste draaipunten hebben. Met de puntstand mee kunnen zowel punt- als waaierdeuren open gedrukt worden, maar dat is dan in het algemeen tegen het verval. Dat is veelal minder schadelijk.

Bedacht moet worden dat de robuustere deurtypen veelal op de bredere sluisen voorkomen. Daar zijn de aanvaarbestedingen ook groter, en is dus de 'winst' van de robuustere deur hard nodig.

De opneembare energie van het keermiddel kan op verschillende niveaus worden bepaald. Dit varieert van grof naar fijn. Met behulp van mechanicaregels kan bepaald worden welke energie (eenheid: kNm) er nodig is om (een aantal) sterktebepalende onderdelen van het keermiddel plastisch²¹ te laten bezwijken.

De opneembare energie wordt vervolgens vergeleken met de vrijkomende energie die door het keermiddel moet worden opgenomen na een aanvaring. Een grove benadering om de op te nemen aanvaarenergie te bepalen is om het schip onvervormbaar te veronderstellen en alle aanvaarenergie te laten resulteren in vervorming van het keermiddel. Er wordt in deze benadering dus geen aanvaarenergie opgenomen door het schip zelf.

Een scherpe bepaling van de opneembare aanvaarenergie van het keermiddel en de op te nemen aanvaarenergie door het keermiddel kan plaatsvinden door via eindige elementen berekeningen de energieverdeling tussen deur en schip te bepalen en vervolgens van de deur de bezwijkkrachten te bepalen. Dit vergt echter veel deskundigheid en tijd.

Schematisering van de kans op herstel van de sluiting

De kans op herstel van de sluiting is gerelateerd aan het alsnog kunnen sluiten van het eerste keermiddel nadat het gesloten tweede keermiddel uitgevaren is. Dit is afhankelijk van de doorstroomopening die overblijft na het bezwijken van het tweede keermiddel in combinatie met het type eerste keermiddel.

De doorstroomopening die overblijft na het uitvaren van het tweede gesloten keermiddel is afhankelijk van de vraag of het schip tussen de uitgevaren deuren klem blijft zitten of dat het doorschiet de kolk uit. Indien het klem blijft zitten zal de uiteindelijk resulterende doorstroomopening veel kleiner zijn dan wanneer het schip

²¹ In het geval van houten keermiddelen is plasticiteit niet aan de orde, maar kan gebruik worden gemaakt van een elastische benadering, waarbij de partiële factoren navenant behandeld mogen worden en waarbij uitgegaan mag worden van een zeer korte belastingduur.

na aanvaring de kolk uitschiet. Daardoor is bij een klemzittend schip de kans groter dat het eerste keermiddel alsnog gesloten kan worden, omdat de stroomsnelheden bij het eerste keermiddel kleiner zullen zijn.

4.6.4.3 Falen door instabiliteit constructie en grondlichaam (STCG)

Het faalmechanisme *Falen door instabiliteit constructie en grondlichaam* heeft betrekking op het falen van het kunstwerk als geheel als gevolg van verval- en golfbelastingen, waardoor direct een dusdanige opening in de waterkering ontstaat dat er sprake is van een onbeheersbare situatie. Mechanismen die hiertoe kunnen leiden hebben betrekking op de stabiliteit van het kunstwerk.

Afweging welke mechanismen/onderdelen beoordeeld moeten worden

Het afwegen van mechanismen is bedoeld om de beoordelingsinspanning zoveel mogelijk te richten op datgene wat daadwerkelijk van belang is (dominant is voor de overstromingskans) maar tevens te voorkomen dat onderdelen over het hoofd worden gezien. Onderbouwing voor het al dan niet nader beschouwen van mechanismen dient altijd plaats te vinden, waarbij het in veel gevallen zeer wel mogelijk is om dit op kwalitatieve gronden te doen.

Instabiliteit van de constructie betreft de volgende mogelijke mechanismen:

- Horizontale instabiliteit. Hierbij schuift het gehele kunstwerk uit de waterkering als gevolg van vervalbelastingen.
- Verticale instabiliteit. Als gevolg van de optredende belastingen bezwijkt de fundatie van het kunstwerk, hetgeen kan leiden tot opdrijven van (delen van) het kunstwerk. Het geheel bezwijken van een kunstwerk als gevolg van verticale instabiliteit is niet waarschijnlijk. Onderdelen zoals een sluishoofd dat apart gefundeerd is, hebben een grotere kans op bezwijken als gevolg van verticale instabiliteit. Indien bezwijken van een deel van het kunstwerk leidt tot algehele instabiliteit dan moet dit worden beschouwd.
- Kantelinstabiliteit. Als gevolg van de vervalbelastingen ontstaat een dusdanig moment op het kunstwerk dat dit gaat kantelen (roteren om een horizontale as loodrecht op de lengterichting van het kunstwerk). Dit mechanisme heeft ook raakvlakken met verticale instabiliteit.

Voor horizontale stabiliteit zijn de volgende punten van belang:

- Als een kunstwerk is gebouwd op een onderwaterbetonvloer die is opgelegd en ingeklemd met permanente damwanden dan kan ervan worden uitgegaan dat horizontale stabiliteit niet van belang is.
- Als de afmetingen van het door vervalbelasting belaste oppervlak klein zijn in verhouding tot de lengte/fundatie van het kunstwerk in het dijklichaam dan is het zeer onwaarschijnlijk dat het kunstwerk uit de dijk gedrukt zal worden.

Voorbeeld 5

De breedte en hoogte van een als koker uitgevoerde uitwateringssluis zijn vaak veel kleiner dan de lengte van een dergelijk kunstwerk. In dit geval zal horizontale stabiliteit geen dominant mechanisme zijn.

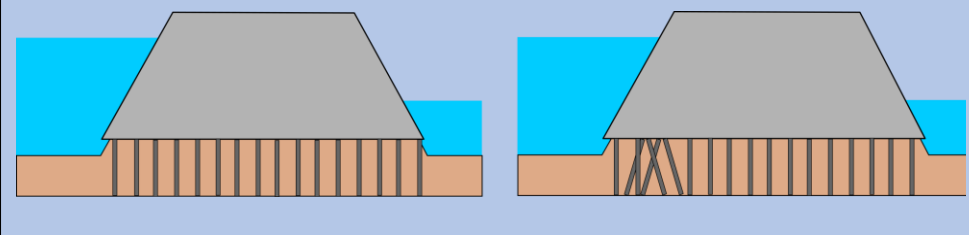


Dit blijft niet beperkt tot kleine constructies door een dijk. Ook bij schutsluizen met aanzienlijke lengte is de kans op horizontaal verschuiven klein.

- In het geval er een palenfundatie (NEN 8700 en NEN 9997) aanwezig is, is het van belang om vast te stellen of het alleen loodpalen of ook schoorpalen betreft. In geval van loodpalen wordt een horizontale belasting in eerste instantie door het omliggende grondlichaam opgenomen en vervolgens gaan de palen via het inklemmingsmoment in de vloer ook nog de nodige weerstand leveren. Bij schoorpalen gaat de horizontale belasting direct de schoorpalen in. Bij de aanwezigheid van schoorpalen is het zeer waarschijnlijk dat deze met name vanuit het aspect van horizontale stabiliteit zijn aangebracht. Het verkrijgen van de ontwerpuitgangspunten (en berekeningen) kan dan zeer behulpzaam zijn. Uiteraard geldt dit ook voor kunstwerken zonder schoorpalen. Daar is echter de kans kleiner dat de horizontale stabiliteit van het kunstwerk specifiek bekeken is.

Voorbeeld 6

Bij een kunstwerk gefundeerd op enkel loodpalen zal bij enige mate van vervorming als eerste de wandwrijving worden gemobiliseerd. Een kleine vervorming leidt nog nauwelijks tot mobilisatie van de inklemmingsmomenten van de palen in de vloer. Daarvoor zijn grotere horizontale vervormingen nodig. Bij schoorpalen gaat de kracht direct naar de schoorpalen toe die als stijf element functioneren.



- Aanwezigheid van damwanden die horizontaal verplaatsen tegengaan. Hierbij kan worden gedacht aan achterloopsheidschermen en vleugelwanden. Ook steunberen kunnen een bijdrage hebben aan de horizontale stabiliteit van een kunstwerk.

Voor verticale stabiliteit zijn de volgende punten van belang:

- Het geheel verticaal bezwijken van een object zal nagenoeg nooit plaatsvinden. Bij verticale stabiliteit is met name het opdrijven van de constructie van belang. Een hoge buitenwaterstand kan leiden tot hogere drukken onder de constructie en daarmee een grotere opdrijvende kracht. Deze opdrijvende kracht zal bij de aanwezigheid van de benodigde weerstand (grond en damwandschermen) verlopen over de lengte van het kunstwerk. Opgemerkt wordt dat opdrijven met name bij aanleg- en onderhoudssituaties een rol speelt en niet zozeer bij hoogwatersituaties. In situaties waarbij dit laatste onzeker is, worden vaak preventieve maatregelen genomen, zoals het opzetten van het kolkpeil bij een schutkolk.
- Verticale stabiliteit is bij geheel gesloten kokers door de dijk niet van belang. Bij een stijgende grondwaterstand in de dijk ontstaat immers niet alleen een

aanvullende opwaartse, maar ook een aanvullende neerwaartse belasting op de koker.

Voor kantelinstabiliteit zijn de volgende punten van belang:

- Kantelinstabiliteit is het gevolg van een verlopende verticale stabiliteit over de constructie. Kantelinstabiliteit kan ontstaan doordat een deel van de constructie zijn verticale stabiliteit verliest als gevolg van opwaartse krachten. Daarnaast kan kantelinstabiliteit van belang zijn bij een door horizontale verval krachten optredend moment op de fundatie, waardoor de constructie aan de ene kant wordt 'opgetild' en aan de andere zijde worden neergedrukt.
- Kantelinstabiliteit is met name van belang bij korte constructies met een groot verval. Bij langere constructies zoals schutsluizen speelt dit veel minder een rol. Door de lengte kunnen de te mobiliseren tegenwerkende momenten veel groter worden. Constructies zoals keersluizen en coupures zijn als gevolg van dit aspect gevoeliger voor kantelstabiliteit dan schutsluizen.
- Kantelinstabiliteit speelt voor kokers door dijklichamen nauwelijks een rol. Ten eerste zal het door het verval gegenereerde kantelmoment relatief beperkt zijn. Daarnaast is de lengte vaak groot ten opzichte van de breedte en hoogte.

Gegevens van de constructie

Zonder basisgegevens zoals afmetingen van het kunstwerk en gegevens omtrent de fundatie is een analyse niet mogelijk. Indien deze niet voorhanden zijn kan getracht worden via veldmetingen hierover het een en ander te verzamelen. Gegevens omtrent de fundatie zijn hiermee echter niet of nauwelijks te achterhalen. In die gevallen wordt het aanbevolen om te bekijken of via een kwalitatieve redenering te onderbouwen is waarom wel of niet naar de stabiliteit moet worden gekeken (substantiële bijdrage aan de faalkans of niet). Als ook dit niet mogelijk is, is geen onderbouwde uitspraak over de sterkte van de fundering te geven en is nader onderzoek nodig.

Gegevens actuele conditie

Het is van belang om bij de analyses rekening te houden met de actuele conditie van het kunstwerk. Deze conditie kan worden vastgesteld middels inspectie en met name (hoogte-) metingen. Zodra uit de metingen blijkt dat het kunstwerk of onderdelen hiervan zettingen hebben ondergaan of er zijn doorgaande scheuren zichtbaar, kan dit een indicatie zijn van een fundatie die (deels) bezweken is. Hiermee dient dan tijdens de analyses rekening te worden gehouden. Een indicatie van een bezweken fundatie behoort altijd nader geanalyseerd te worden, waarbij wordt beschouwd of dit mogelijk leidt tot bezwijken van het kunstwerk onder hoogwater belasting. Indien dit laatste het geval is, leidt dit altijd tot een oordeel waaruit blijkt dat niet wordt voldaan aan de eisen van de ondergrens. Indien het echter slechts om een beperkt gedeelte van het kunstwerk gaat (bijvoorbeeld het binnenhoofd van een schutsluis) kan nader worden geanalyseerd of het bezwijken van het binnenhoofd direct tot een probleem met betrekking tot waterveiligheid leidt. In dat geval is het ook goed mogelijk dat dit met name problemen geeft voor het dagelijks functioneren (beschikbaarheid) maar de kans op een zware overstroming nog steeds klein is.

Overige sterkten

Voor dit faalmechanisme geldt dat het uitgangspunt kan worden gehanteerd dat falen gelijk staat aan vorming van een bres onder hoogwateromstandigheden. Er treedt dan praktisch zeker een onbeheersbare situatie op met een overstroming op met substantiële schade of slachtoffers tot gevolg. Het hoogwatergedreven bezwijken van het kunstwerk kan dus bij goede benadering worden beschouwd als het eindpunt van het faalpad.

4.6.5 *Schematisering faalmechanisme piping bij kunstwerk*

Bij het schematiseren van het faalmechanisme *piping* bij kunstwerk moeten de volgende stappen worden doorlopen om te komen tot schematiseringen van een of meer mogelijk maatgevende kwelwegen rondom het beschouwde kunstwerk. Deze stappen zijn:

1. identificatie van mogelijk maatgevende kwelwegen.
2. geotechnische en geohydrologische schematisering van de ondergrondopbouw onder en naast het kunstwerk.
3. bepaling van maatgevende kwelwegen.
4. analyse van de uitkomsten.

Een uitgebreide beschrijving van de schematisatie van de parameters die horen bij de modellen die in de beoordeling worden gebruikt is in het hierna volgende hoofdstuk opgenomen.

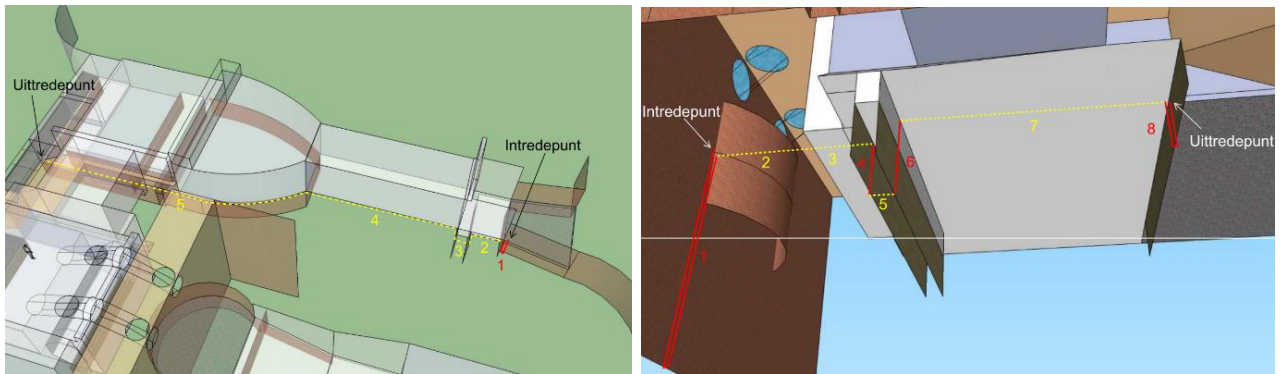
4.6.5.1 Identificatie van mogelijk maatgevende kwelwegen

Een goede identificatie van mogelijk maatgevende kwelwegen onder en naast (of een combinatie van beide) het kunstwerk is de basis voor een goede analyse van de kans op het optreden van piping. De mogelijke kwelwegen worden bepaald door het samenspel van geometrie van het kunstwerk (afmetingen kunstwerk, kwelschermen, fundatiewijze) en de aanwezige bodemopbouw. Op de kwelweganalyse wordt in deze paragraaf nader ingegaan, op de bodemopbouw in paragraaf 4.6.5.2.

Identificatie mogelijk maatgevende kwelwegen

Paragraaf 6.3.2 van het *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen* [23] gaat in op de kwelweganalyse bij kunstwerken. Aanvullend hierop worden in deze paragraaf enkele handreikingen gegeven.

De identificatie van mogelijk maatgevende kwelwegen onder en naast (of een combinatie van beide) het kunstwerk begint bij een 3D-visualisatie van het kunstwerk. Bij een eenvoudig kunstwerk kan deze analyse in drie dimensies nog plaatsvinden met 2-dimensionale hulpmiddelen (langs- en dwarsdoorsneden over het kunstwerk). Voor meer complexe kunstwerken (kunstwerken met meerdere kwelschermen en verschillende bodemniveaus) verdient het aanbeveling gebruik te maken van 3D-hulpmiddelen. Dit kan met geavanceerde tekensystemen, maar ook met eenvoudiger tekenprogramma's is het mogelijk om de contouren en kwelschermen van een kunstwerk binnen een afzienbare tijdsbesteding in 3D vast te leggen. Dit kan enorm helpen bij het vinden van de mogelijk maatgevende combinatie van kwelwegen onder en naast het kunstwerk.

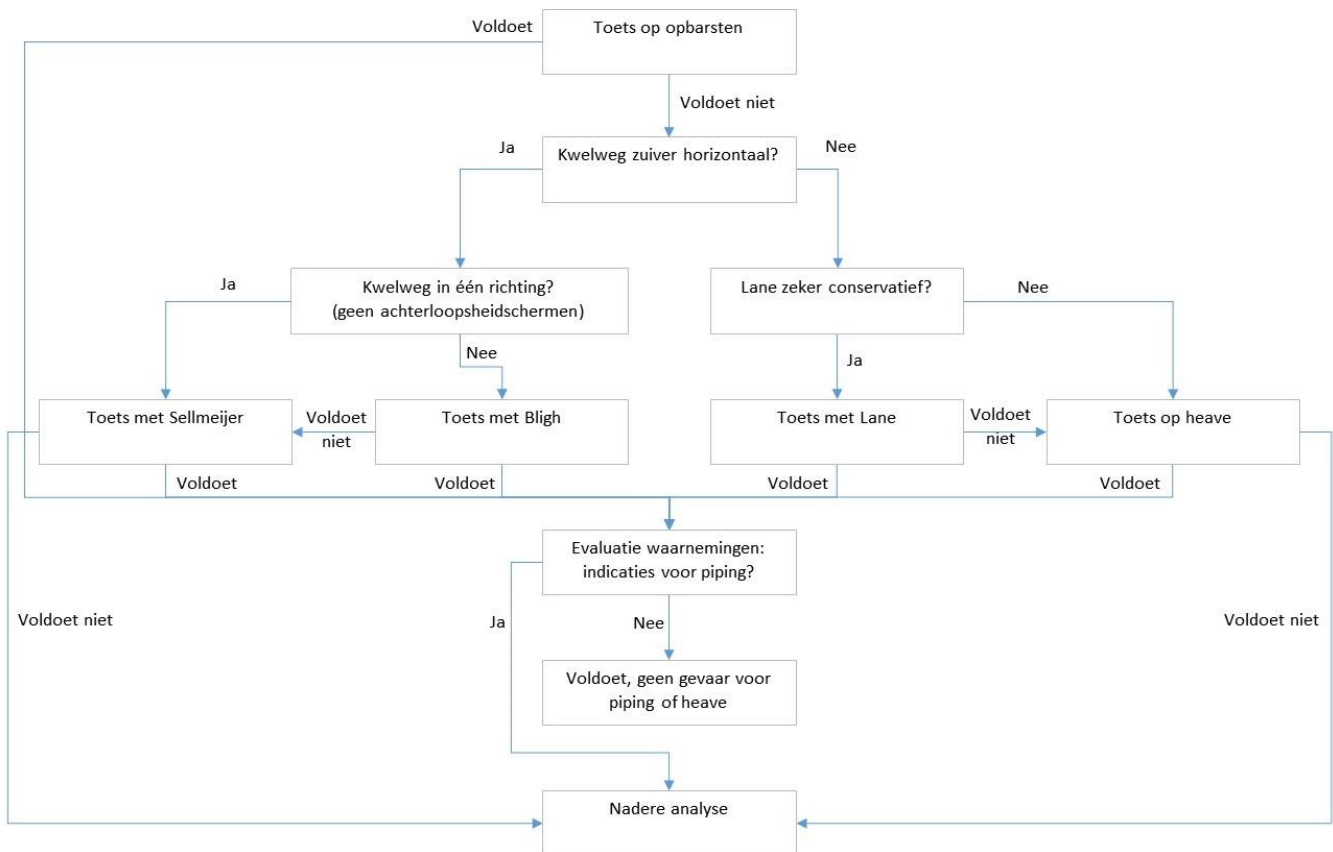


Figuur 21: Een driedimensionale uitwerking van een complex kunstwerk in Google SketchUp ten behoeve van bepaling maatgevende kwelwegen voor onder- en achterloopsheid (bron: Tauw). De linker figuur laat (gele stippellijn) een mogelijke zuiver horizontale kwelweg zien, de rechter figuur toont een kunstwerk van onderaf met hierin een kwelweg met horizontale (gele stippellijn) en verticale (rode lijn) componenten

Tot slot moet men bij het bepalen van de maatgevende kwelweg erop bedacht zijn dat de maatgevende kwelweg soms slechts een deel van een constructie omvat, zoals bijvoorbeeld een sluishoofd (zie *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen* [23] paragraaf 6.3.2).

Stroomschema toepassing beschikbare modellen

Bij het onderkennen van mogelijk maatgevende kwelwegen moet onderscheid worden gemaakt in zuiver horizontale kwelwegen en kwelwegen met een verticale component. De aard van de mogelijke kwelwegen bepaalt namelijk welk model gebruikt kan worden. Dit wordt in Figuur 22 nader uitgewerkt.



Figuur 22: Uitwerking blok Beoordeling uit stappenschema Figuur 9

Van zowel de zuiver horizontale kwelwegen als de kwelwegen met verticale componenten wordt in principe de maatgevende kwelweg gezocht. Voor de zuiver horizontale kwelweg kan het rekenmodel van Sellmeijer of Bligh worden toegepast en voor de andere kwelwegen de rekenregel van Lane of heave. In Figuur 22 is aangegeven wanneer welk model toepasbaar is. Aanbevolen wordt altijd van zowel de zuiver horizontale als de (deels) verticale kwelwegen de maatgevende kwelweg te berekenen.

Bodemverdediging meenemen in kwelweg?

Aan zowel de in- als uitstroomzijde van kunstwerken is nagenoeg altijd een bodemverdediging aanwezig. In de praktijk wordt hier zeer verschillend mee omgegaan bij het schematiseren van kwelwegen. Daarom worden in deze paragraaf enkele richtlijnen gegeven.

Onderscheid kan worden gemaakt tussen een waterdichte of waterdoorlatende bodembescherming en de bodembescherming aan de binnen- of buitenzijde van het kunstwerk. Stampbeton, colloïdaal beton of asfaltmestiek zijn de meest voorkomende waterdichte bodembeschermingen. Bodembeschermingsconstructies die als waterdoorlatend beschouwd worden zijn blokkenmatten, steenasfaltmatten, zetsteen en granulaire filters²².

Indien aan de buitenzijde een waterdichte bodembescherming aanwezig is dan kan de lengte van de bodembescherming worden meegenomen als horizontale kwelweg

²² Noot: Granulaire filters kunnen ook piping tegenaan afhankelijk van hun korreldiameter.

mits de aansluiting met het kunstwerk (vloer, vleugelwanden, onderwater talud) goed is. Hier kan vanuit worden gegaan, tenzij er concrete aanwijzingen zijn die duiden op het tegendeel. Een vloer van stampbeton zal vrijwel altijd zijn opgesloten met een kort kwelscherm om onderspoeling tegen te gaan, zodat doorgaans ook een stukje verticale kwelweglengte kan worden toegevoegd. Een waterdoorlatende bodembescherming aan de buitenzijde wordt uiteraard niet meegenomen in de kwelweglengte.

Een waterdichte bodembescherming aan de binnenzijde van een kunstwerk kan alleen worden meegenomen in de kwelweglengte als opbarsten van deze bodembescherming kan worden uitgesloten. Hiertoe moet de optredende waterdruk onder de bodembescherming berekend worden, waarna moet worden gecontroleerd of opbarsten plaatsvindt. Als er geen opbarsten plaatsvindt dan mag de lengte van de bodembescherming bij de kwelweglengte worden opgeteld. Ook hier moet de aansluiting met het kunstwerk (vloer, vleugelwanden, onderwater talud) uiteraard goed zijn.

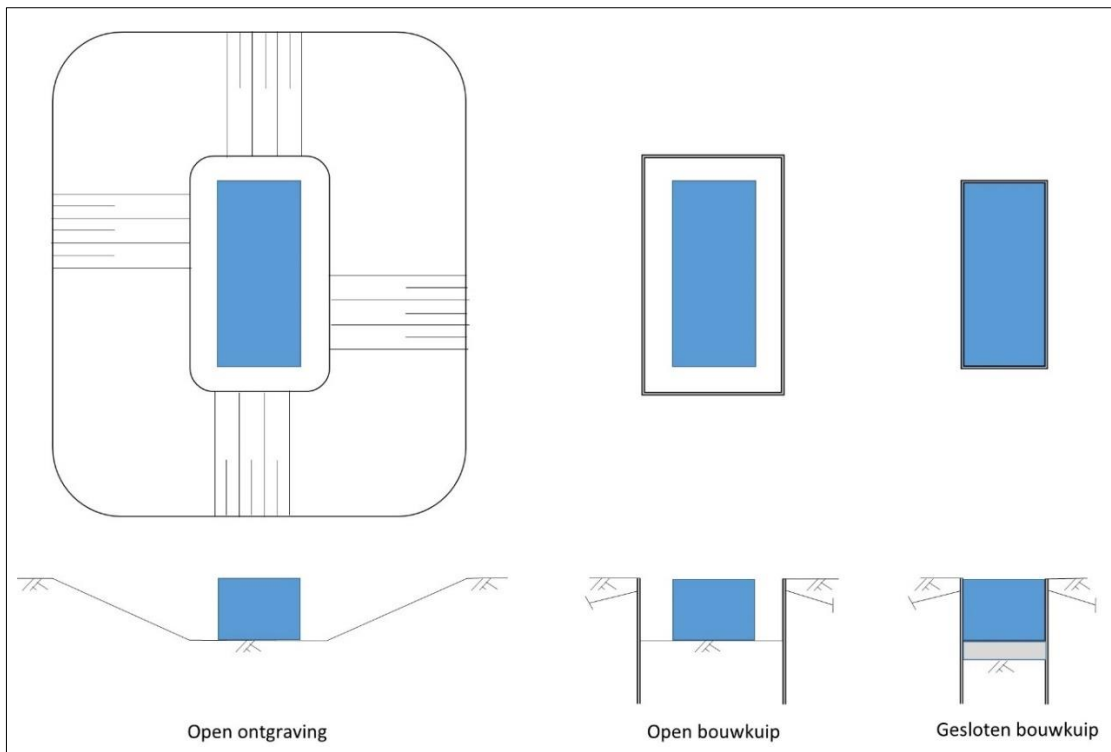
De meeste discussie vindt in de praktijk plaats rondom waterdoorlatende bodembeschermingen aan de binnenzijde die tevens zanddicht worden verondersteld. Deze bodembescherming wordt dan verondersteld als filter te fungeren, waardoor piping niet op kan treden. In de praktijk betekent dit dat er bij het ontwerp eisen moeten worden gesteld aan zanddichtheid en waterdoorlatendheid van de constructie. Daarnaast dient de filterwerking bij het ontwerp over ten minste de beoordelingsperiode aantoonbaar te worden gemaakt. Oftewel: kan aannemelijk worden gemaakt dat het filter niet dichtslibt en waterdoorlatend blijft en hierdoor ook daadwerkelijk als filter blijft functioneren? Voor bodembeschermingsconstructies op een geotextiel is dit lastig. Daarom wordt aanbevolen deze bodembeschermingen in eerste instantie te beschouwen als dichtgeslibd en hierdoor waterdicht en ze mee te nemen als horizontale kwelweg. Daarbij moet dan wel geverifieerd zijn dat opbarsten niet optreedt. Hierbij moet wel voldoende aannemelijk zijn dat deze bodembescherming nog geheel intact is en geen gaten bevat en de aansluiting op het kunstwerk goed is. Alleen voor filterconstructies die volledig granulair zijn opgebouwd is het aannemelijk dat de filterwerking gewaarborgd is.

Waterdoorlatende bodembeschermingen die niet zanddicht zijn worden nooit meegenomen bij de bepaling van de kwelweglengte.

- 4.6.5.2 Geotechnische en geohydrologische schematisatie van de ondergrond
Het vaststellen van de opbouw van de ondergrond onder en naast het kunstwerk is vaak lastig. Dit komt doordat de bodemopbouw lokaal sterk kan variëren, afhankelijk van de bouwwijze van het kunstwerk. Alleen met lokaal grondonderzoek direct naast het kunstwerk kan iets zinnigs worden gezegd over de samenstelling van de bodem onder en naast het kunstwerk.

Bodemopbouw naast het kunstwerk: bouwwijze van invloed

De bouwwijze is van invloed op de bodemopbouw onder en naast het kunstwerk. Daarom is de bouwwijze belangrijk om, zeker bij gebrek aan grondgegevens in de directe nabijheid van het kunstwerk, toch een inschatting (best guess) te kunnen maken van de bodemopbouw. Hierbij wordt onderscheid gemaakt naar een bouwwijze waarbij het kunstwerk is gerealiseerd in een open ontgraving, een open bouwkuip of een gesloten bouwkuip. Daarnaast speelt ook de fundatiewijze een rol. Dit wordt onderstaand nader uitgewerkt.



Figuur 23: Verschillende aanlegwijzen bij kunstwerken

Een kunstwerk dat is gebouwd in een open ontgraving is tot ruim buiten het kunstwerk aangevuld met geroerde grond. Doorgaans wordt direct naast het kunstwerk een strook van enkele meters vrijgehouden als loop- annex werkruimte, waarna de taluds beginnen richting omringend maaiveld en dijklichaam. Na realisatie van het kunstwerk is deze ruimte weer aangevuld, veelal met grond die is vrijgekomen bij de ontgraving van de bouwkuip. Direct naast het kunstwerk is dus altijd sprake van geroerde grond. Sonderingen langs het kunstwerk laten daarom doorgaans tot de diepte van de open ontgraving ook een sterk wisselend beeld zien, waaruit zelden een eenduidige conclusie te trekken is ten aanzien van doorgaande zand- en kleilagen.

Indien een kunstwerk is gerealiseerd in een open bouwkuip, is de aanvulling met geroerde grond veel beperkter. In de regel wordt een strook van één à twee meter naast het kunstwerk vrijgehouden als loop- annex werkruimte. Het is wel belangrijk dat sonderingen en boringen direct naast het kunstwerk zijn genomen. Anders kan het lijken alsof rondom het kunstwerk een homogeen beeld bestaat van doorgaande zand- en kleilagen, terwijl direct naast het kunstwerk (op de plaats waar vaak een belangrijk deel van de kwelweg doorheen loopt) de grondopbouw over de hoogte van het kunstwerk totaal anders kan zijn.

Bij een gesloten bouwkuip wordt vaak gewerkt zonder loop- annex werkruimte naast het kunstwerk om de kosten van de onderwaterbetonvloer te beperken. De damwand van de bouwkuip fungeert dan als verloren bekisting. Alleen in deze situatie mag verwacht worden dat de bodemopbouw onder de dijk doorloopt tot tegen het kunstwerk aan.

Bodemopbouw onder het kunstwerk: fundatiewijze van invloed

De bodemopbouw direct onder het kunstwerk is van grote invloed op de pipingberekening. Het grootste deel van de kwelweg loopt immers vaak door deze laag. Probleem is dat zelden bekend is wat de exacte samenstelling van de laag direct onder het kunstwerk is. Dit kan zand zijn als het kunstwerk direct op een goed draagkrachtige laag staat. Er kan ook sprake zijn van een beperkte grondverbetering, waarbij direct onder het kunstwerk een slecht draagkrachtige laag is afgegraven en is aangevuld met beter materiaal (zand, grind, puin). Indien een onderwaterbetonvloer is toegepast, is vaak hieronder eerst een grindlaag aangebracht. Alleen bij kunstwerken op palen doet het er niet toe wat de precieze grondslag is onder het kunstwerk, omdat de horizontale kwelweglengte sowieso niet wordt meegenomen. Om de exacte samenstelling van de laag direct onder het kunstwerk te weten te komen is doorgaans bewerkelijk en kostbaar onderzoek noodzakelijk, waardoor dit onderzoek in de praktijk vaak achterwege wordt gelaten. In de eerste analyse kan worden uitgegaan van fijn zand direct onder het kunstwerk. Wanneer uit analyse blijkt dat dit een bepalende parameter is voor het eindoordeel, kan in een vervolgstap nadere informatie worden ingewonnen.

Van grof naar fijn werken

Onzekerheden in bodemopbouw kunnen groot zijn. Omdat het bovendien lastig is de bodemopbouw onder en langs het kunstwerk gedetailleerd in beeld te brengen, wordt in de eerste analyse uitgegaan van zand direct onder het kunstwerk en een kleidijk aansluitend aan het kunstwerk waarvan de onderzijde dezelfde diepte heeft als de onderzijde van het kunstwerk. Dit is de meest ongunstige schematisering als het gaat om de mogelijk maatgevende kwelwegen voor onder- en achterloopsheid. Een ondergrens voor de grofheid is om uit te gaan van fijn zand, voor de dikte en doorlatendheid van het zandpakket kan worden aangesloten bij de waarden die in het dijkenstroomprofiel worden gehanteerd voor het betreffende dijkvak. Als de conclusie desondanks is dat de faalkansbijdrage verwaarloosbaar is dan is de beoordeling hiermee klaar; in andere gevallen moeten grondgegevens verzameld worden.

Indien grondgegevens direct naast het kunstwerk beschikbaar zijn, kan worden geprobeerd hiermee een dekkend beeld te verkrijgen van de grondopbouw naast het kunstwerk. In de meeste gevallen ontbreken gegevens van de grondopbouw onder het kunstwerk, conservatief kan worden uitgegaan van fijn zand direct onder het kunstwerk. Vanaf circa 1 meter onder het kunstwerk kan doorgaans worden aangesloten bij de bodemopbouw die is aangetroffen in naastgelegen sonderingen. Aan de hand van de geschematiseerde bodemopbouw zal opnieuw de analyse gedaan moeten worden van mogelijk maatgevende kwelwegen.

Als er geen grondgegevens direct naast het kunstwerk beschikbaar zijn dan moeten deze worden ingewonnen middels nader grondonderzoek. Omdat de afmetingen van kunstwerken vaak beperkt zijn, speelt ruimtelijke variabiliteit in de lengterichting van de waterkering veelal niet of nauwelijks. Het zoeken naar mogelijke 'ongunstigste' dwarsdoorsneden ten aanzien van de ondergrondopbouw is dan onnodig, anders dan bij (lange) dijkstrekkingen. Het inwinnen van gedetailleerde informatie over de opbouw van de ondergrond bij kunstwerken heeft dus veel meer het karakter van lokaal grondonderzoek.

Inwinnen nadere grondgegevens

Als eerste benadering kan worden uitgegaan van ten minste drie sonderingen aan beide zijden van het kunstwerk: ter plaatse van kruin, buiten- en binnenteen. Voor de tussenafstand tussen de sonderingen wordt aanbevolen deze niet groter dan 25 à 50 meter te laten zijn. Voor de diepte van de sonderingen wordt aanbevolen enkele

meters dieper dan het diepste kwelscherm aan te houden en ten minste 3 meter in de watervoerende zandlaag.

Op basis van de sonderingen kunnen de verschillende zandlagen worden onderscheiden. Voor de diepe zandlagen kunnen de parameters worden overgenomen uit de Stochastische Ondergrond Schematisatie (de SOS, zie volgende paragraaf). Daar waar de SOS geen uitsluitsel geeft, wordt geadviseerd van iedere zandlaag die van belang is tenminste drie zevingen te doen om de grofheid van het zand vast te stellen. De monsters dienen aan de bovenzijde van de betreffende zandlaag genomen te worden. Geadviseerd wordt de hiervoor benodigde boringen direct te gebruiken om peilbuizen te plaatsen. Eventueel kunnen de boringen in mindering worden gebracht op het aantal sonderingen.

Gebruik model Stochastische ondergrondschematisatie (SOS)

Voor heel Nederland is een globale Stochastische Ondergrondschematisatie (SOS) opgesteld met daarbij scenariokansen. De globale Stochastische Ondergrondschematisatie bevat informatie over de (veelal onzekere) opbouw van de ondergrond. In het dijkenstroom wordt dit SOS onder andere gebruikt bij het faalmechanisme *piping*. In de handleiding lokaal schematiseren met WTI-SOS [20] wordt in detail beschreven hoe de SOS is opgezet en waaruit de SOS bestaat.

Voor het faalmechanisme *piping bij kunstwerk* wordt de SOS gebruikt waar mogelijk. Voor diepere grondlagen (beneden niveau fundatie kunstwerk) kan de SOS gebruikt worden om de karakteristieke (5% of 95%) waarde van de dikte, doorlatendheid en d_{70} van het watervoerende pakket in te schatten. Voor gebruik van deze waarden in het model van Sellmeijer wordt verwezen naar de handleiding Piping. Ten behoeve van de berekening met de modellen van Bligh en Lane kan de d_{70} worden omgerekend naar de d_{50} met de volgende formule: $d_{50} = d_{70}/1,35$ (*Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen* [23] paragraaf 9.5.2.1). Tevens kan de SOS gebruikt worden om scenario's omtrent de ligging van cohesieve lagen tot aan het maaiveld te bepalen, althans voor zover de grond rondom het kunstwerk niet geroerd is.

Voor de grondlagen boven het fundatieniveau van het kunstwerk is de SOS naar verwachting niet goed toepasbaar. Hier is vaak sprake is van geroerde grond onder en naast het kunstwerk. Hierover bevat de SOS geen informatie. De beoordeling van het faalmechanisme *piping* bij kunstwerk kan daarom niet anders dan met lokale ondergrondinformatie uitgevoerd worden.

Omgaan met onzekerheden in bodemopbouw

Indien de beoordeling met een eerste grove ondergrondschematisatie geen bevredigend resultaat oplevert dan moet de beschikbare informatie over de ondergrond nader bekeken worden. De informatie kan afkomstig zijn uit lokale grondonderzoeken en uit de SOS (zie vorige paragraaf). Deze informatie leidt zelden tot een eenduidig beeld van de bodemopbouw rondom het kunstwerk. Dit betekent dat meerdere scenario's aangaande de bodemopbouw rondom het kunstwerk mogelijk zijn.

Ieder scenario aangaande de bodemopbouw heeft zijn eigen kans van voorkomen en brengt zijn eigen veiligheid tegen piping met zich mee. De kans op een scenario dient door de beoordelaar ingeschat te worden op basis van de beschikbare informatie. De onzekerheid omtrent welk scenario in werkelijkheid aanwezig is kan worden afgedekt door de toepassing van een schematiseringsfactor indien het model van Sellmeijer wordt toegepast. Voor de afleiding van deze

schematiseringsfactor wordt verwezen naar paragraaf 3.4 van *TR Grondmechanisch Schematiseren bij Dijken* [24].

Een dergelijke schematiseringsanalyse is nog niet uitgewerkt voor de modellen van Bligh en Lane. Het is aan de beoordelaar om aan te tonen dat ongunstige schematiseringen die leiden tot een oordeel 'faalkansbijdrage niet verwaarloosbaar' een zodanig kleine kans van voorkomen hebben dat deze slechts weinig bijdragen aan de faalkans. De schematiseringstheorie uit *TR Grondmechanisch Schematiseren bij Dijken* [24] kan als voorbeeld dienen bij het beredeneren van de keuze van de schematisering voor een analyse met de modellen van Bligh en Lane. Voor een uitgewerkt voorbeeld van de toepassing ervan wordt verwezen naar paragraaf 12.3.7 van *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen* [23].

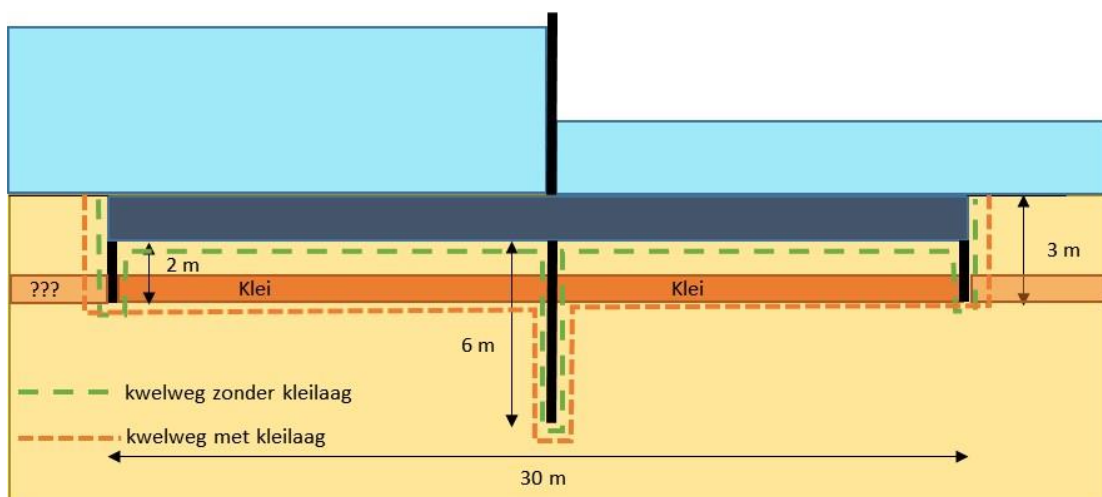
Geohydrologie

Als de bodemopbouw afdoende in beeld is, kan over de geohydrologie nagedacht worden. Doorgaans is het evident dat de preferente grondwaterstroming onder en/of langs het kunstwerk loopt. Soms blijkt uit een geohydrologische analyse echter dat de grondwaterstroming helemaal niet zijn weg zoekt via het kunstwerk, maar een uittredepunt heeft dat verder van het kunstwerk af gelegen is. Bijvoorbeeld bij een kunstwerk in een boezem, waarbij vlak bij het kunstwerk diepe poldersloten zijn gelegen met een veel lager peil dan het boezempeil. In dat geval is het aannemelijk dat het grondwater naar de poldersloot toe stroomt en is er geen uittredepunt bij het kunstwerk. Dit kan in het veld vaak eenvoudig geverifieerd worden met een of enkele peilbuizen.

4.6.5.3 Bepaal maatgevende kwelwegen

De mogelijke kwelwegen worden bepaald door het samenspel van geometrie van het kunstwerk (afmetingen kunstwerk, kwelschermen, fundatiewijze) en de aanwezige bodemopbouw. Op basis van geometrie zijn de mogelijke kwelwegen geïnventariseerd (paragraaf 4.6.5.1). Aan deze analyse moet de informatie over de ondergrond worden toegevoegd. Indien bijvoorbeeld de aansluitende dijk bestaat uit klei tot tenminste het fundatieniveau van het kunstwerk, dan kunnen kwelwegen die door dit dijklichaam lopen worden uitgesloten. Daarnaast kan het zo zijn dat een afsluitende kleilaag aan de binnenzijde van een kunstwerk voorkomt; in dat geval kan mogelijk opbarsten van deze laag worden uitgesloten en hiermee het optreden van piping langs deze kwelweg.

Ook kunnen kwelwegen mogelijk worden kortgesloten door de aanwezigheid van ondoorlatende lagen onder het kunstwerk. Figuur 24 geeft hier een voorbeeld van.



Figuur 24: Voorbeeld hoe grondopbouw van invloed is op lengte kwelweg

In dit voorbeeld is sprake van een kleilaag op beperkte diepte onder het kunstwerk. Zowel aan intreezijde als aan uittreezijde is niet bekend of deze kleilaag ook daar aanwezig is. Zo ja, dan zal het kunstwerk niet gevoelig zijn voor piping, immers de kwelschermen lopen door tot in deze laag en er is dus geen intreepunt. Echter, zolang dit niet aannemelijk is gemaakt, wordt aanbevolen uit te gaan van een pipinggevoelige situatie. De gewogen kwelweglengte in dit voorbeeld bedraagt dan $3+30/3+2 \times 4+3 = 24$ m (oranje stippellijn), tegenover een gewogen kwelweg van $3+2+30/3+2 \times 6+2+3=32$ m (groene stippellijn) als de kleilaag er niet zou zitten.

Overigens hoeft een dergelijke kleilaag niet per se ongunstig te werken. De kleilaag werkt gunstig indien het kunstwerk op palen zou zijn gefundeerd. In dat geval mag de horizontale kwelweg worden meegenomen als de kleilaag aanwezig is (oranje stippellijn). Als de gehele ondergrond uit zand zou bestaan, dan mag dit echter niet en is de gewogen kwelweglengte slechts $3+2+2 \times 6+2+3 = 22$ m. Als wordt uitgegaan van de aanwezigheid van een kleilaag, dan moet echter wel zeker zijn dat de ondoorlatende laag over de hele lengte van het kunstwerk doorloopt. Zolang dit niet het geval is, wordt aanbevolen om van de ongunstigere situatie uit te gaan. Levert dit een score 'faalkansbijdrage niet verwaarloosbaar', dan kan middels nader grondonderzoek bepaald worden of bijstelling mogelijk is (zie ook paragraaf 4.8).

4.6.5.4 Evaluatie waarnemingen

In paragraaf 6.3.6 van *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen* [23] wordt ingegaan op de evaluatie van waarnemingen. Waarnemingen kunnen waardevolle aanvullende informatie geven ten behoeve van het schematiseren. In alle gevallen wordt evaluatie van eventueel beschikbare waarnemingen dan ook aanbevolen. Het verdient de voorkeur waarnemingen al in beschouwing te nemen voordat met eventueel grondonderzoek wordt begonnen omdat geconstateerde wellen kunnen duiden op lokaal extra pipinggevoelige omstandigheden. Bij het grondonderzoek kan hier dan rekening mee worden gehouden, bijvoorbeeld door extra te investeren in onderzoek naar de grondgesteldheid direct onder het kunstwerk als blijkt dat hier de maatgevende kwelweg doorheen gaat.

Waarnemingen kunnen in twee categorieën worden onderverdeeld:

1. Waarnemingen tijdens bijzondere situaties.
2. Waarnemingen tijdens hoogwater.

Tijdens bijzondere situaties – denk hierbij aan de aanleg, inspectie en groot onderhoud – kunnen voor piping (bijna) maatgevende omstandigheden ontstaan. Denk hierbij aan verlaging van het binnenpeil ten behoeve van aanleg of inspectie van een bodembescherming bijvoorbeeld. Waarnemingen tijdens dit soort omstandigheden kunnen bijzonder waardevol zijn en een goede indicatie geven van de beschikbare weerstand tegen piping. Het verdient dan ook aanbeveling deze waarnemingen goed te documenteren en nadrukkelijk in de beoordeling te betrekken.

Indien uitspoeling van zand wordt geconstateerd hoeft er overigens niet per definitie sprake te zijn van een pipinggevoelige situatie; het kan bijvoorbeeld ook gaan om beperkte uitspoeling onder de vloer van het kunstwerk tot aan een verder bovenstrooms gelegen kwelscherm. Als geen verklaring kan worden gevonden, dan wordt aangeraden om lokaal nader onderzoek uit te laten voeren.

Indien de rekenkundige beoordeling een positief resultaat oplevert en er geen waarnemingen zijn gedaan die duiden op pipinggevoeligheid van het kunstwerk, dan is het oordeel dat de faalkansbijdrage aan de overstromingskans van het dijktraject verwaarloosbaar klein is.

4.7 Bepalen faalkans / uitvoeren beoordeling

Nadat de benodigde gegevens zijn ingewonnen en middels schematiseringen zijn vertaald naar modelinvoer kan voor de faalmechanismen *overslag en/of overloop*, *niet sluiten* en *sterkte en/of stabiliteit puntconstructies* met behulp van Riskeer op volledig probabilistische wijze een faalkans worden bepaald. In de gebruikershandleiding Riskeer – Faalmechanismen kunstwerken [31] worden handvatten gegeven ten aanzien van de bepaling van de invoerparameters in Riskeer. Daarnaast zijn er alternatieve berekeningswijzen beschikbaar om een faalkans te berekenen. Hier wordt in paragraaf 4.8.2 nader op ingegaan.

Voor het faalmechanisme *piping bij kunstwerk* ligt dit genuanceerder. Dit wordt hieronder nader toegelicht.

Piping bij kunstwerk

Voor het faalmechanisme *piping bij kunstwerk* is voor de meeste situaties geen faalkansbepaling mogelijk. Dit komt doordat voor de meeste situaties geen probabilistische modellen of semi-probabilistische rekenregels met veiligheidsfactoren beschikbaar zijn²³. Dit betekent dat er dan géén faalkans wordt berekend. Hieruit vloeit voort dat uit de beoordeling uitsluitend kan worden opgemaakt dat:

- de faalkansbijdrage verwaarloosbaar klein is (als het faalmechanisme voldoet bij een beoordeling op basis van de beschikbare modellen) óf
- het faalmechanisme mogelijk een significante bijdrage levert aan de overstromingskans (als het faalmechanisme niet voldoet bij een beoordeling op basis van de beschikbare modellen).

De generieke analyse wordt uitgevoerd met de waterstand met een overschrijdingskans die getalsmatig gelijk is aan de norm (ondergrens) van het dijktraject.

Uiteraard geldt dat als in de generieke analyse is geconcludeerd dat het faalmechanisme *piping* bij kunstwerk mogelijk een significante bijdrage levert aan de overstromingskans de mogelijkheden moeten worden verkend om meer zekerheid te verkrijgen aangaande het oordeel. Hier wordt in hoofdstuk 5 nader op ingegaan.

4.8 Plausibiliteitscontrole en mogelijke aanscherpingen

4.8.1 *Plausibiliteitscontrole*

Nadat de uitkomsten van de analyses vanuit de modellen (bijvoorbeeld Riskeer) beschikbaar komen, kunnen een aantal stappen worden genomen ter uitvoering van de plausibiliteitscontrole. Bij plausibiliteit gaat het om het beoordelen of het resultaat aannemelijk is. Dit kan aan de hand van de volgende generieke vragen:

- Voldoet de berekende faalkans aan de verwachtingen van het betreffende kunstwerk?

²³ Alleen als de kwelwegen horizontaal én in rechte lijn lopen dan is er een probabilistisch model (Sellmeijer) beschikbaar

- Passen de uitkomsten van de modelberekeningen bij waarnemingen?
- Hoe vergelijkt het beeld met eerdere analyses?

De belangrijkste stap is de verificatie of de berekende faalkans ook voorstelbaar is gelet op de specifieke situatie van het kunstwerk en de beschikbare ervaringen, bijvoorbeeld praktijkwaarnemingen met betrekking tot *niet sluiten of piping* of eerdere berekeningen bij soortgelijke kunstwerken. Ook alternatieve berekeningswijzen (zie paragraaf 4.8.2) kunnen dienen als controle op de berekende faalkans.

Een groot verschil tussen de berekende faalkans en de verwachte faalkans op basis van eerdere ervaringen bij soortgelijke kunstwerken / waarnemingen / controleberekeningen kan duiden op de aanwezigheid van fouten. Bij discrepanties of bij twijfel over de juistheid van het berekeningsresultaat kunnen onder andere de volgende vragen worden gesteld:

- Is de juiste invoer in het model (bijvoorbeeld Riskeer) opgegeven? Dit kan bijvoorbeeld betrekking hebben op een typefout.
- 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 berekening.
- Specifiek voor *niet sluiten*: Voldoen de waarden in het ontwerppunt van betrokken parameters nog wel aan de toepassingsvoorwaarden van het gekozen instroommodel (4.6.3.4)?
- Specifiek voor *piping bij kunstwerk* geldt dat het kan voorkomen dat waarnemingen in bijzondere situaties (zie paragraaf 4.6.5.4) duiden op voldoende weerstand tegen piping, terwijl de rekenkundige beoordeling geen resultaat 'faalkansbijdrage verwaarloosbaar' oplevert. In dat geval wordt aanbevolen de praktijkwaarnemingen, mits vertaald naar hoogwatercondities en mits voldoende betrouwbaar en goed gedocumenteerd, te laten prevaleren boven het oordeel dat op basis van modellen is verkregen.

Als fouten zijn geconstateerd, moeten deze worden hersteld en moet opnieuw een berekening 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 het Informatiepunt Leefomgeving (IPLO).

Indien de faalkans correct is berekend en een substantiële bijdrage levert aan de overstromingskans van het dijktraject dan kan middels aanscherpingen getracht worden om de faalkans nader te bepalen. In hoofdstuk 5 wordt nader ingegaan op aanscherpingen die kunnen worden overwogen. In het werkatelier moet dan beoordeeld worden of het zinvol is het faalmechanisme nader te analyseren in de analyse van de dominante faalpaden.

4.8.2 *Controle uitkomsten analyses middels alternatieve faalkansberekeningen*

Faalmechanisme overslag en/of overloop

Bij het faalmechanisme *overslag en/of overloop* kan, zeker bij kleine golven, vaak een eenvoudige inschatting van de faalkans worden gemaakt op basis van de terugkeertijd van de waterstand. Met Hydra-NL en Riskeer kan de faalkans

daadwerkelijk berekend worden. Indien de faalkans is berekend met het ene model dan kan het andere model gebruikt worden om een controleberekening te maken.

Faalmechanisme niet sluiten

Indien de faalkans is bepaald met behulp van programma Riskeer (of een alternatief programma) is het vooral bij *niet sluiten* belangrijk om middels een handsom deze faalkans te verifiëren. Het faalmechanismemodel in Riskeer berust namelijk op enkele benaderingen/veronderstellingen die niet altijd passend zullen zijn. Een groot verschil tussen de handsom en de uitkomst van het computerprogramma duidt meestal op een fout in de invoer van Riskeer. **Een handmatige controle van het berekeningsresultaat is dan ook essentieel om fouten te voorkomen.**

Een eenvoudige inschatting van de faalkans kan vaak worden gemaakt op basis van de terugkeertijd van de waterstand waarbij grote gevolgen optreden (gebruik makend van bijvoorbeeld Hydra-NL voor de belastingstatistiek), de kans dat het kunstwerk open staat voorafgaand aan een hoogwater en de kans dat het kunstwerk niet gesloten kan worden om de berekende faalkans te verifiëren.

Faalmechanisme sterkte en/of stabiliteit puntconstructies

Bij het faalmechanisme *sterkte en/of stabiliteit puntconstructies* kan aan de hand van de Werkwijzer Ontwerpen Waterkerende Kunstwerken op relatief eenvoudige wijze een faalkans bepaald worden. Hiervoor wordt verwezen naar bijlage E.

4.8.3

Aanscherpen schematisering piping bij kunstwerk

Als een eerste analyse geen resultaat 'faalkansbijdrage verwaarloosbaar' oplevert dan moet worden geanalyseerd of aanscherping mogelijk is en welke aanscherpingen het meeste effect zullen hebben. Een mogelijke conclusie kan dan zijn dat door het verzamelen van meer informatie omtrent geometrie (meestal kwelschermen) of ondergrond mogelijk een ander oordeel wordt gegeven. Paragrafen 6.3.3 en 6.3.4 van *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen* [23] gaan uitgebreid in op methoden om aanvullende informatie aangaande grondopbouw en kwelschermen te verzamelen. Met de nieuw verzamelde informatie kan vervolgens de beoordeling opnieuw doorlopen worden.

Indien peilbuizen worden geplaatst om de werking van de kwelschermen vast te stellen is het verstandig om permanente peilbuizen te plaatsen die periodiek gemeten worden. Zodoende kunnen veranderingen in de tijd opgemerkt worden. Indien in de tijd een verandering wordt geconstateerd in de respons van de peilbuizen moet een vervolgonderzoek gestart worden om na te gaan wat er aan de hand is.

Uiteindelijk kan ook worden geconcludeerd dat een meer geavanceerde beoordeling in de *nadere analyse* noodzakelijk is. In paragraaf 5.5 wordt nader ingegaan op aanscherpingen die kunnen worden overwogen. Een meer geavanceerde beoordeling kan zinvol zijn indien de geometrie sterk afwijkt van de geïdealiseerde situatie die in de modellen wordt verondersteld. Dit doet zich bijvoorbeeld voor bij sterk driedimensionale situaties. Ook als het spreadsheetprogramma voor heave (zie paragraaf 5.2.4 van de gebruikershandleiding Riskeer – Faalmechanismen kunstwerken [31]) niet meer voldoende ingangen biedt om het kunstwerk te beoordelen kan een meer geavanceerde beoordeling zinvol zijn. Een geavanceerde beoordeling zal dikwijls op een analyse van het uittredeverhang zijn gebaseerd. Dit uittredeverhang kan in een geavanceerde beoordeling middels peilbuismetingen en/of 3-D grondwaterstromingsberekeningen bepaald worden.

5 Mogelijkheden voor aanscherping overstromingskans

5.1 Algemeen

Als uit de assemblage van de beoordelingsresultaten van alle faalmechanismen blijkt dat een of meerdere van de faalmechanismen *overslag en/of overloop, niet sluiten, piping bij kunstwerk of sterkte en/of stabiliteit puntconstructie* een substantiële bijdrage levert aan de overstromingskans op dijktrajectniveau, dan moet onderzocht worden of nadere analyse van het faalmechanisme tot een scherpere bepaling van de faalkans kan leiden. In de volgende paragraaf 5.2 worden de meest kansrijke opties hiervoor benoemd. In het werkatelier kan de kansrijkheid hiervan nader verkend worden, bijvoorbeeld middels een gevoeligheidsanalyse.

Hierbij moet bedacht worden dat het maken van nadere analyses altijd een bewuste keuze van de beheerder moet zijn. Juist bij kunstwerken kan een verbetermaatregel relatief eenvoudig zijn en minder inspanning vergen dan het uitvoeren van een nadere analyse. Denk voor het faalmechanisme *overslag en/of overloop* bijvoorbeeld aan een eenvoudige ophoging van de keermiddelen of voor *niet sluiten* aan het vervangen van de aandrijving door een betrouwbaarder systeem.

Verder wordt opgemerkt dat voor kunstwerken het onderscheid tussen de generieke analyse en de analyse van de dominante faalpaden anders ligt dan bij de faalmechanismen in het dijkenstroom. Dit komt omdat een analyse van een kunstwerk per definitie objectspecifiek is. Onderstaande opties tot verfijning en aanscherping kunnen ook al in de generieke analyse worden ingebracht.

5.2 Kansrijke optimalisaties faalmechanisme *overslag en/of overloop*

Uit een analyse van het illustratiepunt van de Riskeer-berekening volgt welk(e) deelfaalmechanisme(n) dominant zijn voor de faalkans. Afhankelijk van het deelfaalmechanisme zijn aanscherpingen mogelijk. Daarnaast kan mogelijk een aanscherping worden gevonden in de berekening van het overslag-/overloopdebiet. Hier wordt in onderstaande subparagrafen per deelfaalmechanisme nader op ingegaan.

5.2.1 *Falen door erosie bodembescherming*

Indien de faalkans voor *overslag en/of overloop* gedomineerd wordt door het bezwijken van de bodembescherming en het vervolgens bezwijken van het kunstwerk als gevolg van het ontstaan van ontgrondingskuilen kan een nadere analyse worden uitgevoerd. Met name de laatste knoop in het faalpad, de kans op het bezwijken van het kunstwerk als gevolg van het ontstaan van ontgrondingskuilen, is veelal nog niet uitgenut. Er zijn echter nog nauwelijks handvatten om een aanscherping in deze knoop goed te onderbouwen.

De omvang van ontgrondingskuilen kan globaal berekend worden, maar de gevolgen van deze ontgrondingskuilen zijn lastiger in te schatten. Middels modelberekeningen (bepaling ontgrondingskuilen) en expert elicitation/DOT kan worden getracht een onderbouwing te vinden voor het meenemen van deze reststerkte. In paragraaf 2.3 van de gebruikershandleiding Riskeer – Faalmechanismen kunstwerken [31] zijn hiervoor enkele aanknopingspunten gegeven.

5.2.2 *Nadere inschatting van het kritieke debiet*

Kritieke debiet bij een overstortende straal

Voorals gebruik is gemaakt van richtwaarden voor het kritieke debiet kan het kritieke debiet in de *analyse van de dominante faalpaden* worden aangescherpt. Dit geldt specifiek voor bodembeschermingsconstructies die rechtstreeks worden belast door een overstortende straal. Dit vergt maatwerk waarvoor specialistische kennis omtrent bodembeschermingen vereist is.

Toelaatbaar overslag-/overloopdebiet i.v.m. dynamische effecten op keermiddel.

Als de faalkans gedomineerd wordt door het toelaatbaar overslag-/overloopdebiet i.v.m. dynamische effecten op keermiddel dan kan dit mogelijk beter worden ingeschat op basis van expert judgement of modelonderzoek. De kansrijkheid hiervan kan in het werkatelier verkend worden. Eventuele nadere uitwerking kan dan plaatsvinden in de analyse van de dominante faalpaden.

5.2.3 *Nadere bepaling kombergend vermogen*

Indien uit de analyse naar voren komt dat het kombergend vermogen maatgevend is voor de faalkans voor *overslag en/of overloop* 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, op de toelaatbare peilstijging en op de tijdsduur van de instroming.

Oppervlak van de komberging

- 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.

Toelaatbare peilstijging

- Met betrekking tot de toelaatbare peilstijging geldt dat hiervoor in principe wordt uitgegaan van het normpeil van de achterliggende regionale keringen. 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. 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 dan een uitgebreide analyse uit te voeren.
- Indien het watersysteem van de komberging is omringd door kades die praktisch niet door kunnen breken maar wel kunnen overlopen of als achter de kering geen regionaal watersysteem aanwezig is, dan kan in eerste instantie als praktisch criterium 0,2 m water op straat/maaiveld (gemiddeld in een postcodegebied) worden gehanteerd conform *Grondslagen voor Hoogwaterbescherming* [11]. In de analyse van de dominante faalpaden 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 eerste beoordeling uitgegaan van de bijbehorende kleine komberging. Als overschrijding van dit kleine kombergend vermogen naar verwachting niet leidt tot significante gevolgen dan is wellicht nog 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 B is dit nader uitgewerkt.

Tijdsduur van instroming

- Ook de tijdsduur waarover instroming plaats vindt over de keermiddelen kan mogelijk aangescherpt worden door rekening te houden met het verloop van de hoogwatergolf. Daarnaast wordt er in Riskeer vanuit gegaan dat de piek van de waterstand en de golfhoogte samenvallen, hetgeen langs de kust conservatief is. In paragraaf 2.4 van de gebruikershandleiding Riskeer – Faalmechanismen kunstwerken [31] wordt hier nader op ingegaan.

5.2.4 *Nadere bepaling overslag-/overloopdebiet.*

Met behulp van de EurOtop-manual [4] kan een nauwkeurigere inschatting van het optredende overslag-/overloopdebiet worden bepaald. Specifiek bij constructies met voorlanden en samengestelde constructies kan met de EurOtop-manual een kleiner overslag-/overloopdebiet worden berekend. Handvatten hiervoor worden gegeven in paragraaf 5.5 van de Werkwijzer Ontwerpen Waterkerende Kunstwerken [12].

5.3 **Kansrijke opties faalmechanisme *niet sluiten***

Uit een analyse van de uitkomsten van de modellen (bijvoorbeeld Riskeer) volgt welk(e) deelfaalmechanisme(n) dominant zijn voor de faalkans. Afhankelijk van het deelfaalmechanisme zijn aanscherpingen mogelijk. Hierbij wordt opgemerkt dat in het geval van *niet sluiten* het over het algemeen meer loont om de analyse van de kans op niet sluiten nader uit te werken dan veel energie te steken in de processen die daarop volgen (het falen van de bodembescherming dan wel overschrijding van komberging).

5.3.1 *Nadere analyse kans op niet sluiten*

De faalkans van sluiten wordt in beoordeling zoveel mogelijk bepaald met behulp van standaardmethoden en/of standaardwaarden. Indien de uitkomst van de beoordeling aangeeft dat de faalkans van sluiting dominant is voor het faalmechanisme *niet sluiten*, kan een aanscherping van deze faalkans worden uitgevoerd. Hiertoe kan een object specifieke risicoanalyse/faalkansanalyse worden opgesteld.

Ook kan het nuttig zijn om het specifieke gebruik van het kunstwerk nader vast te stellen aan de hand van gebruiksgegevens. Dit heeft dan met name betrekking op de kans dat het kunstwerk openstaat voorafgaand aan een hoogwater.

5.3.2 *Falen door erosie bodembescherming*
Hiervoor wordt verwezen naar paragraaf 5.2.1.

5.3.3 *Nadere bepaling kombergend vermogen*
Hiervoor wordt verwezen naar paragraaf 5.2.3.

5.4 Kansrijke opties faalmechanisme sterkte en/of stabiliteit puntconstructies

Uit een analyse van de uitkomsten van de modellen (bijvoorbeeld Riskeer) volgt welk(e) deelfaalmechanisme(n) een dominante bijdrage leveren aan de overstromingskans. Afhankelijk van het deelfaalmechanisme zijn aanscherpingen mogelijk. Hierbij wordt opgemerkt dat in het geval van *sterkte en/of stabiliteit puntconstructies* het over het algemeen meer loont om de analyse van het bezwijken van onderdelen nader uit te werken dan veel energie te steken in de processen die daarop volgen (het falen van de bodembescherming dan wel overschrijding van komberging). Argument hiervoor is dat bij bezwijken van onderdelen vaak al sprake is van een dusdanig verval over het kunstwerk dat na bezwijken vaak een onbeheersbare situatie zal ontstaan en de kans op overstromingsgevolgen dan groot is.

5.4.1 Nadere analyse sterkte constructieonderdelen

In het algemeen wordt bij de analyse van de sterkte van de constructieonderdelen in eerste instantie uitgegaan van aanwezige ontwerpberekeningen dan wel wordt middels eenvoudige handsommen een inschatting gemaakt van de aanwezige sterkte. Beide componenten kunnen nog het nodige conservatisme bevatten.

- Het schematiseren van de sterkte aan de hand van eenvoudige handsommen is altijd conservatief. Een nadere bepaling van de sterkte kan plaatsvinden door meer geavanceerde sterkteberekeningen te maken. Uiteindelijk kan middels een EEM-berekening (Eindige Elementen Methode) de sterkte zo optimaal mogelijk worden ingeschat.
- Bij het bepalen van de sterkte wordt meestal in eerste instantie uitgegaan van lineair elastisch gedrag van de constructie. Er wordt geen rekening gehouden met plasticiteit en het plastisch vervormen van een constructie. Omdat het echter om bezwijken gaat, is het toepassen van de plasticiteitsleer geoorloofd. Gerealiseerd moet worden dat wanneer een onderdeel eenmaal plastisch vervormd is, het niet eenvoudig zal zijn om dit weer te herstellen. Hierdoor kan het zijn dat een kunstwerk gedurende langere tijd niet beschikbaar is nadat het hoogwater gepasseerd is. Plastisch gedrag met name relevant bij staalconstructies.
- Bij gebruik van ontwerpberekeningen is het mogelijk dat in het ontwerp nog conservatismen zitten, bijvoorbeeld in de wijze waarop de constructie is geschematiseerd. Ook kan het zijn dat de constructie niet volledig is uitgenut of dat de uiteindelijk gerealiseerde constructie afwijkt (sterker is) dan in het ontwerp bepaald.

Ten slotte kunnen ook aan de belastingkant nog punten zitten die geoptimaliseerd kunnen worden. Hierbij kan worden gedacht aan de aangehouden golfbelasting. Wellicht is bij de bepaling van de aanwezige golven geen rekening gehouden met een eventueel afgeschermd ligging van het kunstwerk of de aanwezigheid van hogere voorlanden bij golfrichtingen die niet loodrecht op het kunstwerk staan.

5.4.2 Nadere analyse stabiliteit constructie en grondlichaam

Evenals bij de analyse van de sterkte van constructieonderdelen wordt, indien een analyse nodig is, vaak in eerste instantie een globale (conservatieve) analyse van de

stabiliteit constructie en grondlichaam uitgevoerd. Indien hiermee de faalkansbijdrage aan het dijktraject substantieel is, kan worden getracht middels geavanceerdere modellen de sterkte te bepalen. In veel gevallen zal dit niet eenvoudig zijn, omdat sprake is van een interactie tussen grond en constructie.

5.4.3 *Nadere analyse aanvaren*

Zoals in paragraaf 4.6.4.2 is aangegeven verdient het de voorkeur om in eerste instantie bij aanvaren niet direct een complete faalkansberekening met Riskeer op te zetten. Dit omdat de modellen die hiervoor nodig zijn de nodige onzekerheden kennen en daarnaast de kans op aanvaren en vervolgens uitvaren van een constructie(element) veel invloedsfactoren kent. Daarom kan beter middels een risicosessie met alle betrokkenen bij het kunstwerk (schutsluizen, keersluis) getracht worden de risicobepalende elementen vast te stellen en vervolgens in te schatten of het risico te groot is. Hierbij moet worden bedacht dat het uitvaren van keermiddelen in sluizen de afgelopen 60-70 jaar niet is voorgekomen. Er is uiteraard wel schade aan keermiddelen ontstaan door botsingen, maar dat heeft nog nooit geleid tot zodanige vervormingen dat de waterkerende functie in het geding is, laat staan tot een overstroming.

5.4.4 *Nadere analyse komberging*

Vaak wordt komberging in eerste instantie bij *sterkte en/of stabiliteit puntconstructies* niet als aanvullende sterkte gemodelleerd, omdat bij bezwijken in veel gevallen sprake zal zijn van een bres met eventuele bresgroei en daarmee een groot instromend volume. In sommige gevallen kan een nadere beschouwing van de komberging nog relevant zijn, omdat de komberging bijvoorbeeld heel groot is, of omdat de achterliggende kaden in staat zijn om een relatief hoge waterstand te keren (verschil tussen buitenwaterstand waarbij kunstwerk bezwijkt en kerende hoogte kaden is klein). Een lastige stap bij een nadere analyse van de komberging is in hoeverre er bresgroei zal optreden, omdat dit het volume instromend water bepaalt. Wanneer in een kunstwerk alleen het keermiddel bezwijkt is de kans op bresgroei mogelijk klein, zeker in het geval dat de bodembescherming aan de binnenzijde in staat is om de optredende stroomsnelheden te weerstaan.

5.4.5 *Nadere analyse bodembescherming*

In veel gevallen zal de bodembescherming bij bezwijken van waterkerende constructieonderdelen niet in staat zijn om de optredende stroomsnelheden te weerstaan. Het verval bij bezwijken zal immers groot zijn, waardoor ook de stroomsnelheden hoog zijn. Er zijn echter situaties denkbaar waarbij de bodembescherming in de directe omgeving van het kunstwerk niet extreem wordt belast, bijvoorbeeld wanneer de ontstane doorstroomopening klein is en de watervoerende doorsnede ter plaatse van de bodembescherming relatief groot.

In het geval van bezwijken door aanvaren is het afhankelijk van het moment waarop de aanvaring plaatsvindt hoe groot het verval is en daarmee hoe groot de optredende stroomsnelheden aan de bodem is. Zeker wanneer het schip na de aanvaring als een soort prop in het sluishoofd blijft hangen is er een gerede kans dat ter plaatse van de bodembescherming de stroomsnelheden nog enigszins beperkt blijven. Daarbij moet worden bedacht dat de bodembescherming bij schutsluizen vaak zijn uitgelegd op redelijk grote stroomsnelheden vanwege de scheepvaart die er overheen komt.

5.5 Kansrijke opties faalmechanisme piping bij kunstwerk

Er zijn (onder andere) onderstaande mogelijkheden voor een nadere analyse:

- Peilbuismetingen.
- Geavanceerde grondwaterstromingsmodellen.
- Het principe 'bewezen sterkte'.
- Probabilistische piping- of heave-analyse.

Op deze aspecten wordt in onderstaande paragrafen nader ingegaan. Onderstaande teksten zijn deels ontleend aan paragraaf 7.5.3 van *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen* [23].

5.5.1 Peilbuismetingen

Juist bij kunstwerken, waar sprake kan zijn van grote onzekerheden in de schematisering, wordt het uitvoeren van peilbuizenonderzoek sterk aanbevolen. Hiermee kan de respons van de stijghoogte in de watervoerende zandlagen op de buitenwaterstand goed in beeld gebracht worden. Hiervoor zijn verschillende methoden beschikbaar (bijvoorbeeld [22], [25]). Binnen het BOI wordt geen methode voorgeschreven; het is aan de beoordelaar om de geschiktheid van de gebruikte methode aan te tonen. De vertaling van peilbuismetingen naar hoogwateromstandigheden vereist specifieke aandacht.

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

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

5.5.2 Geavanceerde grondwaterstromingsmodellen

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

- Niet-stationaire grondwaterstromingsmodellen voor situaties waarbij de duur van hoogwater relatief kort is, zoals bijvoorbeeld in een getijdegebied²⁴ en een stormgedomineerd gebied (zoals de delta's, het IJsselmeergebied en andere kleinere meren).
- Driedimensionale of quasi-driedimensionale grondwaterstromingsmodellen voor situaties waarbij de geometrie of laagopbouw niet uniform is in de richting van de waterkering of loodrecht op de waterkering.

Deze modellen kunnen worden gebruikt om een betere inschatting te kunnen maken van de stijghoogte onder hoogwateromstandigheden of om het uittredeverhang te kunnen bepalen. Bij een zeer gelaagde bodemopbouw of slechts beperkte gegevens van de bodem worden deze geavanceerde modellen echter niet aanbevolen.

²⁴ De benedenrivieren kunnen deels ook worden gezien als getijdegebied.

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

5.5.3 *Bewezen sterkte*

Er zijn kunstwerken waarbij het verval dat hoort bij de waterstand bij de norm al eens in het verleden is opgetreden of zelfs is overschreden. Dit kan onder hoogwateromstandigheden zijn geweest (bijvoorbeeld bij kunstwerken langs de oude Zuiderzee of in de Zeeuwse en Zuid-Hollandse delta) of tijdens onderhouds- of inspectiewerkzaamheden. In dit geval kan een beoordeling op basis van 'bewezen sterkte' zinvol zijn. Voor deze aanpak is het vaak van belang dat de omstandigheden in het verleden vergelijkbaar zijn met de huidige hoogwateromstandigheden. Voor bijvoorbeeld de vraag of een scherm nog aansluit op de constructie kunnen de waargenomen prestaties bij lagere buitenwaterstanden al informatief zijn.

5.5.4 *Probabilistische piping of heave analyse*

Voor het uitvoeren van een probabilistische analyse worden in de vigerende leidraden en technische rapporten geen aanwijzingen gegeven. Er zijn echter wel programma's beschikbaar die gebruikt kunnen worden voor een probabilistische analyse.

Indien het oordeel gebaseerd is op het model van Bligh of Lane dan moet de gebruiker zelf een probabilistisch model opzetten om een probabilistische beoordeling uit te voeren. Voor de statistiek van de buitenwaterstand kan hierbij gebruik worden gemaakt van Hydra-NL of Riskeer (Hydra-Ring). Voor de probabilistische modellering van de formules van Bligh en Lane kan gebruik worden gemaakt van de modellering zoals die destijds in PC-Ring²⁵ is gebruikt. Via de IPLO-helppdesk is een tool beschikbaar waarmee een probabilistische berekening uitgevoerd kan worden.

Indien het oordeel is gebaseerd op het model van Sellmeijer dan kan gebruik worden gemaakt van Riskeer. In Riskeer is dit model namelijk probabilistisch opgenomen in het dijken spoor. Er moet dan een dijken som handmatig worden aangepast en worden omgeschreven naar een kunstwerkensom.

Bij het model van heave is het niet mogelijk om met PC-Ring of Riskeer een probabilistische berekening uit te voeren.

5.6 **Benutten kennisontwikkeling**

De laatste optie betreft het inventariseren en verwerken van nieuwe relevante ontwikkelingen. In Nederland wordt kennis ontwikkeld in het waterbeheer vanuit verschillende programma's en invalshoeken. Dit kan meerwaarde hebben voor het bepalen van de overstromingskans van primaire waterkeringen.

Vanuit BOI zal een releasekalender worden opgesteld. Dit geeft enige richting aan de te verwachten kennisontwikkeling. Een aandachtspunt is dat de kennis met

²⁵ Noot: PC-Ring werd gebruikt in het project Veiligheid Nederland in Kaart 2 en kan gezien worden als een voorloper van Riskeer. PC-Ring wordt niet meer onderhouden en het gebruik wordt niet meer ondersteund

voldoende zekerheid kan worden toegepast voor het beoogde doel. Aangeraden wordt dit punt te bespreken in het werkatelier.

6 Voorbeelden

Voor de faalmechanismen *overslag en/of overloop, piping bij kunstwerk* en *sterkte en/of stabiliteit puntconstructies* is geen specifiek voorbeeld opgenomen. In plaats daarvan wordt verwezen naar de vele voorbeelden met betrekking tot de verschillende deelfaalmechanismen die in de gebruikershandleiding *Riskeer – Faalmechanismen kunstwerken* [31] zijn opgenomen. Voor piping bij kunstwerk wordt voor een voorbeeld van een uitgewerkte schematisering voorts verwezen naar paragraaf 12.3 van *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen* [23] en paragraaf 11.5 van de *WOWK* [12].

Alleen voor het faalmechanisme niet sluiten is, in aanvulling op de vele voorbeelden bij de verschillende deelfaalmechanismen in de gebruikershandleiding *Riskeer – Faalmechanismen kunstwerken* [31], hieronder een uitgewerkt voorbeeld opgenomen.

6.1 Faalmechanisme *niet sluiten* - 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, waarachter het maaiveld vervolgens een stukje lager ligt en dus onder loopt bij een doorbraak hiervan. 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 geoeffend.

6.1.1 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' [27] 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 $n = 1$.

6.1.2 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 3.5.1 van de gebruikershandleiding Riskeer – Faalmechanismen kunstwerken [31] 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 vervult, 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].

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

6.1.3 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.

6.1.4 Schematisering gevolgen (uitwerking met Riskeer)

In eerste instantie wordt gekeken welke gevolgen gemodelleerd moeten worden. Hierbij wordt gebruik gemaakt van hetgeen in paragraaf 4.6.3.4 is vermeld. Vanuit de aanbeveling 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.

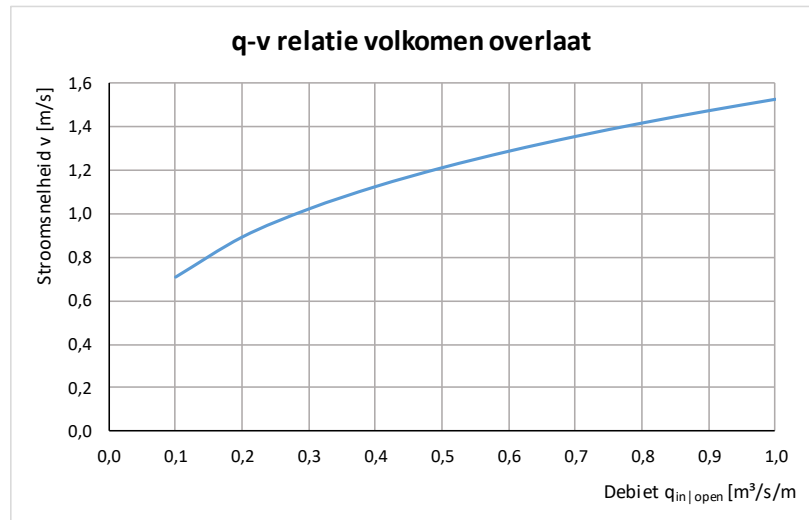
Er is in dit geval sprake van een zeer kleine komberging. Kijkend naar de bodem achter de coupure, dan is deze middels de stelconplaten zeer goed beschermd. Hogere stroomsnelheden zijn toelaatbaar. De zwakste plek hierin zal de aansluiting tussen coupure en stelconplaten zijn. Er wordt conservatief uitgegaan 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 3.3 van de gebruikershandleiding Riskeer – Faalmechanismen kunstwerken [31]), welke hieronder is afgebeeld).

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

In Figuur 25 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/s²

$q_{in open}$ [m ³ /s/m]	$h-h_{dr}$ [m]	v [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 25: 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 $4.000 \times 0,50 = 2.000$ 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 uitgegaan 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 boven 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 4.6.3.4) 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 verder geen rol meer speelt. Bijvoorbeeld de volgende waarden kunnen worden gehanteerd:

$$\Delta H_{kom} = 2,0 \text{ m.}$$

$$A_{kom} = 1,0 \cdot 10^6 \text{ m}^2.$$

$$t_s = 6 \text{ uur (=standaardwaarde)}.$$

6.1.5

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 weglighamen meenemen.
- 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, is aanscherping van de faalkans van herstel niet mogelijk.

Referenties

- [1] *Handreiking aansluitconstructies (product 6.0F)*, Deltares, kenmerk 1220087-006-GEO-0002. Delft, juli 2015. [[IPLO-link](#)]
- [2] *Achtergrondrapport toetsspoor hoogte kunstwerk I – Modelling optredend overslag-/overloopdebiet (WTI 2017)*. Deltares, kenmerk 1220087-001-GEO-0004. Delft, december 2015. [[IPLO-link](#)]
+ bijlage A: review overtopping inclusief parafen [[IPLO-link](#)]
- [3] *Achtergrondrapport toetsspoor hoogte kunstwerk II – Bepaling kritiek overslag-/overloopdebiet (WTI 2017)*. Deltares, kenmerk 1220087-001-GEO-0011. Delft, december 2015. [[IPLO-link](#)]
+ bijlage A [[IPLO-link](#)] en B [[IPLO-link](#)]
- [4] *EurOtop Manual on wave overtopping of sea defences and related structures: Second edition 2018*. Van der Meer et. al., december 2018. [[link naar EurOtop website](#)]
Versie dec2018 [[EuroTop-link](#)] + errata nov2019 [[EuroTop-link](#)]
- [5] *Technische Leidraad Hoogte bij kunstwerk.*
- [6] *Technische Leidraad Piping bij kunstwerk.*
- [7] *Technische Leidraad Sterkte en/of stabiliteit puntconstructies*
- [8] *Technische Leidraad Betrouwbaarheid sluiting kunstwerk*
- [9] *Leidraad Kunstwerken*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. ISBN 90-369-5544-0. Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Delft, mei 2003. [[open.rws.nl link](#)]
- [10] *Handleiding voor het gebruik van de dam- en voorlandmodule ter bepaling van de hydraulische condities bij de dijkteen*, Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving, november 2019. oude link: [Helpdesk Water link](#)>
- [11] *Grondslagen voor hoogwaterbescherming*. ENW rapport, november 2017
- [12] *Werkwijzer Ontwerpen Waterkerende Kunstwerken*, RWS-WVL Waterkeringen, Groene versie, 1 november 2018. [[IPLO-link](#)]
- [13] *Hoe om te gaan met waterbezwaar als gevolg van hoge overslagdebieten?*, KPR-factsheet d.d. 15-10-2018 versie 2. [Adviesteam Dijkontwerp [link](#)]
- [14] *Gebruikershandleiding Waterstandsverloop - versie 3.0.1*, HKV LIJN IN WATER i.o.v. Rijkswaterstaat WVL, maart 2017. [[IPLO-link](#)]

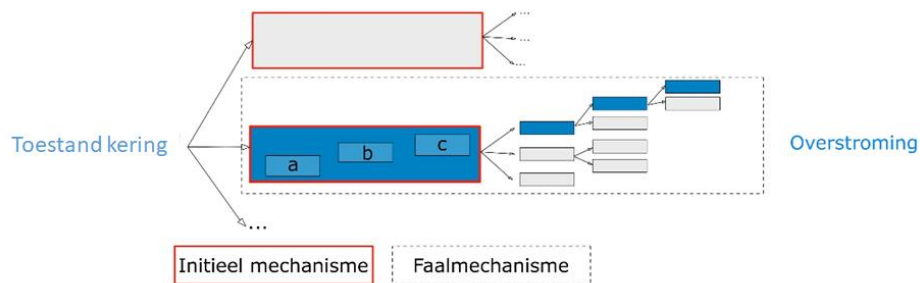
- [15] *Hydra-NL Gebruikershandleiding versie 2.4*, HKV_{LIJN IN WATER} i.o.v. Rijkswaterstaat WVL, mei 2018. [[IPLO-link](#)]
- [16] *Riskeer Gebruikershandleiding, versie 22.1.2*, Deltares, 5 december 2022. [[IPLO-link](#)]
- [17] *Hydraulische Belastingen Havens - Gebruikershandleiding en methode*, Aktis Hydraulics en HKV_{LIJN IN WATER} i.o.v. Rijkswaterstaat WVL, december 2017
- [18] *Toets op Maat voor stalen damwandschermen als stabiliteit-verhogende langsconstructie (WTI 2017 Kunstwerken)*. Deltares rapport 1220087-005-GEO-0004. Delft, december 2015.
- [19] *Handreiking Toets op Maat voor demontabele keringen (WTI 2017 Kunstwerken- Achtergrondrapport)*. Deltares 1220087-002-GEO-0008, februari 2016.
- [20] *Handleiding lokaal schematiseren met WTI-SOS*. G. Kruse, M. Hijma. Deltares rapport 1209432-004-GEO-0002, Delft, december 2015. [[IPLO-link](#)]
- [21] *Hulpmiddelen voor toetsers – Historische Kunstwerken*. STOWA, rapport 2006-03. ISBN 90.5773.325.0. Utrecht, januari, 2006. [[open.rws.nl link](http://open.rws.nl)]
- [22] *Invloed van demping van de belasting bij piping*. Deltares, rapport 1206013-002-GEO-0001. Delft, 2013.
- [23] *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen*. U. Förster, G. van den Ham, E.O.F. Calle, G.A.M. Kruse. Deltares rapport 1202123-003-GEO-0002 in opdracht van RWS Waterdienst. Delft, Maart 2012. [[open.rws.nl link](http://open.rws.nl)]
- [24] *Technisch Rapport Grondmechanisch Schematiseren bij Dijken*. Expertise Netwerk Waterveiligheid. Uitgave: Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving, oktober 2012. [[IPLO-link](#), [open.rws.nl link](http://open.rws.nl)]
- [25] *Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. RWS-DWW, ISBN-90-369-5565-3, zie www.enwinfo.nl. Delft, september 2004.
- [26] TNO 2017 R10788, *Kalibratie toetsvoorschrift constructief falen onder hoogwaterbelasting voor RBK-NAT*, TNO, juni 2017 [[IPLO-link](#)]
- [27] *Werkwijze bepalen kans op niet sluiten per sluitvraag met scoretabellen, definitief v1.2*, RWS rapport, A. Casteleijn, Bob van Bree, november 2017. [[IPLO-link](#)]
- [28] *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. [[IPL0-link](#)]

- [29] *Handleiding overstromingskansanalyse*, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, Rijkswaterstaat, 2023. [[IPL0-link](#)]
- [30] Handreiking Veiligheidsontwerp.
- [31] *Gebruikershandleiding Riskeer – Kunstwerken*, Rijkswaterstaat, 2023 [[IPL0-link](#)]
- [32] *Werkwijze overstromingsrisico als gevolg van aanvaren - Omgang aanvaren van gesloten waterkerende kunstwerken binnen het Programma Rijkskeringen*, 10 maart 2021, definitief. [[IPL0-link](#)]

Bijlage A Begrippenlijst

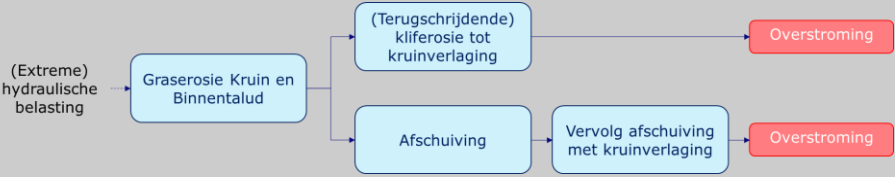
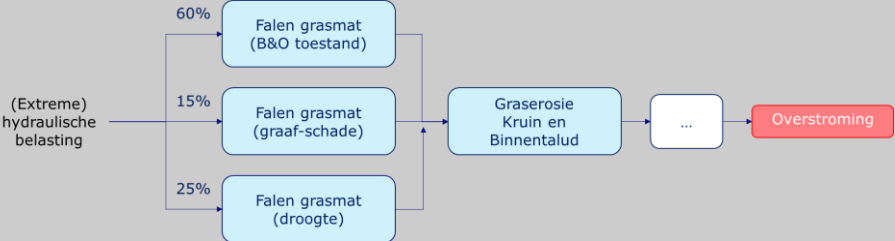
Deze begrippenlijst is hetzelfde als in bijlage I en II van de Regeling primaire waterkeringen 2023.



Figuur 26: Schematische weergave van de relatie tussen faalmechanisme, faalpaden, gebeurtenissen en (initiële, vervolg) mechanismen.

Tabel 2: Begrippenlijst. Voor deze termen is de definitie contextafhankelijk, geen absoluut begrip. Het betekent dat binnen het beoordelingsproces de term wordt gebruikt met de betreffende definitie. De definities van deze termen zijn uitgewerkt in bijlage II van de Regeling (Randvoorwaarden beoordeling)

Naam	Omschrijving en voorbeelden
Faalmechanisme*	De verzameling faalpaden met een gemeenschappelijk initieel mechanisme. <i>Voorbeeld: gestippelde kader in Figuur 26</i>
Faalpad*	Een gehele keten van opeenvolgende gebeurtenissen of mechanismen die samen leiden tot een overstroming of falen van de waterkering. <i>Voorbeeld: in Figuur 26 in blauw aangegeven reeks van gebeurtenissen/ mechanismen</i>
Gebeurtenis*	Proces van verandering van een toestand naar een nieuwe, opvolgende toestand. Een gebeurtenis of knoop geeft de stap in het proces aan (zie ook mechanisme). <i>Voorbeeld: in Figuur 26 zijn a-b-c drie gebeurtenissen binnen het initiële mechanisme (met een rode rand aangegeven)</i>
Mechanisme	Proces van verandering van een toestand naar een nieuwe, opvolgende toestand. Mechanisme wordt gebruikt om de fysica te beschrijven en kan bestaan uit een gebeurtenis of uit een aaneenschakeling van meerdere gebeurtenissen (zie ook gebeurtenis). <i>Voorbeeld: in Figuur 26 zijn mechanismen in blauw aangegeven. Samen vormen ze een faalpad, Het initiële mechanisme in Figuur 26 bestaat uit drie gebeurtenissen.</i>
Initieel mechanisme*	Eerste mechanisme in een faalpad <i>Voorbeeld: in Figuur 26 aangegeven met een rode rand</i>
Vervolgmechanismen*	De mechanismen die de initiërende mechanisme opvolgen. Samen leiden ze tot overstroming of falen van de waterkering. <i>Voorbeeld: in Figuur 26 zijn voorbeelden van vervolgmechanismen in een faalpad in blauw aangegeven. De vervolg mechanismen volgen op het met een rode rand aangegeven initiële mechanisme.</i>
Directe mechanismen	Directe mechanismen zijn mechanismen binnen een faalpad die kunnen leiden tot een overstroming en die worden veroorzaakt door een (extreme) hydraulische belasting.

	<p>Voorbeelden van directe mechanismen zijn de initiële mechanismen in Tabel 5.1 van Bijlage II van de Regeling (Randvoorwaarden beoordeling) bij de Omgevingsregeling. Directe mechanismen kunnen ook een vervolgmecanisme zijn. Bijvoorbeeld het optreden van een afschuiving binnentalud na erosie van kruin en binnentalud.</p>
<p>Indirecte mechanismen</p>	<p>Indirecte mechanismen leiden niet direct tot falen maar eerder tot een gewijzigde staat van de waterkering. Ze hebben hierdoor invloed op het gedrag van de waterkering tijdens een extreme hydraulische belasting.</p> <p>Voorbeelden van indirecte mechanismen zijn gegeven Tabel 5.2 van Bijlage II van de Regeling (Randvoorwaarden beoordeling) bij de Omgevingsregeling</p>
<p>Generieke faalmechanismen</p>	<p>Bij overstromingskansanalyses wordt onderscheid gemaakt tussen generieke en specifieke faalmechanismen. De generieke faalmechanismen die worden beschouwd in de overstromingskansanalyse zijn gebundeld rondom de initiële mechanismen in Tabel 5.1 van Bijlage II van de Regeling (Randvoorwaarden beoordeling) bij de Omgevingsregeling.</p> <p>Voorbeeld van een generiek faalmechanisme gebundeld rond Grasbekleding erosie kruin en binnentalud als initieel mechanisme</p> 
<p>Specifieke faalmechanismen</p>	<p>Specifieke faalmechanismen zijn locatiespecifiek. Specifieke faalmechanismen kunnen het gevolg zijn van een optreden van een direct of indirect mechanisme.</p> <p>Voorbeeld van een specifiek faalmechanisme is het falen van innovaties.</p> <p>Voorbeeld van een specifiek faalmechanismen, die het gevolg is van het optreden van een direct mechanisme, is het falen van een waterkering als gevolg van het falen van een langsconstructie.</p> <p>Voorbeeld van een specifiek faalmechanisme die het gevolg is van een indirect mechanisme is het falen van een waterkering als gevolg aan de invloed van ernstige droogte op de kwaliteit van een grasbekleding.</p>
<p>Scenario</p>	<p>Een scenario beschrijft een mogelijke geometrie of staat van de waterkering die wordt gebruik als uitgangspunt voor een overstromingskansanalyse. Verschillende scenario's kunnen een bijdrage leveren aan de overstromingskans van een waterkering. Een scenario kan onder anderen betrekking hebben op onzekerheden over de ondergrond of op een gewijzigde staat van de waterkering die kan ontstaan na het optreden van een indirect mechanisme.</p> <p>Voorbeeld van scenario's bij een overstromingskansanalyse: scenario's voor toestand grasbekleding</p> 

Bijlage B Definitie falen komberging

Conform de definitie uit de Waterwet/Omgevingswet wordt binnen het BOI wordt het volgende faalcriterium met betrekking tot komberging gehanteerd:

Het kombergend vermogen wordt overschreden als het instromende water leidt tot overstromingsgevolgen (substantiële schade en/of slachtoffers) in het achterliggende gebied.

In de Waterwet is echter niet nader uitgewerkt wat moet worden verstaan onder substantiële schade en/of slachtoffers. Er is hiermee dus geen heldere definitie van de term 'overstromingsgevolgen'.

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 waaraan het kunstwerk dient te voldoen op gebaseerd. Dit is in de praktijk echter niet goed werkbaar.

Binnen het BOI wordt daarom ten behoeve van de beoordeling aangesloten op de pragmatische werkwijze uit de Grondslagen voor hoogwaterbescherming [11] waarbij wordt gewerkt met een bepaalde toelaatbare waterdiepte, welke voor zowel bebouwd als landelijk gebied dezelfde is en als volgt luidt:

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/Omgevingswet 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 wellicht bij lagere) waterdiepte achter een kunstwerk substantiële economische schade optreedt en/of tenminste 1 slachtoffer valt. Het KPR-factsheet "Hoe om te gaan met waterbezwaar als gevolg van hoge overslagdebieten?" [13] kan behulpzaam zijn om tot verdere aanscherping te komen.

Zoals in de technische leidraad is uitgewerkt, zijn er drie relevante situaties te onderscheiden als wordt gekeken naar overschrijding van het kombergend vermogen:

1. Achter het kunstwerk is een watersysteem aanwezig dat wordt omringd door zachte kades (grondlichamen). Als de kades bezwijken of overlopen door de toegenomen waterstand in het watersysteem, kan (een deel van) het watersysteem leeglopen in het achterliggende gebied.
2. Achter het kunstwerk is een watersysteem aanwezig dat 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 deze situatie kan dusdanig veel water

over de randen van het watersysteem het achterliggende gebied in lopen dat sprake is van een overstroming.

3. Achter het kunstwerk is geen watersysteem aanwezig, er vindt direct inundatie van het achterliggende gebied plaats. Dit komt bij coupures veel voor.

In alle gevallen moet het in principe gaan om een zodanig instromend watervolume in het achterliggend gebied dat dit leidt tot substantiële schade en/of slachtoffers. Ook hierbij kan de praktische maat van 0,20 m water op straat of in landelijk gebied gehanteerd worden. Hierbij wordt geen onderscheid gemaakt tussen landelijk en stedelijk gebied.

In de eerste situatie - een watersysteem dat wordt omringd door zachte kades (grondlichamen) – dan wordt de beoordeling in de praktijk vaak gestart met het bezwijken van de kades; de gevolgen die daarna optreden worden dan nog niet beschouwd. Voor de waterstand waarbij bezwijken van de kades optreedt wordt dan vaak 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. Als de faalkans bij toepassing van deze vereenvoudiging niet verwaarloosbaar klein is, kan aanscherping hiervan nog plaatsvinden door deze gevolgen na bezwijken van de kades wel nader te beschouwen.

Samengevat

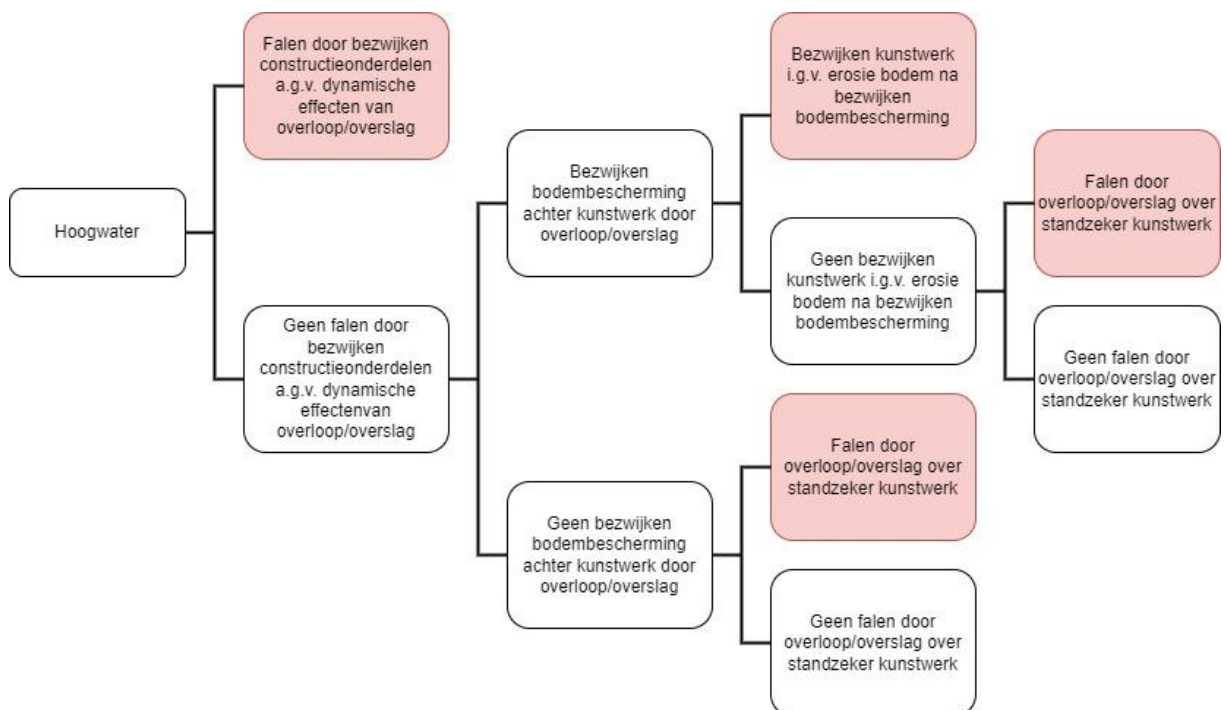
In de beoordeling wordt als eerste praktische benadering ervan uitgegaan dat substantiële schade en/of slachtoffers optreden als:

- 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 gemiddeld in een postcodegebied (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).

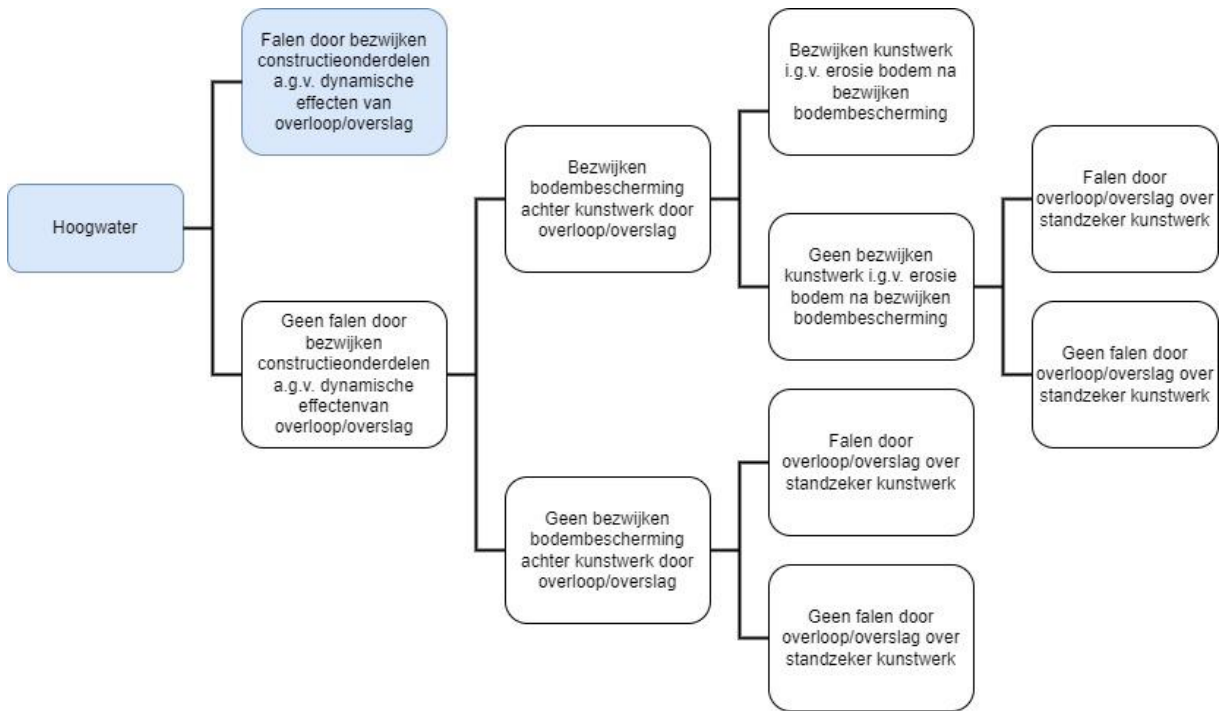
Bijlage C Van foutenboom naar gebeurtenissenboom

Ter illustratie is de foutenboom in Figuur 5 in deze bijlage omgewerkt naar een gebeurtenissenboom. Bij het omwerken van deze foutenboom naar een gebeurtenissenboom is de tak Falen aansluitconstructie uit deze figuur gemakshalve buiten beschouwing gelaten. In rood zijn in Figuur 27 de gebeurtenissen weergegeven die leiden tot overstroming. In Figuur 28 tot en met Figuur 31 zijn de achtereenvolgende faalpaden weergegeven:

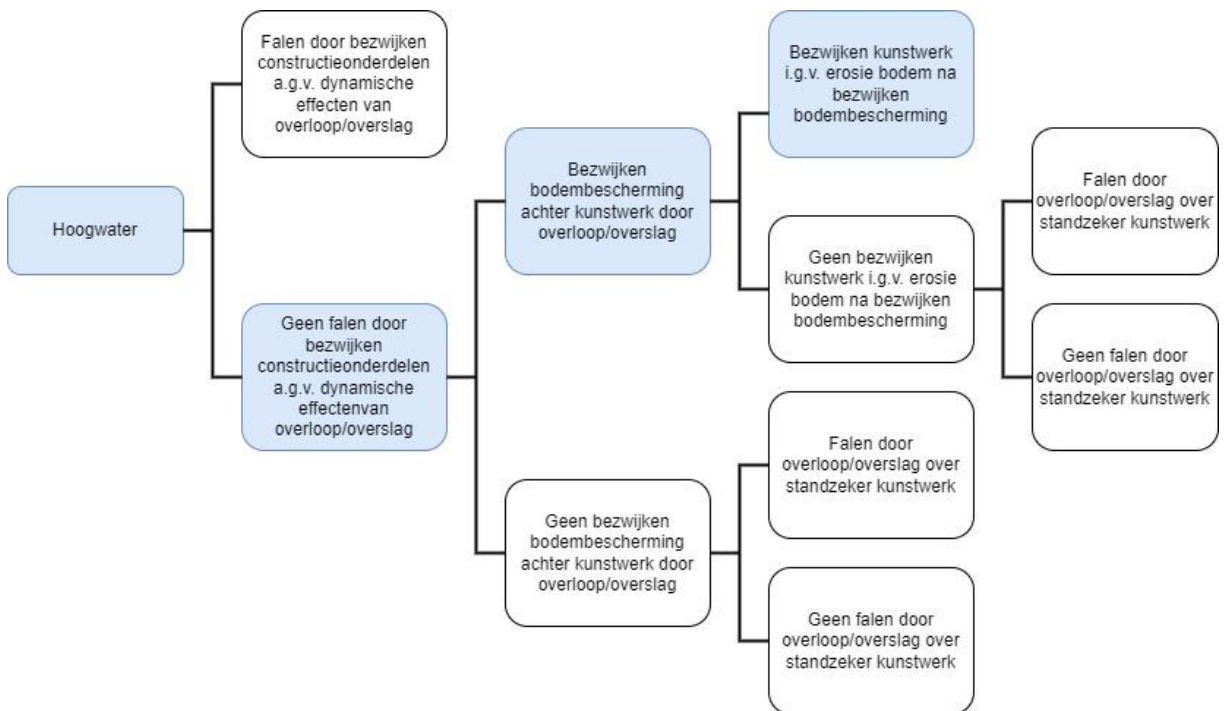
- Faalpad 1: Hoogwater – Bezwijken constructieonderdelen door dynamische effecten
- Faalpad 2: Hoogwater – Bezwijken bodembescherming achter kunstwerk – Bezwijken kunstwerk i.g.v. erosie bodem
- Faalpad 3: Hoogwater – Bezwijken bodembescherming achter kunstwerk maar geen Bezwijken kunstwerk i.g.v. erosie bodem – Falen bij standzeker kunstwerk
- Faalpad 4: Hoogwater – Falen bij standzeker kunstwerk



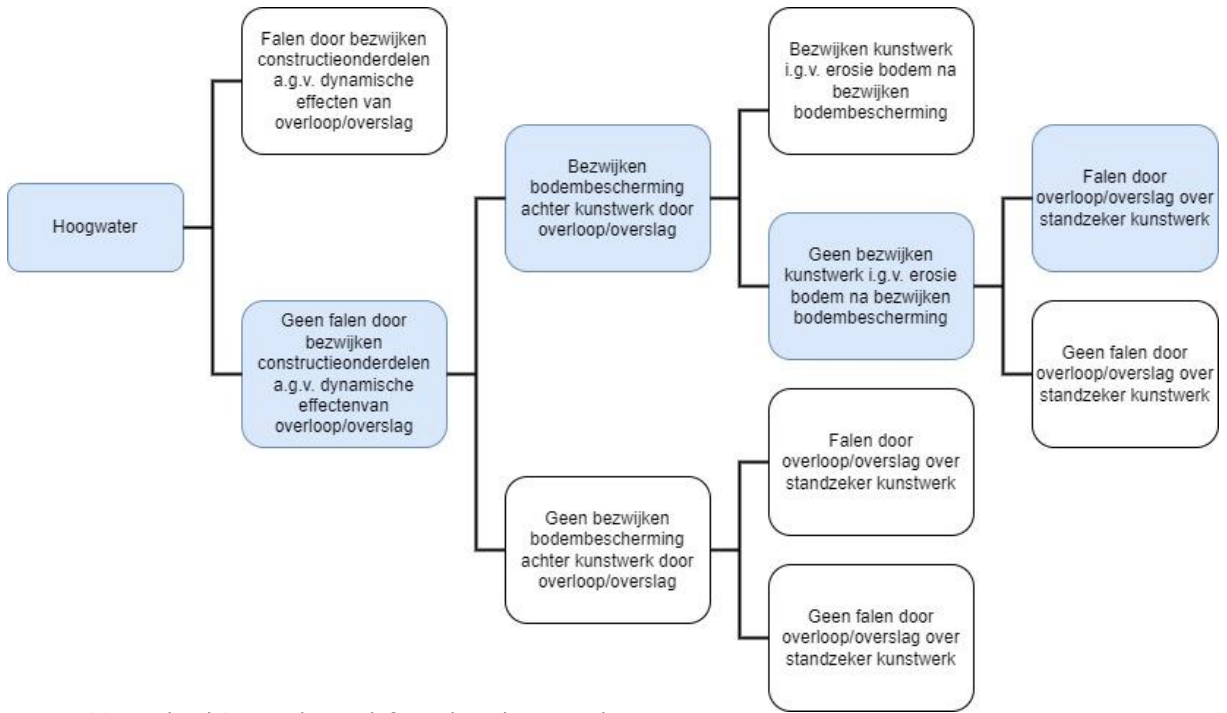
Figuur 27: Gebeurtenissenboom overslag en/of overloop kunstwerk



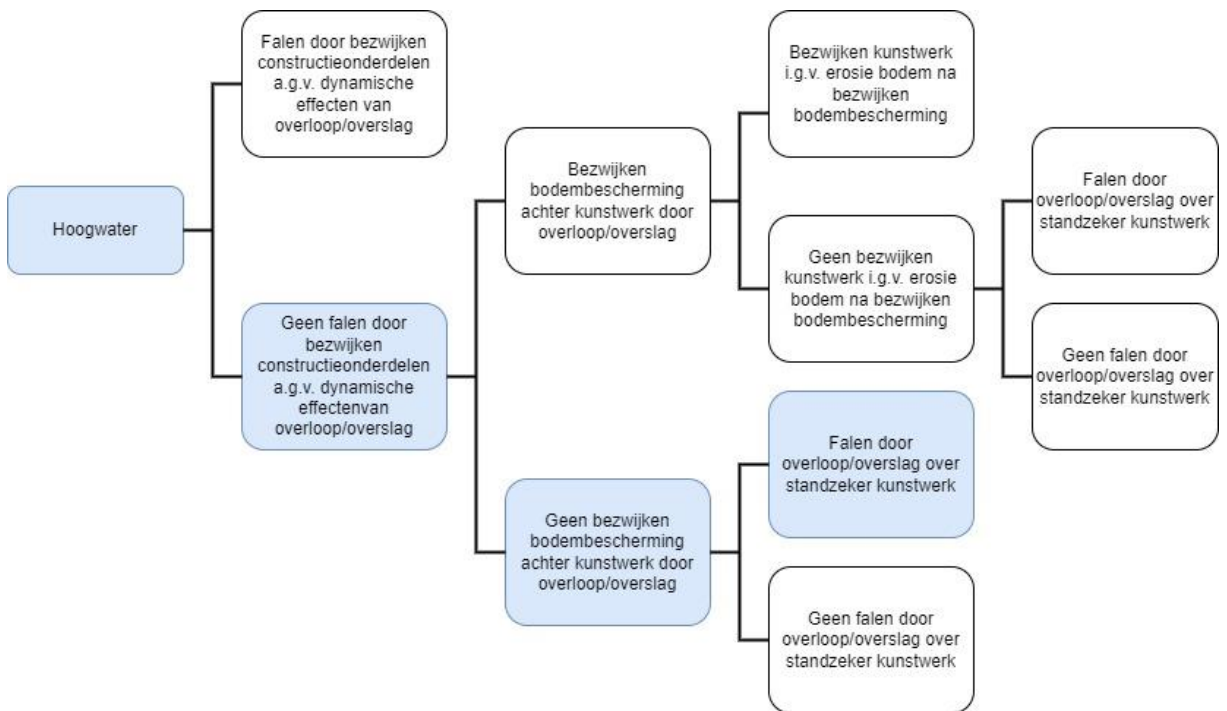
Figuur 28: Faalpad 1 overslag en/of overloop kunstwerk



Figuur 29: Faalpad 2 overslag en/of overloop kunstwerk



Figuur 30: Faalpad 3 overslag en/of overloop kunstwerk



Figuur 31: Faalpad 4 overslag en/of overloop kunstwerk

Bijlage D Analyse: 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 onafhankelijke en afhankelijke wijze kunnen falen.

Het is mogelijk een (zeer) conservatieve benadering te kiezen, waarbij wordt uitgegaan van volledige afhankelijkheid van falende doorstroomopeningen (oftewel: als één keermiddel faalt dan falen ze allemaal) en een totaal doorstroomoppervlak bestaande uit de sommatie van de doorstroomoppervlakken van alle aanwezige doorstroomopeningen.

Een tweede methode is het uitvoeren van een handberekening, 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 3 ($P_{f,kw|erosie}$). Hoe meer kokers er ongewenst open blijven staan, des te groter de kans dat het kunstwerk bezwijkt.

Tabel 3: 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 4 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 4: 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 is ten eerste het gevolg van 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 oorzaak van afhankelijkheid in het 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:

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

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 scenario²⁶:

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

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 3 en Tabel 4.

²⁶ De vergelijking voor $P_{BS, jaar}$ is een benadering. Indien de faalkans per getijperiode te groot is, gaat deze benadering niet meer op.

Faalkans keermiddelen per sluitvraag (P_{ns})

A. *Faaloorzaak 1: De kans per sluitvraag dat i van de n openstaande kokers niet gesloten kunnen worden door oorzaken die volledig onafhankelijk zijn*

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

Waarbij:

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

Met $P_{ns,i \text{ kokers onafh}}$ 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 door het volledig afhankelijk falen (niet sluiten) van de drie schuiven en het onafhankelijk falen van i van de deuren.*

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

Waarbij:

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

$$P_{f,voeding} = P_{f,stromvoorziening} \cdot P_{f,noodaggregaat} \quad [1/vraag] \quad C-7$$

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 5 specifiek voor deze casus. Het wordt aanbevolen om deze waarden voor andere casussen en objecten opnieuw te beschouwen.

Tabel 5: Gebruikte variabelen bij de casus

Variabele	Waarde	Beschrijving
n	3	Aantal openingen [-]
P_{BS}		Faalkans Betrouwbaarheid Sluiten [1/jaar]
$P_{ns, schuif}$	1,00E-4	Faalkans per sluitvraag schuif ²⁷ , falen schuif t.g.v. gebeurtenissen anders dan falen voeding en drukvat [1/vraag]
$P_{ns, deur}$	1,00E-2	Faalkans per sluitvraag wachtdeur ²⁸ [1/vraag]
$P_{ns, koker, onafh.}$	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

²⁷ Uit: Bijlage B van de Werkwijzer Ontwerpen Waterkerende Kunstwerken [12]

²⁸ Faalkans op basis van expert judgement.

P_f, drukvat	3,00E-5	Faalkans hydraulische drukvat per vraag. De faalfrequentie = 5,00E-6 [kans per uur] ²⁹ . 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, stroomvoorziening	1,00E-4	Faalkans per vraag stroomvoorziening ³⁰ [1/vraag]
P_f, noodaggregaat	1,00E-2	Faalkans per vraag noodaggregaat ³¹ [1/vraag]
P_f, voeding	1,00E-6	Faalkans voeding (elektriciteitsnet en noodaggregaat) [1/vraag], zie formule H-7
P_{ns}, 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]

Resultaat handberekening

Het combineren van de faalkansen leidt tot een kans voor Betrouwbaarheid sluiting kunstwerk (BSKW) van 5,08E-04 per 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 toetspoor 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.

²⁹ Uit: Tabel B3.9 van Leidraad Kunstwerken (mei 2003) [9]

³⁰ Faalkans op basis van uitspraak van netbeheerder Liander.

³¹ Uit: Tabel B3.8 van Leidraad Kunstwerken (mei 2003) [9]

kokers open (n)

P_{open} 1
0,4

aantal gefaalde kokers (i)

	Faaloorzaak 1	Faaloorzaak 2
P_{ns}	1,00E-06	3,10E-07
$P_{f,KW erosie}$	0,5	0,5
$P_{BS,getij}$	2,00E-07	6,20E-08
$P_{BS,jaar}$	1,41E-04	4,37E-05

$P_{BS,jaar,1\ koker\ open}$ 1,85E-04

kokers open (n)

P_{open} 2
0,2

aantal gefaalde kokers (i)

aantal mogelijkheden (binomiaalcoëfficiënt)

	Faaloorzaak 1	Faaloorzaak 2	Faaloorzaak 1	Faaloorzaak 2
P_{ns}	2,00E-06	6,14E-07	1,00E-12	3,10E-09
$P_{f,KW erosie}$	0,5	0,5	1	1
$P_{BS,getij,scenario}$	2,00E-07	6,14E-08	2,00E-13	6,20E-10
$P_{BS,jaar,scenario}$	1,41E-04	4,33E-05	1,41E-10	4,37E-07

$P_{BS,jaar\ \Sigma scenario}$ 1,84E-04

$\Sigma P_{BS,2\ kokers\ stonden\ initieel\ open}$ 1,85E-04

4,37E-07

kokers open (n)

P_{open} 3
0,1

aantal gefaalde kokers (i)

aantal mogelijkheden (binomiaalcoëfficiënt)

	Faaloorzaak 1	Faaloorzaak 2	Faaloorzaak 1	Faaloorzaak 2	Faaloorzaak 1	Faaloorzaak 2
P_{ns}	3,00E-06	9,11E-07	3,00E-12	9,21E-09	1,00E-18	3,10E-11
$P_{f,KW erosie}$	0,5	0,5	1	1	1	1
$P_{BS,getij,scenario}$	1,50E-07	4,56E-08	3,00E-13	9,21E-10	1,00E-19	3,10E-12
$P_{BS,jaar,scenario}$	1,06E-04	3,21E-05	2,11E-10	6,49E-07	7,05E-17	2,19E-09

$P_{BS,jaar\ \Sigma scenario}$ 1,38E-04

$\Sigma P_{BS,3\ kokers\ stonden\ initieel\ open}$ 1,39E-04

6,49E-07

2,19E-09

$\Sigma P_{BS, totaal}$

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

Bijlage E Veiligheidsfilosofie constructieve veiligheid en haar historie

Algemeen

In de loop der tijd is er veel veranderd in de wijze waarop constructieve veiligheid in de ontwerpnormen is opgenomen. Aangezien de te toetsen kunstwerken in verschillende perioden zijn gebouwd heeft men te maken met verschillende veiligheidsfilosofieën. Om oude ontwerpberekeningen op een juiste wijze te kunnen interpreteren wordt hierop ingegaan. Enkel de belastingen en materialen die normaal gesproken worden gebruikt bij waterkerende kunstwerken worden hier beschouwd.

Bij constructieve vraagstukken is er sprake van een belastingzijde (S van Sollicitation) en van een sterktezijde (R van Resistance). Het is nu de kunst om deze twee zijden dusdanig op elkaar af te stemmen dat uiteindelijk met voldoende waarschijnlijkheid kan worden aangetoond dat geldt $S \leq R$. In Hydra-Ring wordt uitgegaan van een betrouwbaarheidsmethode van de derde orde (probabilistisch). In de ontwerpnormen wordt uitgegaan van een betrouwbaarheidsmethode volgens de tweede orde (semi-probabilistisch). Om tot een goede invoer in Hydra-Ring te komen, dient een vertaalslag te worden gemaakt van de normen naar de invoer van Hydra-Ring.

Werkwijze Hydra-Ring

De belastingzijde (S) in de sommen wordt door Hydra-Ring verzorgd. Hydra-Ring genereert de waterstand en golfbelasting aan de buitenzijde van het object. De gebruiker dient alleen de bijbehorende waterstand aan de binnenzijde in te voeren en de hierop van toepassing zijnde spreiding. Met behulp hiervan kan Hydra-ring de maatgevende combinatie van verval en golfcondities bij verschillende overschrijdingsfrequenties bepalen.

Voor de sterktezijde (R) dient de gebruiker een constructieve sterkte op te geven. Voor de invoer van de sterkte voor zowel STCO en STCG geldt dat hier een verwachtingswaarde (R_m) ingevuld dient worden. De schematisering van R_m (R_{lin} resp. R_{kwad}) voor STCO en STCG in hoofdstuk 4 van de gebruikershandleiding Riskeer – Faalmechanismen kunstwerken [31] toegelicht. Hieronder wordt ter ondersteuning daarvan per tijdsperiode de achtergrond van R_m toegelicht voor STCO.

Veiligheidsfilosofie in ontwerpnormen vanaf 1990

Vanaf 1990 is de TGB1990 beschikbaar welke in 2012 is opgevolgd door de Eurocodes (NEN-EN 1990 – 1999). De veiligheidsfilosofie is identiek, maar de getalsmatige invulling verschilt. In de semi-probabilistische methode conform de Eurocodes en TGB1990 (zie onderstaande figuur) wordt van zowel de sterkte als de belasting de gemiddelde waarde (= verwachtingswaarde = S_m en R_m) en de spreiding (σ_S en σ_R) bepaald. Met behulp hiervan is de normale verdeling voor zowel belasting als sterkte vastgelegd. Vervolgens is voor de belastingzijde gezocht naar de 5%-overschrijdingswaarde. Deze waarde wordt dus in 5% van de gevallen van een steekproef van de belasting overschreden. Deze waarde wordt gevonden door bij de gemiddelde waarde 1,64 maal de spreiding op te tellen. De nu gevonden waarde wordt de karakteristieke waarde van de belasting genoemd (S_k).

Voor de sterkte geldt dat gezocht wordt naar de 5%-onderschrijdingswaarde. Deze waarde wordt dus in 5% van de gevallen bij een steekproef op sterkte onderschreden. Deze waarde wordt gevonden door van de gemiddelde waarde 1,64 maal de spreiding af te trekken. De nu gevonden waarde wordt de karakteristieke waarde van de sterkte genoemd (R_k).

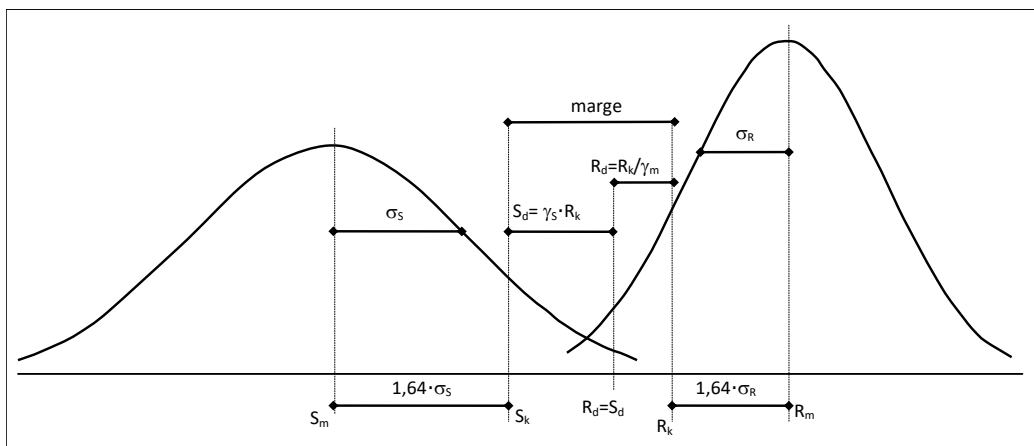
Voor het bepalen van de rekenwaarden van sterkte en belasting wordt in de Eurocodes en de TGB1990 gebruik gemaakt van partiële veiligheidsfactoren. Door de karakteristieke sterkte te delen door een materiaalfactor (γ_m) wordt de rekenwaarde van de sterkte (R_d) gevonden. Door de karakteristieke belasting te vermenigvuldigen met een belastingfactor (γ_s) wordt de rekenwaarde van de belasting (S_d) gevonden. Op deze wijze wordt de in de huidige normen de geëiste veiligheidsmarge gecreëerd.

Safety format 1990 – 2012 en 2012 - 2018:

Voor de belasting- en materiaalfactoren vanaf 1990 tot aan met 2012 wordt verwezen naar de TGB1990 en Leidraad Kunstwerken [9]. Vanaf 2012 tot aan met 2018 wordt specifiek voor waterkerende constructies verwezen naar de Eurocodes en Leidraad Kunstwerken. De TGB en Eurocodes zijn in principe geschreven voor gebouwen en in de Leidraad Kunstwerken wordt ingegaan op belastingen specifiek voor natte constructies. Vanaf 2012 is er een aanvulling op de Leidraad Kunstwerken beschikbaar ten gevolge van de komst van de Eurocodes³², waarin een nieuwe waarde voor de belastingfactor voor de hoogwaterbelasting wordt geïntroduceerd.

$$R_d \geq S_d$$

$$\frac{R_k}{\gamma_R} \geq S_k \gamma_S$$



Figuur 32: Verhouding sterkte en belasting vanaf 1990

Safety format 2018 - heden:

Voor de vigerende werkwijze wordt verwezen naar de Werkwijzer Ontwerpen Waterkerende Kunstwerken (WOWK) [12] welke de Leidraad Kunstwerken in 2018 heeft vervangen. Daarmee is vanaf 2018 de belastingfactor voor specifiek de hoogwaterbelasting (verval en golven) komen te vervallen en wordt nu direct met de rekenwaarde van de hoogwaterbelasting gerekend. Er is geen karakteristieke waarde meer gedefinieerd. Voor alle overige belastingen is de werkwijze met een belastingfactor nog steeds van toepassing.

³² Zie ook het document "Afstemming Leidraad Kunstwerken en Eurocode, Activiteit 1: Belastingfactoren bij maatgevende waterstanden 1204875-002-GEO-0008" van Deltares. Dit document is op te vragen bij Helpdesk Water.

- Voor de Hoogwaterbelastingssituatie:

$$R_d \geq S_d$$

$$\frac{R_k}{\gamma_R} \geq S_d$$

- Voor alle overige belastingen:

$$R_d \geq S_d$$

$$\frac{R_k}{\gamma_R} \geq S_k \gamma_S$$

Veiligheidsfilosofie in ontwerpnormen 1972 – 1990 (TGB 1972)

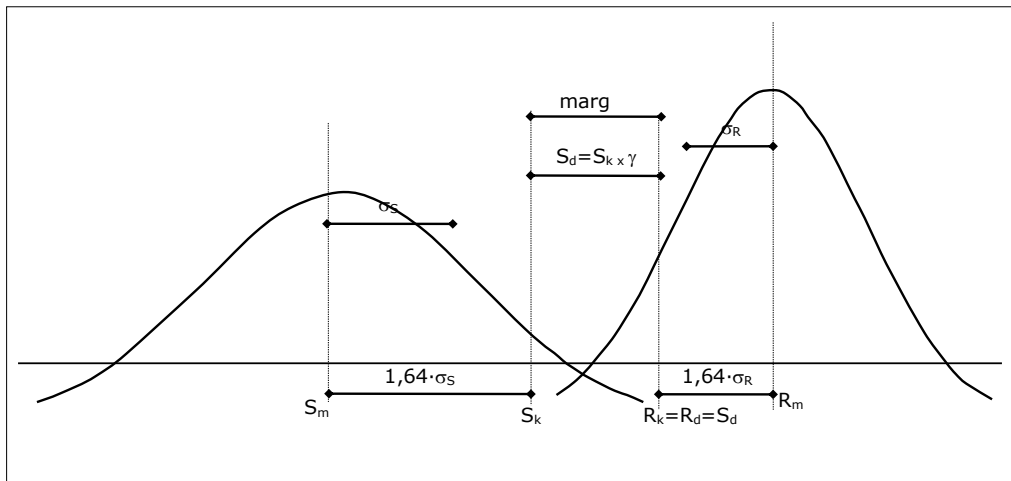
In de semi-probabilistische methode conform de ontwerpnormen vanaf 1972 tot 1990 werd ook al van zowel de sterkte als de belasting de gemiddelde waarde (R_m en S_m) en de karakteristieke waarde (R_k en S_k) bepaald. Voor het bepalen van de rekenwaarden gebruikte men daarentegen een overall veiligheidsfactor (genaamd belastingfactor) welke met de karakteristieke belasting(-en) werd vermenigvuldigd en per materiaal was bepaald.

- Beton: $\gamma = 1,7$ (VB1974/1984-beton, NEN3880: Regulations concrete, Artikel A401.2.2)
- Staal: $\gamma = 1,5$ (TGB1972-staal, NEN3851: Staalconstructies, Artikel 1.9.2)
- Hout: vanaf 1972 bleef men voor hout de methode van voor 1972 gebruiken, zie volgende kopje.

Safety format vanaf 1972 - 1990:

$$R_d \geq S_d$$

$$R_k \geq S_k \gamma$$



Figuur 33: Verhouding sterkte en belasting vanaf 1972 tot 1990

Veiligheidsfilosofie in ontwerpnormen vanaf 1955 (TGB 1955)

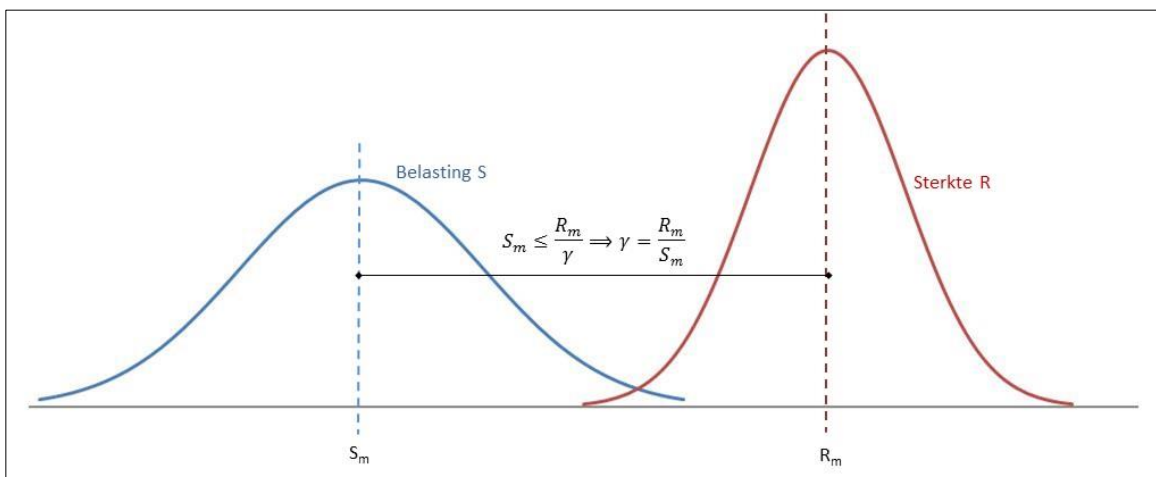
Voor 1972 beschouwde men in de ontwerpnormen belastingen en materiaalsterkte als deterministen. Veiligheid creëerde men door met toelaatbare materiaalspanningen (σ_a) te rekenen. Toelaatbare spanningen worden verkregen door de vloeigrens of de breuksterkte van het materiaal

te delen door een veiligheidscoëfficiënt. Deze reductiefactor γ werd niet vermeld in de voorschriften, maar was impliciet opgenomen door σ_a voor te schrijven. Ten behoeve van het narekenen worden hier, waar mogelijk, de γ 's voor de verschillende materialen gegeven:

- Beton en betonstaal $\gamma = 1,8$
- Staal: $\gamma = 1,5$
- Hout: γ is voor dit materiaal niet bekend. Een mogelijke methode is om de gemiddelde sterkte te bepalen volgens de huidige normen en te reduceren vanwege mogelijke degeneratie.

Deze veiligheidsfilosofie sluit dus niet aan op de huidige praktijk. Hoewel de veiligheid in de bovenstaande procedure geheel is ondergebracht aan de sterktekant, wijkt het deterministische safety format sterk af van de semi-probabilistische safety formats van na 1972. De toelaatbare materiaalspanning (σ_a) en vloeï- of breukspanning zoals gebruikt voor 1972 zijn deterministisch en niet te vergelijken met een stochast van de materiaalsterkte, uitgedrukt in de ontwerp-, representatieve (karakteristieke) en gemiddelde waarde, zoals gebruikt na 1972.

Voor het probabilistisch toetsen volgens het WBI 2017 van kunstwerken die gebouwd zijn voor 1972, is het echter wel nodig om een gemiddelde waarde van de constructieve sterkte te bepalen. Aangezien de werkwijze van voor 1972 die informatie niet geeft, dient een vertaalslag gemaakt te worden. Uit praktisch oogpunt wordt ten behoeve van de beoordeling de materiaalsterkte van voor 1972 wel als stochast beschouwd en wordt aanbevolen de toelaatbare spanning (σ_a) te interpreteren als ontwerpwaarde en de vloeï- of breukspanning als representatieve waarde.



Figuur 34: Constructieve veiligheid TGB 1955

Bijlage F Vereenvoudigde beoordeling sterkte en/of stabiliteit aan de hand van de WOWK

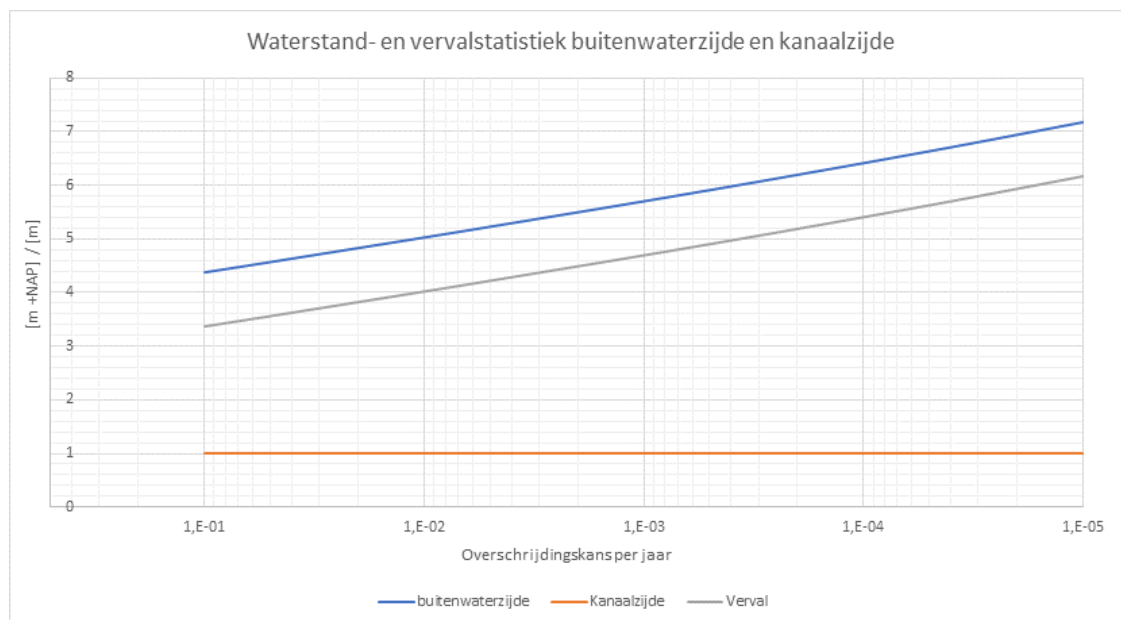
Met de komst van de Werkwijzer ontwerpen Waterkerende Kunstwerken [12] is het mogelijk om kunstwerken semi-probabilistische te ontwerpen maar ook te beoordelen. Hierbij zijn twee mogelijkheden:

1. Gebruik van de WOWK middels een 'omgekeerde toepassing' van de relatie tussen betrouwbaarheidsindices en veiligheidsfactoren uitgaande van een Unity Check van 1.
2. Maak gebruik van het feit dat ontwerpen die voldoen aan de WOWK minimaal de bij het ontwerp geëiste betrouwbaarheid bezitten

Vereenvoudigde faalkansinschatting aan de hand van ontwerpgegevens en de WOWK

In de WOWK [12] is een semi-probabilistische ontwerpverificatiemethode voor de hoogwaterbelastingssituatie opgenomen, gebaseerd op een landsdekkende kalibratiestudie [26]³³. Daarbij is de relatie gelegd tussen faalkanseisen en rekenwaarden. Door deze relatie 'andersom' te gebruiken, kan uit een berekening met rekenwaarden een faalkans worden geschat. Een mogelijk uitgangspunt om dat te doen, is te bepalen wanneer sprake is van Unity Check=1 en de bijbehorende faalkans(eis) op te zoeken.

De werkwijze wordt aan de hand van een voorbeeld toegelicht, namelijk de faalkansinschatting van de buitendeuren van fictieve schutsluis (STCO) die een buitenwater aan de kust verbindt met een kanaal. De onderstaande vervalstatistiek is afgeleid met Hydra-NL.



Figuur 35: Waterstand- en vervalstatistiek buitenwaterzijde en kanaalzijde

³³ Opgemerkt wordt dat kennis van dit document niet vereist is voor toepassing van de WOWK, maar dat het voor de gespecialiseerde lezer mogelijk meerwaarde oplevert.

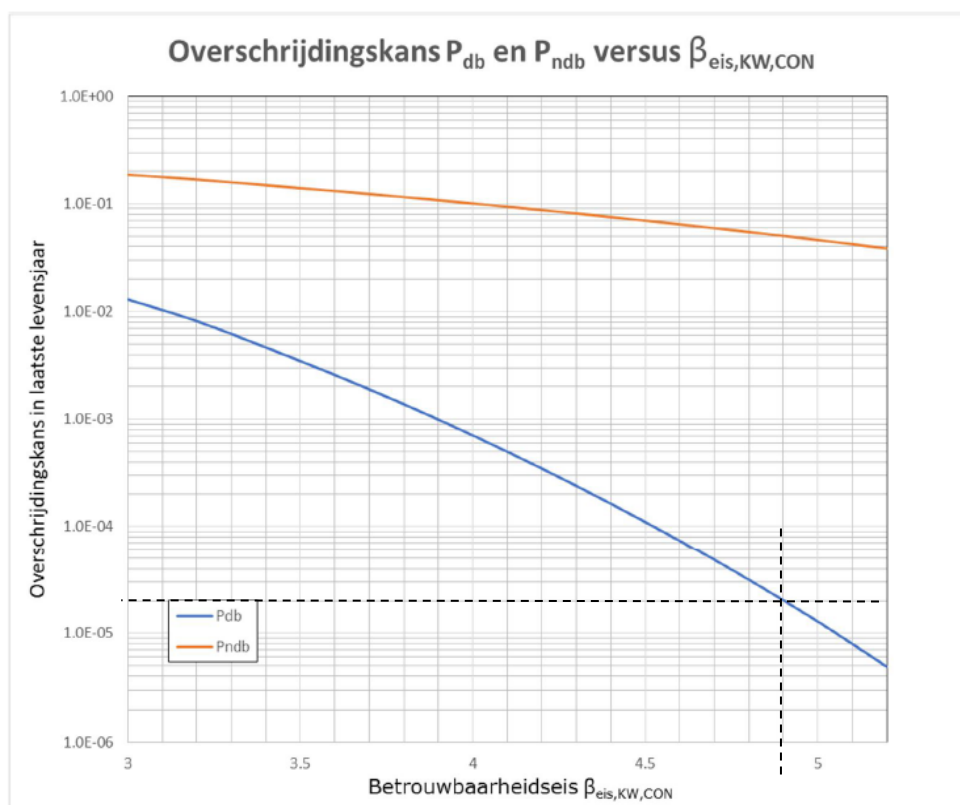
Er is in het ontwerp geen rekening gehouden met golfbelasting bij extreem hoogwater. Omdat bij extreem hoogwater de wind aflagend is bij de sluis, zal dat ook in deze beoordeling worden aangehouden. In dit geval bestaat de hydraulische belasting dus alleen uit vervalbelasting.

Uit de ontwerpdocumenten volgt een ontwerpbelasting die middels Bijlage D is vertaald naar de equivalente huidige rekenwaarde van de vervalbelasting ($E_{d,nieuw}$), deze is gelijk aan 5,9 meter. Dit verval heeft een overschrijdingskans van circa 2×10^{-5} per jaar volgens bovenstaande figuur. Met Figuur 36 in de WOWK (hieronder opgenomen) kan vervolgens de kans voor STCO, uitgedrukt in β , worden bepaald die hoort bij een overschrijdingskans van de hydraulische belasting van 2×10^{-5} per jaar (blauwe lijn, want hydraulische belasting is dominant ten opzichte van het eigen gewicht). Deze kans is gelijk aan $\beta = 4,9$ met als referentieperiode 1 jaar. Uitgedrukt in kans per jaar:

$$P_{eis,STCO} = \Phi(-\beta_{eis,STCO}) = \Phi(-4,9) = 4,8 \cdot 10^{-7} \text{ per jaar}$$

Met de op deze wijze geschatte faalkans kan direct worden geverifieerd of aan de eis bij de norm wordt voldaan.

Ofwel voor beoordelen wordt Figuur 36 in de WOWK in de omgekeerde richting gebruikt. Wanneer een nieuw te bouwen sluis op dit moment op deze locatie gebouwd zou moeten worden die een rekenwaarde van 5,9 meter verval kan keren met $UC = 1,0$, dan heeft deze sluis een faalkans voor constructief falen van $4,8 \times 10^{-7}$ per jaar.



Figuur 36: Aanbevolen overschrijdingskansen verval- en golfbelasting P_{db} en P_{ndb} volgens 6.10b bij verificaties op basis van de Waterwet

Kunstwerk ontworpen met WOWK

Indien een kunstwerk ontworpen is conform de WOWK zal dit kunstwerk minimaal de bij het ontwerp vereiste sterkte bezitten. Hieruit volgt dan direct de betrouwbaarheidsindex (en of faalkans) waaraan de constructie zal voldoen.



Foto voorzijde: Stuw bij Hagestein, Beeldbank.rws.nl, Rijkswaterstaat

Foto achterzijde: <https://beeldbank.rws.nl>, Rijkswaterstaat / Jan van den Broeke



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Deltares