

Rode Draad Waterkerende Kunstwerken

Ontwikkeling kennis en kunde voor
overstromingskansanalyse waterkerende kunstwerken

Datum	20 september 2022
Versie	1.0
Status	Groene versie

Colofon

Uitgegeven door Hoogwaterbeschermingsprogramma, Hoogheemraadschap
Hollands Noorderkwartier, Deltares en Rijkswaterstaat WVL
Auteurs Joost Bredeveld, Niek Verdijck
Informatie Ellen Tromp
E-mail ellen.tromp@deltares.nl

Datum 20 september 2022
Versie 1.0
Status Definitief

Versiebeheer

1.0	20-09-2022	Groene versie voor HWBP-programmateam

Inhoud

Totstandkoming Groene versie Rode Draad - Proces 4

1	Inleiding 5
1.1	Definitie waterkerende kunstwerken 6
1.2	Faalpaden 6
1.3	Faalmechanismen 7
2	Fenomenologische beschrijving van overstroming veroorzaakt door stroming door kunstwerken 8
2.1	Niet Sluiten kunstwerk 8
2.1.1	Fenomenologische beschrijving niet sluiten kunstwerk 8
2.1.2	Faalpad niet-sluiten 9
2.2	Overslag en/of overloop kunstwerk 9
2.2.1	Fenomenologische beschrijving overslag en/of overloop kunstwerk 9
2.2.2	Faalpaden overslag en/of overloop bij kunstwerk 10
2.3	Piping bij kunstwerk 11
2.3.1	Fenomenologische beschrijving piping bij kunstwerk 11
2.3.2	Faalpaden piping bij kunstwerk 12
2.4	Constructief falen kunstwerk 12
2.4.1	Fenomenologische beschrijving sterkte en stabiliteit puntconstructies 12
2.4.2	Faalpad sterkte en stabiliteit puntconstructies 13
3	Overzicht huidige kennis voor beoordelen van kunstwerken 15
3.1	Niet sluiten kunstwerk 15
3.2	Overloop en/of overslag kunstwerk 18
3.2.1	Falen aansluitconstructie door overslag/overloop 18
3.3	Piping bij kunstwerk 18
3.4	Constructief falen Kunstwerk 20
3.4.1	Falen door bezwijken waterkerende constructieonderdelen (STCO) 20
3.4.2	Falen door instabiliteit constructie en grondlichaam (STCG) 21
3.4.3	Falen t.g.v. aanvaren 22
4	Rode draden; mogelijkheden op (door)ontwikkeling kennis en kunde 24
4.1	Toelichting 24
4.2	Niet sluiten kunstwerk 24
4.3	Overslag en/of overloop kunstwerk 29
4.4	Piping bij kunstwerk 30
4.5	Sterkte en stabiliteit puntconstructies 32
5	Prioritering 39
5.1	Toelichting 39
5.2	Algemeen 39
5.3	Niet sluiten kunstwerk 39
5.4	Overslag en/of overloop kunstwerk 40
5.5	Piping bij kunstwerk 40
5.6	Sterkte en stabiliteit kunstwerk 41

Referenties 42

Totstandkoming Groene versie Rode Draad Waterkerende kunstwerken - Proces

In een iteratief proces hebben Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (via het HWBP project Samenwerken aan Kunstwerken), Rijkswaterstaat WVL, Deltares en het HWBP de voorliggende groene versie van een 'rode draad' aangemaakt over het onderwerp overstroming door falen van waterkerende kunstwerken. Dat betreft een gezamenlijk aangemaakt document met een door de betrokken partijen gedragen overzicht van relevante aspecten, kennis en kennisleemtes bij het bepalen van een overstromingskans van waterkerende kunstwerken. Eerder is ook al voor andere faalmechanismen een rode draad opgesteld. Gedurende de totstandkoming van de rode draad voor waterkerende kunstwerken zijn diverse partijen betrokken geweest. Hieronder staan de betrokken organisaties en deskundigen genoemd:

Inhoudelijke kern

- Joost Breedevelt (Inhoudelijk opsteller)
- Niek Verdijck (inhoudelijk opsteller / dossierhouder WVL)

Afstemming en inbedding omgeving

- Ellen Tromp (opdrachtgever vanuit Samenwerken aan Kunstwerken)
- Han Knoeff (borging Rode draden)
- Kenrick Heijn (technische begeleider programmadirectie HWBP)
- Alessandra Bizzarri (borging rode draden)

Begeleidersgroep op inhoud en inbedding omgeving

- Patrizia Bernardini (RWS Aanpak Sluizen)
- Daan Dunsbergen (kenniscoördinator kunstwerken)

Klankbordgroep

- Adviesteam Dijkontwerp (o.a. Bob van Bree en Rob Delhez)
- Martijn P.C. de Jong / Otto Weiler (beiden Deltares)
- RWS- WVL (Arnaud Casteleijn en Marieke Hazelhoff)
- Ruben Jongejan (RMC)
- KKP Kunstwerken

Onderwerp: Rode draad overstroming bij falen van waterkerende kunstwerken

1 Inleiding

In dit document geven we overzicht over de huidige stand van zaken van de kennis en de kennisleemtes voor overstromingskansanalyse bij waterkerende kunstwerken. Continu worden zowel bij het programma Kennis voor Keringen (KvK) als in de HWBP Kennis- en Innovatie Agenda (KIA) en verschillende SITO¹-programma's van Deltares diverse onderzoeksvoorstellen ingediend en uitgevoerd. Deze voorstellen hebben vaak betrekking op verbetering van de kennis over en inzicht in een individuele schakel in de keten van opeenvolgende gebeurtenissen die leidt tot een overstroming; dus meer inzicht in (de belasting- of sterktecondities bij) een mechanisme of een vergroot bewustzijn en mate van gesteld staan van de organisatie bij calamiteiten. Om de voorstellen op elkaar af te stemmen, en ten behoeve van de prioritering van onderzoeksvoorstellen, is het van belang om de onderzoeksvoorstellen in de (causale) keten van gebeurtenissen te plaatsen. Het overzicht dat hieruit volgt, geeft ook inzicht in relevante kennisleemten die nog niet in de onderzoeksprogramma's worden opgepakt. Die uitwerking is voor waterkerende kunstwerken in het huidige document vastgelegd als een 'rode draad': een gezamenlijk aangemaakt document met een door de betrokken partijen gedragen overzicht van relevante aspecten, kennis en kennisleemtes. Een rode draad is eerder voor overstromingskansanalyse bij andere faalmechanismen uitgewerkt, zoals piping en macrostabiliteit.

De relevante kennisleemten zijn afhankelijk van de omstandigheden, onder andere de locatie in het watersysteem, en het type waterkering. In rode draden wordt richting gegeven aan de vraag welk onderzoek in welke situatie zinvol is in verband met de impact die het onderzoek kan hebben op een specifiek faalpad c.q. de overstromingskans. Een faalpad is daarbij gedefinieerd als de keten van gebeurtenissen die leiden tot een overstroming met significante hinder en/of schade in het achterland, conform de definitie zoals aangehouden in de Waterwet (zie Paragraaf 1.2). Verder geven rode draden samenhang aan tussen de verschillende onderzoeken en beschrijven zij de prioriteiten voor verdere kennis en innovatieontwikkelingen. Binnen projecten kunnen op basis van het overzicht uit een rode draad keuzes worden gemaakt welke nieuwe kennis zij kunnen toepassen of doorontwikkelen. Hierbij wordt opgemerkt dat een rode draad een overkoepelend verhaal beschrijft dat input en sturing kan geven voor een project, maar dat hier juist project-specifiek ook weer onderbouwd van kan worden afgeweken.

Bij het opstellen van plannen van aanpak voor KvK, de KIA, Kennisprogramma Natte Kunstwerken (KpNK) en/of het Strategisch onderzoek van Deltares kan door de opstellers van die plannen op dit document worden aangesloten. Dat moet helpen om te zien waar raakvlakken zijn en om te voorkomen dat onderzoeken in verschillende projecten dubbel worden gedaan. Door met plannen van aanpak aan te sluiten op dit document kan ook helder worden aangegeven wat de achtergrond en de relatie met andere projecten van een onderzoeksvoorstel is.

In dit document wordt alleen ingegaan op relevante aspecten, kennis en kennisleemtes ten aanzien van waterkerende kunstwerken in de context van de overstromingskansbenadering. Uiteraard kunnen er ook andere overwegingen zijn om een onderzoek op te starten in relatie tot een waterbouwkundig kunstwerk als onderdeel van een dijkversterkingsproject. Dat kan zijn vanwege mogelijk andere functies die dit kunstwerk vervult of vanuit een Life Cycle Cost-benadering, duurzaamheid (energie), CO₂-reductie, klimaatadaptatie, ruimtelijke ordening (herinrichting i.r.t. waterveiligheidslandschappen), et cetera.

De doelgroep van dit memo is in eerste instantie de groep van experts die betrokken zijn bij het opstellen en uitwerken van aan waterbouwkundige kunstwerken gerelateerde onderzoeksprogramma's. Daarnaast is dit memo bedoeld voor medewerkers van waterschappen die een

¹ Subsidieregeling instituten voor Toegepast Onderzoek

goede achtergrondkennis van natte kunstwerken hebben en op basis daarvan kunnen nagaan welke kennis meegenomen of doorontwikkeld kan worden in hun dijkversterkingsproject.

De voorliggende rode draad is tot stand gekomen door eerst de faalpaden bij waterkerende kunstwerken die leiden tot een overstroming met significante hinder en/of schade in het achterland te beschouwen. De kennis die voor ieder van de gebeurtenissen in deze faalpaden relevant zijn en is toegepast in het WBI 2017, is zo goed als mogelijk gecategoriseerd al naargelang die betrekking heeft op: theorie, model, rekenregel, veiligheidsformat en implementatie. In Hoofdstuk 2 worden deze categorieën verder toegelicht.

1.1 Definitie waterkerende kunstwerken

Omwillen van eenduidigheid wordt bij de onderstaande uitwerking van de rode draad de definitie van een waterkerend kunstwerk uit de Waterwet (2016) aangehouden:

"Een waterkerende constructie is een constructie die onderdeel uitmaakt van een waterkering en over een beperkte lengte de waterkerende functie van het grondlichaam geheel of gedeeltelijk overneemt, maar is aangelegd ten behoeve van een andere (utilitaire) functie die de waterkering kruist (zoals schutten en spuien). In verband met deze utilitaire functie zijn deze waterstaatkundige constructies meestal voorzien van één of meer beweegbare afsluitmiddelen."

Voor deze rode draad worden kunstwerken met een doorstroomoppervlakte van het kunstwerk > 0,5 m² beschouwd. Kunstwerken met een kleinere doorstroomoppervlakte worden niet apart geregistreerd bij het HWBP (HWBP, 2020). Middels deze HWBP-ondergrens, waar geen specifieke onderbouwing aan ten grondslag ligt anders dan een categoriseringskeuze, wordt voorkomen dat de zeer kleine constructies (inlaatconstructies van zeer beperkte grootte en capaciteit) in de rapportages apart besproken en gerapporteerd moeten worden. De voorliggende rode draad waterkerende kunstwerken is opgesteld zonder onderscheid te maken in type kunstwerk.

N.B. De uitgebreidere typologieën waterkerende constructies, zoals beschreven in het WBI, zouden in een volgende stap meegenomen kunnen worden. Bij die indeling wordt rekening gehouden met verschillende aspecten waarop constructies onderscheidend zijn:

- mate waarin de constructie bijdraagt aan veiligheid tegen overstromen
- mate waarin het waterkeren van een constructie afhankelijk is van de werking en inzet van andere delen in de beschouwde doorsnede van de waterkering (oftewel: de 'mate van zelfstandigheid' bij het waterkeren) en welke functies nog meer door de constructie moeten worden vervuld
- onderscheid tussen constructietype en verschijningsvorm (zoals materiaalgebruik)
- moment waarop de constructie water moet keren
- locatie waar de constructie zich bevindt (bv in een zone voor of achter kering)

In de huidige rode draad is dat onderscheid vanwege compactheid/eenvoud nog niet gemaakt.

1.2 Faalpaden

Een faalpad is een gehele keten van opeenvolgende gebeurtenissen die samen leiden tot een overstroming conform de definitie in de Waterwet en later de Omgevingswet. Het faalpad met de grootste kans van optreden voor een specifiek waterkerend kunstwerk is sterk afhankelijk van het ontwerp en geometrie van het kunstwerk en van de omgeving waarin het zich bevindt.

Voor het bepalen van de veiligheidsopgave wordt in het Beoordelings- en Ontwerp-instrumentarium (BOI) per faalpad een overstromingskans bepaald. Deze worden meegenomen bij het assembleren van het veiligheidsoordeel van het gehele dijktraject.

Voordat het falen van een waterkerend kunstwerk tot een doorbraak leidt, moeten dus verschillende opeenvolgende gebeurtenissen optreden. Bij elk van de vier genoemde initiële mechanismen wordt de fenomenologische beschrijving, ofwel het faalpad, in de volgende paragrafen beschreven. Dit is overgenomen uit een concept versie van de BOI 2023 documentatie bij het opstellen van het voorliggende document (06-2022).

Van de mechanismen een faalpaden wordt een uitgebreide omschrijving opgenomen in de BOI 2023 documentatie van handleidingen en technische leidraden. Deze worden begin 2023 gepubliceerd op Informatiepunt Leefomgeving ([IPLO](#)). Ook de meest actuele versie zal de lezer daar kunnen vinden.

1.3 Faalmechanismen

Bij een analyse van een overstromingskans worden verschillende situaties onderscheiden. Voor het bepalen van de veiligheidsopgave voor Nederland, en de daaruit resulterende versterkingsopgave voor HWBP-projecten, wordt hier gefocust op de overstromingskans enkel door een hoogwater. Dit is een projectmatige keuze.

In een analyse wordt onderscheid gemaakt tussen enerzijds de gebeurtenissen (i.e. processen van verandering van een toestand naar een nieuwe, opvolgende toestand) die, gegeven een situatie bij hoogwater, tot overstroming kunnen leiden en anderzijds de toestand (op basis van scenario's) van onderdelen van de waterkering voorafgaand aan de hoogwatersituatie.

Voor de faalpaden gebruiken we de vier onderscheidende faalmechanismen die voor waterkerende kunstwerken worden gehanteerd in het BOI als input, te weten (met tussen haakjes de afkorting/benaming):

- Betrouwbaarheid sluiting kunstwerk (BSKW), kans op niet sluiten per sluitvraag
- Hoogte kunstwerk (HTKW), kans op overmatige overslag en/of overloop
- Piping bij kunstwerk (PKW), kans op tekort aan weerstand tegen piping
- Sterkte en stabiliteit puntconstructies (STKWp), kans op constructief falen

Voor elk van die faalmechanismen is een eigen foutenboom en overzicht van achterliggende deelmechanismen opgenomen in WBI 2017. Bovendien bevat het WBI 2017 op basis daarvan:

- Gedetailleerde beschrijving van het faalproces; het proces van initiatie tot falen.
- Vigerende veiligheidsfilosofie
- Beschrijving deelfaalmechanismen, met daarbij (1) WBI kennisbasis belasting- en sterktemodellen, (2) de destijds meegenomen nieuwe kennis voor WBI 2017 en (3) keuze WBI 2017 in model voor de overstromingskansanalyse.

Deze rode draad geeft bij elk van de vier onderscheidende faalmechanismen een overzicht van nieuwe kennisontwikkeling die kan bijdragen bij het verbeteren van een overstromingskansanalyse en het aanscherpen van de faalkansen in relatie tot waterkerende kunstwerken. Daarbij wordt voorgesteld welke kennisontwikkeling de meeste prioriteit zou moeten krijgen, omdat onderzoek naar die onderwerpen naar alle waarschijnlijkheid de meeste impact zal hebben op de overstromingskans.

2 Fenomenologische beschrijving van overstroming veroorzaakt door stroming door kunstwerken

In de volgende paragrafen wordt per faalmechanisme van een waterkerend kunstwerk eerst de keten van gebeurtenissen richting het falen van de waterkering beschreven. In deze fenomenologische beschrijving geven de nummers tussen haakjes de plaats van de gebeurtenis in de foutenboom per faalmechanisme aan.

In deze foutenboom wordt aangegeven hoe uit de kansen op de onderscheiden gebeurtenissen kan worden gekomen tot de kans op de topgebeurtenis: de kans op falen van het waterkerend kunstwerk door het betreffende faalmechanisme. In de foutenbomen staat bij de mechanismen de Z-functies genoemd, overeenkomend met het WBI 2017. De laatste fase in de foutenboom betreft het feitelijke falen van de waterkering ofwel het optreden van overstromingsgevolgen.

2.1 Niet Sluiten kunstwerk

2.1.1 Fenomenologische beschrijving niet sluiten kunstwerk

Falen van de waterkering als gevolg van het faalmechanisme niet-sluiten kunstwerk treedt op wanneer het instromende volume aan water door een onterecht openstaand kunstwerk dusdanig groot is, dat dit leidt tot substantiële schade en/of slachtoffers (overstromingsgevolgen). Falen van de waterkering treedt bij niet-sluiten kunstwerk via de onderstaande gebeurtenissen op als :

- (1) Zich een hoogwater aandient,
- 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
- EN (5a) Het kunstwerk zelf bezwijkt als gevolg van bezwijken van de bodembescherming met substantiële schade en/of slachtoffers (overstroming) als gevolg². Hiervoor moet eerst de bodembescherming achter het kunstwerk bezwijken. 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. Aangenomen wordt dat deze situatie altijd leidt tot het overschrijden van het kombergend vermogen van het achterland.
- OF (5b) Het kunstwerk zelf blijft staan maar het instromend volume door het niet gesloten kunstwerk niet kan worden geborgen in het achterliggende (water-) systeem zonder dat dit leidt tot substantiële schade en/of slachtoffers (overstroming).

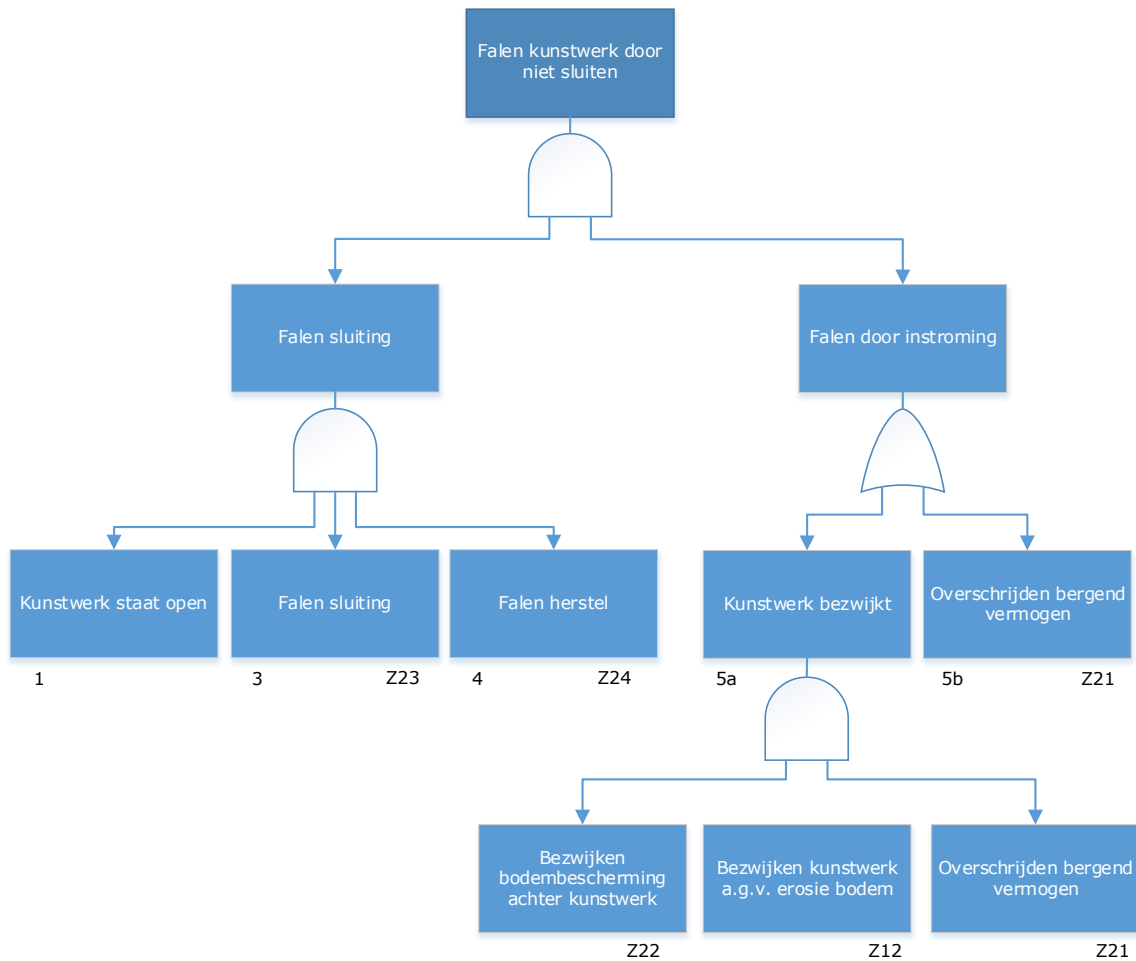
² In praktische zin kan het zijn dat een kunstwerk bezwijkt als gevolg van het instromende water, zonder dat dit tot grote gevolgen (schade en/of slachtoffers) leidt. Dat komt dan doordat de komberging van het achterland heel groot is en de bresgroei beperkt blijft. Vanuit de primaire functie van het kunstwerk zal een dergelijke benadering bij het ontwerp echter niet gewenst zijn als uitgangspunt. In geval van een beoordeling vanuit waterveiligheid kan het wel worden gebruikt om aan te tonen dat wordt voldaan aan de eisen.

2.1.2 *Faalpad niet-sluiten*

Overzicht faalpaden en belangrijkste aspecten

De faalpaden voor niet sluiten bij kunstwerken zijn in onderstaande foutenboom weergegeven. In de vorige paragraaf zijn de diverse stappen in deze foutenboom al nader toegelicht.

De foutenboom in Figuur 1 geeft aan hoe vanuit de kansen op de onderscheiden gebeurtenissen kan worden gekomen tot de kans op de topgebeurtenis: de kans op falen van het waterkerend kunstwerk door niet sluiten van het kunstwerk bij een sluitvraag. Binnen het BOI is het gebruikelijk de relevante faalpaden te onderscheiden op basis van gebeurtenissenbomen. Opgemerkt wordt dat zowel foutenbomen als gebeurtenissen niet meer dan hulpmiddelen zijn om tot een bepaling van de kans op een overstroming te komen.



Figuur 1 Foutenboom Niet Sluiten Kunstwerk

2.2 Overslag en/of overloop kunstwerk

2.2.1 *Fenomenologische beschrijving overslag en/of overloop kunstwerk*

Falen van de waterkering als gevolg van overslag en/of overloop kunstwerk vindt plaats indien er door golfoverslag en/of overloop zoveel water over het hoogwaterkerend gesloten kunstwerk of aansluitconstructie gaat, dat dit leidt tot substantiële schade en/of slachtoffers (overstromingsgevolgen). In die toestand faalt het kunstwerk volgens de definitie uit de Waterwet. Falen van de waterkering via de onderstaande gebeurtenissen treedt op als:

Zich een hoogwater aandient

- 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)³.
- OF (3) De keermiddelen bezwijken als gevolg van dynamische effecten⁴ door het overslag-/overloopdebiet. Aangenomen wordt dat deze situatie altijd leidt tot substantiële schade en/of slachtoffers (overstroming)¹.

2.2.2 *Faalpaden overslag en/of overloop bij kunstwerk*

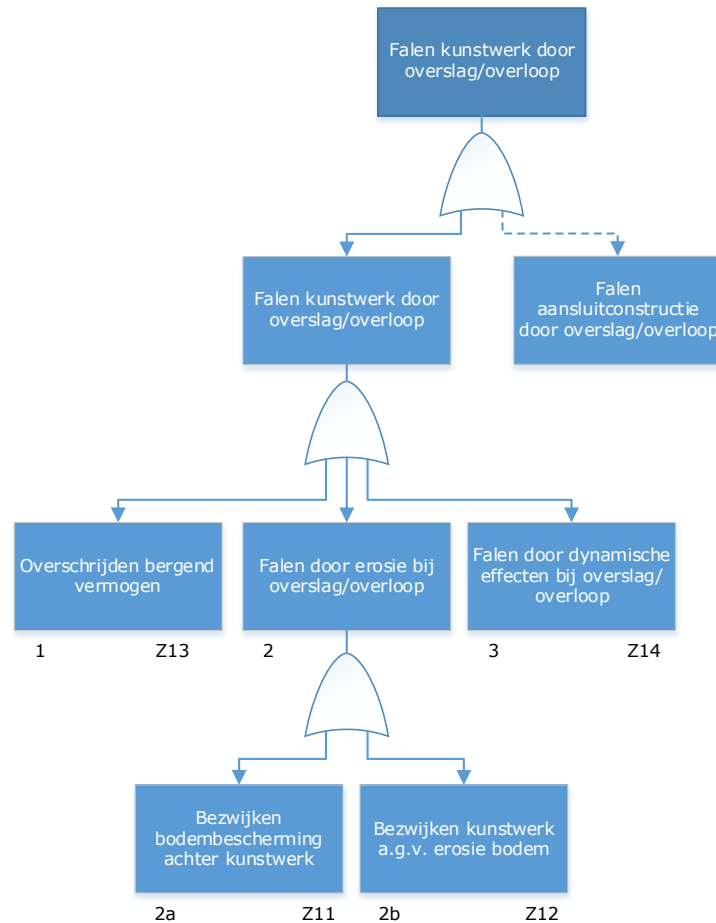
Overzicht faalpaden en belangrijkste aspecten

De faalpaden voor overslag en/of overloop bij kunstwerken zijn in onderstaande foutenboom weergegeven. In de vorige paragraaf zijn de diverse stappen in deze foutenboom al nader

³ 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 zal dit erg lastig zijn om dit aannemelijk te maken, vandaar de aanname dat bezwijken van delen van het kunstwerk altijd leidt tot overschrijden van het kombergend vermogen.

⁴ Het als gevolg van het soms wel (en dus optreden van luchtinsluitingen) en soms niet aanliggen van het overslag-/overloopdebiet over het keermiddel, waardoor een wisselende hydraulische belasting op het keermiddel plaatsvindt;

toegelicht. Opgemerkt wordt dat falen van de aansluitingsconstructie door een tekort aan kerende hoogte niet in de modellen van dit faalmechanisme is opgenomen. Wel is hiervoor bij het BOI een handreiking opgesteld die gebruikt kan worden voor aansluitconstructies. Hier wordt alleen de kerende hoogte van het kunstwerk zelf behandeld.



Figuur 2 Foutenboom overslag en/of overloop kunstwerk.

2.3 Piping bij kunstwerk

2.3.1 Fenomenologische beschrijving piping bij kunstwerk

Falen van de waterkering als gevolg van piping bij kunstwerken vindt plaats indien er door de grondwaterstroming als gevolg van het verval over het kunstwerk zoveel zand uitspoelt dat dit leidt tot bezwijken van het kunstwerk en hiermee tot substantiële schade en/of slachtoffers (overstromingsgevolgen). Falen van de waterkering via de onderstaande gebeurtenissen treedt op als:

- Zich een hoogwater aandient
- EN (1) Als gevolg van een geconcentreerde kwelstroming⁵ zodanige uitspoeling van grondeeltjes
- (1a) onder het kunstwerk ontstaat (onderloopsheid)
- OF (1b) rondom het kunstwerk ontstaat (achterloopsheid)

⁵ Hierbij wordt aangenomen dat het optredende kweldebiet nooit groot genoeg zal zijn dat er een overstroming ontstaat;

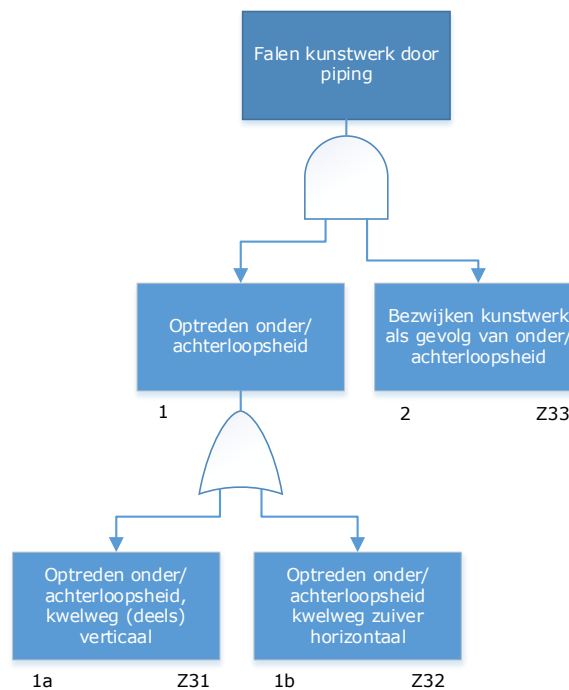
dat een doorgaand erosiekanaal (pipe) ontstaat.

- EN (2) Het kunstwerk bezwijkt door deze pipevorming waardoor een bres in de waterkering ontstaat met substantiële schade en/of slachtoffers (overstroming) als gevolg.

2.3.2 Faalpaden piping bij kunstwerk

Overzicht faalpaden en belangrijkste aspecten

De faalpaden voor piping bij kunstwerken zijn in onderstaande foutenboom weergegeven. In de vorige paragraaf zijn de diverse stappen in deze foutenboom al nader toegelicht.



2.4 Constructief falen kunstwerk

2.4.1 Fenomenologische beschrijving sterkte en stabiliteit puntconstructies

Falen van de waterkering als gevolg van het faalmechanisme sterkte en stabiliteit puntconstructies treedt op wanneer het kunstwerk en/of de omringende grondconstructie bezwijkt als gevolg van het optredende verval en/of aanvaarbelasting en het vervolgens instromende volume aan water dusdanig groot is dat dit leidt tot substantiële schade en/of slachtoffers (overstromingsgevolgen).

Onder het faalmechanisme sterkte en stabiliteit puntconstructies bevinden zich feitelijk drie aparte faalmechanismen, sterkte waterkerende constructieonderdelen (STCO), stabiliteit constructie en grondlichaam (STCG) en aanvaren van een (deels) gesloten constructie. Hierbij is de laatste (aanvaren) grotendeels vergelijkbaar met STCO, omdat het gaat om het bezwijken van onderdelen van de constructie.

Falen van de waterkering als gevolg van een tekort aan sterkte (STCO en aanvaren) treedt op als:

Figuur 3 Foutenboom piping kunstwerk.

- (1) Zich een hoogwater aandient en het kunstwerk (deels) gesloten staat,
- EN (2) Onderdelen van het kunstwerk bezwijken door hydraulische belastingen of door een aanvaring
- EN (4) Herstel van de bezweken waterkering mislukt
- EN (5a) Het kunstwerk bezwijkt als gevolg van bezwijken van de bodembescherming met substantiële schade en/of slachtoffers (overstroming) als gevolg⁶. Om dit te laten gebeuren moet dan eerst de bodembescherming achter het kunstwerk bezwijken. 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. Aangenomen wordt dat deze situatie altijd leidt tot het overschrijden van het kombergend vermogen van het achterland.
- OF (5b) 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:

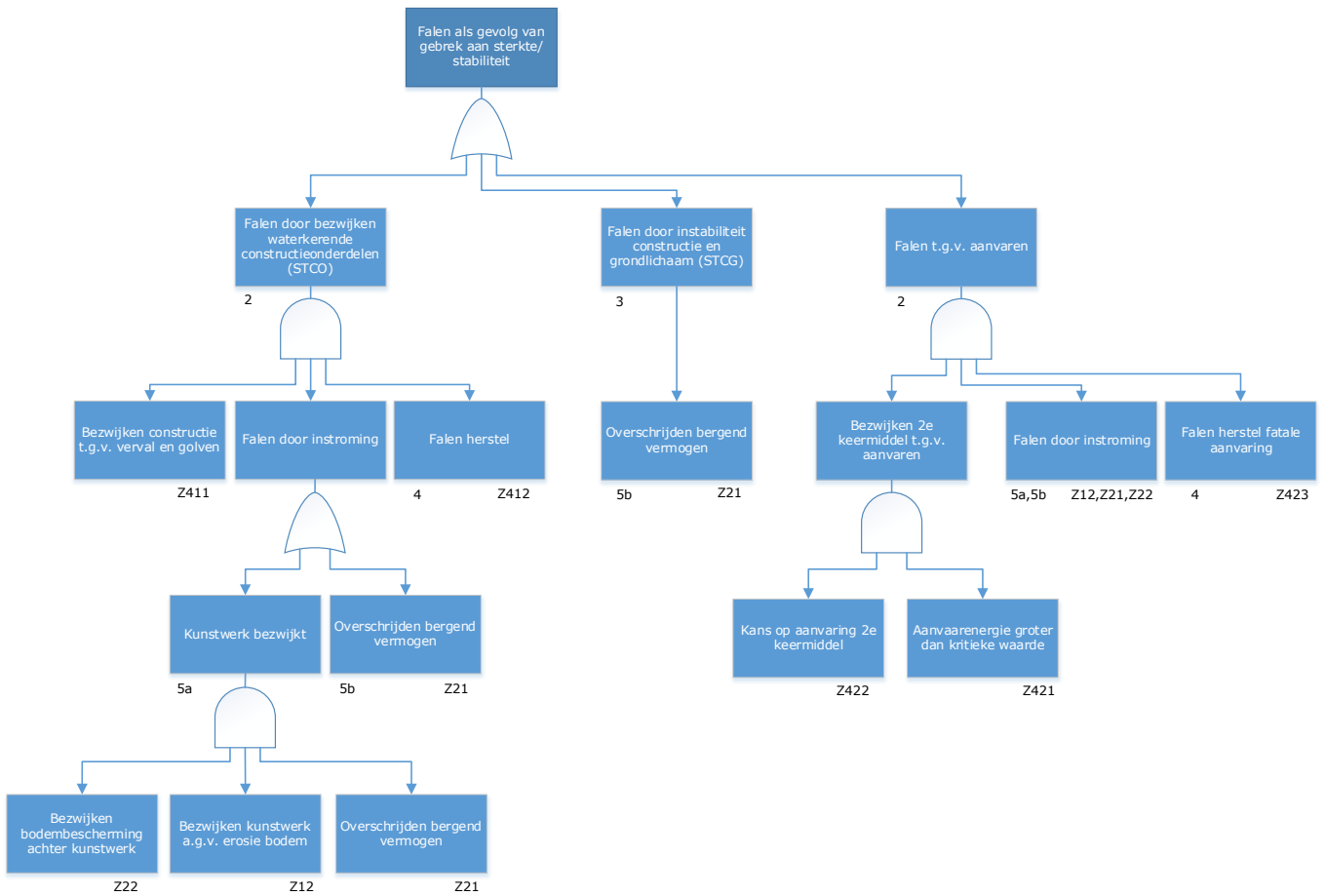
- (1) Zich een hoogwater aandient en het kunstwerk (deels) gesloten staat,
- EN (3) Instabiliteit van het kunstwerk optreedt met geheel bezwijken van de constructie als gevolg
- EN (5b) Het instromend volume door het bezweken kunstwerk niet kan worden geborgen in het achterliggende (water-) systeem zonder dat dit leidt tot substantiële schade en/of slachtoffers (overstroming).

2.4.2 *Faalpad sterkte en stabiliteit puntconstructies*

Overzicht faalpaden en belangrijkste aspecten

De faalpaden voor sterkte en stabiliteit puntconstructies zijn in onderstaande foutenboom weergegeven. In de vorige paragraaf zijn de diverse stappen in deze foutenboom al nader toegelicht.

⁶ 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 4 Foutenboom sterkte en stabiliteit puntconstructies.

3 Overzicht huidige kennis voor beoordelen van kunstwerken

Dit hoofdstuk van deze rode draad kunstwerken geeft een overzicht van de kennis en methoden om een overstromingskans door het falen van kunstwerken te bepalen. Productinnovaties en overige constructieve maatregelen worden hier niet behandeld.

In de opvolgende paragrafen is voor de mechanismen uit de foutenbomen beschreven wat de achterliggende theorie, het model, het veiligheidsformat en de wijze van implementatie is in het WBI 2017. Veelal is dit overgenomen uit de WBI 2017 documentatie.

Nieuwe (generieke) kennis kan uiteindelijk worden opgenomen in (basis)instrumenten waarmee veiligheidsanalyses voor het beoordelen en ontwerpen van waterkeringen en waterkerende kunstwerken worden uitgevoerd. Daarbij zijn mechanismen binnen de faalpaden cruciale onderdelen. Juist kennis van die mechanismen zal een bepaalde gereedheid moeten hebben. Dit kan worden uitgedrukt in een Technology Readiness Level (TRL)⁷ of Stakeholder Readiness Level (SRL)⁸.

Om elk onderdeel systematisch uit te werken en te beschrijven wordt in de volgende paragrafen bij elk faalpad dezelfde set aan onderdelen zoveel mogelijk omschreven:

- Beschrijving: Fenomenologische beschrijving gebeurtenis incl. maatgevende parameters.
- Theorie: De theoretische beschrijvingen van het fysische en organisatorische proces.
- Model: De vertaling theorie naar model (formulepark).
- Rekenregel: De vertaling van model naar eenvoudige rekenregel.
- Schematisering en veiligheidsformat: Het format waarmee het rekenmodel / rekenregel kan worden vertaald naar een kans.
- Implementatie: Het ontsluiten van kennis in instrumenten, en daarmee de toepasbaarheid. De wijze van implementatie in WBI 2017.

3.1 Niet sluiten kunstwerk

Z21, Z13 – Overschrijden bergend vermogen	
Beschrijving	Instromend volume zorgt voor overstrooming (als functie van tijd, verval over het kunstwerk, hoogwatergolf, kombergend vermogen achterland). Een overstrooming is gedefinieerd in de Waterwet als een dusdanig groot volume instromend water dat dit leidt tot substantiële schade en/of slachtoffers (overstromingsgevolgen). Als gevolg van een geopend of constructief bezwaken kunstwerk of overslag en/of overloop bij een stand zeker en gesloten kunstwerk kan water naar binnen stromen.
Theorie en model	De kans dat het aanwezige bergend vermogen niet toereikend is om het totale instromend volume tijdens een hoogwatergolf te bergen in het achterliggende systeem zonder dat dit tot significante gevolgen leidt. Voor het overslag-/overloopdebiet over het gesloten kunstwerk is een aantal modellen beschikbaar, zie H3.3.2 van [16]. De vigerende kennisbasis is vastgelegd in [14].
Rekenregel	Dominante parameters: <ul style="list-style-type: none"> • Tijdsduur hoogwatergolf / stormduur • (tijdsafhankelijk) verval over het kunstwerk • Doorstroomoppervlak • Kombergend vermogen (oppervlak maal kritieke peilverhoging ten opzichte van het waterpeil bij aanvang van hoogwater)

⁷ <https://rwsinnoveert.nl/uitleg-trl/uitleg-trl/>

⁸ <https://rwsinnoveert.nl/@208132/stakeholder/>

Schematisering en veiligheidsformat	
Implementatie	[16]

Z22, Z11 – Bezwijken bodembescherming achter kunstwerk	
Beschrijving	De bodembescherming achter de constructie kan falen ten gevolge van de instroming van water. Dit is het geval als er stroomsnelheden ontstaan die hoger zijn dan waarvoor de bodembescherming is ontworpen; de kritieke stroomsnelheid.
Theorie en model	Zie H5 van [16], H7 van [13] en [15]; stroming over lage drempel, volkomen en onvolkomen overlaat en stroming door verdronken koker.
Rekenregel	$Z_{11} = Q_c - Q_{os/ol}$ <p><u>Sterktemodel</u>: directe invoer. Q_c betreft het kritieke instromend debiet, die is gelinkt aan de kritieke stroomsnelheid juist boven de bodem. Dit wordt bepaald a.d.h.v. formules van bijv. Izbash, Shields en Pilarczyk of voor grondsoorten op basis van deels empirische bevindingen, zie H7.8.1 van [4]. $Q_{os/ol}$ betreft...</p> <p><u>Belastingmodel</u>: invoer en resultaat formule overslag/overloopdebiet of instromend debiet. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen twee belastingssituaties:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. De bodembescherming wordt belast door horizontale stroming. 2. De bodembescherming wordt rechtstreeks belast door een overstortende straal. <p>Dominante parameters:</p> <ul style="list-style-type: none"> • gemiddelde stroomsnelheid • kritieke stroomsnelheid juist boven bodembescherming • impact grondwaterstroming (door kwel via filterlagen) op sterkte bodem(bescherming)
Schematisering en veiligheidsformat	
Implementatie	[8] [10] [11] Software Riskeer met onderliggende faalmechanisme-bibliotheken, zie referentie [2].

Z12 – Bezwijken kunstwerk a.g.v. erosie bodem	
Beschrijving	De kans op bezwijken van het kunstwerk als gevolg van het eroderen van de bodem. Het ontstaan van erosiekuilen kan plaatsvinden ter plaatse van de bodembescherming, maar ook ter plaatse van onbeschermd bodem aansluitend op de bodembescherming. Dit laatste is alleen van belang indien dit leidt tot instabiliteit van het kunstwerk. Wanneer de bodembescherming correct is ontworpen en daarmee voldoende lang is, dan leiden erosiekuilen voorbij de bodembescherming niet tot instabiliteit van het kunstwerk.
Theorie en model	Het wordt uitgedrukt in de kans op bezwijken van het kunstwerk gegeven erosie bodem.
Rekenregel	Over het algemeen wordt bij het beoordelen ervan uitgegaan dat de kans op bezwijken van het kunstwerk gegeven erosie bodem gelijk is aan 1,0. Deze pragmatische keuze wordt over het algemeen gemaakt, omdat het fenomeen van ontgrondingskuilen en het effect ervan op het falen van de constructie is lastig te vatten met een kwantitatieve onderbouwing via

	kansen; voor de grootte (en diepte) van de ontgrondingskuilen is deze kwantitatieve onderbouwing er wel.
Schematisering en veiligheidsformat	
Implementatie	

Z23 – Falen sluiting	
Beschrijving	<p>Het beoordelen van het falen van de sluiting bestaat uit twee factoren bij dit mechanisme:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. De kans dat het kunstwerk niet (hoogwater-) kerend gesloten staat op het moment dat een hoogwater zich aandient. 2. De kans dat het sluiten van één of meer onafhankelijke doorstroomopeningen faalt op het moment dat dat vanuit hoogwaterkeren nodig is.
Theorie en model	<p>Bij het bepalen van de kans op open staan bij naderend hoog water (P_{open}) worden een viertal typen kunstwerken onderscheiden. Om de kans te bepalen zijn gegevens over het gebruik van het kunstwerk benodigd.</p> <ol style="list-style-type: none"> A. Altijd hoogwater kerend gesloten. B. Te openen op aanvraag. Voorbeeld: spuisluis. C. Te sluiten bij hoogwater. D. Te sluiten bij een calamiteit. Deze keermiddelen staan in beginsel ook tijdens een hoogwater niet gesloten en is alleen benodigd indien zich een calamiteit voordoet waardoor het waterkerend vermogen wordt aangetast. Bijv. objecten die geen directe relatie met het buitenwater hebben. <p>De kans op niet sluiten (P_{ns}) kan grofweg met drie methoden worden bepaald.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Met behulp van scoretabellen, zie [8] en [7]. Deze methode is van toepassing op keermiddelen die niet worden gesloten bij uitoefening van de primaire functie(s) van het kunstwerk maar alleen bij nadering van een hoogwater. 2. Met behulp van standaardfaalkansen voor keermiddelen die vanuit hun primaire functie regelmatig worden gesloten. In Bijlage B van [5] is dit voor een aantal veel voorkomende keermiddelen gedaan. 3. Met behulp van een geavanceerde foutenboomanalyse. Een dergelijke analyse is met name van belang bij grotere, meer complexe kunstwerken.
Rekenregel	In bijlage D van de schematiseringshandleiding Betrouwbaarheid sluiting [2] wordt het gehanteerde formulepark afgeleid.
Schematisering en veiligheidsformat	
Implementatie	Zie de referenties [2], [5], [8], [9], [10] en [13]

Z24 – Falen herstel	
Beschrijving	Nadat een reguliere sluiting is gefaald is in veel situaties nog een herstel van de sluiting mogelijk, bijv. met behulp van de inzet van alternatieve middelen, dan wel het uitvoeren van corrigerende maatregelen om de faaloorzaak weg te nemen.
Theorie en model	<p>Aspecten die een rol spelen:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Beschikbare tijd tussen sluitpeil en waterstand waarbij daadwerkelijk water door een niet gesloten opening naar binnen kan stromen. - Afmetingen en bereikbaarheid van de doorstroomopeningen. - Oorzaak falen van reguliere sluiting
Rekenregel	

Schematisering en veiligheidsformat	In eerste instantie wordt bij het WBI 2017 geen rekening gehouden met een kans op herstel, m.a.w. kans op falen herstel is 1,0.
Implementatie	

3.2 Overloop en/of overslag kunstwerk

Z11 (Z22), Z12 en Z13 (Z21) worden behandeld bij Niet Sluiten Kunstwerk.

Z14 – Falen door dynamische effecten bij overslag/overloop	
Beschrijving	Bij grote overslag- en/of overloopdebieten kan niet worden uitgesloten dat dynamische belastingen (zoals het trillen van de deuren door bijvoorbeeld insluiting van lucht onder de overstortende straal) optreden die kunnen leiden tot het bezwijken van het keermiddel. Overwogen is om dit als belastingsituatie te beschouwen bij falen waterkering doorgebrek aan sterkte van het kunstwerk (faalmechanisme sterkte en stabiliteit van kunstwerken). Omdat het echter direct samenhangt met de initiërende gebeurtenis overslag en/of overloop is ervoor gekozen het binnen het faalmechanisme overslag en/of overloop te behandelen
Theorie en model	Over dit deelfaalmechanisme is zeer weinig bekend. Als 'best guess' kan worden aangehouden dat een debiet groter dan 1,0 m ³ /s/m over een sluisdeur zeker niet toelaatbaar geacht moet worden. Voor de beeldvorming: dergelijke debieten horen bij waterstanden die circa 65 cm hoger zijn dan de kruin van de deuren. Incidenteel kan een hoger debiet toelaatbaar zijn, maar dit vraagt bij het WBI voor nadere onderbouwing.
Rekenregel	
Schematisering en veiligheidsformat	
Implementatie	

3.2.1 Falen aansluitconstructie door overslag/overloop

Falen aansluitconstructie is formeel geen toetspoot bij het WBI 2017. Echter het is wel een mechanisme waardoor falen van de waterkering kan optreden. Daarom wordt in de Handreiking aansluitconstructies [11] handreikingen gegeven voor het toetsen van aansluitconstructies. Hierbij wordt specifiek gericht op het kwalitatief toetsbaar maken van de horizontale, schuine en verticale overgangen in het vlak van de buitencontour tussen waterkerende kunstwerken enerzijds en andere waterkeringstypen anderzijds, die zich onder normale hydraulische condities boven water bevinden.

De handreiking beperkt zich tot:

- Een definitie van aansluitingen en aansluitconstructies.
- Een praktische indeling in categorieën van typen aansluitconstructies.
- Een lijst van de in Nederland meest voorkomende typen aansluitconstructies.
- Fenomenologische beschrijvingen van een aantal van deze in Nederland meest voorkomende aansluitconstructies.

Voor verdere doorontwikkeling is ook nog een aantal aanbevelingen gedaan.

3.3 Piping bij kunstwerk

Bij het beoordelen van kunstwerken worden mogelijk maatgevende kwelwegen onder en/of langs het kunstwerk geïdentificeerd. Door vervolgens daaruit een kritiek verval te bepalen en

dit te vergelijken met het maatgevend verval uit de hydraulische belastingen, wordt een oordeel gegeven voor het falen op piping bij een kunstwerk.

Bij piping in het WBI wordt momenteel geen faalkans bepaald. Echter, in een aanscherping op het oordeel is het mogelijk om (met bijv. PC-Ring) een probabilistische piping- of heave-analyse te doen. Daarnaast kan men ook denken aan:

- Peilbuismetingen.
- Geavanceerde grondwaterstromingsmodellen.
- Het principe van 'bewezen sterkte'.

Belangrijke gegevens voor de beoordeling op piping; voor de bepaling van de maatgevende kwelweg als voor de bepaling van het optredende uittredeverhang, meer hierover in het Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen [25]:

- Afmetingen van de constructie.
- De kwelschermen; aanwezigheid, locatie, dimensies, conditie, toestand, functioneren.
- De wijze waarop de constructie is gefundeerd.
- Ondergrond (grondonderzoek) samenstelling.
- Gegevens en staat van de bodembescherming, filterconstructies en indicatie van aansluiting, opbouw en onderhoudstoestand.

Bij de bepaling van Z31 en/of Z32 draait het bij het mechanisme Piping bij kunstwerken om het identificeren van mogelijk maatgevende kwelwegen onder en/of langs het kunstwerk, met als complicerende factor dat dit driedimensionaal moet gebeuren. De aard van de mogelijke kwelwegen bepaalt vervolgens welk model gebruikt wordt.

Z31 – Optreden onder/achterloopsheid, kwelweg (deels) verticaal	
Beschrijving	Ontstaan van pipes door terugschrijdende erosie in grond en uitspoeling door doorgaande pipes bij onder en/of achterloopsheid. De kwelweg is (deels) verticaal.
Theorie en model	Toets op opbarsten, d.m.v. formule met veiligheids- en schematiseringsfactor. Model van Lane. Kan probabilistisch in PC-Ring worden uitgevoerd. Heave-model (als Lane mogelijk niet conservatief is). Een hulpmiddel om de heave-toets uit te voeren is de fragmentenmethode. Geavanceerde grondwaterstromingsmodellen
Rekenregel	Parameters: - Kwelweglengte - Ondergrondparameters (creep-factor) - Modelparameters
Schematisering en veiligheidsformat	
Implementatie	Schematiseringshandleiding Piping bij Kunstwerk [3]

Z32 – Optreden onder/achterloopsheid kwelweg zuiver horizontaal	
Beschrijving	Ontstaan van pipes door terugschrijdende erosie in grond en uitspoeling door doorgaande pipes bij onder en/of achterloopsheid. De kwelweg is zuiver horizontaal.
Theorie en model	Model van Bligh. Kan probabilistisch in PC-Ring worden uitgevoerd. Oorspronkelijk was de rekenregel van Bligh bedoeld om zowel verticale als horizontale kwelwegen te beoordelen. In de Nederlandse beoordelings- en ontwerp praktijk wordt deze rekenregel echter alleen toegepast bij zuiver horizontale kwelwegen.

	Model van Sellmeijer, als er geen achterloopsheidschermen aanwezig zijn. Sellmeijer is probabilistisch in Riskeer mogelijk. Geavanceerde grondwaterstromingsmodellen.
Rekenregel	Parameters: <ul style="list-style-type: none"> - Kwelweglengte - Ondergrondparameters (creep-factor) - Modelparameters
Schematisering en veiligheidsformat	
Implementatie	Schematiseringshandleiding Piping bij Kunstwerk [3]

Geavanceerde grondwaterstromingsmodellen, hierbij kan worden gedacht aan:

- Niet stationaire grondwaterstromingsmodellen voor situaties waarbij de duur van hoogwater relatief kort is, zoals een getijdegebied of storm gedomineerd gebied.
- 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.

Z33 – Bezwijken kunstwerk als gevolg van onder/achterloopsheid	
Beschrijving	Als gevolg van onder- of achterloopsheid zal het kunstwerk bezwijken indien de stabiliteit van de gehele constructie door het optreden van die fenomenen voldoende wordt ondermijnd.
Theorie en model	Het voorspellen van de aard en omvang van pipes en pipegroei op basis van modelberekeningen is buitengewoon complex en uitkomsten zijn met grote onzekerheden omgeven. Ook de bepaling van een geloofwaardige kans op het bezwijken als gevolg van onder- en/of achterloopsheid is buitengewoon lastig. Daarnaast kunnen de relevante lokale omstandigheden sterk variëren.
Rekenregel	In eerste instantie gaat men bij het WBI 2017 er vanuit dat het kunstwerk bezwijkt indien onder/achterloopsheid optreedt en er ook geen mogelijkheid is tot herstel, m.a.w. kans op falen herstel is 1.
Schematisering en veiligheidsformat	
Implementatie	

3.4 Constructief falen Kunstwerk

3.4.1 Falen door bezwijken waterkerende constructieonderdelen (STCO)

Z12, Z21 en Z22 worden behandeld bij Niet sluiten Kunstwerk.

Z411 – Bezwijken constructie t.g.v. verval en golven	
Beschrijving	Waterkerende constructieonderdelen bezwijken t.g.v. hydraulische belastingen op de constructie.
Theorie en Model	Voor sterkte wordt in het WBI geen specifiek model voorgeschreven. Het is de bedoeling om een sterkte af te leiden uit gegevens omtrent de constructie, as-built (indien voor handen) dan wel actuele staat. De belasting wordt gevormd door een vervalbelasting, die lineair of kwadratisch evenredig kan zijn met de buitenwaterstand. De belasting

	door golven wordt met behulp van de formule van Goda-Takahashi meegenomen in deze vervalbelasting.
Rekenregel	Dominante parameters: In algemene termen: <ul style="list-style-type: none"> • Sterkte • Belastingen (en daarnaast analysehoogte en binnenwaterstand) Specifieke Riskeer invoerparameters gerelateerd aan het model van Goda-Takahashi: <ul style="list-style-type: none"> • o.a. bermbreedte, kerende hoogte, drempelhoogte.
Schematisering en veiligheidsformat	
Implementatie	

Z412 – Falen herstel	
Beschrijving	Na het bezwijken van waterkerende constructieonderdelen kan worden getracht de waterkerende functie te herstellen.
Theorie en model	Kans op falen van herstel van de waterkering na bezwijken van een constructieonderdeel.
Rekenregel	Over het algemeen wordt (conservatief) bij het beoordelen ervan uitgegaan dat de kans erop gelijk is aan 1,0. Oftewel, het kunstwerk wordt niet hersteld. Factoren van invloed: <ul style="list-style-type: none"> • Afmetingen van watervoerend element • Bereikbaarheid • Instroomsnelheid • Beschikbaarheid van alternatieve keermiddelen en benodigd materieel. • Beschikbare tijd
Schematisering en veiligheidsformat	
Implementatie	

3.4.2 Falen door instabiliteit constructie en grondlichaam (STCG)

Het betreft het falen van een kunstwerk als gevolg van het optreden van instabiliteit van de constructie dan wel het grondlichaam om het kunstwerk heen. Als gevolg hiervan treden er dusdanige vervormingen van de constructie op, dat dit leidt tot verdergaande erosie en uiteindelijk het ontstaan van een bres.

Mechanismen die hiertoe kunnen leiden hebben betrekking op de stabiliteit van het kunstwerk. Conform de afbakening van het concept WTI 2011 geldt dat alleen de grondconstructie voor en achter het kunstwerk betrokken wordt in mogelijke instabiliteitsvormen. De stabiliteit van de dijklichamen direct aansluitend aan het kunstwerk wordt getoetst in het dijkenstroom (macrostabiliteit) en niet hier behandeld.

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.
- 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.

Het mechanisme kan op eenzelfde wijze worden gemodelleerd als Z411 – Bezwijken constructie a.g.v. verval en golven. Echter, de sterkteparameters hebben betrekking op andere delen van de constructie.

Aangezien instabiliteit optreedt bij hoge buitenwaterstanden en er – in geval van falen via dit mechanisme – ook daadwerkelijk bresvorming optreedt, wordt reststerkte in de vorm van komberging en bodembescherming niet meer meegenomen in het WBI 2017. Hiervoor zijn diverse redenen, in eerste instantie pragmatisch (van grof naar fijn), maar ook gebrek aan kennis over bresgroei.

3.4.3 Falen t.g.v. aanvaren

Aanvaren is feitelijk geen apart faalmechanisme, maar een deelfaalmechanisme van sterkte waterkerende constructieonderdelen (STCO). Desondanks is het wel expliciet in de foutenboom opgenomen, omdat de belasting komt door een door de mens veroorzaakte aanvaargebeurtenis, niet zozeer door hydraulische belastingen.

Er zijn in het BOI drie mechanismen omschreven, deze worden hieronder samen behandeld.

- Z421 – Aanvaarenergie groter dan kritische waarde
- Z422 – Kans op aanvaring 2e keermiddel
- Z423 – Falen herstel fatale aanvaring

Z421, Z422 en Z423	
Beschrijving	Aanvaring van het kunstwerk door bijv. een schip waardoor het waterkerend vermogen van het kunstwerk vermindert en/of een kunstwerk niet sluit.
Theorie	Voor sterkte voor het opvangen van een aanvaring wordt in het WBI geen specifiek model voorgeschreven. Het is de bedoeling om een sterkte af te leiden uit gegevens omtrent de constructie, as-built dan wel actuele staat. Belasting wordt uitgedrukt als de kinetische energie van een representatief schip bij aanvaring op een bepaalde plek van het kunstwerk (m.n. het keermiddel).
Model	Het voorspellen van de aard en omvang van schade door een aanvaring op basis van modelberekeningen is buitengewoon complex en uitkomsten zijn met grote onzekerheden omgeven. Ook de bepaling van een geloofwaardige kans op een aanvaring is buitengewoon lastig. Het gaat om zeer kleine getallen en de relevante lokale omstandigheden die kunnen bijdragen aan een aanvaring kunnen sterk variëren.
Rekenregel	
Schematisering en veiligheidsformat	
Implementatie	[1] Programma Rijkskeringen – Werkwijze overstromingsrisico als gevolg van aanvaren [4] WBI 2017 – Schematiseringshandleiding sterkte en stabiliteit kunstwerk v3.0

In het Programma Rijkskeringen van Rijkswaterstaat is in de 1^e Landelijke Beoordelingsronde (LBO1) een pragmatische werkwijze gekozen hoe om te gaan met aanvaren van gesloten waterkerende kunstwerken binnen het areaal van Rijkswaterstaat, met *specifiek voor RWS* de twee conclusies hieronder. In de memo [1] worden deze conclusies nader onderbouwd. Het is de moeite waard deze RWS-conclusies breder te verkennen, zoals later in Hoofdstuk 4.

1. De overstromingskans als gevolg van aanvaren van een gesloten kunstwerk draagt op voorhand niet bij aan het overstromingsrisico van de waterkering.
2. Aanvaren is vanuit de primaire functie van een kunstwerk, het laten passeren van vaartuigen, goederen en mensen, een aspect dat gedegen aandacht behoeft ten einde de beschikbaarheid voor de primaire functie zo goed mogelijk te waarborgen.

4 Rode draden; mogelijkheden op (door)ontwikkeling kennis en kunde

4.1 Toelichting

In de volgende paragrafen is per faalmechanisme aangegeven welke nieuwe kennis en verdere (model)ontwikkeling kan bijdragen aan een scherpere schatting van de overstromingskans. Dit volgt uit ervaringen van de auteurs, gesprekken met adviseurs, het lopende Programma Rijkskeringen bij Rijkswaterstaat en zoals vastgelegd in [6]. Elke mogelijkheid op (door)ontwikkeling heeft een unieke code, die aangeeft aan welk (deel)faalmechanisme of onderwerp de (door)ontwikkeling toelevert (en daarmee hergebruik mogelijk maakt):

- A-codes: algemeen, niet specifiek toeleverend aan één faalmechanisme ;
- S-codes: specifiek toeleverend aan niet sluiten kunstwerk;
- B-codes: specifiek toeleverend aan het beschouwen van bodembeschermingen;
- K-codes: specifiek toeleverend aan het beschouwen van komberging;
- H-codes: specifiek toeleverend aan het beschouwen van hoogte;
- P-codes: specifiek toeleverend aan het beschouwen van piping;
- C-codes: specifiek toeleverend aan het beschouwen van sterkte en stabiliteit.

4.2 Niet sluiten kunstwerk

A1. Evaluatie hydraulische formuleringen

De ervaringen die (door Deltares) worden opgedaan bij het beoordelen van de OSK leren dat het, ook bij de bulk aan waterkerende kunstwerken, verstandig kan zijn om in overstromingskansanalyses de hydraulische ontwerpbelastingen inclusief achterliggende aannames (in relatie tot de wijze waarop de constructie deze afdraagt naar de ondergrond) te evalueren. Waar en op welk tijdstip in een hoogwatergolf en/of het sluitproces treden bijvoorbeeld in de huidige situatie de grootste hydraulische (golf)belastingen op, waar treedt een watersprong op en waar is sprake van diepte-gemiddelde stroomcondities.

Als algemene onderzoekstaak zou een uitwerking en evaluatie van alle in de richtlijnen voorgeschreven hydraulische formuleringen uitgevoerd kunnen worden, inclusief achterliggende kennis- en brondocumenten. Ook de achterliggende onderbouwing voor de gekozen formulering en daarvoor benodigde parameterwaarden kunnen onderzocht en geëvalueerd worden.

CONCREET: Evalueren van hydraulische formuleringen in de richtlijnen, en deze leggen langs recente inzichten uit beoordelingen en onderzoek.

A2. Inzicht in correlatie belastingparameters

In het verlengde van de aanleiding om de hydraulische formuleringen te evalueren (zie A1), is het ook verstandig om in overstromingskansanalyses de aannames omtrent de correlatie tussen (hydraulische) belastingparameters tegen het licht te houden. Bij extreme situaties is de kans op gelijktijdig optreden van extreme condities relevant. Sommige belastingparameters zijn deels gecorreleerd (hoge golven en hoge waterstand), maar niet alle. Het is zeer conservatief om van alle belastingaspecten voor alle onderdelen (ook diegene die niet relevant zijn voor het beschouwde faalmechanisme bij een gesloten kunstwerk, maar juist als het keermiddel nog niet volledig is gesloten) de hoogste waarde te combineren.

CONCREET: Inzichtelijk maken mate van (gedeeltelijke) correlatie bij belastingparameters in alle sporen, dus ook bij overslag en/of overloop.

A3. Specificeren hydraulische belastingen 'op maat'

Hoofdoel van (nader) R&D is het uitwerken en geschikt maken van een beschrijving van de maatgevende stroming en andere hydraulische belastingen op waterkerende kunstwerken aan de hand van algemene (kern)parameters. Dat betekent dat de complexiteit van zowel (de sterkte van) het kunstwerk als de hydraulische belastingen vereenvoudigd zullen moeten worden ten bate van efficiënt ontwerp en beoordeling. Bovendien zijn veel waterkerende kunstwerken 'one-off'-kunstwerken, wat betekent dat de specifieke eigenschappen van een kunstwerk ook in de algemene aanpak verdisconteerd moeten kunnen worden. Verder wordt in [14] en [15] genoemd dat onderzoeksresultaten uit [28] zijn verwerkt in een (destijds nieuwe) EurOtop 2015 [17]; inmiddels is een meer recente EurOtop 2018 manual beschikbaar en is ook in aanpalende vakgebieden (bijvoorbeeld voor het ontwerp van golfbrekers) meer inzicht gekomen in de geldigheid van de bestaande (praktijk)kennis en kunde. Deze nieuwe inzichten kunnen opnieuw worden bekeken en aangescherpt worden waar mogelijk.

CONCREET: Verbeteren van mogelijkheden om de invloed van specifieke eigenschappen van een (uniek) kunstwerk op de hydraulische belastingen – in dit geval met betrekking tot overslag en/of overloop – in een algemene aanpak te verdisconteren.

A4. Mogelijk maken van 'slimmer' combineren van faalkansen

In [22] wordt aanbevolen, overigens niet specifiek voor dit faalmechanisme, dat idealiter de faalkansen per vak/kunstwerk en faalmechanisme worden gecombineerd tot een overstromingskans rekening houdend met afhankelijkheden. De technische mogelijkheden daarvoor zijn in beginsel voorhanden (Hydra-Ring als opvolger van PC-Ring), maar helaas niet ontsloten via Riskeer/Ringtoets of een andere handige user-interface. Door te combineren rekening houdend met afhankelijkheden (anders dan in het huidige 'assembleren') kan conservatisme worden voorkomen.

CONCREET: Ontwikkelen van een praktisch bruikbare tool om faalkansen per vak/kunstwerk en faalmechanisme te combineren, rekening houdende met afhankelijkheden, tot een overstromingskans.

S1. Inzicht in oorzaak voor afkeur op niet-sluiten kunstwerk

Zijn beheerders wat betreft het falen van het sluitproces van keermiddelen onvoldoende 'in control'? Hebben zij de juiste informatie en geschikte handvatten en/of tools om hun taak uit te voeren? Of is er een gebrek aan data en ontbreken sluitprotocollen? In hoeverre bemoeilijkt het feit, dat veel kunstwerken (dus ook sluitprotocollen) maatwerkoplossingen zijn, het eenduidig komen tot beoordelingsuitkomsten? Er is geen volledig consistente toepassing binnen Nederland, enkele voorbeelden worden gegeven in [13].

CONCREET: Inzichtelijk maken waardoor veel kunstwerken in een beoordeling op de betrouwbaarheid van het sluitproces worden afgekeurd.

S2. Opstellen prior-verdelingen / kansen bij gebrek data

Het inzicht in de bijdrage van een gebrek aan geschikte handvatten en/of tools aan de afkeur op niet sluiten kunstwerk (zie S1) kan onder andere worden aangepakt door het aanreiken van handvatten in gevallen waar er onvoldoende locatie-specifieke data voorhanden is, bijvoorbeeld bij beperkte kennis over de kwaliteit van een bodembescherming.

CONCREET: Opstellen prior-verdelingen/kansen voor beoordelen niet sluiten kunstwerk voor toepassing bij onvoldoende locatie specifieke data.

S3. Richtlijnen tbv betrouwbaarheidsanalyse niet-sluiten kunstwerk

Volgens [22] zijn er op dit moment op hoofdlijnen twee methodieken om de kans op niet-sluiten bij kunstwerken te kwantificeren; een op maat gemaakte foutenboomanalyse (fijn) en een analyse met een gestandaardiseerde foutenboom en scoretabellen (grof). Wenselijk is om

deze twee methoden met elkaar in verband te brengen (hoe en wanneer scoretabellen benutten). Daarbij wordt aanbevolen om 'van grof naar fijn' te werken t.a.v. zowel de te hanteren foutenboom als kwantificering van kansen. Bij de uitwerking rekening houden met o.a.:

- een set minimale voorwaarden waaraan voldaan moet worden voordat überhaupt een zinvolle betrouwbaarheidsanalyse kan worden uitgevoerd.
- de mate waarin recht gedaan kan worden aan de complexiteit van bediening en installatie.
- de foutgevoeligheid van geavanceerde analyses in combinatie met de schaarse kennis en ervaring op dit gebied.

In lijn hiermee wordt een verbetering/flexibilisering nodig geacht van het faalmechanisme-model dat is geïmplementeerd in BOI (de formule in 'rekenregel' oogt simpel, maar berust op vereenvoudigingen die de praktijk dikwijls vermoeilijken). Tot slot wordt opgemerkt dat het evalueren en eventueel verbeteren van de methode voor schatting faalkans menselijk handelen (waaronder herstel) nuttig lijkt.

***CONCREET:** Het – in een richtlijn voor betrouwbaarheidsanalyses, van grof naar fijn – met elkaar in verband brengen van de beschikbare methode voor een betrouwbaarheidsanalyse naar kans op niet-sluiten, en (mede daarmee) verbeteren van de geïmplementeerde modellen in het BOI.*

S4. Benutten praktijkervaring faalkansen keermiddelen

Conform [22] is er voor terugslagkleppen en schuifafsluiters in 2019 een eerste analyse naar de kans op niet sluiten uitgevoerd. Daaruit kwam onder meer naar voren dat, op basis van de beschikbare data binnen één waterschap, de faalkansen technische storing voor beide keermiddelen een orde kleiner kan worden verondersteld dan altijd aangenomen. Ook voor andere keermiddelen, bijvoorbeeld puntdeuren bij schutsluizen, kan een dergelijke analyse worden uitgevoerd. Verder wordt in [22] aanbevolen om handvatten te geven waarmee, op basis van faalkansprestaties uit het verleden van een object, een inschatting kan worden gemaakt van de kans op niet sluiten voor een specifiek kunstwerk. Uitgangspunt hierbij is uiteraard dat er genoeg data/ervaring voorhanden is om dergelijke inschattingen te kunnen maken. Aan de andere kant: ook de mogelijke impact, die het (veel) vaker moeten sluiten van een kunstwerk (bv als gevolg van zeespiegelstijging) heeft op de betrouwbaarheid van het sluitproces, moet worden beschouwd. In een rekenmodel van het watersysteem kan dat betrekkelijk eenvoudig worden weergegeven, maar veel waterkerende kunstwerken zijn geheel niet ontworpen voor veel sluitingen, zeker de grotere stormvloedkeringen.

***CONCREET:** Het actualiseren en uitbreiden van faalkansen van componenten en keermiddelen, door het benutten en uitbreiden casuïstiek/ervaringen uit de praktijk, en een verbeterde onderbouwing van een faalkanswaarde van diverse onderdelen van een kunstwerk.*

S5. Kwantificeerbaar maken doelmatigheid sluitprotocol

Met [7] is reeds een document beschikbaar waarin de eisen aan sluitprotocollen zijn vastgelegd. In de praktijk is de doelmatigheid van sluitprotocollen echter nog voor verbetering vatbaar. Wat wil men met een protocol bereiken en aan welke eisen moet het dan voldoen? Wat draagt een verbetering bij aan de faalkans voor 'niet sluiten'.

***CONCREET:** Het evalueren van de bruikbaarheid, toepasbaarheid, alternatieven etc van de zaken in [7] in de praktijk. En daarnaast het vastleggen van (generieke) handvatten om de doelmatigheid van sluitprotocollen te verbeteren.*

S6. Meenemen aanbevelingen memo Rijkskeringen en ENW

Een aantal aanbevelingen van het Programma Rijkskeringen uit [22] is al verwerkt in de bovenstaande onderwerpen. In aanvulling hierop beveelt [22] ook aan handvatten te geven voor nadere bepaling van (voor niet sluiten kunstwerk relevante) sterkte-eigenschappen van een kunstwerk. Hierbij kan gedacht worden aan

- de nadere bepaling van het kombergend vermogen, en dan met name de toelaatbare peilstijging (zie K1 en K2);
- de instroming bij niet-gesloten zijn, waarbij ook de invloed van een stijgende binnenwaterstand wordt meegenomen op het debiet-verloop in de tijd en de locatie waar er in/achter het kunstwerk daadwerkelijk sprake is van stromingscondities (zoals schietend water) die in het ontwerp zijn aangenomen (link met A1);
- het tijdverloop van de belasting, i.e. verloop afvoergolf (link met A3);
- het proces van erosie bodembescherming tot ontstaan ontgrondingskuilen en vervolgens instabiel worden van het kunstwerk (link met B3).

Door hier meer praktische handvatten voor te geven wordt het eenvoudiger om de niet sluiten deelfaalmechanismen 'overschrijden bergend vermogen (Z21)' en 'bezwijken bodembescherming achter kunstwerk (Z22)' nader te bepalen, waardoor ze (in veruit de meeste gevallen) een grotere positieve bijdrage aan de faalkans krijgen.

***CONCREET:** Aandragen handvatten voor de nadere bepaling van vier specifieke (ook voor niet sluiten kunstwerk relevante) sterkte-eigenschappen van een kunstwerk.*

S7. Hydraulische condities bij herstel sluiting

De ervaringen die bij het beoordelen van de OSK (zie A1) zijn opgedaan, laten zien dat hydraulische aspecten een rol spelen bij de betrouwbaarheid van de sluiting van het waterkerende kunstwerken. Direct, als een belasting tijdens het sluiten (die voor onderdelen maatgevender kunnen zijn dan de belasting na sluiting), maar ook indirect als door mogelijk initieel falen en (als gevolg daarvan) later sluiten er inmiddels zwaardere en andere hydrodynamische condities zijn ontstaan (bijvoorbeeld stroming door kunstwerk als gevolg van oplopende waterstand). Bovendien spelen er dan ook andere praktische aspecten als toegenomen windsnelheid. Dit betekent dat bij een sluiting na een herstelactie in geval van falen van de eerste sluitpoging andere condities optreden dan bij de eerste sluitpoging. Dergelijke invloeden zijn geen standaardonderdeel van de hydraulische randvoorwaarden en raken heel direct aan de operationele inzet van waterkerende kunstwerken.

***CONCREET:** Analyseren van de impact van (het tijdsverloop van) condities op de faalkans van het sluitproces en, indien significant, nagaan of in het operationele gebruik van de kunstwerken hier een oplossing voor kan worden gevonden.*

B1. Invloed kwel op stabiliteit bodembescherming

De stabiliteit van bodembeschermingslagen kan mogelijk ook beïnvloed worden door kwel onder het kunstwerk door. Onbekend is of door het opkomende kwelwater de stabiliteit verlaagd kan worden ten opzichte van een situatie zonder kwel. In de rekenregels wordt geen rekening gehouden met kwel. Om dat te kunnen doen is onderzoek naar de potentiële impact van kwel nodig. Bij die studie, en andere onderzoeken gerelateerd aan de bodembescherming rondom waterkerende kunstwerken, is het van belang om als uitgangspunt goed zicht te krijgen op de daadwerkelijk aanwezige soort en uitgestrektheid van de bodembescherming. Hiervoor zou een inventarisatie van de 'as-built'-informatie uitgevoerd kunnen worden.

***CONCREET:** Onderzoeken in welke mate de stabiliteit van bodembeschermingslagen voor/achter waterkerende kunstwerken wordt beïnvloed door kwel onder het kunstwerk door.*

B2. Inzicht impact turbulente stroming op bodemerosie

Impact van een watersprong in richtlijnen/rekenregels is mogelijk niet altijd goed of volledig meegenomen (link met A1). De watersprong wordt aangenomen ter hoogte van de positie van de betonnen bescherming/drempel. Dat is niet perse altijd het geval, onder andere afhankelijk van de diepte van het benedenstroomse water. Bovendien kan de watersprong uitgestrekter zijn dan het bereik van de betonnen bescherming in de directe nabijheid van het kunstwerk. Het optreden van watersprongen inclusief hun (turbulente) eigenschappen en impacts zou nader onderzocht moeten worden. Als startpunt zou bijvoorbeeld uit de achterliggende fysica van een watersprong meer info over stroomsnelheid bij de bodem afgeleid kunnen worden. Hierbij worden dan niet alleen de condities voor het hoogste punt in de watersprong bekeken – waar op dit moment in de richtlijnen de focus op ligt – maar onder de gehele spronglengte in stromingsrichting. Zo kan de impact op bodembescherming beter vastgesteld worden. Daarbij kunnen ook eerdere schaalmodeltesten en gerelateerde kennis vanuit offshore/bescherming monopiles ingezet worden. Ook het 3D-karakter van de (uit)stroming nabij kunstwerken kan waar mogelijk opgenomen worden in de analyse, waar in sommige onderdelen van de richtlijnen 2D-stroming wordt aangenomen. In elk geval wordt bij Shields de diepte-gemiddelde stroming aangehouden (en/of in het inzichtelijk presenteren van zijn onderzoeksresultaten in de literatuur gebruikt?) om de kritieke lijn tussen wel of geen beweging van bodemmateriaal te beschrijven. Maar dan resteert nog steeds de vraag n.a.v. de schaalfactor voor weergave van turbulentie.

***CONCREET:** Onderzoeken in welke mate het meenemen van turbulentie (bovenop impact van diepte-gemiddelde stroming) de ontwikkeling en groei van ontgrondingskuilen beïnvloedt, die uiteindelijk tot ondermijning van het waterkerende kunstwerk kunnen leiden.*

B3. Inzicht in reststerkte na falen bodembescherming

Kans op overstroming na het bezwijken van de bodembescherming wordt gelijk aan 1 verondersteld. Dit is conservatief maar het is bijzonder ingewikkeld om dit te verbeteren en het is ook zeer de vraag of dat praktische meerwaarde heeft (richting besluitvorming). Er is nog veel onbekend rondom de ontwikkeling en groei van ontgrondingskuilen in geval van falen van de bodembescherming of in geval van niet voldoende uitgestrektheid van bodembescherming. Bijvoorbeeld recent promotiewerk [20] n.a.v. ontgrondingskuilen nabij Oosterscheldekering.

***CONCREET:** Onderzoeken of het beschadigd raken van een bodembescherming moet worden gezien als falen van het kunstwerk, en hoe inzichtelijk te maken hoe het faalpad daarna (via de ontwikkeling en groei van ontgrondingskuilen nabij een kunstwerk) er uit ziet.*

B4. Gevoeligheid constructie-opbouw voor instabiliteit

Niet nieuw, maar wel een eerste stap kan zijn om alleen naar de constructieopbouw te kijken en te beschouwen of een ontgrondingskuil invloed zou kunnen hebben op de stabiliteit van het kunstwerk.

***CONCREET:** Ontsluiten bestaande kennis over de mate waarin er, vanuit de constructieopbouw van een waterkerend kunstwerk, kan worden verwacht kan worden dat de stabiliteit door ondermijning en ontgroning wordt beïnvloed.*

B5. Model bezwijken kunstwerk als gevolg van erosie bodem

In het verlengde van de genoemde mogelijkheid B4: er is geen specifiek model voorhanden voor het beschrijven van het geheel bezwijken van een kunstwerk als gevolg van erosie van de bodembescherming. Wel zijn er modellen die een deel van dit proces beschrijven. Hierbij valt met name te denken aan het ontstaan van erosiekuilen.

***CONCREET:** Het nagaan van de mogelijkheden tot en potentiële impact van een integrale modelbeschouwing van dit proces.*

K1. Inzetbaar maken sterkte achterliggende keringen

De principes van komberging (inclusief hoe om te gaan met meerdere kunstwerken die gebruik maken van dezelfde kombergingscapaciteit) zijn eenvoudig en algemeen geldend. Toch zijn er praktijksituaties waarin deze lastiger blijken toe te passen. Zo is er de vraag naar meer inzicht in de sterkte van achterliggende keringen van de komberging, onder andere door het toetsen van regionale keringen en 'c-keringen' (verouderde term).

CONCREET: Bruikbaar maken van gegevens over de sterkte van achterliggende keringen ten behoeve van een verscherpt inzicht in daadwerkelijke komberging.

K2. Praktische werkwijze voor vaststellen komberging

De principes van komberging (inclusief het omgaan met meerdere kunstwerken die gebruik maken van dezelfde kombergingscapaciteit) zijn eenvoudig en algemeen geldend. Toch zijn er praktijksituaties waarin deze lastiger blijken toe te passen. Zo is het recent in Programma Rijkskeringen nodig gebleken een werkwijze voor voorliggende keringen op te stellen. Deze kennis moet beschikbaar komen voor de praktijk.

CONCREET: Afleiden en/of implementeren van een praktische werkwijze voor het vaststellen van komberging bij kunstwerken in voorliggende keringen.

4.3 Overslag en/of overloop kunstwerk

Eerder besproken aspecten in geval van niet-sluiten kunstwerk, en ook relevant voor overslag en/of overloop:

- A1. Evaluatie hydraulische formuleringen
- A2. Inzicht in correlatie belastingparameters
- A3. Specificeren hydraulische belastingen 'op maat' (*link met S6*)
- A4. Mogelijk maken van 'slimmer' combineren van faalkansen
- B1. Invloed kwel op stabiliteit bodembescherming
- B2. Inzicht impact turbulente stroming op bodemerosie
- B3. Inzicht in reststerkte na falen bodembescherming (*link met S6*)
- B4. Gevoeligheid constructie-opbouw voor instabiliteit
- B5. Model bezwijken kunstwerk als gevolg van erosie bodem
- K1. Inzetbaar maken sterkte achterliggende keringen (*link met S6*)
- K2. Praktische werkwijze voor vaststellen komberging (*link met S6*)

H1. Evaluatie bruikbaarheid onderzoek transitions UK

Er is een handreiking [11] die een eerste aanzet geeft voor een beoordeling van aansluitconstructies (i.e. de raakvlakken met de doorsnede van de waterkering naast het kunstwerk). Hierin komt nadrukkelijk de impact van hydraulische belasting op de aansluitconstructie aan bod. De stabiliteit van een aansluitconstructie kan mogelijk ook beïnvloed worden door kwel langs het kunstwerk. Onbekend is of door het opkomende kwelwater de stabiliteit verlaagd kan worden ten opzichte van een situatie zonder kwel. Zie ook de opmerking bij ontgroning. Mogelijk dat recent onderzoek van het Environment Agency (UK) ook bruikbaar is voor beter inzicht in het falen van dit onderdeel.

CONCREET: Evalueren bruikbaarheid onderzoeksresultaten EA (UK) over wetenschappelijke(r) vertaling van inspecties op aansluitconstructies naar een sterkteverloop .

H2. Onzekerheden overslag en/of overloopdebiet

Omtrent de waarde van het kritieke overslag- en/of overloopdebiet bestaat grote onzekerheid, waardoor een exacte bepaling van het optredende debiet slechts een beperkte toegevoegde waarde heeft. Het is nuttig naar deze onzekerheid te kijken en deze zo mogelijk te verkleinen.

***CONCREET:** Opstellen plan van aanpak om de onzekerheden rondom het overslag- en/of overloopdebiet bij kunstwerken te verkleinen. Dit plan voorleggen aan een expertgroep om de juiste prioriteit aan de uitvoering van het afgestemde plan van aanpak te geven.*

H3. Invloed grotere overslag/overloop op bodem

Op dit moment wordt uitgegaan van een grenswaarde voor het debiet van een overstortende straal als gevolg van overslag- en/of overloop (die verband houdt met de sterkte van het keermiddel). Mogelijk is deze pragmatische grenswaarde van 1 m³/s/m (zie ook C4) vanuit de bodembescherming gezien conservatief, bijvoorbeeld vanwege het belastingeffect bij puntdeuren: de overstort is gefocust naar het midden (belasting-verhogend) maar evt. ook belucht (belasting-verlagend). Als de overstort over een kunstwerk niet belucht is zal de overstortende jet een dynamisch (positie-)gedrag laten zien met mogelijk een grotere impact op de achterliggende bodembescherming. Ook speelt de waterdiepte achter het keermiddel een rol; een grotere waterdiepte verkleint de impact van de straal op de bodembescherming. De onzekerheid voor wat betreft de bodembescherming is dus de impact van deze overstortende straal op de bodembescherming achter het keermiddel.

In schaalmodeltesten zouden conceptuele representatieve situaties van waterkerende kunstwerken beschouwd kunnen worden om zo op basis van bijvoorbeeld een typisch sluitmiddel de impact van een overtoppende jet te beschouwen. Eerder zijn voor enkele deelaspecten al principe-testen in een generieke labopstelling (2D) door Deltares beschouwd, en de opgedane kennis is gedeeld in een artikel [29] en zal in een rapid assessment tool worden opgenomen. Door een representatieve bodembescherming in een nieuw/aanvullend model in BOI op te nemen zou het gehele proces van hoge waterstand, overstort, impact op bodem en uitwerking op (en falen van) bodembescherming beschouwd kunnen worden.

***CONCREET:** Inzichtelijk maken (bv via schaalmodelonderzoek) van invloed aanhouden groter debiet overstortende straal op bodembescherming, inclusief schetsen handelingsperspectief.*

4.4 Piping bij kunstwerk

Toelichting op genoemde mogelijkheden voor de algemene (door)ontwikkeling kennis en kunde. Eerder besproken bij niet sluiten kunstwerk (A1 t/m A4 en B1) en overslag en/of overloop (H1), en ook relevant voor piping bij kunstwerken:

- A1. Evaluatie hydraulische formuleringen
- A2. Inzicht in correlatie belastingparameters
- A3. Specificeren hydraulische belastingen 'op maat' (*link met S6*)
- A4. Mogelijk maken van 'slimmer' combineren van faalkansen
- B1. Invloed kwel op stabiliteit bodembescherming
- H1. Evaluatie bruikbaarheid onderzoek transitions UK

P1. Mogelijk maken kwantitatieve faalkansanalyse in RISKEER

Voor piping bij een kunstwerk is het momenteel niet mogelijk om een kwantitatieve kans te bepalen. Het is een doelstelling van het BOI om alle faalmechanismen probabilistisch te kunnen bepalen. In tegenstelling tot bij de Lane-implementatie in PC-Ring bezitten de huidige rekenregels voor piping geen relatie met kansen.

***CONCREET:** Het mogelijk maken dat er in RISKEER een kwantitatieve faalkansanalyse kan worden uitgevoerd.*

P2. Inventariseren (bijdrage van) meetmethoden grondwaterstroming

Binnen het KPP VOW van Rijkswaterstaat is er samen met Deltares een discussiestuk [23] voor het verbeteren van piping bij kunstwerken geschreven. Hierin werden twee onzekerheden benoemd waar men in de beoordeling van piping bij kunstwerken nu tegen aan loopt: de onzekerheid in de bodemopbouw, en de invloed hiervan op de 3D grondwaterstroming, en de onzekerheid omtrent aanwezigheid of werking van kwelschermen. In het verlengde hiervan kwam de vraag naar voren welke grondwaterstroming meetmethoden er (ook die binnen de geohydrologie) zijn, welke bijdrage deze kunnen leveren aan inzicht in de grondwaterstroming onder en langs een kunstwerk en wat zijn de voor- en nadelen en toepassingsmogelijkheden.

***CONCREET:** Inventariseren bijdrage aan inzicht en voor- en nadelen meetmethode grondwaterstroming onder en langs een kunstwerk.*

P3. Verbeterde connectie geohydrologie met beoordeling piping

Binnen het KPP VOW van Rijkswaterstaat is er samen met Deltares een discussiestuk [23] voor het verbeteren van piping bij kunstwerken geschreven. Hierin werd de potentiële meerwaarde van een verbeterde connectie met de (landelijke en regionale modellen binnen de) geohydrologie benoemd. Daarbij is ook de praktische toepasbaarheid van (gekoppelde_ methoden beschouwd.

In relatie tot de modellen wordt verwacht dat een beter onderbouwd model voor horizontale kwelwegen – *waar bij kunstwerken nu nog Bligh voor wordt gebruikt* - tot een nauwkeuriger inschatting van de overstromingskans zal leiden. Ook wordt een verdere verkenning voorgesteld naar de toepassing van de fragmentenmethode en de Eindige Elementen Methode binnen het beoordelen. Voor het uitvoeren van dergelijke analyses zijn wel heldere uitstroomcriteria op basis van fysica benodigd. Voor analyses van verticale uitstroming is dat criterium beschikbaar; wel dient hier (zoals bij dijken) een veiligheidsfilosofie voor te worden opgesteld. Voor analyses van horizontale uitstroming ontbreekt echter een criterium.

***CONCREET:** Inventariseren wat geohydrologie kan bijdragen aan een scherpere en/of betrouwbaardere overstromingskans ten gevolge van piping, welke 'tools' of modellen er beschikbaar zijn en welke ontbrekende zaken (zoals uitstroomcriteria en veiligheidsfilosofie) de inzet hiervan in de praktijk belemmeren. Van grof naar fijn.*

P4. Praktische oplossingen bij theoretisch weerstandstekort piping

Als er onduidelijkheid over de weerstand tegen piping bij een kunstwerk bestaat, ontstaat al snel een "alles of niets"-situatie. Verder modelleren is dan niet direct de meest voor de hand liggende optie of nodig voor besluitvorming. Een tekort is immers praktisch oplosbaar door bijvoorbeeld een filterconstructie aan de teen (kosten maatregel in geen verhouding tot potentiële schade in geval van niet ingrijpen). Het is dan ook de vraag of betere of verdergaande modellen hier ook een betere/andere beslissing/keuze zullen opleveren.

***CONCREET:** Ontsluiten in een handleiding van vorm en uitwerking praktische oplossingen (zoals filterconstructies aan de teen) bij een tekort (op papier) aan weerstand tegen piping bij een kunstwerk als aanvulling op het instrumentarium.*

P5. Onderzoek naar faalpad piping bij kunstwerk

Binnen het KPP VOW van Rijkswaterstaat is er samen met Deltares een discussiestuk [23] voor het verbeteren van piping bij kunstwerken geschreven. Hierin kwamen ook de vragen naar voren of het (initieel) ontstaan van een pipe moet worden gezien als falen van het kunstwerk en of er iets kan worden gezegd over het faalpad daarna.

***CONCREET:** Onderzoeken of het ontstaan van een pipe moet worden gezien als falen van het kunstwerk en hoe inzichtelijk te maken hoe het faalpad daarna er uit ziet.*

4.5 Sterkte en stabiliteit puntconstructies

Toelichting op genoemde mogelijkheden voor de algemene (door)ontwikkeling kennis en kunde. Eerder besproken bij niet sluiten (A1 t/m A4, B1 t/m B5, K1, K2 en S6) en ook relevant voor sterkte en stabiliteit puntconstructies:

- A1. Evaluatie hydraulische formuleringen
- A2. Inzicht in correlatie belastingparameters
- A3. Specificeren hydraulische belastingen 'op maat' (*link met S6*)
- A4. Mogelijk maken van 'slimmer' combineren van faalkansen
- B1. Invloed kwel op stabiliteit bodembescherming
- B2. Inzicht impact turbulente stroming op bodemerosie
- B3. Inzicht in reststerkte na falen bodembescherming (*link met S6*)
- B4. Gevoeligheid constructie-opbouw voor instabiliteit
- B5. Model bezwijken kunstwerk als gevolg van erosie bodem
- K1. Bruikbaar maken sterkte achterliggende keringen (*link met S6*)
- K2. Praktische werkwijze voor vaststellen komberging
- S6. Meenemen aanbevelingen memo Rijkskeringen en ENW

C1. Staat van de kering, degradatie

De sterkte van de constructie is veruit de belangrijkste parameter in de faalkansbepaling. De mate waarin sterktegradatie daarin wordt meegenomen is hierdoor ook belangrijk voor de faalkans. Doorgaans wordt hier op basis van expert judgement een grove inschatting van gemaakt, maar meer handvatten zouden een welkome aanvulling vormen. Hoe houdt men rekening met materiaaldegradatie en vervormingen in de overstromingskansanalyse. En welke (ruime) ervaring met de rekenkundig aanpak (denk ook aan de Eurocodes) is bruikbaar? Hoe omgaan met de informatievoorziening en inspectie bij de beheerders, die achterloopt?

CONCREET: Opstellen van een praktische handreiking (bijvoorbeeld aan de hand van een boek met schadebeelden) over het meenemen van de staat van de kering.

C2. Nieuwe inzichten omtrent model van Goda.

Qua hydraulische belastingen is er behoefte aan een methode om de combinatie van verval- en golfbelasting bij gegeven overschrijdingskansen te bepalen. zodat afhankelijkheden tussen waterstanden en golfcondities op een nette manier worden meegenomen. Dit vraagt kennis over de fysica van de betrokken (hydraulische) fenomenen. Dit is nog niet gefaciliteerd waardoor (conservatief) met marginale statistieken wordt gerekend. Verder wordt in [21] aangegeven dat de hydraulische belastingen in het WBI-instrumentarium middels het model van Goda worden vertaald naar belastingen op de constructie. Naar het model van Goda (en de probabilistische implementatie daarvan) is door TNO in de afgelopen jaren onderzoek gedaan. Verder zijn bij het model van Goda nog twee opmerkingen te maken:

- Het model van Goda is alleen geschikt om statisch verval en golfbelastingen bij een vrije waterspiegel te maken. Voor (dynamische) belastingsituaties als golfklappen en situaties, waarbij de vrije waterspiegel niet aanwezig is (kokers of uitkragende constructieonderdelen), is het model niet geschikt en hiermee de kalibratie in [19] en [5] ook niet. Mogelijk leveren openingen in de constructie en gedeeltelijke transmissie van inkomende golven ook beperkingen op voor de toepassing van het model. Voor het gros van de constructies is dit natuurlijk voldoende, maar in sommige situaties niet. Overwogen kan worden ook hiervoor passende modellen te ontwikkelen (mogelijke link naar benoemde beoordeling OSK in A1, waar modellen worden ontwikkeld).
- Voor ontwerpen zou het handig zijn als in Riskeer op basis van een doelkans de belastingen over de hele hoogte van de constructie gegenereerd kunnen worden.

***CONCREET:** Aanbevolen wordt kennis te nemen van de nieuwste inzichten rondom het model van Goda en, indien nodig, deze te verwerken in (modellen voor) het BOI-instrumentarium. Doel is om te komen tot een instrumentarium waarmee afhankelijkheden tussen waterstanden en golfcondities niet kunnen worden meegenomen.*

C3. Sterktemodel 'tot de 3e macht'

In aanvulling op C1 kan het voor beoordelen wenselijk zijn om ook een sterktemodel 'tot de 3^e macht' (denk aan buigend moment door waterschildruk) beschikbaar te hebben om beter naar buigende momenten door waterschildruk te kunnen kijken.

***CONCREET:** Opnemen van een sterktemodel 'tot de 3^e macht' in het BOI-instrumentarium.*

C4. Belastingeffect van overstort keermiddelen

Kunnen de kerende middelen hogere maatgevende waterstanden en overeenkomstige overstort wel aan? Nu wordt van een pragmatische grenswaarde van 1 m³/s/m voor het debiet van de overstortende straal uitgegaan. Mogelijk is deze waarde vanuit de sterkte van het keermiddel gezien conservatief, door onzekerheid over gevolgen van een niet beluchte overstortende straal; deze is instabiel en zal dynamisch gedrag vertonen. Dit kan leiden tot trillingen van het keermiddel. Alleen kijken naar de impact van een overstortende straal op de bodembescherming (zie H3) en het (kom)bergend vermogen lijkt dus niet voldoende. Door zeespiegelstijging zal dit aspect belangrijker worden, en dus mogelijk gaan leiden tot onnodig afkeuren van keermiddelen.

- Hogere waterstanden geven ook bij een gegeven constructiehoogte meer (verval)-belasting op het keermiddel, aangezien als gevolg van de hogere waterstand een hoger drukverschil over de constructiehoogte inwerkt, ondanks dat de 'top' van de hoogwatergolf over het kunstwerk heen kan slaan/stromen.
- De impact op kunstwerken van (aangescherpte) maatgevende hydraulische condities is niet altijd in detail meegenomen. De constructieve aspecten van de impact van hydraulische belastingen op kunstwerken vragen om achtergrondkennis van de statistiek van wisselende belastingen, die benodigd is om vermoeiing van constructieonderdelen te kunnen analyseren. Die informatie is niet standaard beschikbaar binnen de vastgestelde maatgevende hydraulische condities. Zo kunnen trillingen van kerende delen (platen) optreden in geval van overstort of stroming onder een schuif door. Door (zelf-)versterking van trillingen kan via resonantie schade aan het keermiddel ontstaan. Doorgaans bij frequenties hoger dan de golffrequenties. Aandrijving van de trillingen is gelinkt aan turbulenties in de stroming. Beluchting van de overstort en vormgeving van boven- en onderrand van kerende middelen (afrondingen, minimale kierhoogtes onder een sluitmiddel) kunnen trillingen mogelijk voorkomen, maar meer kennis is benodigd.
- Een keermiddel kan ook grootschalig dynamisch gedrag laten zien, o.a. bij de tijdschalen van inkomende golven. Hierbij kan een gehele kerende wand in een gekoppelde beweging komen samen met het omringende water. Door grootschaligheid van bewegingen en betrokken grote krachten is dit zeer ongewenst. Dit heeft reeds aanleiding gegeven tot het opstarten van een MSc-studie naar het dynamische gedrag van de Maeslantkering. Meer onderzoek zou extra mogelijkheden kunnen opleveren om dergelijk ongewenst gedrag te voorkomen/uit te sluiten binnen relevante hydraulische belastingcombinaties.

Bij H3 is aangegeven dat er door Deltares voor enkele deelaspecten rondom overslag en/of overloop van keermiddelen eerder al principe-testen in een generieke labopstelling (2D) zijn beschouwd. Dit schaalmodel-werk is in afronding; de kennis is gedeeld in een artikel [29] en wordt in een rapid assessment tool opgenomen. Mogelijk kan in een soortgelijk model ook

gekeken worden naar het beluchten⁹ van overstortende stralen in relatie tot voorkomen schokbelasting. Daarnaast is onderzoek naar dynamisch gedrag van sluitonderdelen (bij de tijdschalen van inkomende golven of langer) mogelijk in een schaalmodelopstelling te analyseren. Mogelijk vraagt dat laatste aspect een uitgebreider (3D) schaalmodel voor de juiste representatieve weergave van de situatie en het gedrag van het waterkerende kunstwerk.

CONCREET: Inzichtelijk maken (bijvoorbeeld via schaalmodelonderzoek) van invloed aanhouden groter debiet overstortende straal op deur (trilling), inclusief schetsen handelingsperspectief.

C5. Beoordeling en ontwerp van pen-gat-verbindingen

Voor het beter kunnen beoordelen van pen-gat-verbindingen is door TU Delft en TNO al het nodige voorwerk gedaan, zie [26] en [27]. Wat nog mist is een (praktische) methode voor de beoordeling van pen-gat-verbindingen bij houten sluisdeuren.

CONCREET: Ontwikkelen (op basis van beschikbare kennis) van een praktische methode voor het beoordelen van pen-gat-verbindingen bij houten sluisdeuren

C6. Richtlijnen voor beschouwen aanvaring

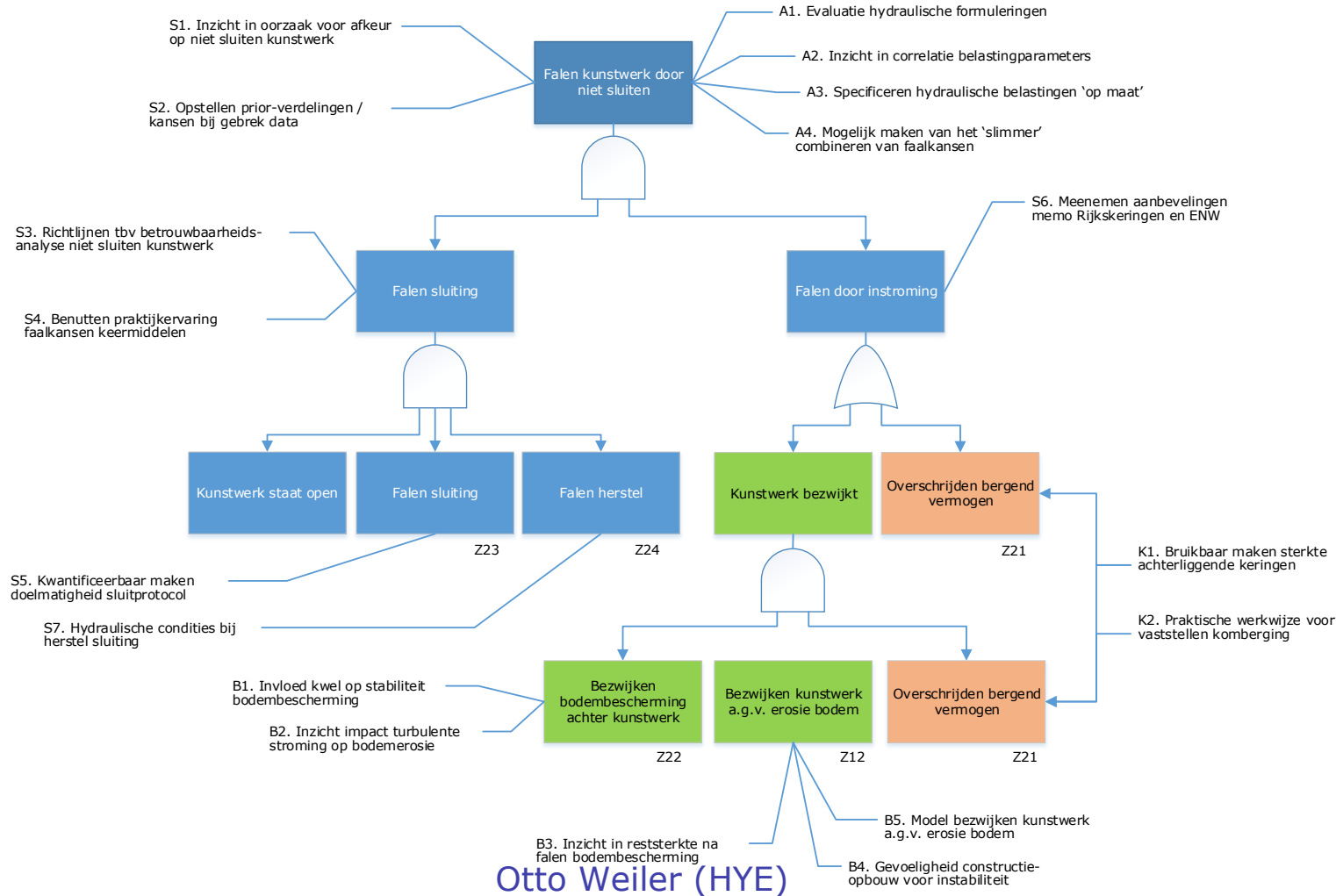
Dit is tweeledig: Als eerste is er een plan van aanpak om statistiek op te bouwen voor aanvaring. Recente data is er nog onvoldoende. Hiervoor is (naast TNO en Deltares) ook MARIN een belangrijk kennisleverancier. Een tweede spoor bestaat uit een verdere uitwerking van de werkwijze binnen Programma Rijkskeringen (PRK). In de praktijk is er grote behoefte aan duidelijke richtlijnen voor de omgang met aanvaarrisico's bij vooral de beoordeling van waterkeringen. In PRK is een pragmatische lijn ontwikkeld die een nadere beschouwing verdient, en wellicht ook bredere toepassing en opname in het BOI-instrumentarium.

CONCREET: Een algemeen toepasbare, concrete aanpak formuleren t.a.v. de omgang met (de kans op overstroming door) aanvaring (o.b.v. casuïstiek, anderszins?)

⁹ dit komt er effectief op neer komt dat de luchtkamer onder de gekromde straal in verbinding met de buitenlucht blijft staan en zo over/onderdrukken direct kwijt kan en geen uitwerking kunnen hebben op (de stabiliteit van) de straal zelf;

Marc Fransen (FDT)
 (Rob Delhez (Green rivers)
 Bob van Bree (ZZPer)

SVK:
 Martijn de Jong (HYE)

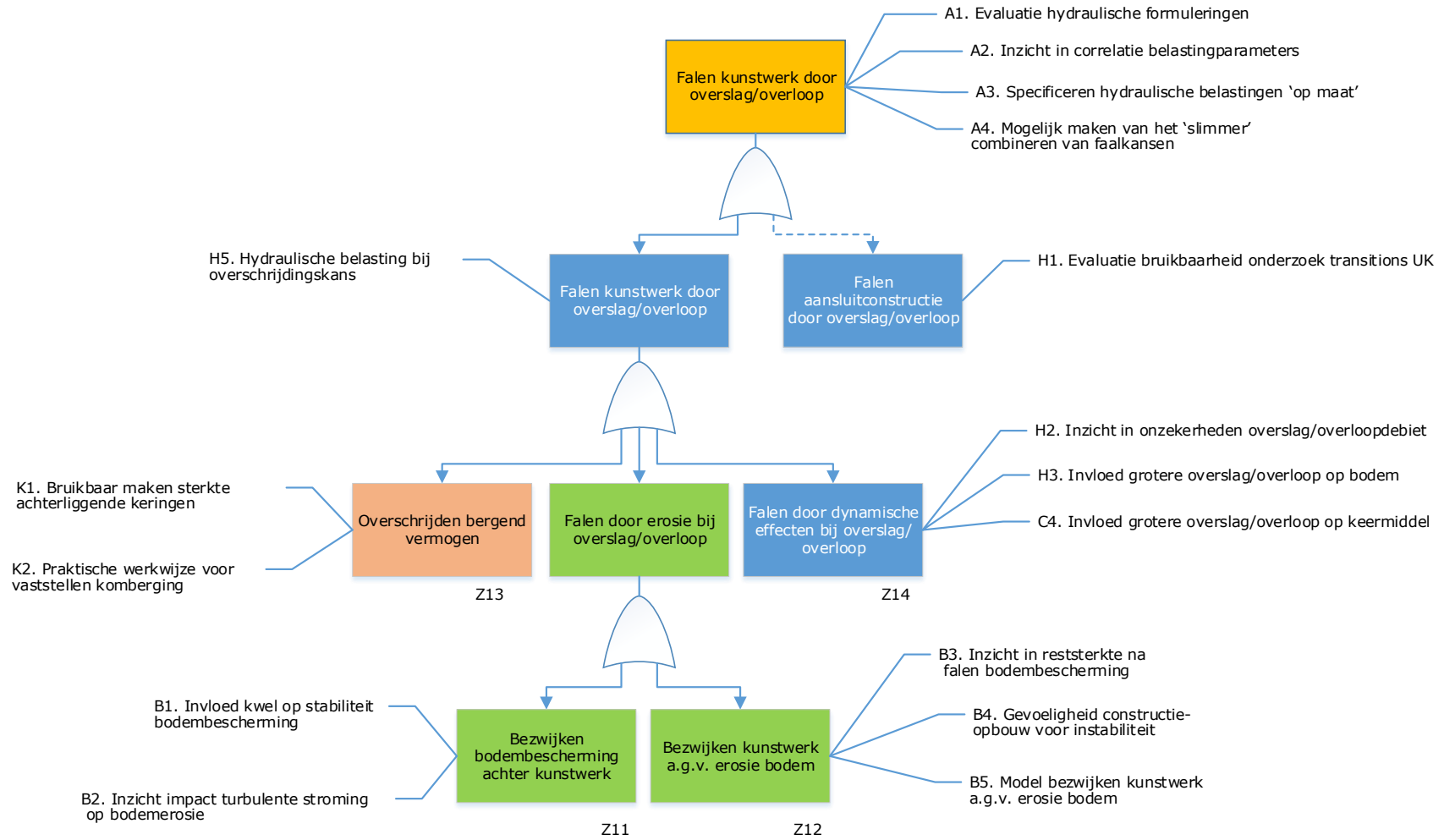


Otto Weiler (HYE)

BSKW

Figuur 5 Mogelijkheden op (door)ontwikkeling kennis en kunde bij niet sluiten kunstwerk.

Hydraulische belasting, bodembescherming: Alex Capel (HYE)



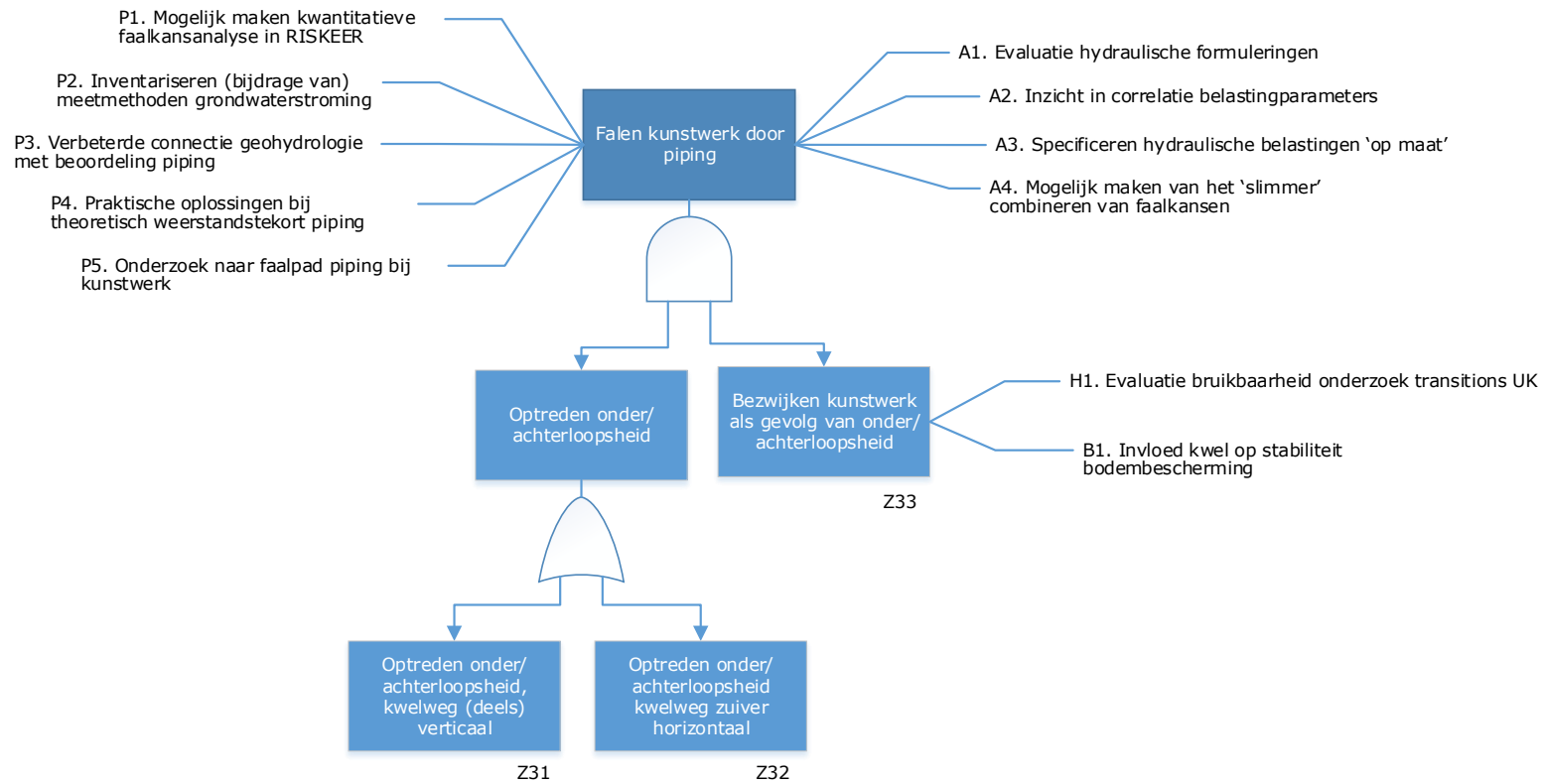
Otto Weiler (HYE)

Figuur 6 Mogelijkheden op (door)ontwikkeling kennis en kunde bij overloop en/of overslag kunstwerk.

HTKW

Ulrich Förster (FDT)
Vera van Beek (FDT)

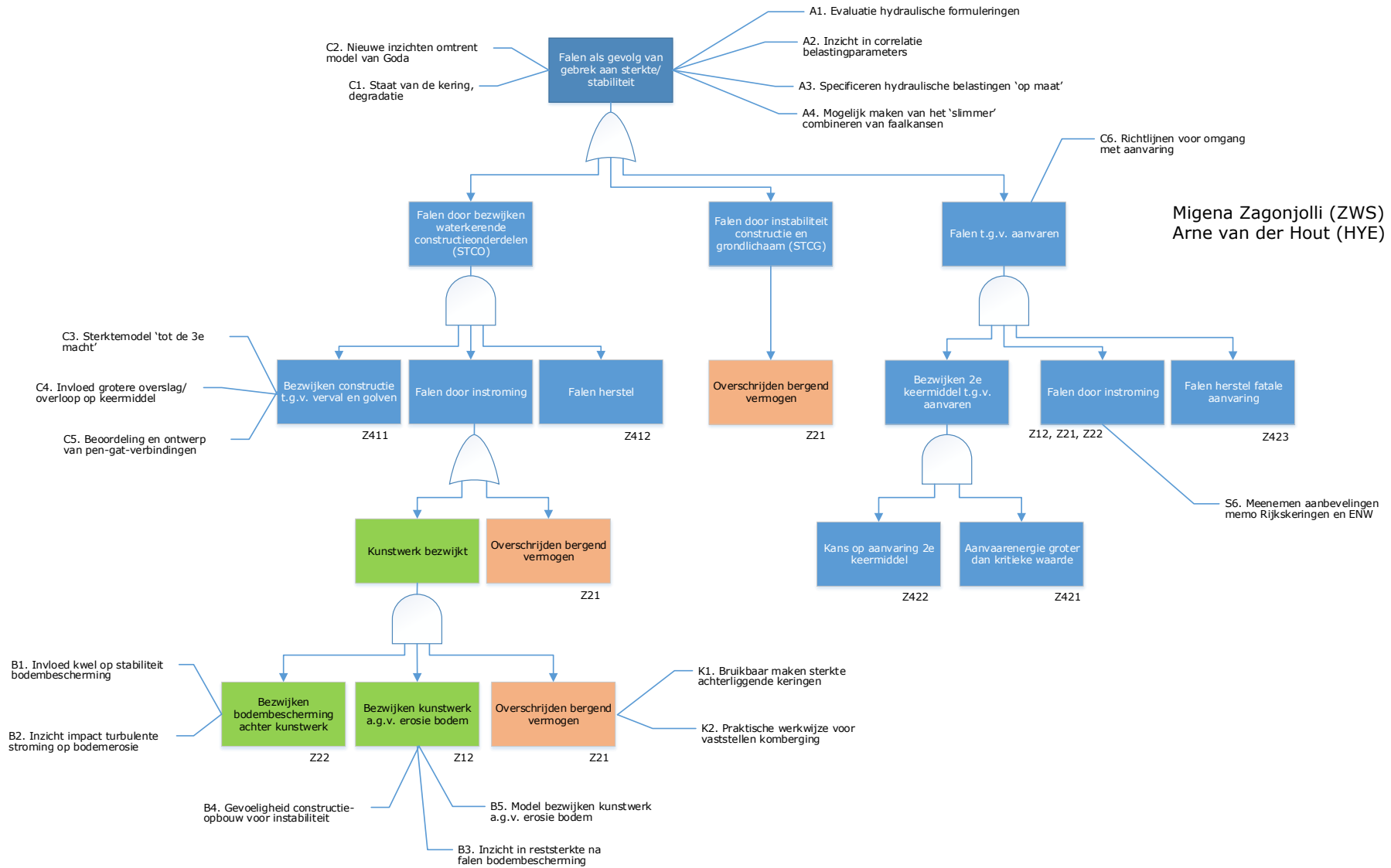
Hans van Meerten
John van Esch



Figuur 7 Mogelijkheden op (door)ontwikkeling kennis en kunde bij piping kunstwerk

PKW

Martijn de Jong (HYE)
Hans Brinkman (GEO)



Figuur 8 Mogelijkheden op (door)ontwikkeling kennis en kunde bij sterkte en stabiliteit puntconstructies.

STCG/STCO

5 Prioritering

5.1 Toelichting

In dit hoofdstuk wordt getracht richting te geven aan een prioritering van alle mogelijkheden voor de (door)ontwikkeling van kennis en kunde in Hoofdstuk 4 zijn verzameld. De mogelijkheden die in dit hoofdstuk terugkomen hebben de hoogste prioriteit. De auteurs van de rode draad waterkerende kunstwerken zijn daarbij van input voorzien van de partijen die in de beschrijving van de totstandkoming ervan zijn benoemd. In lijn met de aanbevelingen¹⁰ in [21] van Adviesteam DijkOntwerp (ADO) zijn hierbij als leidend aangehouden:

- de mate waarin de parameter (waar de (door)ontwikkeling van kennis en kunde betrekking op heeft) in de meeste situaties invloed heeft op de overstromingskans;
- de mate waarin de resultaten van de (door)ontwikkeling van kennis en kunde toepasbaar zijn voor de bulk aan waterkerende kunstwerken.

De prioriteiten van mogelijkheden voor (door)ontwikkeling van kennis en kunde in deze versie van de rode draad waterkerende kunstwerken zijn vooral gebaseerd op de input van het ADO en hydraulische experts van Deltares. Er heeft nog geen prioritering over de faalmechanismen heen kunnen plaatsvinden door het ontbreken van een helder afwegingskader; het zou goed zijn om deze discussie wel aan te gaan in een breder overleg (met ADO-experts, constructiemechanici, hydraulici). Ook om een logische verdeling van taken te kunnen bespreken.

5.2 Algemeen

Het recente werk aan het beoordelen van de OSK laat zien dat het, ook voor de bulk aan waterkerende kunstwerken, verstandig kan zijn om in overstromingskansanalyses de hydraulische ontwerpbelastingen inclusief achterliggende aannamen (in relatie tot de wijze waarop de constructie deze afdraagt naar de ondergrond) te evalueren. Vandaar dat wordt geadviseerd de (door)ontwikkeling van kennis en kunde ook te richten op:

- Evaluatie hydraulische formuleringen (A1)
- Inzicht in correlatie belastingparameters (A2)
- Specificeren hydraulische belastingen 'op maat' (A3)

De bevindingen geven mogelijk aanleiding voor hernieuwde prioritering door breder overleg!

5.3 Niet sluiten kunstwerk

Er wordt, mede op basis van de input vanuit [21], geadviseerd om de (door)ontwikkeling van kennis en kunde op het gebied van ongewenst niet-sluiten vooral te richten op:

- richtgetallen geven voor de faalkansen van componenten en onderdelen die in een faalkansanalyse gebruikt kunnen worden, hetgeen onderdeel is van het opstellen van prior-verdelingen / kansen bij gebrek data (S2);
- een aantal onderdelen van richtlijnen ten behoeve van betrouwbaarheidsanalyse niet sluiten kunstwerk (S3):
 - meer specifiek maken van scoretabellen voor de diverse type keermiddelen;
 - aanscherpen van het faalmechanismemodel dat is geïmplementeerd in BOI, met name de term P_{open} ;
- een aantal onderdelen van benutten praktijkervaring faalkansen keermiddelen (S4):
 - onderzoek naar 'standaard faalkansen' voor veel voorkomende keermiddelen als punt-, hef-, draai- en roldeuren alsmede wacht- en wakerdeuren bij [24];

¹⁰ de aanbevelingen van het ADO zijn afgegeven voordat de input door de betrokken hydraulische experts van Deltares (i.e. Martijn P.C. de Jong en Otto Weiler) in de voorliggende versie van de rode draad waterkerende kunstwerken zijn pgenomen;

- het nader uitschrijven van de methode voor inschatting faalkans per sluitvraag op basis van 'bewezen prestatie';
- evalueren en aanpassen methode voor de schatting van de faalkans van menselijk handelen;

5.4 Overslag en/of overloop kunstwerk

Er wordt, mede op basis van de input vanuit [21], geadviseerd om de (door)ontwikkeling van kennis en kunde op het gebied van overslag en/of overloop kunstwerk vooral te richten op:

- Het toelaatbare debiet in verband met de sterkte van het keermiddel onder dynamische belasting van een overstortende straal (C4) en
- Inzicht in reststerkte na falen bodembescherming (B3) dat zich richt op het faalpad na falen bodembescherming tot aan falen kunstwerk als geheel, hetgeen een link heeft met de aanbevelingen memo Programma Rijkskeringen en ENW (S6).

In [21] geeft het ADO verder aan dat bij overslag en/of overloop kunstwerk een betere inschatting van het bergend vermogen achter het kunstwerk (K1 en K2) en het optredende overslag- en/of overloopdebiet door het specificeren van hydraulische belastingen 'op maat' met o.a. nieuwe inzichten uit de EurOtop-manual (A3) geen nadere (door)ontwikkeling van kennis en kunde vergen, maar vooral formalisatie en opname in het instrumentarium.

N.B. Het inzichtelijk maken van de mate van (gedeeltelijke) correlatie bij belastingparameters (A2) wordt in [21] wel een zinvolle aanscherping gezien, maar dat geldt voor veel meer WBI-mechanismen dan alleen kunstwerken.

5.5 Piping bij kunstwerk

Er wordt, mede op basis van de input vanuit [21], qua (door)ontwikkeling van kennis en kunde op het gebied van piping kunstwerken voor een aantal onderwerpen nog een aanvullende opmerking geplaatst:

- Mogelijk maken kwantitatieve faalkansanalyse in RISKEER (P1): *het ADO schat in dat het met een relatief beperkte inspanning mogelijk moet zijn om alle modellen bij piping kunstwerk probabilistisch beschikbaar te maken;*
- Verbeterde connectie geohydrologie met beoordeling piping (P3):
 - *bij het beoordelen van horizontale kwelwegen leidt een beter onderbouwd model tot een nauwkeuriger inschatting van de overstromingskans;*
 - *bij de fragmentenmethode en Eindige Elementen Methode benadrukt is er de noodzaak voor heldere uitstroomcriteria en een veiligheidsfilosofie;*
- Praktische oplossingen bij theoretisch weerstandstekort piping (P4): *wellicht vormt een specifieke handleiding over de toepassing van filterconstructies als pipingmaatregel bij kunstwerken een zinvolle aanvulling op het instrumentarium.*
- Onderzoek naar faalpad piping bij kunstwerk (P5): *het zou een goed begin zijn om het hele faalpad na te lopen om te bezien of er ook situaties zijn waarin falen door piping op voorhand kan worden uitgesloten.*

5.6 Sterkte en stabiliteit kunstwerk

Er wordt, mede op basis van de input vanuit [21], geadviseerd om het onderzoek te richten op toevoeging aan het BOI instrumentarium van het volgende:

- Een praktische handreiking voor het inschatten van de sterktegradatie van een constructie (C1).
- Implementatie in het BOI van de werkwijze omtrent aanvaren uit het Programma Rijkskeringen (C6).

Voor de (door)ontwikkeling van kennis en kunde wordt in [21] geadviseerd:

- Verwerken van eventuele nieuwe inzichten omtrent het model van Goda in het instrumentarium (C2).
- Uitwerken van een sterktemodel 'tot de 3e macht' (C3).
- Inzichtelijk maken van invloed aanhouden groter debiet overstortende straal op deur (trilling), inclusief schetsen handelingsperspectief.
- Uitwerken van een methode voor de beoordeling van pen-gat-verbindingen (C5).

Referenties

[ref]	jaar	titel	auteur	documentcode
[21]	2022	Memo Adviesteam Dijkontwerp (in reactie op adviesvraag conceptversie rode draad kunstwerken)	ADO	20220519_AD162-1-0.9_Rode Draad SK
[22]	2021	Programma Rijkskeringen; Inzicht in betrouwbaarheid sluiting kunstwerken – Impact van overstromingskansbenadering (v2)	RWS-WVL	
[23]	2021	KPP-Versterking Onderzoek Waterveiligheid Kunstwerken verslag expert meeting piping bij kunstwerken (inclusief presentatie)	Deltares, RWS	11206793-003-ZWS-0003
[1]	2021	Programma Rijkskeringen – Werkwijze overstromingsrisico als gevolg van aanvaren	RWS	
[2]	2021	WBI 2017 - Schematiseringshandleiding betrouwbaarheid sluiting kunstwerk v3.1	RWS-WVL	
	2021	WBI 2017 - Schematiseringshandleiding hoogte kunstwerk v3.0	RWS-WVL	
[3]	2021	WBI 2017 - Schematiseringshandleiding piping bij kunstwerk v3.0	RWS-WVL	
[4]	2021	WBI 2017 - Schematiseringshandleiding sterkte en stabiliteit kunstwerk v3.0	RWS-WVL	
[20]	2020	PhD thesis Horizontal shear flows over a streamwise varying bathymetry (TU Delft)	Y.B. Broekema	ISBN 978-94-6375-824-6
	2020	Beoordeling van de constructieve veiligheid van een bestaand bouwwerk bij verbouw en afkeuren - Grondslagen	NEN	NEN 8700:2011+A1:2020
	2020	Beoordeling van de constructieve veiligheid van een bestaand bouwwerk bij verbouwen en afkeuren - Belastingen	NEN	NEN 8701:2011+A1:2020
[29]	2019	Hydraulic loads on bottom constructions behind a storm surge barrier or weir: development of a rapid assessment method (<i>Smart Rivers 2019 conference paper</i>)	Deltares	
[24]	2019	Standaard faalkansen voor frequent sluitende keermiddelen v1.0	RWS-WVL	
	2019	Corrosie van damwanden in zoetwater – Deel 1: Literatuurstudie	KpNK	KpNK-2019-BKW-02a002
	2019	Corrosie van damwanden in zoetwater – Deel 2: Analyse verzamelde diktemetingen	KpNK	KpNK-2019-BKW-02a003
	2019	Errata EurOtop 2018 2nd Edition	EurOtop	
	2018	Manual on wave overtopping of sea defences and related structures (2nd Edition)	EurOtop	
[5]	2018	Werkwijzer Ontwerpen Waterkerende Kunstwerken (groene versie)	RWS-WVL	WOWK
[6]	2018	Roadmap Kunstwerken	Lievense CSO	
[7]	2017	Handreiking borging betrouwbaarheid sluiting in draaiboeken v1.0	RWS-WVL	
[8]	2017	Werkwijze bepalen kans op niet sluiten per sluitvraag met scoretabellen v1.2	RWS-WVL	
	2017	Kwantificering scoretabellen niet sluiten v1.0	RWS-WVL	

	2017	Bijlagerapport: Analyse geavanceerde betrouwbaarheidsanalyses voor Betrouwbaarheid Sluiten v1.0	RWS-WVL	
	2017	Handleiding kwantitatief bepalen aanvaarrisico van beweegbare objecten in de vaarweg	RWS-GPO	
	2017	Richtlijn Ontwerpen Kunstwerken 1.4	RWS-GPO	
	2017	Richtlijn Ontwerpen Kunstwerken 1.4 - Bijlagendocument deel A	RWS-GPO	
	2017	Richtlijn Ontwerpen Kunstwerken 1.4 - Bijlagendocument deel B	RWS-GPO	
	2017	Grondslagen voor hoogwaterbescherming	ENW	ISBN 978-90-8902-151-9
	2017	Handreiking ontwerpen met overstromingskansen – Veiligheidsfactoren en belastingen bij nieuwe overstromingskansnormen	RWS-WVL	OI2014v4
	2017	Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017 - Bijlage III Sterkte en veiligheid	Min I&M	
[9]	2016	WTI 2017 Kunstwerken – Achtergrondrapport toetsspoor Betrouwbaarheid Sluiting I – Verbeteren gedetailleerde toets	Deltares	1220087-002-GEO-0012
[10]	2016	WTI 2017 Kunstwerken – Achtergrondrapport toetsspoor Betrouwbaarheid Sluiting IV – Toets op Maat demontabele keringen	Deltares	1220087-002-GEO-0008
	2015	Transition structures in grass covered slopes of primary flood defences tested with the wave impact generator	Van Steeg	Proceedings IAHR 2015
[11]	2015	WTI 2017 Cluster Toetsregels Kunstwerken - Handreiking aansluitconstructies (product 6.0F)	Deltares	1220087-006-GEO-0002
[12]	2015	WTI 2017 Toetsregels Kunstwerken – Toetspoorrapport sterkte en stabiliteit puntconstructies	Deltares	1220087-004-GEO-0007
	2015	WTI 2017 Toetsregels Kunstwerken – Toetspoorrapport piping	Deltares	1220087-003-GEO-0004
[13]	2015	WTI 2017 Kunstwerken – Toetspoorrapport betrouwbaarheid sluiting	Deltares	1220087-002-GEO-0009
	2015	WTI 2017 CTK – Achtergrondrapport bepaling kritiek overslag-/overloop-/instroomdebiet bij kunstwerken	Deltares	1220087-002-GEO-0004
[14]	2015	WTI 2017 Kunstwerken – Achtergrondrapport toetsspoor Hoogte I – Modellering optredend overslag-/overloopdebiet	Deltares	1220087-001-GEO-0004
[15]	2015	WTI 2017 Kunstwerken – Achtergrondrapport toetsspoor Hoogte II - Bepaling kritiek overslag-/overloopdebiet	Deltares	1220087-001-GEO-0011
[16]	2015	WTI 2017 Kunstwerken – Toetspoorrapport hoogte	Deltares	1220087-001-GEO-0010
	2015	Beoordeling van de constructieve veiligheid van waterbouwkundige kunstwerken volgens het Bouwbesluit en de Waterwet	Infraquest	TNO-2014-R11674
[17]	2015	EurOtop 2015		
[18]	2014	WTI Handreiking keuze toetsaanpak per object	Deltares	12209438-006-GEO-0003
	2014	Validation and optimization of a design formula for stable geometrically open filter structures	Uijttewaal e.a.	Proceedings ICCE 2014
[27]	2014	Load carrying capacity of large mortise and tenon joints in wooden mitre gates	Van de Kuilen e.a.	TU Delft

[28]	2017	EurOtop revisited. Part 1: sloping structures & Part 2: Vertical Structures	Meer e.a.	
	2013	Richtlijnen Beoordeling Kunstwerken v1.1	RWS	RTD 1006:2013
[26]	2013	Force distribution and connection strength in timber lock gates	Van Otterloo	TU Delft
	2012	Granular open filters on a horizontal bed under wave and current loading	Deltares	Proceedings ICCE 2012
[25]	2012	Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen	Deltares	1202123-003-GEO-0002
	2011	Eurocode serie (Bouwbesluit)	NEN	NEN-EN 1990-1997
[19]	2003	Leidraad Kunstwerken	TAW	ad012
	2000	Ontwerp van schutsluizen	Vrijburcht	ISBN 90-369-3305-6
	1999	TR zandmeevoerende wellen	TAW	TR-15
	1998	Grondslagen voor waterkeren	TAW	L7
	1996	Dynamische gedrag van waterbouwkundige constructies – Deel A Constructies in stroming	RWS-DWW	
	1996	Dynamische gedrag van waterbouwkundige constructies – Deel B Constructies in golven	RWS-DWW	
	1996	Dynamische gedrag van waterbouwkundige constructies – Deel C Methoden van rekenen en experimenteel onderzoek	RWS-DWW	
	1995	Handleiding voor het ontwerpen van granulaire bodemverdedigingen achter tweedimensionale uitstromingsconstructies	RWS-DWW	BOD-R-95002
	1995	Handreiking Constructief Ontwerpen	TAW	L9
	1994	Handreiking Constructief Ontwerpen bijlagen 2-5	TAW	L9a
	1994	Probabilistic calculations of wave forces on vertical structures	Van der Meer	Proceedings ICCE 1994
	1992	Aanvaarrisico's voor sluisdeuren	WL	Q1399