Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Technische Leidraad Katern Waterkerende kunstwerken

7 november 2026

Inhoudsopgave

1. Faalmechanisme betrouwbaarheid sluiting kunstwerk 5
Inleiding faalmechanisme betrouwbaarheid sluiting kunstwerk 5
1.1 Fenomenologische beschrijving falen door betrouwbaarheid sluiting 5
Beschrijving faalproces betrouwbaarheid sluiting 5
Nadere beschrijving faalproces betrouwbaarheid sluiting 7
Historie faalmechanisme betrouwbaarheid sluiting 11
Vigerende werkwijze faalmechanisme betrouwbaarheid sluiting 13
1.2 Veiligheidsanalyse voor faalmechanisme betrouwbaarheid sluiting 13
Beschrijving veiligheidsanalyse voor faalmechanisme betrouwbaarheid sluiting 13
Belastingen bij faalmechanisme betrouwbaarheid sluiting 15
Model voor faalmechanisme betrouwbaarheid sluiting 16
1.3 Kans op open staan 17
Inleiding kans op open staan 17
Gebruik van het kunstwerk 17
Reparatie falende sluitingen 19
Model voor kans op open staan 20
1.4 Faalkans sluiting keermiddelen 21
Inleiding faalkans sluiting keermiddelen 21
Fasen van het sluitproces 21
Aantal keermiddelen en doorgangen in een kunstwerk 22
Faalkans van sluiting 24
1.5 Faalkans van herstel van een gefaalde sluiting 25
Faalkans van herstel van een gefaalde sluiting 25
Herstel van een gefaalde sluiting 25
1.6 Instromingsmodellen voor betrouwbaarheid sluiting 27
Inleiding instromingsmodellen voor betrouwbaarheid sluiting 27
Instromingsmodel voor hoge drempel/verticale wand 28
Instromingsmodel voor lage drempel onvolkomen overlaat 29
Instromingsmodel voor lage drempel volkomen overlaat 30
Instromingsmodel voor verdronken koker 30
Geavanceerde modellen voor instromend debiet 31
Relatie tussen verval en instromend debiet 31
1.7 Kombergingsmodel voor betrouwbaarheid sluiting 35
Kombergingsmodel voor betrouwbaarheid sluiting 35
1.8 Bodembeschermingsmodel voor betrouwbaarheid sluiting 37
Inleiding bodembeschermingsmodel voor betrouwbaarheid sluiting 37
Model voor bezwijken bodembescherming door betrouwbaarheid sluiting 37
Aanvullende processen leidend tot bezwijken kunstwerk door betrouwbaarheid sluiting 38
Kritieke stroomsnelheid 39
1.9 Bijlagen 39
Afleiding formule kans op falen door niet sluiten 39
2. Faalmechanisme overslag en/of overloop bij kunstwerk 44
Inleiding faalmechanisme overslag en/of overloop bij kunstwerk 44

2.1 Fenomenologische beschrijving falen door overslag en/of overloop 44
Beschrijving faalproces overslag en/of overloop 44
Nadere beschrijving faalproces overslag en/of overloop 45
Historie en veiligheidsfilosofie faalmechanisme overslag en/of overloop 50
Vigerende werkwijze faalmechanisme overslag en/of overloop 52
2.2 Veiligheidsanalyse faalmechanisme overslag en/of overloop 52
Beschrijving veiligheidsanalyse voor faalmechanisme overslag en/of overloop 52
Belastingen bij faalmechanisme overslag en/of overloop 53
Model voor faalmechanisme overslag en/of overloop 55
2.3 Instromingsmodel voor overslag en/of overloop 56
Inleiding instromingsmodel voor overslag en/of overloop 57
Historie en recente kennisontwikkeling overslag-/overloopdebiet 57
Optredend overslag- en/of overloopdebiet 57
Golfoverslag als niet-stationair verschijnsel 61
Gebruik van de EurOtop-manual 62
2.4 Kombergingsmodel voor overslag en/of overloop 63
Kombergingsmodel voor overslag en/of overloop 63
2.5 Bodembeschermingsmodel voor overslag en/of overloop 66
Inleiding bodembeschermingsmodel voor overslag en/of overloop 66
Historie en recente kennisontwikkeling bodembescherming 66
Model voor bezwijken bodembescherming door overslag en/of overloop 67
Aanvullende processen leidend tot bezwijken kunstwerk door overslag en /of overloop 68
2.6 Model voor sterkte keermiddel onder dynamische belastingen 69
Model voor sterkte keermiddel onder dynamische belastingen 69
2.7 Bijlagen 69
Bijlage A - Afleiding formule kans op falen door overslag en/of overloop 70
3. Faalmechanisme piping bij kunstwerk 72
Inleiding faalmechanisme piping bij kunstwerk 72
3.1 Fenomenologische beschrijving falen door piping bij kunstwerk 72
Beschrijving faalproces piping bij kunstwerk 72
Nadere beschrijving faalproces piping bij kunstwerk 75
Historie en veiligheidsfilosofie faalmechanisme piping bij kunstwerk 79
Vigerende werkwijze faalmechanisme piping bij kunstwerk 83
3.2 Veiligheidsanalyse voor faalmechanisme piping bij kunstwerk 83
Beschrijving veiligheidsanalyse voor faalmechanisme piping bij kunstwerk 83
Belastingen bij faalmechanisme piping bij kunstwerk 84
Modellen voor faalmechanisme piping bij kunstwerk 86
Ontbreken relatie tussen veiligheidsfactor en faalkans bij modellen Bligh, Lane en heave 86
3.3 Model voor opbarsten 87
Model voor opbarsten 87
3.4 Model van Lane 87
Inleiding model van Lane 87
Historie en kennisbasis model van Lane 87
Safety format en modelbeschrijving model van Lane 89

Geldigheidsgebied model van Lane ... 92
Model van Lane of heave? ... 94
3.5 Heave model ... 94
Inleiding heave model ... 94
Historie en kennisbasis heave model ... 95
Mechanismebeschrijving heave ... 97
Safety format en modelbeschrijving heave model ... 99
Rekenmodellen voor berekening optredend verhang ... 101
3.6 Model van Bligh ... 101
Inleiding model van Bligh ... 101
Historie en kennisbasis model van Bligh ... 101
Safety format en modelbeschrijving model van Bligh ... 102
Geldigheidsgebied model van Bligh ... 103
Wanneer Bligh en wanneer Sellmeijer gebruiken? ... 104
3.7 Model van Sellmeijer ... 105
Inleiding model van Sellmeijer ... 105
Safety format en modelbeschrijving model van Sellmeijer ... 105
Geldigheidsgebied model van Sellmeijer ... 109
4. Faalmechanisme sterkte en stabiliteit puntconstructies ... 109
Inleiding faalmechanisme sterkte en/of stabiliteit puntconstructies ... 109
4.1 Fenomenologische beschrijving falen door sterkte en/of stabiliteit ... 110
Beschrijving faalproces sterkte en/of stabiliteit ... 110
Nadere beschrijving faalproces sterkte en/of stabiliteit ... 112
Historie en veiligheidsfilosofie faalmechanisme sterkte en/of stabiliteit ... 114
Vigerende werkwijze faalmechanisme sterkte en/of stabiliteit ... 115
4.2 Veiligheidsanalyse voor faalmechanisme sterkte en/of stabiliteit ... 116
Beschrijving veiligheidsanalyse voor faalmechanisme sterkte en/of stabiliteit ... 116
Faalkansmodel voor faalmechanisme sterkte en/of stabiliteit ... 117
Belastingen bij faalmechanisme sterkte en/of stabiliteit ... 118
Sterkte bij faalmechanisme sterkte en/of stabiliteit ... 120
4.3 Model voor bezwijken waterkerende constructieonderdelen en instabiliteit constructie en grondlichaam ... 120
Model voor bezwijken waterkerende constructieonderdelen en instabiliteit constructie en grondlichaam ... 120
4.4 Instromingsmodel voor sterkte en/of stabiliteit ... 123
Instromingsmodel voor sterkte en/of stabiliteit ... 123
4.5 Kombergingsmodel voor sterkte en/of stabiliteit ... 123
Kombergingsmodel voor sterkte en/of stabiliteit ... 123
4.6 Bodembeschermingsmodel ... 123
Bodembeschermingsmodel voor sterkte en/of stabiliteit ... 123
4.7 Betrouwbaarheidsverificatie ... 123
Inleiding betrouwbaarheidsverificatie ... 123
Historie van voorschriften aan waterkerende kunstwerken ... 124
Vigerende voorschriften aan waterkerende kunstwerken ... 125

1. Faalmechanisme betrouwbaarheid sluiting kunstwerk

Inleiding faalmechanisme betrouwbaarheid sluiting kunstwerk

In dit hoofdstuk wordt een beschrijving gegeven van het faalmechanisme *betrouwbaarheid sluiting* van hoogwaterkerende kunstwerken. De basis van dit faalmechanisme staat beschreven in de Werkwijzer Ontwerpen Waterkerende Kunstwerken WOWK [Van Bree, et al., 2018]. Deze is gebaseerd op de [Leidraad Kunstwerken, 2003].

Een waterkerend kunstwerk in een waterkering is in eerste instantie daar aanwezig ten behoeve van een andere functie dan waterkeren. De primaire functie heeft betrekking op de wens om mensen, goederen, voertuigen of vloeistoffen en gassen de waterkering te laten passeren. Zonder deze primaire functie zou het kunstwerk immers niet nodig zijn. Vanwege de primaire functie dient een kunstwerk een opening te bieden in de waterkering. Deze opening in het bijzonder maakt dat een waterkerend kunstwerk zich onderscheidt van een waterkering bestaande uit dijken, kaden of duinen. Het faalmechanisme *betrouwbaarheid sluiting* is daarmee een uniek faalmechanisme dat alleen bij waterkerende kunstwerken[1] speelt. Om een hoogwater te kunnen keren zal de opening en daarmee het kunstwerk (hoogwaterkerend) gesloten moeten worden. Totdat het hoogwater ten einde is moet de functie waterkeren op de gewenste wijze vervuld blijven.

De komende paragrafen (zie gerelateerde artikelen) gaan dieper in op het falen van de waterkering als gevolg van het niet (tijdig) sluiten van de waterkering ter plaatse van een kunstwerk.

[1] Transportleidingen van bijvoorbeeld gas of water die de waterkering wel passeren maar niet direct buitenwater keren, worden in dit hoofdstuk niet beschouwd.

Versie 1.0: 2 juli 2025

1.1 Fenomenologische beschrijving falen door betrouwbaarheid sluiting

Beschrijving faalproces betrouwbaarheid sluiting

Falen door het faalmechanisme *betrouwbaarheid sluiting* treedt op wanneer het instromende volume aan water door een niet (tijdig) gesloten kunstwerk dusdanig groot is dat dit leidt tot substantiële schade en/of slachtoffers (overstromingsgevolgen) in het achter de kering gelegen gebied. Falen van de waterkering treedt bij *betrouwbaarheid sluiting* op als (zie ook Figuur 1):

(1) zich een hoogwater aandient;

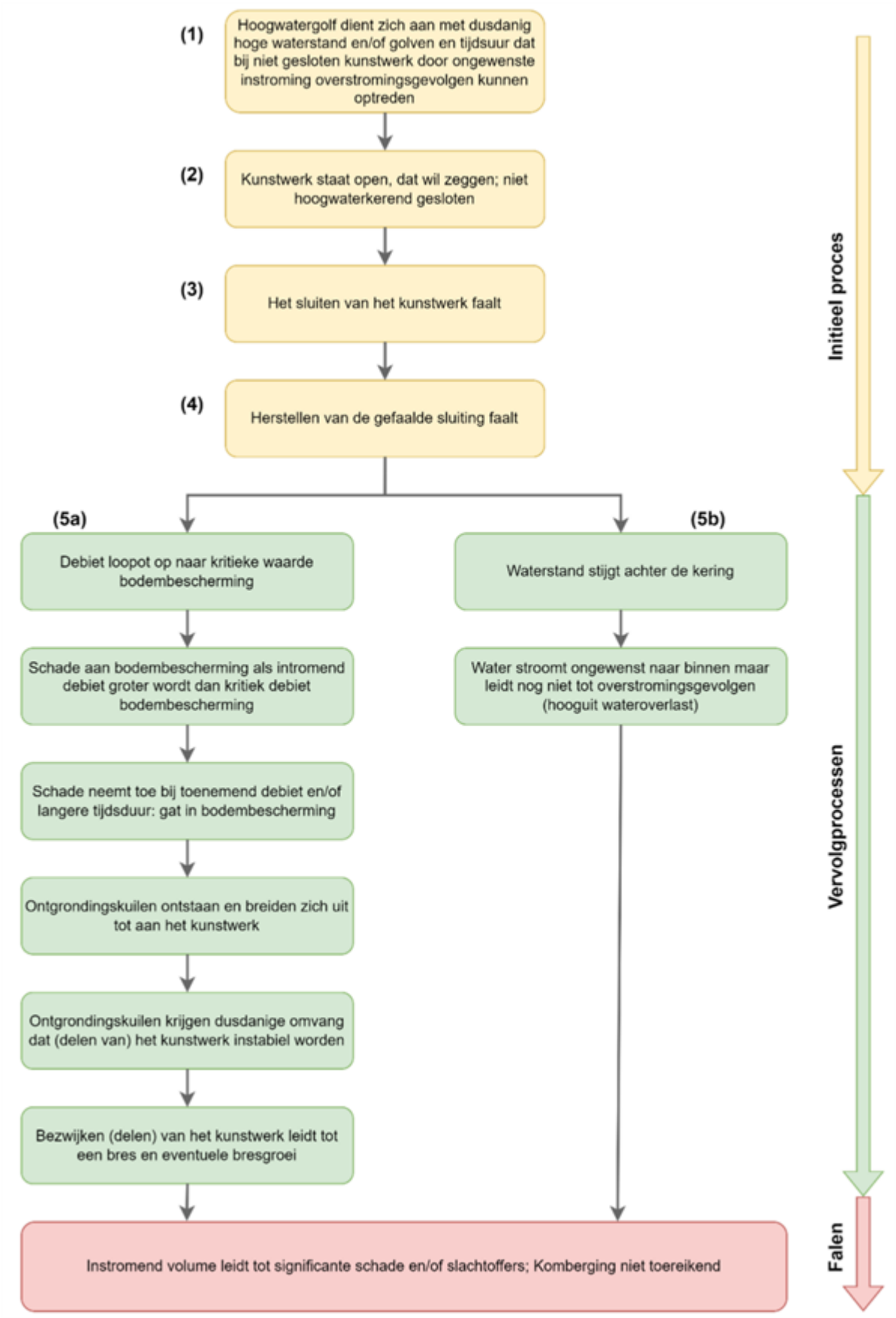
EN (2) het kunstwerk voorafgaand aan dit hoogwater niet hoogwaterkerend gesloten staat;

EN (3) de sluiting van de (hoogwaterkerende) keermiddelen faalt;

EN (4) herstel van de gefaalde sluiting faalt;

EN (5a) het kunstwerk zelf bezwijkt door bezwijken van de bodembescherming met substantiële schade en/of slachtoffers (overstroming) als gevolg[1]. Hiervoor moet eerst de bodembescherming achter het kunstwerk bezwijken. Vervolgens moeten ontgrondingskuilen ontstaan in de (niet meer beschermde) ondergrond, waarna de standzekerheid van het kunstwerk verloren gaat met als gevolg een (voortschrijdende) bres in de waterkering. Ten slotte moet als gevolg van de instroming door deze (groeiende bres) de komberging worden overschreden;

OF (5b) het kunstwerk zelf blijft staan maar het instromend volume door het niet-gesloten kunstwerk kan niet worden geborgen in het achterliggende (water-)systeem zonder dat dit leidt tot substantiële schade en/of slachtoffers (overstroming).



Figuur 1 Faalproces betrouwbaarheid sluiting.

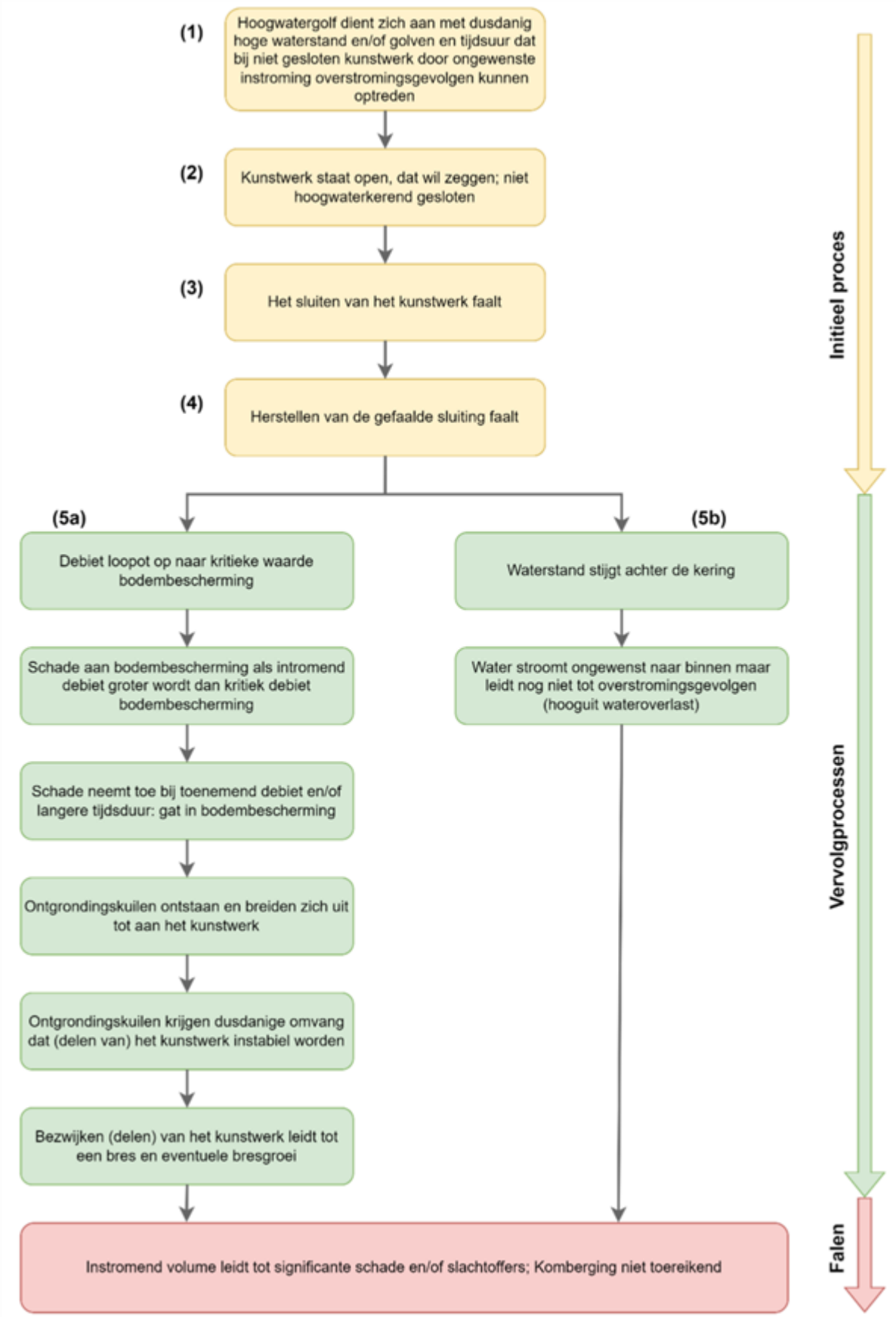
Het komt erop neer dat falen door niet-sluiten optreedt als de buitenwaterstand oploopt tot dusdanige hoogte dat, bij een niet-gesloten kunstwerk, er ongewenst water binnenstroomt en vervolgens dit instromende debiet leidt tot overschrijding van het beschikbare kombergende volume, al dan niet inclusief bezwijken van het kunstwerk en eventuele bresgroei.

[1] Praktisch gezien kan het gebeuren 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 ten opzichte van het ongewenst instromend debiet relatief groot is en bresgroei niet optreedt of 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.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Nadere beschrijving faalproces betrouwbaarheid sluiting

Dit artikel beschrijft het faalproces in meer detail, zie ook Beschrijving faalproces betrouwbaarheid sluiting. De nummers tussen haakjes verwijzen daarbij naar de nummers in Figuur 1 (overgenomen uit eerdergenoemd artikel).



Figuur 1 Faalproces betrouwbaarheid sluiting.

Initiërende gebeurtenis

Het faalproces start met de situatie waarin een kunstwerk zijn primaire functie vervult, het laten passeren van water, voertuigen, mensen et cetera van de waterkering. Om dit mogelijk te maken staat het kunstwerk in een bepaalde mate en gedurende een bepaalde periode geopend. Op dergelijke momenten is de maximaal beschikbare waterkerende hoogte van het kunstwerk niet aanwezig (2).

Op een gegeven moment wordt een hoogwater voorspeld (1). Op basis van deze voorspelling wordt gekeken of het nodig is om bij het kunstwerk de maximaal beschikbare kerende hoogte aan te brengen. Dit komt overeen met het hoogwaterkerend sluiten van het kunstwerk. Wanneer dit nodig blijkt te zijn, wordt het sluitproces gestart. Dit is feitelijk de eerste stap in het sluitproces; de alarmering.

Na het sein om te gaan sluiten wordt afhankelijk van de bediening van het kunstwerk personeel en eventueel materiaal/materieel gemobiliseerd om het kunstwerk te gaan sluiten. Bij een kunstwerk dat vanuit zijn primaire functie lokaal wordt bediend is dit mobiliseren (grotendeels) niet nodig omdat het bedienend personeel al aanwezig is. Een voorbeeld hiervan is een lokaal bediende schutsluis. Bij kunstwerken die op afstand worden bediend kan het zijn dat ook de hoogwaterkerende keermiddelen op afstand kunnen worden bediend, zodat mobilisatie (in eerste instantie) niet nodig is, tenzij deze bediening faalt. Er zijn ook kunstwerken, bijvoorbeeld coupures, waarbij zowel mens als materiaal en materieel moeten worden gemobiliseerd om de kering te sluiten.

Na mobilisatie volgt het daadwerkelijke sluiten, de bediening, van de kunstwerken. Falen van deze bediening of het optreden van een technische storing kan ertoe leiden dat het kunstwerk niet gesloten kan worden (3).

Falen van een kunstwerk gaat altijd gepaard met het falen van een van de aangegeven aspecten van het sluitproces (alarmering, mobilisatie, bediening en technische storing). In dat geval staat het kunstwerk niet hoogwaterkerend gesloten. Er zal vervolgens worden getracht om alsnog de sluiting te realiseren (4) via herstel van de opgetreden fout(en) in het sluitproces. Dit gebeurt eventueel met behulp van alternatieve methoden (bijvoorbeeld zandzakken of bigbags). Wanneer dit niet lukt, zal buitenwater ongewenst via het openstaande kunstwerk binnen kunnen stromen.

Vervolgprocessen

Het instromende water belast aan de binnenzijde de bodembescherming en het kombergend vermogen van het achter de kering gelegen gebied. Falen van het kunstwerk (optreden van overstromingsgevolgen in het achterland) treedt alleen op wanneer het kombergend vermogen van dit achterland niet meer toereikend is en er grote schade optreedt en/of er dodelijke slachtoffers vallen.

Overschrijden komberging na bezwijken kunstwerk door falen bodembescherming (5a)

Bij een toenemend verval over het niet-gesloten kunstwerk neemt de stroomsnelheid boven de bodembescherming toe. Dit leidt tot falen van de bodembescherming als de kritieke stroomsnelheid van de bodembescherming wordt overschreden. In de praktijk is dit veelal het begin van een geleidelijk erosieproces, waarbij bij toenemende stroomsnelheid steeds grotere schade aan de bodembescherming ontstaat en uiteindelijk de ondergrond onder de bodembescherming bloot komt te liggen.

Na bezwijken van de bodembescherming kan transport van bodemmateriaal uit de ondergrond onder de bodembescherming plaatsvinden. Dit leidt tot ontgrondingskuilen direct achter het kunstwerk. Deze ontgrondingskuilen worden groter en dieper naarmate de ondergrond langer belast wordt door de stroming als gevolg van het instromende debiet. Uiteindelijk kunnen deze ontgrondingskuilen

dermate groot en diep worden dat dit leidt tot algehele instabiliteit en hiermee het bezwijken van (delen van) het kunstwerk.
Nadat de kritieke stroomsnelheid van de bodembescherming wordt overschreden, moet er dus nog het nodige gebeuren voordat het kunstwerk als geheel bezwijkt en er een bres in de waterkering ontstaat, namelijk:

- Doorgaand transport van elementen uit de toplaag en eventuele onderlagen van de bodembescherming en het ontstaan van een gat in de bodembescherming.
- Optreden van erosie van de onbeschermde bodem als gevolg van de optredende stroomsnelheden. Dit proces leidt uiteindelijk tot het ontstaan van ontgrondingskuilen.
- Optreden van een afschuiving aan de rand van deze ontgrondingskuil, waarvan de inscharing het kunstwerk bereikt.
- Afmetingen (diepte, breedte) van de ontgrondingen ter plaatse van het kunstwerk worden dusdanig groot dat dit leidt tot instabiliteit (kantelen, verschuiven) van het kunstwerk. Dit kan optreden door het wegvallen van de passieve gronddruk aan de binnenzijde, maar ook door het uitspoelen van gronddeeltjes onder de binnenzijde van het kunstwerk. Dit kan leiden tot een proces waarbij delen van het kunstwerk steeds verder vervormen, dan wel verplaatsen. Ook kunnen ontgrondingskuilen leiden tot verminderde weerstand tegen *piping* van het kunstwerk.
- Het totale kunstwerk faalt als gevolg van kantelen en/of verschuiven van het geheel of het opeenvolgend bezwijken van onderdelen van de constructie. Afhankelijk van wat er bezwijkt, de gehele constructie dan wel een deel van de constructie, kan er een bres in de waterkering ontstaan en vervolgens bresgroei optreden. In dat geval wordt het gat in de waterkering groter en stijgt het instromend debiet. Het kombergend vermogen zal dan sneller niet toereikend zijn.

De mate waarin en de snelheid waarmee bovenstaande processen na bezwijken van de bodembescherming optreden is afhankelijk van een groot aantal factoren. De belangrijkste zijn:

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

Overschrijden komberging bij standzeker kunstwerk (5b)

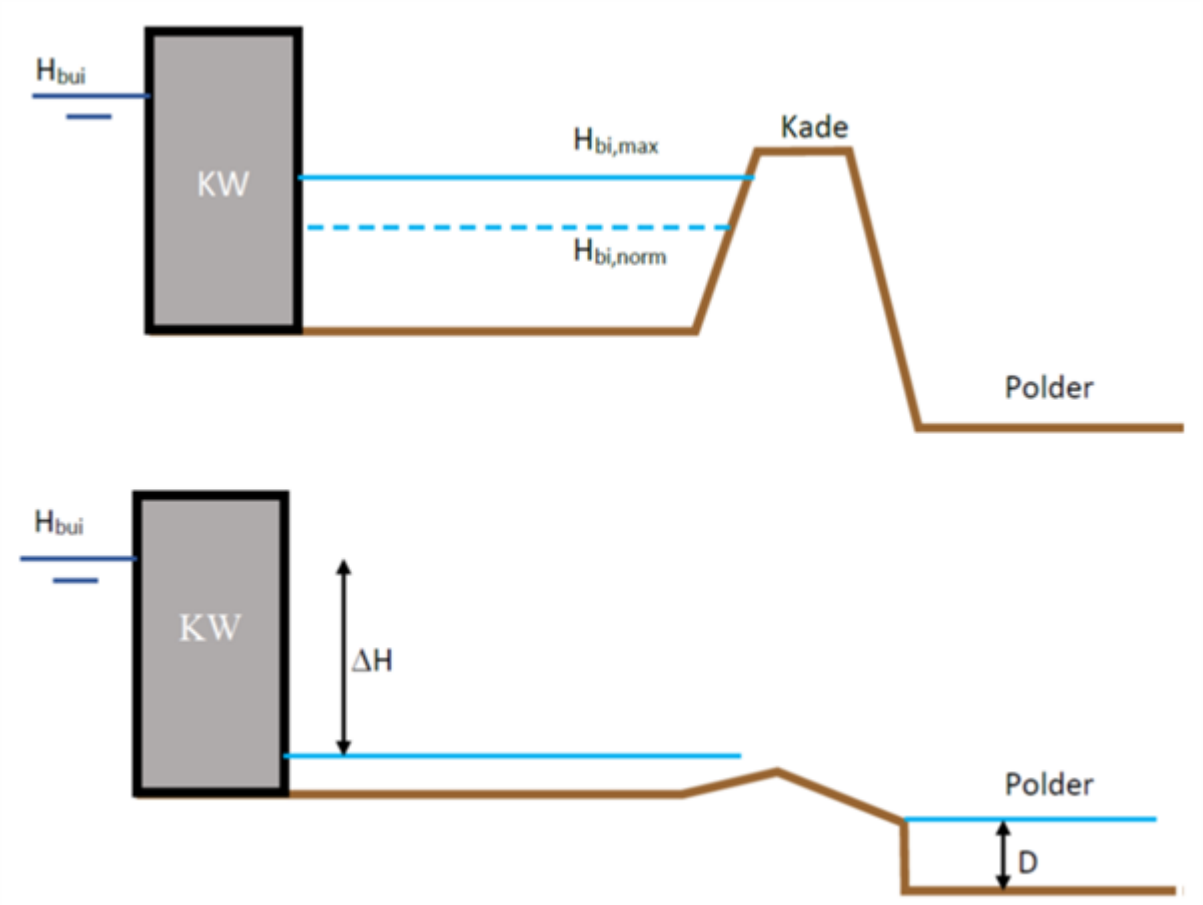
Het overschrijden van het kombergend vermogen bestaat uit het instromen van dusdanig veel water in het achterliggende watersysteem of gebied dat er sprake is van overstromingsgevolgen (substantiële schade en/of slachtoffers) in het achterliggende gebied. Voor kunstwerken zijn in de basis drie verschillende situaties te onderscheiden:

1. Achter het kunstwerk is een watersysteem aanwezig dat wordt omringd door zachte kades (grondlichamen). Als de kades bezwijken of overlopen door de toegenomen waterstand in het watersysteem, kan (een deel van) het watersysteem leeglopen in het achterliggende gebied.
2. Achter het kunstwerk is een watersysteem aanwezig dat wordt omringd door kades die praktisch niet kunnen doorbreken, bijvoorbeeld doordat sprake is van harde kades bij een haven of doordat de boorden van de watergang op of beneden het maaiveld gelegen zijn. In deze situatie kan dusdanig veel water over de randen van het watersysteem het achterliggende gebied in lopen dat er sprake is van een overstroming.
3. Achter het kunstwerk is geen watersysteem aanwezig, er vindt direct inundatie van het

achterliggende gebied plaats. Dit komt bij coupures veel voor.

Als sprake is van kleine watersystemen met 'zachte' kades hoeft falen van de kades niet direct te leiden tot overstromingsgevolgen doordat het volume dat dan het achterliggende gebied in stroomt klein is. In deze situatie kan falen van de 'zachte' kade wel andere faalprocessen initiëren. Dit komt doordat ná falen van de kades de binnenwaterstand zover daalt dat het verval over het kunstwerk sterk toeneemt. Hierbij kunnen vervolggebeurtenissen worden onderscheiden die kunnen leiden tot bezwijken van het kunstwerk:

1. Door de afgenomen waterdiepte kan de stroomsnelheid ter plaatse van de bodembescherming achter het kunstwerk zodanig toenemen dat een faalproces van erosie van de bodembescherming in gang wordt gezet. Dit geldt voor zowel een gesloten kunstwerk als een kunstwerk dat onterecht open staat.
2. Bij een deels gesloten kunstwerk (er zijn keermiddelen gesloten, maar deze keren niet tot de maximale hoogte) kan het toegenomen verval over het kunstwerk leiden tot bezwijken van waterkerende constructie-onderdelen of het instabiel worden van het kunstwerk.



Figuur 2 Voorbeeld van situatie waarin verval over het kunstwerk sterk toeneemt na bezwijken van de kades rond de komberging (boven: situatie vóór bezwijken kades, onder: situatie ná bezwijken kades komberging).

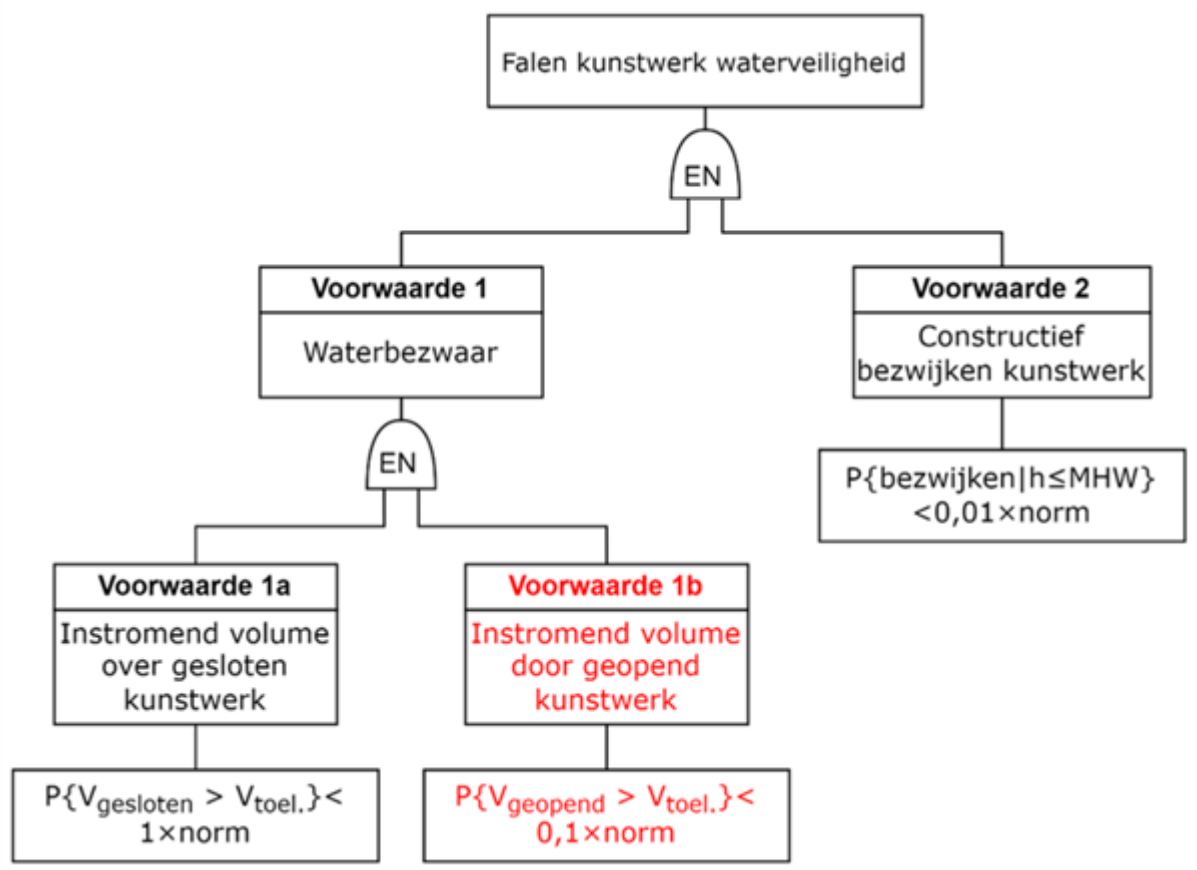
Versie 1.0: 2 juli 2025

Historie faalmechanisme betrouwbaarheid sluiting

Het aspect van *betrouwbaarheid sluiting* is een van de belangrijkste aandachtspunten geweest sinds het bouwen van kunstwerken in waterkeringen. Lange tijd werd het aantal en het type keermiddelen dat

hiermee gemoeid was bepaald op basis van ervaringen en persoonlijke inschatting van risico's. Bij de bouw van de stormvloedkeringen zoals de Oosterscheldekering is *betrouwbaarheid sluiting* als faalmechanisme behandeld en zijn faalkansanalyses van de keermiddelen uitgevoerd. In de documenten [Basisrapport Waterkerende Kunstwerken en Bijzondere Constructies, 1997] en [Leidraad Waterkerende Kunstwerken en Bijzondere Constructies, 1997] is het faalmechanisme specifiek naar voren gebracht voor alle waterkerende kunstwerken Dit is uiteindelijk verder uitgewerkt in de [Leidraad Kunstwerken, 2003] waar de basis voor ontwerp en beoordeling van dit faalmechanisme is gelegd.
In de [Grondslagen voor Waterkeren, 1998] is aangegeven dat vanaf 1998 ontwerp en beoordeling van waterkeringen op basis van de overbelastingsbenadering plaatsvond, waarbij de waterkeringen ontworpen en getoetst werden bij een specifiek peil afhankelijk van de norm van de dijkring. Dit peil werd ook wel aangeduid met MHW (maatgevend hoogwater).

Voor een verdere invulling van de eisen aan falen van kunstwerken is in de Grondslagen voor Waterkeren verwezen naar de Leidraad Kunstwerken 2003. Hierin is voor toetsen en ontwerpen het falen van een kunstwerk opgedeeld in een spoor *waterbezwaar* – hierin dienen de faalmechanismen *overslag en/of overloop* en *betrouwbaarheid sluiting* te worden beschouwd – en een spoor *constructief bezwijken* (zie Figuur 1). Uitgangspunt is de overbelastingsbenadering, die wat betreft *waterbezwaar* primair eisen stelt aan de kans op overschrijding van een toelaatbaar instromend volume buitenwater via het gesloten of het geopende kunstwerk. Aanvullend hierop is een eis gesteld aan de kans op *constructief falen*, gegeven dat normomstandigheden niet worden overschreden.



Figuur 1 Faalpaden op hoofdlijnen volgens [Leidraad Kunstwerken, 2003]. In rood het pad voor *betrouwbaarheid sluiting*.

Voor het faalmechanisme *betrouwbaarheid sluiting* was op basis van Figuur 1 voor elk kunstwerk een faalruimte van 0,1 x norm beschikbaar. Daarbij werd alleen gekeken naar de gevolgen bij niet-sluiten

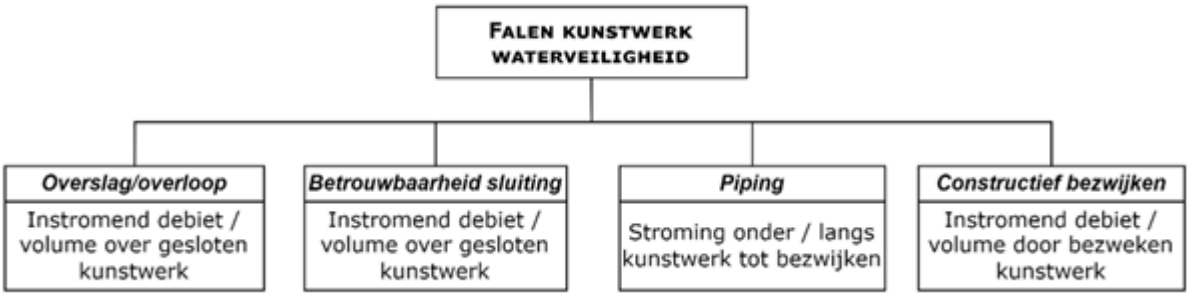
voor het kombergend vermogen. Het bezwijken van de bodembescherming ten gevolge van niet-sluiten viel onder voorwaarde 2, *constructief bezwijken*.
In de Leidraad Kunstwerken 2003 is vervolgens ook het basismodel voor het faalmechanisme *betrouwbaarheid sluiting* geformuleerd. Deze is daarin opgedeeld in twee faaltakken; kans dat de keermiddelen niet gesloten zijn op het moment dat een hoogwater passeert en de kans dat vervolgens het kombergend vermogen (optreden van waterbezwaar of erger) van het achterliggende systeem niet groot genoeg is om het ongewenst instromende volume aan water te bergen.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Vigerende werkwijze faalmechanisme betrouwbaarheid sluiting

Sinds 2017 is de overstromingskansbenadering van toepassing. Hierbij wordt meer expliciet uitgegaan van overstromingsgevolgen als faalcriterium. Mede door de in de [Leidraad Kunstwerken, 2003] gehanteerde termen 'waterbezwaar' als faalcriterium en 'open keerpeil' als maximaal toelaatbaar binnenpeil, lag de focus bij de overbelastingsbenadering op wateroverlast in plaats van substantiële gevolgen. Daar waar in de praktijk de overbelastingsbenadering wateroverlast gekoppeld was aan falen, zijn nu grote gevolgen (miljoenen euro's schaden en/of één of meer slachtoffers) aangeduid als criterium voor falen. Daarnaast is falen van het kunstwerk nu opgedeeld in vier faalmechanismen (zie Figuur 1), waarvan *betrouwbaarheid sluiting* er één is.

Voor een nadere uitwerking van de huidige werkwijze en modellen wordt verwezen naar de lijst met gerelateerde artikelen.



Figuur 1 Vigerende faalboom kunstwerken waterveiligheid.

Voor *niet-sluiten* geldt dat in de huidige praktijk, naast de kans op het niet-gesloten zijn van het kunstwerk, bij passeren van een hoogwatergolf gekeken wordt naar de reststerkte komberging en sterkte bodembescherming. Dit laatste wordt daarmee in tegenstelling tot de werkwijze voor 2017 direct betrokken bij het faalmechanisme *niet-sluiten* en niet apart beschouwd bij *constructief bezwijken*.

Versie 1.0: 2 juli 2025

1.2 Veiligheidsanalyse voor faalmechanisme betrouwbaarheid sluiting

Beschrijving veiligheidsanalyse voor faalmechanisme betrouwbaarheid sluiting

Een veiligheidsanalyse ten aanzien van *betrouwbaarheid sluiting* kan op meerdere wijzen worden uitgevoerd. De basis van de analyse is echter altijd hetzelfde: de kans op overstroming door het ongewenst niet gesloten zijn van het kunstwerk moet voldoende klein zijn.

Basisbegrippen

Bij de uitvoering van een veiligheidsanalyse voor *betrouwbaarheid sluiting* worden de volgende basisbegrippen gehanteerd:

- Waterkerend kunstwerk: een kunstwerk dat zich in de waterkering bevindt en dat voorzien is

van keermiddelen waarmee naast mogelijk andere functies (bijvoorbeeld schutten) ongewenste directe instroming van buitenwater voorkomen kan worden.
- Primaire functie(s) van een waterkerend kunstwerk: de dagelijkse functie(s) waarvoor het kunstwerk in de waterkering aanwezig is en zonder welke er geen kunstwerk benodigd zou zijn. Het keren van hoogwater is daarmee geen primaire maar een afgeleide functie van het kunstwerk.
- Maximaal toelaatbare binnenwaterstand: de waterstand op de binnendijkse watergang die maximaal toelaatbaar is zonder dat dit leidt tot substantiële schade en/of slachtoffers (overstromingsgevolgen). Voor coupures geldt dat er geen binnendijkse watergang is en is dus geen maximale binnenwaterstand aanwezig.
- Hoogwater kerende keermiddelen: de/het keermiddel(en) die de maximaal kerende hoogte van het kunstwerk verzorgen.
- Kombergend vermogen: het volume aan water dat binnendijks in het achter het kunstwerk gelegen gebied (watergang) geborgen kan worden zonder dat dit tot overstromingsgevolgen leidt.
- Sluitproces: het proces van alarmering (er is een dusdanig hoogwater op komst dat het kunstwerk gesloten moet worden) tot en met de daadwerkelijke hoogwatersluiting van het kunstwerk.

Systeembeschrijving

Een betrouwbaarheidsanalyse ten aanzien van *betrouwbaarheid sluiting* bestaat in de basis uit het beschrijven van het watersysteem en de functie en werking van het kunstwerk in dit systeem. Hierbij kunnen onder andere de volgende zaken aan bod komen:

- De functie van het watersysteem waarin het kunstwerk is opgenomen.
- De componenten waaruit het systeem bestaat met daarbij onder andere het kunstwerk.
- De functie(s) die het kunstwerk vervult in het watersysteem.
- De inzetduur en inzetfrequentie van het kunstwerk voor de diverse functies.
- De componenten waaruit het kunstwerk bestaat en de wijze waarop deze functioneren.
- De ervaringen met het systeem en het kunstwerk.
- De storingsgegevens van het kunstwerk.

In het artikel Systeemanalyse wordt hier nader op ingegaan.

Eisen waterveiligheid

De omgang met de eisen vanuit waterveiligheid verschilt tussen ontwerpen en beoordelen. Over het algemeen wordt bij beoordelen de faalkans voor *betrouwbaarheid sluiting* bepaald en wordt vervolgens gekeken of deze faalkans een substantiële dan wel dominante bijdrage aan de overstromingskans van het normtraject heeft. Het totaal aantal kunstwerken in het normtraject speelt daarin geen directe rol; er wordt geen faalkanseis voor *betrouwbaarheid sluiting* voor een kunstwerk bepaald op basis van het aantal en de prestatie van de overige waterkerende kunstwerken in het normtraject.

Bij ontwerpen van een nieuw kunstwerk is het van belang om de prestatie en daarmee de faalkansbijdrage (nu en in de toekomst) van de overige kunstwerken en de andere onderdelen van het dijktraject aan de overstromingskans van het normtraject inzichtelijk te hebben. Op basis hiervan, in combinatie met de overstromingskansnorm van het dijktraject, kan vervolgens bepaald worden welke faalkanseis aan het nieuwe kunstwerk kan worden toebedeeld. Daarbij dienen ook toekomstige ontwikkelingen (meer of minder kunstwerken in het normtraject of andersoortige aanpassingen) te worden meegewogen. Opgemerkt wordt dat het bij het ontwerpen van een kunstwerk praktisch kan zijn om een specifiek faalkansbudget voor het nieuwe kunstwerk te hanteren, waarbij gebruik kan

worden gemaakt van de bekende faalkansbijdragen van de overige elementen in het traject.

Eisen vanuit primaire/overige functie(s)

Specifiek voor het functioneren van het sluitproces van een waterkerend kunstwerk geldt dat beschikbaarheidseisen vanuit het primaire proces ook een grote rol kunnen spelen bij het ontwerpen van een nieuw kunstwerk. Het is mogelijk dat deze eisen nog strenger zijn dan de eisen vanuit waterveiligheid.

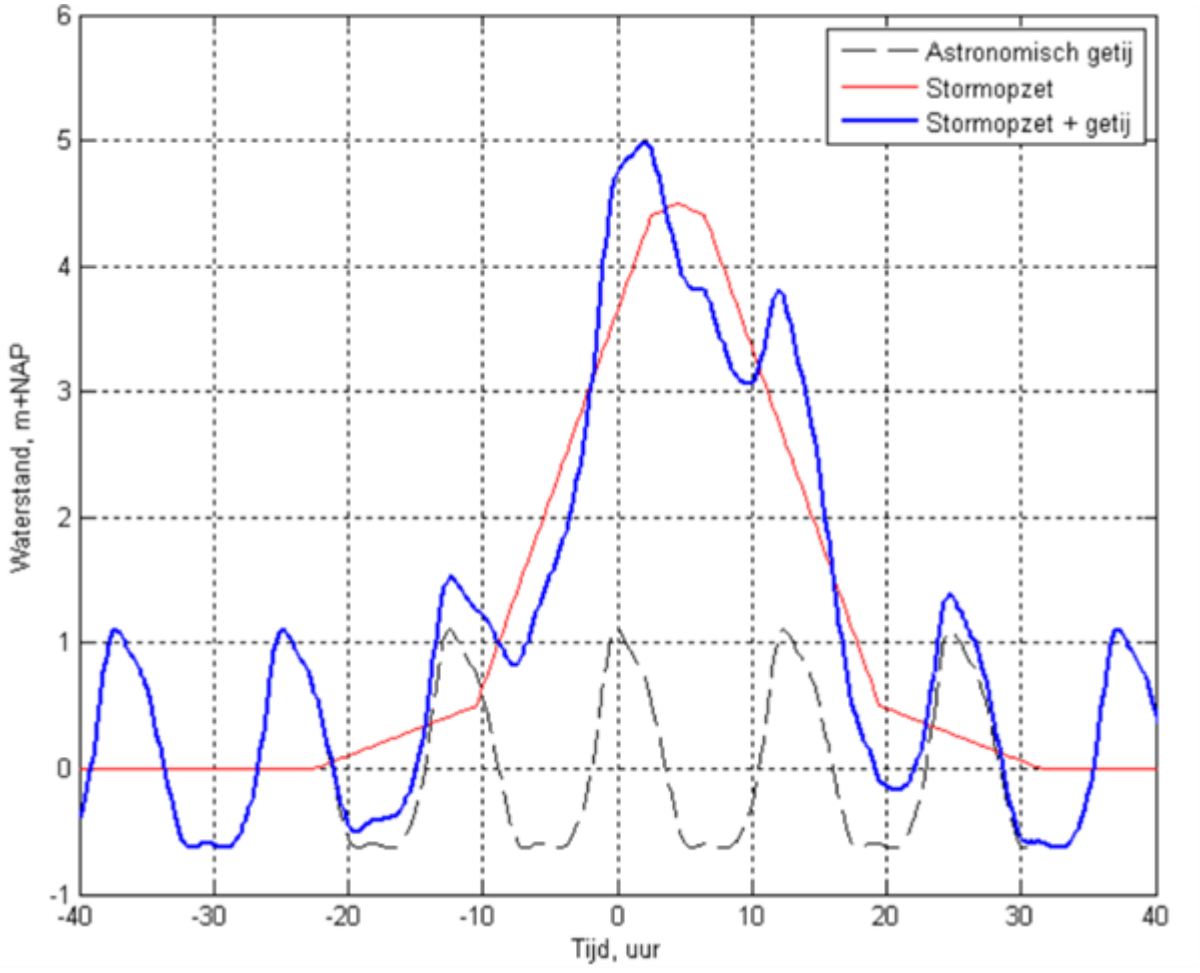
Versie 1.1: 27 maart 2026

Belastingen bij faalmechanisme betrouwbaarheid sluiting

Kijkende naar *betrouwbaarheid sluiting* zijn met name de buitenwaterstand, de golven en de binnenwaterstand van belang als hydraulische componenten.

De buitenwaterstand bepaalt samen met de binnenwaterstand het verval over het kunstwerk en is daarmee naast de afmetingen van de doorstroomopening grotendeels verantwoordelijk voor de hoeveelheid instromend water (debiet en volume). Gedurende een hoogwaterperiode kent de buitenwaterstand afhankelijk van het watersysteem (bovenrivieren, benedenrivieren, zee, meren) een bepaald verloop in de tijd. Globaal kan worden gesteld dat de duur van een hoogwater bij de zee op de meren relatief kort is (maximaal enkele dagen), terwijl een hoogwaterperiode op de bovenrivieren vele dagen kan aanhouden.

In Figuur 1 is een voorbeeld gegeven van het verloop van een hoogwater in het benedenrivierengebied. Duidelijk zichtbaar is de invloed van het getij bij de waterstand gedurende de hoogwaterperiode.



Figuur 1 Verloop hoogwaterperiode in de tijd voor locatie in het benedenrivierengebied.

Golven spelen voor het instromende debiet door een ongewenst niet-gesloten kunstwerk slechts een beperkte rol. Alleen wanneer er in een niet hoogwater gesloten situatie sprake is van een verticale wand/hoge drempel (zie ook Instromingsmodel voor hoge drempel/verticale wand) kunnen golven van belang zijn. De eigenschappen van de golven kunnen gedurende een hoogwaterperiode wijzigen, maar over het algemeen worden ze in de analyses constant gehouden.

De binnenwaterstand speelt ook een belangrijke rol, omdat deze samen met de buitenwaterstand het verval bepaalt en daarmee in de meeste gevallen de aandrijvende kracht is voor het instromende water. Opgemerkt wordt dat het niveau van het binnenwater beïnvloed wordt door het instromende water, waardoor ook het verval gedurende een hoogwaterperiode niet alleen wijzigt door een veranderende buitenwaterstand, maar ook door een toenemende binnenwaterstand. De toename van de binnenwaterstand is afhankelijk van het instromende volume en het kombergend vermogen. Wanneer de verhouding tussen instromend volume en kombergend vermogen heel klein is, dan zal de invloed van het instromende debiet op de binnenwaterstand ook beperkt zijn.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Model voor faalmechanisme betrouwbaarheid sluiting

Het model voor het faalmechanisme *betrouwbaarheid sluiting* wordt beschreven via onderstaande functie (zie ook Beschrijving faalproces betrouwbaarheid sluiting). De basis van deze formule is afgeleid in Bijlage A.

$$P_{f,KW,BS} = P_{open} \cdot P_{ns} \cdot P_{f,herstel} \cdot P\left(V_{in|open} > V_c\right) \quad (1)$$

Parameterdefinities zijn weergegeven onder formule 3.

Voor de kans dat de komberging niet toereikend is, wordt geen specifiek onderscheid gemaakt tussen een tekort aan komberging inclusief bezwijken of exclusief bezwijken van het kunstwerk. In de praktijk wordt hier vaak wel naar gekeken. Het uitgangspunt is dan dat wanneer het kunstwerk bezwijkt door erosie van de bodem en het ontstaan van ontgrondingskuilen voordat de beschikbare komberging niet meer toereikend is, de bresgroei dusdanig zal zijn dat de komberging zeker ook niet toereikend zal zijn en dus falen optreedt (falen met bezwijken). Wanneer dit wordt ingebracht in het model en bezwijken van het kunstwerk wordt gerelateerd aan een kritiek debiet (en daarmee stroomsnelheid) voor de bodembescherming ontstaat onderstaande formule:

$$P_{f,KW,BS} = P_{open} \cdot P_{ns} \cdot P_{f,herstel} \cdot P\left(\left\{V_{in|open} > V_c\right\} OF \left\{Q_{in|open} > Q_c\right\}\right) \quad (2)$$

Ervan uitgaande dat de kans op een tekort aan komberging onafhankelijk is van de kans dat de bodembescherming bezwijkt, volgt onderstaande formule:

$$P_{f,KW,BS} = P_{open} \cdot P_{ns} \cdot P_{f,herstel} \cdot \left\{P\left(V_{in|open} > V_c\right) + P\left(Q_{in|open} > Q_c\right)\right\} \quad (3)$$

Waarin:

$P_{f,KW,BS}$ Kans op overstroming na niet-sluiten [1/jaar].

P_{open} Kans op open kering bij een sluitvraag [-].

P_{ns} Kans op falen sluiting bij een sluitvraag [-].

$P_{f;herstel}$ Kans op falen herstel van gefaalde sluiting [-].

$V_{in|open}$ Instromend volume door het niet hoogwater kerend gesloten kunstwerk gedurende een hoogwaterperiode [m³].

V_c Maximaal beschikbaar volume aan kombergend vermogen in het achterland waarbij geen overstromingsgevolgen optreden [m³].

$Q_{in|open}$ Instromend debiet door het niet hoogwater kerend gesloten kunstwerk gedurende een hoogwaterperiode [m³/s].

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

De diverse delen van bovenstaande formule worden in de volgende artikelen nader uitgewerkt: Reparatie falende sluitingen, Model voor kans op open staan, Faalkans van herstel van een gefaalde sluiting, Kombergingsmodel voor betrouwbaarheid sluiting en Model voor bezwijken bodembescherming door betrouwbaarheid sluiting.

Voor de faalkans voor *betrouwbaarheid sluiting* is in ieder geval van belang hoe groot het instromende debiet is, zowel in relatie tot de bodembescherming als de komberging. Omdat het instromend debiet mede bepaald wordt door de watergang waar doorheen het binnenstroomt, worden eerst de diverse Instromingsmodellen weergegeven.

Versie 1.0: 2 juli 2025

1.3 Kans op open staan

Inleiding kans op open staan

Wanneer een kunstwerk altijd hoogwaterkerend gesloten is, speelt logischerwijs het faalmechanisme *betrouwbaarheid sluiting* geen enkele rol. Wanneer dit kunstwerk nu één keer per jaar geopend wordt om bijvoorbeeld gedurende 10 dagen continu water in te laten, dan is er een kans dat tijdens deze inlaatperiode een hoogwater voorbijkomt en de (hoogwaterkerende) keermiddelen gesloten moeten worden om een overstroming te voorkomen. Dit toont aan dat het gebruik vanuit de primaire functie van het kunstwerk van grote invloed is op het faalmechanisme *betrouwbaarheid sluiting*. Dit gebruik wordt binnen het faalmechanisme gemodelleerd met de kans op open staan (P_{open}). In bovenstaande situatie is deze kans P_{open} = 10 dagen/365 dagen = 10/365. Deze parameter geeft feitelijk de kans aan dat voorafgaand aan, of eventueel tijdens, een hoogwater het kunstwerk geopend is.

In de artikelen Gebruik van het kunstwerk en Reparatie falende sluitingen komen de zaken voorbij die van invloed zijn op de kans op open staan (P_{open}). Daarbij wordt de parameter stapsgewijs steeds verder toegelicht en onderbouwd. Daarbij opgemerkt dat de parameter voor alle voorkomende situaties in waterkeringen lastig eenduidig te vatten is. Tenslotte wordt in Model voor kans op open staan de berekening van deze parameter beschreven.

Zoals later zal blijken kan de parameter in het gehanteerde Model voor faalmechanisme betrouwbaarheid sluiting naast een kans ook de vorm van een frequentie aannemen.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Gebruik van het kunstwerk

Het gebruik van het kunstwerk vanuit zijn primaire functie vormt de basis voor het faalmechanisme *betrouwbaarheid sluiting.* En meer specifiek geldt dat het gebruik van de hoogwaterkerende keermiddelen de daadwerkelijke basis is. Hiernaar kijkend zijn er globaal vijf typen kunstwerken te

onderscheiden:

1. Kunstwerk functioneert dusdanig dat het altijd hoogwaterkerend gesloten staat. De keermiddelen zijn zo geconfigureerd dat, met uitzondering van een calamiteit, de primaire functie van het kunstwerk kan worden vervuld met instandhouding van de waterkerende functie. Een voorbeeld hiervan is een schutsluis waarvan zowel het buiten- als het binnenhoofd en de kolk fysiek en constructief eenzelfde waterstand kunnen keren.
2. Kunstwerk wordt op aanvraag (primaire functie) geopend buiten een hoogwaterperiode. Het kunstwerk staat in beginsel altijd hoogwaterkerend gesloten en wordt alleen op aanvraag geopend om zijn primaire functie uit te oefenen. Na afloop hiervan wordt het kunstwerk weer hoogwaterkerend gesloten. Voorbeelden hiervan zijn een spuisluis en een gemaal.
3. Kunstwerk wordt op aanvraag (primaire functie) geopend tijdens een hoogwaterperiode. Het kunstwerk wordt gebruikt om ten tijde van hoge waterstanden het water vanuit de polder te lozen op het buitenwater. Sommige gemalen worden zodanig ingezet en zijn dus bedoeld om de gevolgen van het hoogwater gesloten zijn van de kering in relatie tot de afvoer van binnenwater (bijvoorbeeld regen) zoveel mogelijk te beperken.
4. Kunstwerk te sluiten bij hoogwater. Het kunstwerk staat vanuit zijn primaire functie altijd geopend (niet hoogwaterkerend gesloten) en wordt bij een naderend hoogwater gesloten. Een voorbeeld hiervan is een coupure, maar ook een schutsluis waarvan het hoogwaterkerende keermiddel alleen gesloten wordt in geval van hoogwater.
5. Kunstwerk te sluiten bij een calamiteit. De keermiddelen staan in beginsel ook tijdens een hoogwater niet-gesloten. Sluiting van deze kunstwerken is alleen noodzakelijk als zich een calamiteit voordoet waardoor het waterkerend vermogen wordt aangetast. Het gaat hierbij om objecten die geen directe verbinding met het buitenwater hebben. Een voorbeeld van een dergelijk object is een tunnel die de waterkering kruist.

Het is duidelijk dat de kans op open staan van bovenstaande vijf typen kunstwerken van elkaar verschilt en ook anders wordt benaderd. Daarnaast kan uit de verschillende typen worden afgeleid dat het gebruik van een kunstwerk vanuit zijn primaire functie bestaat uit drie componenten: de frequentie waarmee het kunstwerk wordt ingezet, de tijdsduur van deze inzet per keer en de situatie ten aanzien van een hoogwater bij inzet.

Voor type **a** geldt dat deze kunstwerken altijd hoogwaterkerend gesloten staan en dat het faalmechanisme *betrouwbaarheid sluiting* geen rol speelt. In het artikel Inleiding kans op open staan is begonnen met de beschrijving van een dergelijk kunstwerk.

Het eerdergenoemde kunstwerk dat 1 keer per jaar gedurende 10 dagen open staat om water in te laten en de rest van de tijd hoogwaterkerend gesloten is, behoort tot type **b**. Hierbij spelen frequentie van inzet en tijdsduur per keer een directe rol. De inzet vindt niet plaats wanneer een hoogwater zich op dat moment voordoet. Stel dat het kunstwerk 5 keer per jaar wordt ingezet om water in te laten en dat een dergelijke inlaatperiode gemiddeld 2 dagen per keer duurt, dan is de kans dat bij een naderend hoogwater het kunstwerk open staat wederom gelijk aan 5×2/365 = 10/365. Maar wanneer de inlaatperiode gemiddeld 3 dagen per keer beslaat wordt dit gelijk aan 5×3/365 = 15/365 = 3/73. De basisformule voor P_{open} vanuit de primaire functie is dus:

$$P_{open;fun} = N_{open} \cdot T_{open}$$

Waarin:

$P_{open;functie}$ Kans dat een kunstwerk open staat vanuit uitoefening van zijn primaire functie(s) op het moment van een naderend hoogwater voor een tijdsperiode van een jaar [-].

N_{open} Het aantal sluitvragen (en daarmee dus ook openingen) vanuit de primaire functie(s) van een kunstwerk [1/jaar].

T_{open} De gemiddelde tijdsduur per cyclus van openen en sluiten waarin het kunstwerk vanuit zijn primaire functie(s) geopend staat [jaar].

Voor type **c** geldt dat deze kunstwerken bewust ten tijde van een hoogwater worden ingezet. Deze kunstwerken zijn zodanig ontworpen dat tijdens deze inzet geen water naar binnen kan stromen (bijvoorbeeld een gemaal dat tegen het verval water uitslaat). Het meest risicovolle moment voor deze kunstwerken is het beëindigen van deze inzet wanneer er nog steeds sprake is van een hoogwater en de hoogwaterkerende keermiddelen gesloten moeten worden. Zo is het bijvoorbeeld nagenoeg onmogelijk om een gemaal op te starten tegen de stroming in, wanneer de keermiddelen niet zouden sluiten.
Voor dit type kunstwerken verandert de hoedanigheid van de parameter van kans naar frequentie. De kans dat het kunstwerk tijdens een hoogwater open staat, is immers gelijk aan 1 (wordt juist ten tijde van hoogwater ingezet). Maar wanneer het kunstwerk meerdere keren in een hoogwaterperiode aan- en uitgezet wordt betekent dat, dat er meerdere goede sluitingen nodig zijn om ongewenste instroming te voorkomen. De kans op onterecht open staan wordt daarmee dus groter naarmate het kunstwerk vaker wordt ingezet bij een hoogwater. De tijdsduur per inzet doet er niet toe, omdat het kunstwerk ontworpen is om tijdens een hoogwater zijn primaire functie te vervullen en dus zolang deze functie wordt vervuld, is instroming niet mogelijk.

Voor type **d** geldt dat het om kunstwerken gaat die gedurende het gehele jaar hun primaire functie uitoefenen zonder dat daarbij de hoogwaterkerende keermiddelen zijn gesloten. Deze worden alleen gesloten wanneer zich een dusdanige buitenwaterstand aandient, dat bij niet-hoogwaterkerend gesloten zijn van het kunstwerk, (overstromings-)gevolgen in het achterland kunnen optreden. Inzet van de primaire functie ten tijde van een hoogwater is dan ook niet aan de orde. De kans dat een dergelijk kunstwerk open staat (niet-hoogwaterkerend gesloten is) is daarmee gelijk aan 1.

Voor type **e** geldt ten aanzien van de kans op open staan hetzelfde als voor type **c** en dus is ook hier deze kans gelijk aan 1. De ‘trigger’ om dit type kunstwerk te sluiten wijkt wel af van type **c**, omdat nu een daadwerkelijke calamiteit met de omliggende (of voorliggende) kering moet plaatsvinden voordat de keermiddelen worden gesloten.

Ten einde de kans op open staan (niet-hoogwaterkerend gesloten) te verkleinen kan de inzet van een kunstwerk mogelijk meer gerelateerd worden aan de hoogwatervoorspellingen. Dat betekent dat er wellicht voor kan worden gekozen om bij een voorspeld hoogwater (bijvoorbeeld een dag van tevoren) het kunstwerk niet in te zetten vanuit zijn primaire functie. Dit is uiteraard afhankelijk van de gevolgen die optreden wanneer deze niet wordt ingezet.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Reparatie falende sluitingen

Een kunstwerk kan open staan (niet-hoogwaterkerend gesloten) door het uitoefenen van zijn primaire functie, maar ook als gevolg van een gefaalde sluiting van de hoogwaterkerende keermiddelen na een periode waarin de primaire functie is uitgeoefend. De tijd die het in beslag neemt om deze gefaalde sluiting te herstellen is daarmee een voorwaardelijke kans op open staan (open staan gegeven een falende sluiting) en is daarmee afhankelijk van de betrouwbaarheid van de sluiting van de keermiddelen. Omdat de kans op een gefaalde sluiting kan toenemen bij een hogere frequentie van de inzet spelen zowel deze frequentie van inzet van het kunstwerk en de herstelduur een rol. In formulevorm:

$$P_{open;rep} = N_{open} \cdot P_{ns} \cdot T_{rep}$$

Waarin:

$P_{open;reparatie}$ Kans dat een kunstwerk open staat als gevolg van een gefaalde sluiting na een reguliere periode waarin de primaire functie(s) werd uitgeoefend voor een tijdsperiode van een jaar [-].

P_{ns} Kans op falen sluiting bij een sluitvraag [-].

N_{open} Het aantal sluitvragen (en daarmee dus ook openingen) vanuit de primaire functie(s) van een kunstwerk [1/jaar].

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

Ter illustratie

Een kunstwerk dat 50 keer per jaar wordt ingezet gedurende een periode van 1 dag heeft een kleinere kans op een falende sluiting dan hetzelfde kunstwerk dat 200 keer per jaar wordt ingezet gedurende 6 uur. In het eerste geval zijn er 50 sluitingen per jaar en in het tweede geval zijn dat er 200. Bij gelijke faalkansen per sluiting betekent dat in het tweede geval de kans op een falende sluiting een factor 4 groter is per jaar. En daarmee is ook de voorwaardelijke kans op open staan door een gefaalde sluiting een factor 4 groter. Stel dat de herstelduur van een gefaalde sluiting (T_{rep}) bepaald is op 6 uur en de kans dat de sluiting van de keermiddelen faalt (P_{ns}) ongeveer 10^{-2} per vraag/sluiting is, dan is de voorwaardelijke tijdsduur waarover het kunstwerk open staat als gevolg van een gefaalde sluiting $10^{-2} \times 6 = 6{,}0 \cdot 10^{-2}$ uur, wat overeenkomt met een kans op open staan per sluiting per jaar van $P_{open;reparatie} = 6{,}0 \cdot 10^{-2}/(365 \times 24) = 6{,}85 \cdot 10^{-6}$. Daarmee geldt:

- Bij 50 sluitingen per jaar: $P_{open;reparatie} = 50 \times 6{,}85 \cdot 10^{-6} = 3{,}42 \cdot 10^{-4}$.
- Bij 200 sluitingen per jaar: $P_{open;reparatie} = 200 \times 6{,}85 \cdot 10^{-6} = 1{,}37 \cdot 10^{-3}$.

Het is duidelijk dat wanneer de reparatietijd wordt verkort er ook een kleinere voorwaardelijke kans op open staan is door reparatie. Ook is het voorstelbaar om op basis van een hoogwatervoorspelling ruimschoots voor het hoogwater te sluiten en daarmee 'tijd te kopen' om een eventuele reparatie nog voor het hoge water uit te kunnen voeren. Dergelijke maatregelen hebben invloed op de kunstwerken die behoren tot de typen B, D en E (zie artikel Gebruik van het kunstwerk). Voor type C kunstwerken geldt dat bij falende sluiting ook een hoogwater aanwezig is en reparatie niet meer mogelijk zal zijn. Voor type A geldt dat reparatietijd vanuit de hoogwater kerende functie niet zozeer van belang is. Vanuit de primaire functie kan dit uiteraard wel een rol spelen (beschikbaarheid van het kunstwerk).

Opgemerkt wordt dat keermiddelen ook niet beschikbaar kunnen zijn door het uitvoeren van onderhoud (bijvoorbeeld het smeren van draaiende delen). Dergelijke werkzaamheden worden bijna altijd alleen uitgevoerd wanneer er geen sprake is van een naderend hoogwater en worden daarom niet meegenomen in de bepaling van de kans op open staan (niet-hoogwaterkerend gesloten).

Versie 1.0: 2 juli 2025

Model voor kans op open staan

Binnen het model dat wordt gehanteerd voor het faalmechanisme *betrouwbaarheid sluiting* kan door middel van de onderstaande formule de kans op open staan worden meegenomen. De afleiding van deze formule is opgenomen in Bijlage A.

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

Waarin:

P_{open} Totale kans dat een kunstwerk open staat op het moment van een naderend hoogwater voor een tijdsperiode van een jaar [-].

N_{open} Het aantal sluitvragen vanuit de primaire functie(s) van een kunstwerk [1/jaar].

T_{open} De gemiddelde tijdsduur per cyclus van openen en sluiten waarin het kunstwerk vanuit zijn primaire functie(s) geopend staat [jaar].

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

De randvoorwaarden waaronder deze formule toepasbaar is, worden ook in Bijlage A gegeven. Zoals eerder opgemerkt is de uitkomst P_{open} enigszins bijzonder omdat het niet alleen een kans uitdrukt, maar ook de vorm van een frequentie kan aannemen.

Versie 1.0: 2 juli 2025

1.4 Faalkans sluiting keermiddelen

Inleiding faalkans sluiting keermiddelen

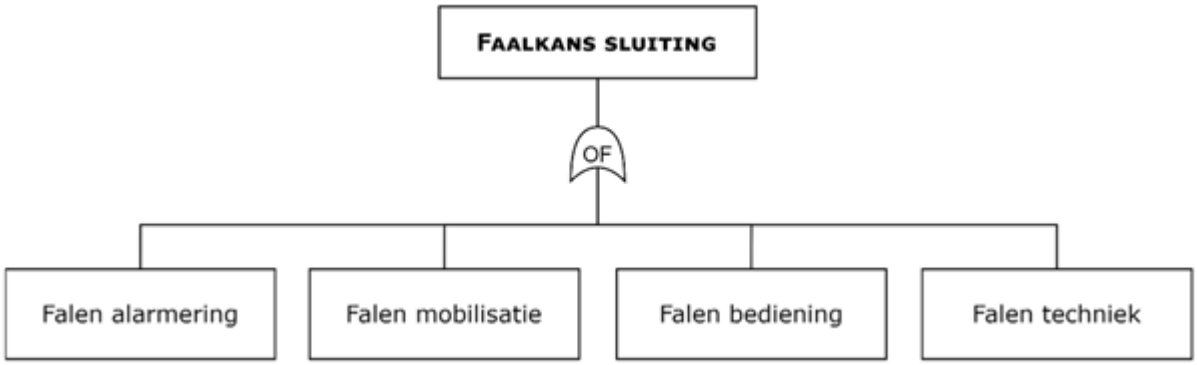
De kans dat de sluiting van de keermiddelen faalt gegeven dat het kunstwerk open staat (P_{ns}) is afhankelijk van meerdere aspecten. Deze aspecten komen terug in de risicoanalyse die van de sluitingsoperatie opgesteld kan worden. Deze risicoanalyse kan op verschillende niveaus plaatsvinden, van eenvoudig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

Het sluitproces wordt uitgelegd in het artikel Fasen van het sluitproces. In Aantal keermiddelen en doorgangen in een kunstwerk komen de zaken voorbij die van invloed zijn op de kans op falen sluiting van een open keermiddel (P_{ns}). Tenslotte wordt in Faalkans van sluiting beschreven hoe men deze faalkans kan bepalen.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Fasen van het sluitproces

Het sluitproces van de keermiddelen kan op hoofdlijnen worden verdeeld in vier fasen, die allemaal een bijdrage aan het falen van het sluitproces kunnen hebben. De vier fasen worden over het algemeen nader uitgewerkt in het calamiteitenplan en de sluitprotocollen van de beheerder van het kunstwerk.



Figuur 1 Fasen van het sluitproces.

Hieronder een korte globale toelichting per fase:

- Falen van de alarmering heeft uiteraard betrekking op het niet doorkomen van het signaal dat er een hoogwater aankomt en dat van daaruit gesloten moet worden. Met name registratie van waterstandsmetingen en voorspellende berekeningen spelen hierbij een rol.
- Falen van de mobilisatie gaat over het fysiek niet bereiken van het kunstwerk (en specifiek de keermiddelen) wanneer deze ter plaatse moeten worden bediend. Daarbij is niet alleen de mobilisatie van menskracht van belang, maar eventueel ook van materiaal en materieel (bijvoorbeeld het sluiten van coupures met schotten die door een kraan moeten worden geplaatst).
- Falen van de bediening betreft het mislukken van (één van de) fysieke handelingen die nodig zijn om de keermiddelen te sluiten.
- Falen van de techniek betreft het in gebreke zijn van technische componenten of het optreden van belemmeringen waardoor keermiddelen niet kunnen sluiten.

In hoeverre de diverse fasen voor elk keermiddel moeten worden doorlopen en op welke wijze dat plaatsvindt is afhankelijk van met name de wijze en frequentie van inzet van de keermiddelen. Omdat bij een beoordeling op waterveiligheid met name de sluiting van hoogwaterkerende keermiddelen van belang is, is het relevant te bepalen of deze keermiddelen alleen bij een hoogwater worden ingezet of ook bij uitoefening van de primaire functie(s) van het kunstwerk. Zo speelt alarmering, mobilisatie en bediening bij keermiddelen die vanuit de primaire functie regelmatig automatisch worden geopend en gesloten in eerste instantie geen rol. Een voorbeeld hiervan is een spindelschuif bij een gemaal dat aan het maalbedrijf gekoppeld is. Dat wil zeggen dat de schuif opengaat als het gemaal aanslaat en vanzelf ook weer sluit wanneer gestopt wordt met malen.

Voor een keermiddel dat alleen ten behoeve van hoogwater wordt gesloten spelen alle fasen een belangrijke rol. Denk daarbij bijvoorbeeld aan het sluiten van een coupure door het plaatsen van schotbalken.

Ten einde de diverse fasen zo goed mogelijk in te richten en de kans op fouten zoveel mogelijk te verkleinen is het belangrijk dat er regelmatig wordt geoefend en getest. Ervaringen die hierbij worden opgedaan moeten worden gedeeld en indien nodig kan dat ook leiden tot aanpassing van procedures maar ook van de aandrijving of bijvoorbeeld de bereikbaarheid van de keermiddelen.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Aantal keermiddelen en doorgangen in een kunstwerk

Aantal keermiddelen

De kans dat een hoogwatersluiting mislukt, is onder andere afhankelijk van het aantal keermiddelen

dat in een kunstwerk aanwezig is. Wanneer er meer keermiddelen aanwezig zijn zal de faalkans van een sluiting (minstens één) veelal toenemen. Door afhankelijkheden is er echter geen lineair verband tussen het aantal keermiddelen en de faalkans van sluiting van de keermiddelen. De afhankelijkheid doet zich voor in de fasen alarmering en mobilisatie, doordat bijvoorbeeld de alarmering faalt waardoor het, ongeacht het aantal aanwezige keermiddelen, niet zal lukken om het kunstwerk te sluiten. Maar ook een technische oorzaak kan ervoor zorgen dat meerdere keermiddelen in een kunstwerk niet sluiten. Bijvoorbeeld het uitvallen van de stroom, terwijl voor het sluiten van alle aanwezige keermiddelen gebruik gemaakt wordt van elektriciteit.

Aantal doorgangen

Wanneer een kunstwerk over meerdere watervoerende doorgangen beschikt dan moet daarmee rekening worden gehouden bij het bepalen van de faalkans van sluiting. Het is duidelijk dat een kunstwerk met één watervoerende doorgang, welke is voorzien van twee keermiddelen, een kleinere faalkans heeft dat de keermiddelen niet gesloten zijn dan een kunstwerk dat bijvoorbeeld drie watervoerende doorgangen heeft, met elk twee keermiddelen. Uiteraard speelt hierbij het gebruik van de meerdere doorgangen nog een belangrijke rol. Het maakt veel uit of bij het kunstwerk met drie doorgangen deze altijd gelijktijdig geopend zijn of bijvoorbeeld er altijd slechts één van de drie geopend is wanneer het kunstwerk zijn primaire functie uitoefent.

Hieronder volgt een voorbeeld dat is opgenomen in paragraaf 4.3.2.1 van de Werkwijzer ontwerpen waterkerende kunstwerken (WOWK) [Van Bree, et al., 2018] ter verduidelijking van de impact van meerdere kokers.

Voorbeeld

Een uitwateringssluis heeft twee kokers die altijd gelijktijdig worden ingezet. De keermiddelen bestaan per koker uit een terugslagklep en een handbediende schuif. Van de handbediende schuiven is bekend dat de faalkans van niet-sluiten gedomineerd wordt door technisch falen. De totale faalkans van het niet-sluiten P_{ns} wordt bepaald met methode 1 (scoretabellen) voor de schuif en methode 2 (standaardfaalkansen) voor de terugslagklep. Het mislukken van de sluiting van de ene koker is nagenoeg onafhankelijk van de sluiting van de andere koker. In onderstaande tabel zijn de diverse gebeurtenissen met hun kans van voorkomen weergegeven. Daarbij opgemerkt dat de faalkans van sluiten per koker (P_{ns}) in ieder geval kleiner is dan 10^{-2} per vraag.

Tabel 1 Kansen per scenario in voorbeeld.

Scenario	Koker 1	Koker 2	Kans
Allebei gesloten	Sluit	Sluit	$(1 - P_{ns}) \cdot (1 - P_{ns}) \approx 1$
Koker 1 niet gesloten	Sluit niet	Sluit	$P_{ns} \cdot (1 - P_{ns}) \approx P_{ns}$
Koker 2 niet gesloten	Sluit	Sluit niet	$(1 - P_{ns}) \cdot P_{ns} \approx P_{ns}$
Allebei niet gesloten	Sluit niet	Sluit niet	$P_{ns} \cdot P_{ns} = P_{ns}^2$

De kans van alle scenario's bij elkaar opgeteld is 1. Wanneer falen optreedt als tenminste één van de kokers open blijft staan (de kans op deze gebeurtenis is gelijk aan $P_{ns} + P_{ns} - P_{ns}^2 \approx 2P_{ns}$) dient in de verdere analyse (instromend debiet) rekening te worden gehouden met een watervoerende doorsnede gelijk aan de doorstroomoppervlakte van één koker. De andere gebeurtenis waarbij falen van de waterkering optreedt, is wanneer beide kokers niet sluiten. De kans hierop is gelijk aan P_{ns}^2 per sluitvraag. In dat geval dient het doorstroomoppervlak van beide kokers samen te worden toegepast in de verdere analyse. In de praktijk is het nagenoeg altijd zo dat de faalkans per koker klein is, waardoor de kans dat één koker niet gesloten is ($2P_{ns}$) substantieel groter is dan de kans dat beide kokers niet gesloten zijn (P_{ns}^2). De laatste kans is vaak verwaarloosbaar klein.

Uit het voorbeeld komt naar voren dat het instromende debiet bij niet-sluiten afhankelijk is van het aantal gefaalde watervoerende doorgangen. Dat geeft direct ook aan dat bij een kunstwerk met meerdere openingen de diverse scenario's voor niet-sluiten moeten worden beschouwd.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Faalkans van sluiting

De faalkans van sluiting (P_{ns}) kan worden bepaald door een analyse van de keermiddelen en het sluitproces. Hierbij kan gebruik worden gemaakt van de volgende drie methoden:

1. Scoretabellen voor niet-sluiten. De scoretabellen bieden de mogelijkheid om voor een kunstwerk de faalkans van sluiting in te schatten aan de hand van het beantwoorden van een aantal vragen voor de vier fasen van het sluitproces. De methode is met name geschikt voor keermiddelen die alleen vanuit de functie van hoogwaterkeren gesloten worden. In feite vormt een gestandaardiseerde foutenboom de basis van deze methode, welke is afgeleid aan de hand van een aantal uitgebreide risicoanalyses van een aantal kunstwerken. In de 'Werkwijze bepalen kans op niet sluiten per sluitvraag met scoretabellen' [Casteleijn en Van Bree, 2017] en 'Handreiking borging betrouwbaarheid sluiting in draaiboeken' [Van Bree, 2017] wordt de methode nader toegelicht en uitgewerkt.
2. Gebruik van standaardfaalkansen. Voor keermiddelen die vanuit de primaire functie al regelmatig worden ingezet (en daarmee getest) kan gebruik worden gemaakt van de faalkansen voor niet-sluiten die in bijlage B van de 'Werkwijzer ontwerpen waterkerende kunstwerken [Van Bree, et al., 2018] zijn weergegeven. Deze faalkansen hebben met name betrekking op technisch falen, omdat voor dit soort automatisch werkende keermiddelen de fasen alarmering, mobilisatie en bediening niet van toepassing zijn. En omdat deze keermiddelen regelmatig geopend en gesloten worden, worden ze regelmatig getest, wat de betrouwbaarheid (afgezien van eventuele slijtage) vergroot. De faalkansen die in de genoemde bijlage B worden aangegeven zijn geen harde getallen, maar geven een globale inschatting van de faalkans van sluiting.
3. Op maat gemaakte foutenboomanalyse. Met een dergelijke analyse kan voor een specifiek kunstwerk ook een specifieke faalkans voor niet-sluiten worden afgeleid. Dergelijke analyses worden meestal uitgevoerd bij de grotere complexe kunstwerken en stormvloedkeringen. De diepgang van de foutenboomanalyse kan variëren, waarbij het wordt aanbevolen om in eerste instantie de analyse beperkt te houden en als daaruit volgt dat verdere verdieping gewenst is, deze navenant uit te breiden.

Methode 1 en 2 vereisen uiteraard een goed inzicht in de werking van het kunstwerk, maar zijn verder redelijk eenvoudig toepasbaar. Methode 3 vereist daarnaast ook een goede kennis van het werken met foutenboomanalyses.

Versie 1.0: 2 juli 2025

1.5 Faalkans van herstel van een gefaalde sluiting

Faalkans van herstel van een gefaalde sluiting

In het model voor *betrouwbaarheid sluiting* (formule 1 in Model voor faalmechanisme betrouwbaarheid sluiting) wordt ook rekening gehouden met de mogelijkheid op het herstel van een gefaalde sluiting. Wanneer dit herstel ook faalt, zal het kunstwerk geopend zijn ten tijde van het hoge water. De faalkans van herstel ($P_{f;herstel}$) kan dus een rol spelen bij het faalmechanisme. Vaak wordt bij een poging tot herstel van een gefaalde sluiting gedoeld op een 'alternatieve' sluiting van het kunstwerk. Dit houdt in het sluiten van het kunstwerk met behulp van materiaal en materieel dat voor de reguliere sluiting niet ingezet wordt. Een voorbeeld hiervan is het dichtgooien van een inlaatkoker met zandzakken of klei via een aanwezige schuivenschacht.

In hoeverre het mogelijk is om een gefaalde sluiting te herstellen is globaal afhankelijk van vijf factoren (zie Herstel van een gefaalde sluiting):

- De beschikbare tijd om de gefaalde sluiting te herstellen.
- De oorzaken voor het falen van de reguliere sluiting.
- De bereikbaarheid van het kunstwerk na het falen van de reguliere sluiting.
- De doorstroomopening die aanwezig is na het falen van de reguliere sluiting.
- De stroomsnelheden die optreden na het falen van de reguliere sluiting.

Met de faalkans van herstel van een gefaalde sluiting kan direct rekening worden gehouden in bijvoorbeeld een uitgebreide foutenboomanalyse en daarmee wordt deze faalkans al onderdeel van de kans op niet sluiten (P_{ns}). Echter voor met name reguliere kleinere kunstwerken zoals inlaatduikers kan de faalkans van herstel nog worden ingezet naast het gebruik van bijvoorbeeld de scoretabellen.

Het rekening houden met een mogelijke kans op herstel van een gefaalde reguliere sluiting is alleen mogelijk wanneer alternatieve sluitingen zijn bedacht en op realiteitswaarde zijn getoetst. Zo zal het sluiten van een 20 meter brede keersluis met behulp van zandzakken niet reëel zijn en kan dit dus ook niet als alternatieve sluiting worden aangehouden.

Het inschatten van de faalkans van herstel kan op meerdere wijzen plaatsvinden. In de meest uitgebreide vorm wordt hier een foutenboom aan ten grondslag gelegd. Voor de wat kleinere reguliere kunstwerken kan wellicht ook worden volstaan met een kwalitatieve en/of kwantitatieve onderbouwing op basis van een beschrijving van de alternatieve sluiting en de beschikbare tijd voor dit herstel.

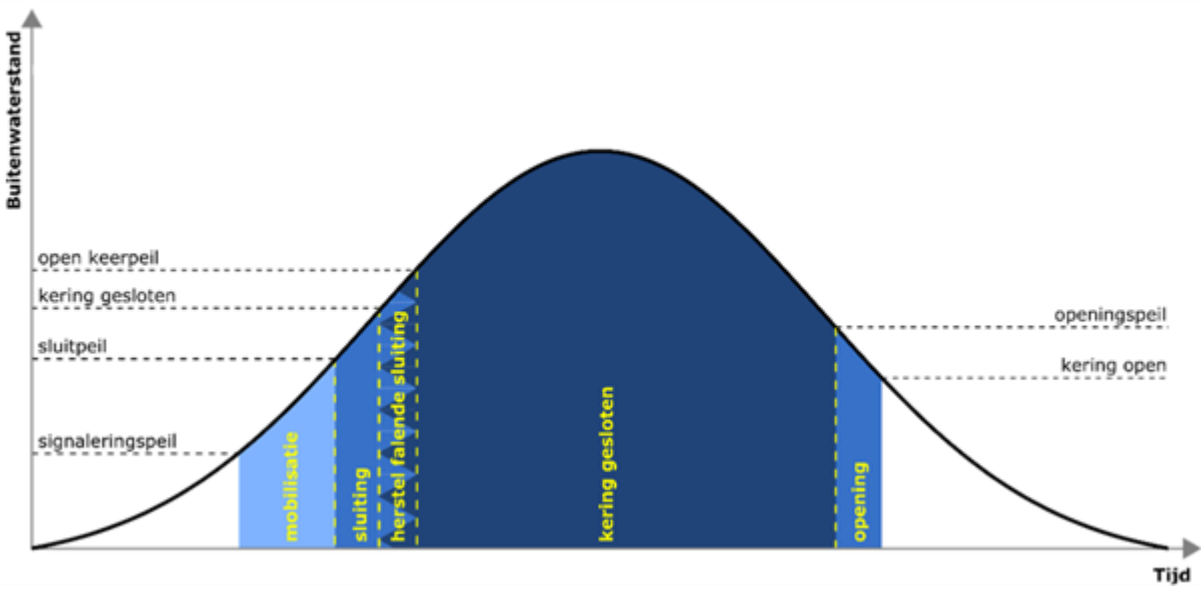
Versie 1.0: 2 juli 2025

Herstel van een gefaalde sluiting

Beschikbare tijd om te herstellen

De tijd die beschikbaar is om een gefaalde sluiting te herstellen is van substantiële invloed op de kans van slagen van de herstelpoging. Hoe meer tijd er beschikbaar is, hoe groter de kans op het slagen van een herstelpoging. Dit is ook de belangrijkste reden dat het sluitpeil (buitenwaterstand waarbij het kunstwerk gesloten wordt) lager is dan de buitenwaterstand waarbij ongewenste instroming[1] plaatsvindt. Wanneer namelijk instroming plaatsvindt, zal het sluiten van de keermiddelen in de meeste gevallen moeilijker of geheel niet uitgevoerd kunnen worden. Een eenvoudig voorbeeld is een coupure, waarbij het sluitpeil lager zal zijn dan de drempelhoogte van de coupure. Zodra de buitenwaterstand hoger is dan de drempelhoogte wordt het lastig om nog schotbalken te plaatsen in de coupure.

De tijd tussen sluitpeil en de buitenwaterstand waarbij ongewenste instroming plaatsvindt wordt bepaald door het verloop van de hoogwatergolf. In Figuur 1 is dat schematisch weergegeven.



Figuur 1 Schematisch verloop sluitingsproces bij een hoogwatergolf (uitgangspunt is dat het kunstwerk niet hoogwaterkerend gesloten is op het moment dat de hoogwatergolf aankomt). In de figuur is de buitenwaterstand waarbij ongewenste instroming plaatsvindt aangeduid als 'open keerpeil'.

Toelichting figuur. In eerste instantie wordt een komende hoogwatergolf gesignaleerd via metingen en voorspellingen. Hierop volgt een mobilisatie ten einde de kering te kunnen sluiten. Bij het bereiken van het sluitpeil dient daadwerkelijk tot sluiting overgegaan te worden. Als er voldoende tijd zit tussen het sluitpeil en het bereiken van de buitenwaterstand waarbij ongewenste instroming plaatsvindt, en de mogelijkheden zijn aanwezig, kunnen bij een falende sluitingsprocedure nog herstelpogingen worden gedaan om alsnog te sluiten. Wanneer dit succesvol is, is de kering alsnog hoogwater kerend gesloten. Als de buitenwaterstand nu weer daalt, wordt op een gegeven moment de kering weer geopend.

Over het algemeen zal de snelheid waarmee het buitenwater stijgt groter zijn aan de kust en op de meren dan in het bovenrivierengebied. Dat betekent dat het voor het bovenrivierengebied relatief makkelijker is om tijd voor herstel te winnen dan aan de kust. Een hersteltijd van 24 uur is voor het bovenrivierengebied niet ondenkbaar, terwijl dat voor de kust veel minder makkelijk realiseerbaar is. Een kunstwerk wil men immers niet te vroeg sluiten om ervoor te zorgen dat het zo lang mogelijk zijn primaire functie kan vervullen.

Oorzaken falen reguliere sluiting en mogelijk herstel sluiting

De oorzaken waardoor de reguliere sluiting is mislukt kunnen van invloed zijn op de mogelijkheden van herstel. Wanneer de sluiting bijvoorbeeld faalt doordat er sprake is van een constructief gebrek, is het de vraag of dit gebrek kan worden overbrugd door een alternatieve sluiting.

Bereikbaarheid van kunstwerk bij mogelijk herstel sluiting

Indien het kunstwerk niet meer op tijd bereikbaar is nadat de reguliere sluiting is gefaald, is de faalkans van herstel ook heel groot. De bereikbaarheid kan bijvoorbeeld belemmerd zijn doordat aangesloten wegen onder water komen te staan of delen van het kunstwerk onder water staan nadat de reguliere sluiting is gefaald.

Doorstroomopening na falen reguliere sluiting

Wanneer de doorstroomopening groot is en de reguliere sluiting is gefaald is het vaak lastig om deze grote opening nog op alternatieve wijze te sluiten. Het is bij een duiker met een diameter van 1,0 m goed denkbaar dat deze (nagenoeg geheel) afgesloten kan worden middels bijvoorbeeld bigbags, zandzakken of klei. Bij een keersluis met grote doorvaartbreedte (bijvoorbeeld 20 m) is het geheel niet evident dat deze binnen de beschikbare tijd op alternatieve wijze gesloten kan worden.

Stroomsnelheden na falen reguliere sluiting

De kans op het succesvol sluiten van het kunstwerk op alternatieve wijze nadat de reguliere sluiting is gefaald wordt kleiner naarmate de optredende stroomsnelheid door het ongewenst openstaande kunstwerk groter is. Bij grote stroomsnelheden zal het bijvoorbeeld lastiger zijn om klei of zandzakken aan te brengen die blijven liggen. Ook het aanbrengen van een noodschot zal in stromend water veel lastiger zijn dan in stilstaand water.

[1] Dit is niet hetzelfde als de buitenwaterstand waarbij bij niet gesloten kunstwerk overstromingsgevolgen optreden. Die waterstand is minimaal gelijk of hoger.

Versie 1.0: 2 juli 2025

1.6 Instromingsmodellen voor betrouwbaarheid sluiting

Inleiding instromingsmodellen voor betrouwbaarheid sluiting

Bij het faalmechanisme *betrouwbaarheid sluiting* zijn naast zaken die te maken hebben met het sluiten van het kunstwerk ook de gevolgen bij niet-sluiten van belang. Deze gevolgen worden veroorzaakt door het instromende debiet bij het niet hoogwaterkerend gesloten zijn van het kunstwerk ten tijde van een hoogwater. Dit instromend debiet vormt de belasting voor zowel de bodembescherming (gerelateerd aan bezwijken kunstwerk) en de komberging (gerelateerd aan overstromingsgevolgen). Instromingsmodellen spelen daarmee een belangrijke rol bij *betrouwbaarheid sluiting*.

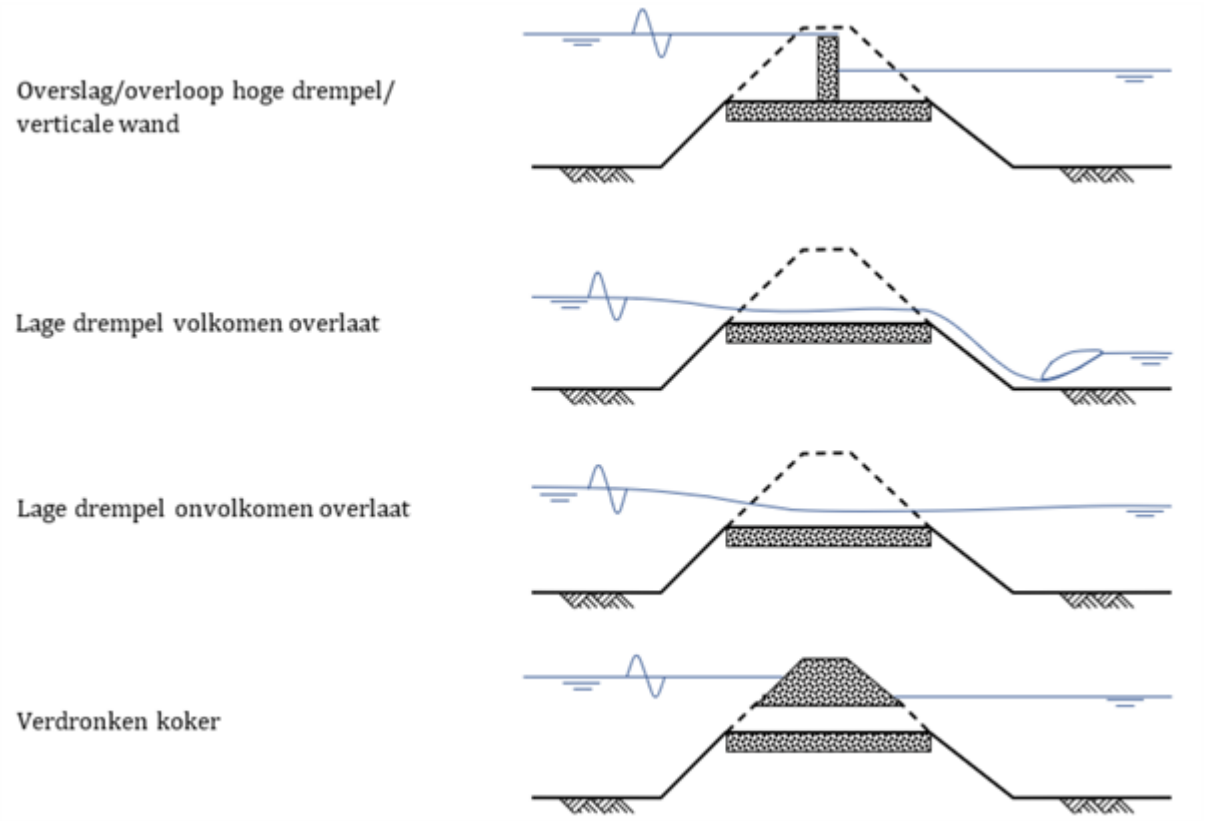
Wanneer buitenwater naar binnen stroomt is het mede afhankelijk van de geometrie van het kunstwerk en de grootte van de watervoerende doorstroomopening hoe groot dit instromend debiet is. Grofweg zijn er drie instromingsmodellen te onderscheiden, waarbij de buiten- en binnenwaterstand ten opzichte van het watervoerende element de onderscheidende rol spelen:

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

De drie instromingsmodellen zijn weergegeven in Figuur 1, waarbij het model van de lage drempel nog gesplitst is in een situatie beschreven met volkomen overlaat en een situatie beschreven als onvolkomen overlaat. Bij een volkomen overlaat heeft de benedenstroomse zijde nagenoeg geen invloed op het debiet dat door het kunstwerk stroomt, terwijl dat bij de onvolkomen overlaat duidelijk wel het geval is.

Bij het model voor hoge drempel/verticale wand is geen sprake van direct contact tussen buiten- en binnenwaterstand, oftewel de binnenwaterstand heeft geen invloed op het instromend debiet.

Voor het model van verdronken koker geldt dat er wel sprake is van direct contact tussen binnen- en buitenwater en dat de instroming plaatsvindt door een watervoerend element dat zich geheel onder water bevindt (zowel aan buiten- als binnenzijde van de kering).



Figuur 1 Schematische weergave van de diverse instromingsmodellen bij betrouwbaarheid sluiting.

Er zijn ook nog tussenvormen mogelijk, waarbij bijvoorbeeld een koker zich aan de buitendijkse zijde geheel onder water bevindt terwijl aan de binnenzijde dit niet het geval is.

In de artikelen Instromingsmodel voor hoge drempel/verticale wand, Instromingsmodel voor lage drempel onvolkomen overlaat, Instromingsmodel voor lage drempel volkomen overlaat en Instromingsmodel voor verdronken koker worden de eerdergenoemde modellen beschreven. Dit zijn de relatief simpele modellen die in veel van de gevallen goed voldoen. Geavanceerde modellen worden genoemd in Geavanceerde modellen voor instromend debiet en de relatie tussen verval en debiet staat uitgebreid beschreven in Relatie tussen verval en instromend debiet.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Instromingsmodel voor hoge drempel/verticale wand

Dit model wordt niet alleen bij het faalmechanisme *betrouwbaarheid sluiting* gebruikt, maar vooral ook bij het faalmechanisme *overslag en/of overloop* bij kunstwerk. Opgemerkt wordt dat er feitelijk drie verschillende instromingssituaties kunnen optreden:

- Alleen golfoverslag.
- Combinatie van overloop en golfoverslag.
- Alleen overloop.

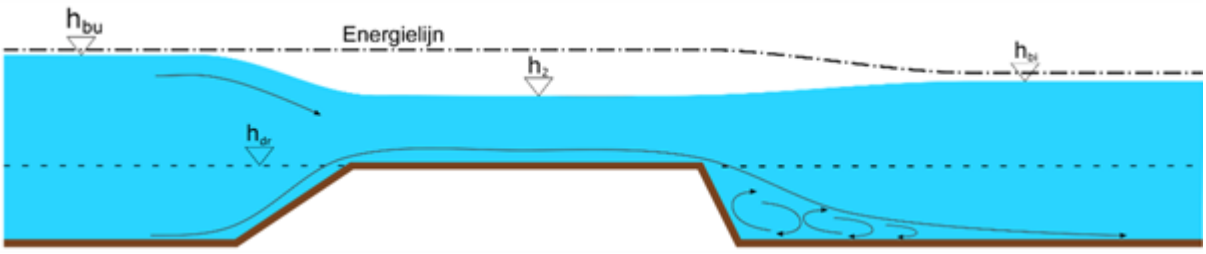
Voor alle drie de situaties bestaan modellen, waarvan de formules beschikbaar zijn. Voor een beschrijving van de modellen wordt verwezen naar het artikel Optredend overslag- en/of overloopdebiet.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Instromingsmodel voor lage drempel onvolkomen overlaat

In het geval van een lage drempel die als onvolkomen overlaat fungeert wordt het instromende debiet door het kunstwerk gestuwd door de binnenwaterstand. Dat betekent dat de binnenwaterstand een remmende invloed uitoefent op de grootte van het instromend debiet.

Hieronder wordt het model en de bijbehorende formule gegeven. Meer informatie over het model kan worden gevonden in bijvoorbeeld het boek 'Toegepaste vloeistofmechanica' [Nortier en De Koning, 1996].



Figuur 1 Onvolkomen overlaat.

Voor een lange onvolkomen overlaat geldt dat de overlaat dusdanig lang is dat de stroomlijnen boven de overlaat niet gekromd zijn. De formule die toegepast kan worden voor deze situatie is:

$$Q_{in,onvolk} = B_d \cdot m_{onv} \cdot (h_{bi} - h_{dr}) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_{bu} - h_{bi})} \quad (1)$$

$$h_{bu} < {}^{3}/_{2} \cdot h_{bi} - {}^{3}/_{2} \cdot h_{dr} \quad (2)$$

Waarin:

$Q_{in,onvolk}$ Optredend instromend debiet door het kunstwerk waarbij sprake is van een onvolkomen stroming [m³/s].

g Gravitatieversnelling [m/s²].

B_d Breedte van de doorstroomopening [m].

m_{onv} Afvoercoëfficiënt voor de onvolkomen overlaat [-].

h_{bi} Binnenwaterstand [m t.o.v. NAP].

h_{dr} Bovenkant drempel, wat in de praktijk de bovenkant van de bodem van het kunstwerk is [m t.o.v. NAP].

h_{bu} Buitenwaterstand [m t.o.v. NAP].

Het geldigheidsgebied van het model is in formule 2 vermeld. De afvoercoëfficiënt m_{onv} heeft voornamelijk[1] betrekking op het energieverlies dat optreedt (bijvoorbeeld wrijving) bij instroming door het kunstwerk. De waarde van de parameter ligt in de praktijk voor lange overlaten tussen 0,7 en 1,4. Voor korte overlaten geldt globaal dat deze maximaal 40% groter is dan voor de situatie met een lange overlaat.

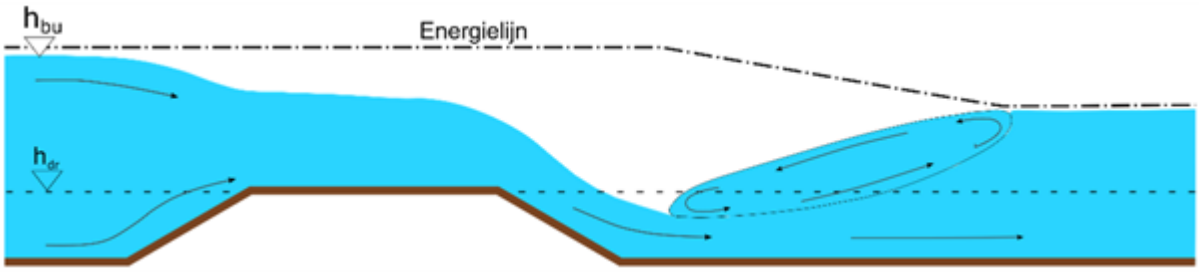
[1] Bij afleiding van de formule wordt vanuit praktisch oogpunt gebruik gemaakt van de binnenwaterstand in plaats van de waterstand boven de drempel. Globaal is de waterdiepte boven de drempel 90% van de waterdiepte aan de binnenzijde, beide gemeten vanaf het niveau van de drempel. Deze praktische werkwijze betekent dat in afvoercoëfficiënt ook nog een verrekening zit ten behoeve van deze werkwijze.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Instromingsmodel voor lage drempel volkomen overlaat

In het geval van een lage drempel die als volkomen overlaat fungeert ondervindt het instromende debiet geen invloed van de binnenwaterstand. Dat betekent dat de binnenwaterstand geen remmende invloed uitoefent op de grootte van het instromend debiet.

Hieronder wordt het model en de bijbehorende formule gegeven. Meer informatie over het model kan worden gevonden in bijvoorbeeld het boek 'Toegepaste vloeistofmechanica'[Nortier en De Koning, 1996].



Figuur 1 Volkomen overlaat.

Voor een lange volkomen overlaat geldt dat de overlaat dusdanig lang is dat de stroomlijnen boven de overlaat niet gekromd zijn. De formule die toegepast kan worden voor deze situatie is:

$$Q_{in,volk} = B_d \cdot m_{vol} \cdot \sqrt{g \cdot (h_{bu} - h_{dr})^3} \quad (1)$$

$$h_{bu} \geq {}^3/_2 \cdot h_{bi} - {}^3/_2 \cdot h_{dr} \quad (2)$$

Waarin:

$Q_{in,volk}$ Optredend instromend debiet door het kunstwerk waarbij sprake is van een volkomen stroming [m³/s].

g Gravitatieversnelling [m/s²].

B_d Breedte van de doorstroomopening [m].

m_{vol} Afvoercoëfficiënt voor de volkomen overlaat [-].

h_{bi} Binnenwaterstand [m t.o.v. NAP].

h_{dr} Bovenkant drempel, wat in de praktijk de bovenkant van de bodem van het kunstwerk is [m t.o.v. NAP].

h_{bu} Buitenwaterstand [m t.o.v. NAP].

Het geldigheidsgebied van het model is in formule 2 vermeld. De waarde van de afvoercoëfficiënt m_{vol} is voor lange overlaten ongeveer 1. Voor korte overlaten met volkomen stroming geldt dat de waarde van m_{vol} sterk afhangt van de energiehoogte en de vorm van de drempel.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Instromingsmodel voor verdronken koker

In het geval van een verdronken koker is de gehele koker met water gevuld doordat zowel de buiten- als de binnenwaterstand hoger is dan de bovenkant van de doorstroomopening.

$$Q_{in,koker} = \mu \cdot A_d \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_{bu} - h_{bi})}$$

Waarin:

$Q_{in,koker}$ Optredend instromend debiet door het kunstwerk waarbij sprake is van een verdronken koker [m³/s].

A_d Minimale oppervlakte van de doorstroomopeningen [m²].

μ Afvoercoëfficiënt voor verdronken koker [-].

h_{bi} Binnenwaterstand [m t.o.v. NAP].

h_{bu} Buitenwaterstand [m t.o.v. NAP].

Bovenstaande formule voor de verdronken koker kent veel overeenkomsten met de formule voor de Onvolkomen overlaat. De afvoercoëfficiënten zijn nadrukkelijk wel verschillend.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Geavanceerde modellen voor instromend debiet

Met rekensoftware en modelonderzoek zijn geavanceerdere modellen voor het instromende debiet af te leiden. Er zijn ook eindige-elementenpakketten waarmee stromingen tot in detail kunnen worden berekend. Deze worden toegepast wanneer het stromingsbeeld sterk beïnvloed wordt door 3D-effecten.

Door de toegenomen rekenkracht is men tegenwoordig in staat modellen steeds groter en gedetailleerder te maken. Dit kan worden toegepast voor zeer complexe situaties, waarbij modelonderzoek ook van wezenlijk belang kan zijn. Voor het overgrote deel van de kunstwerken volstaat echter het gebruik van de formules van de Instromingsmodellen zoals in desbetreffende artikelen zijn gepresenteerd.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Relatie tussen verval en instromend debiet

De drijvende kracht achter het instromende debiet is voor de instromingsmodellen lage drempel en verdronken koker het waterstandsverschil tussen binnen- en buitenwaterstand. Alleen bij het model verticale wand heeft de binnenwaterstand geen directe invloed op het instromend debiet. In dat geval is de drijvende kracht achter het instromende debiet afhankelijk van het verschil tussen bovenkant constructie en buitenwaterstand in combinatie met de optredende golven.

Voor de situaties waarbij direct contact is tussen binnen- en buitenwater, bepaalt het verval over de constructie het instromend debiet. Hieronder wordt voor een viertal situaties met een verdronken koker een beeld gegeven van het verloop van de waterstanden en de grootte van het instromend debiet en uiteindelijk het instromend volume. De variatie die bij de vier gevallen plaatsvindt bestaat uit het verloop van de buitenwaterstand tijdens een hoogwater en de grootte van de komberging. Er zijn uiteraard nog meer gevallen te bedenken, de hieronder gegeven situaties dienen slechts als voorbeeld om enig inzicht te geven.

A. Constante hoge buitenwaterstand en (relatief[1]) grote komberging.

B. Variërende buitenwaterstand en (relatief) grote komberging.

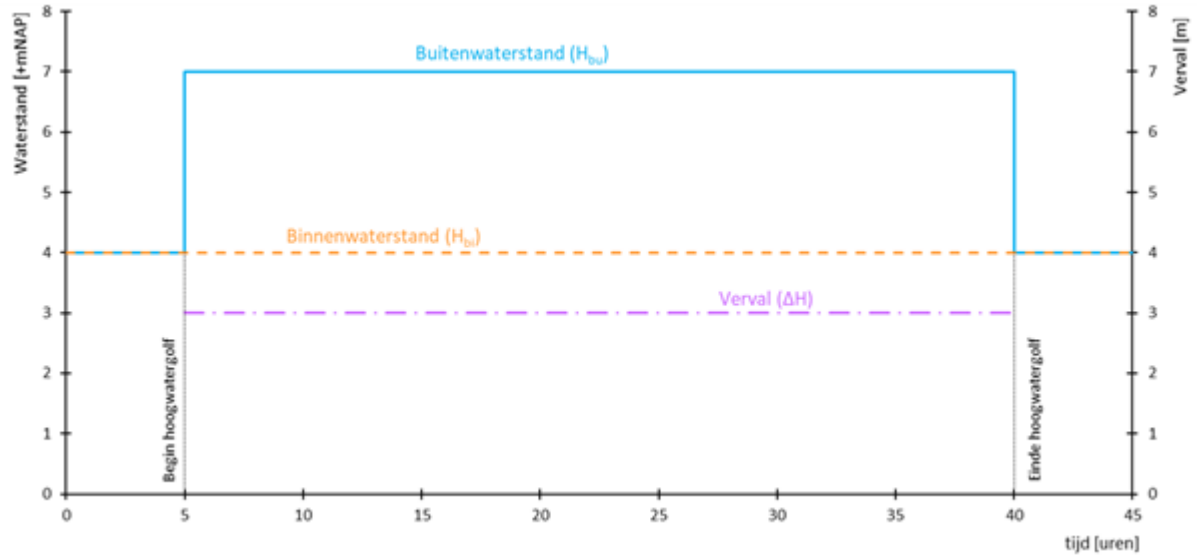
C. Variërende buitenwaterstand met beperkte vaste komberging.

D. Variërende buitenwaterstand met beperkte niet constante komberging (bijvoorbeeld door regen in het achterland).

Situatie A: Constante hoge buitenwaterstand en (relatief) grote komberging

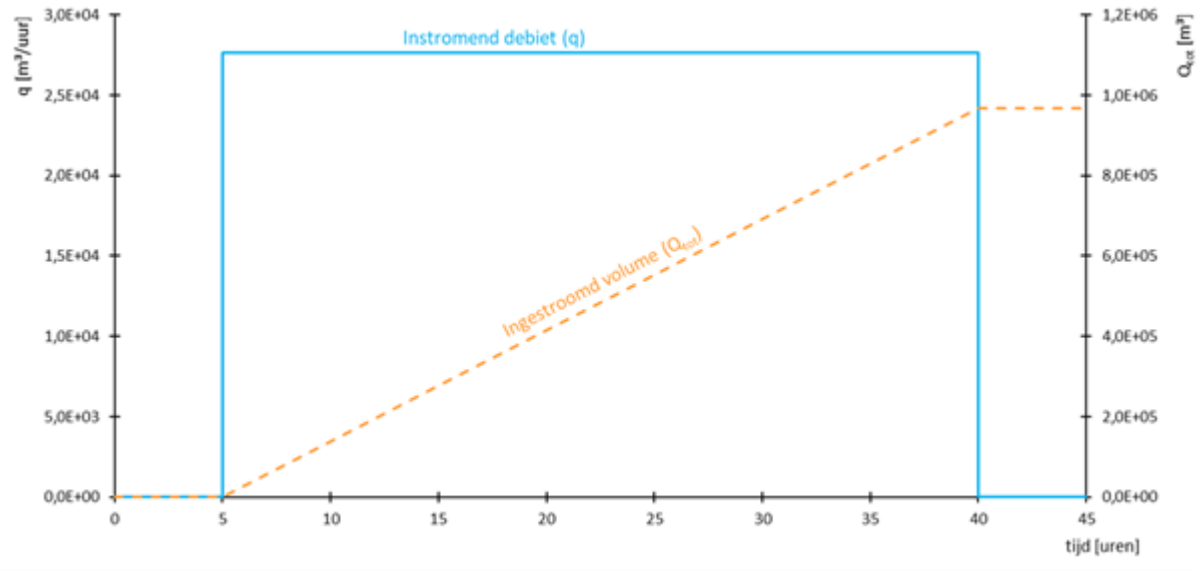
In dit geval is sprake van een constante buitenwaterstand en als gevolg van de relatief grote komberging een (nagenoeg) constante binnenwaterstand. Hiermee is ook het verval constant (zie Figuur 1).

Het geschetste geval is geheel hypothetisch omdat de hoogwatergolf ineens ontstaat en ook weer ineens verdwijnt.



Figuur 1 Verval en binnenwaterstand bij hoogwater met constante buitenwaterstand en relatief grote komberging.

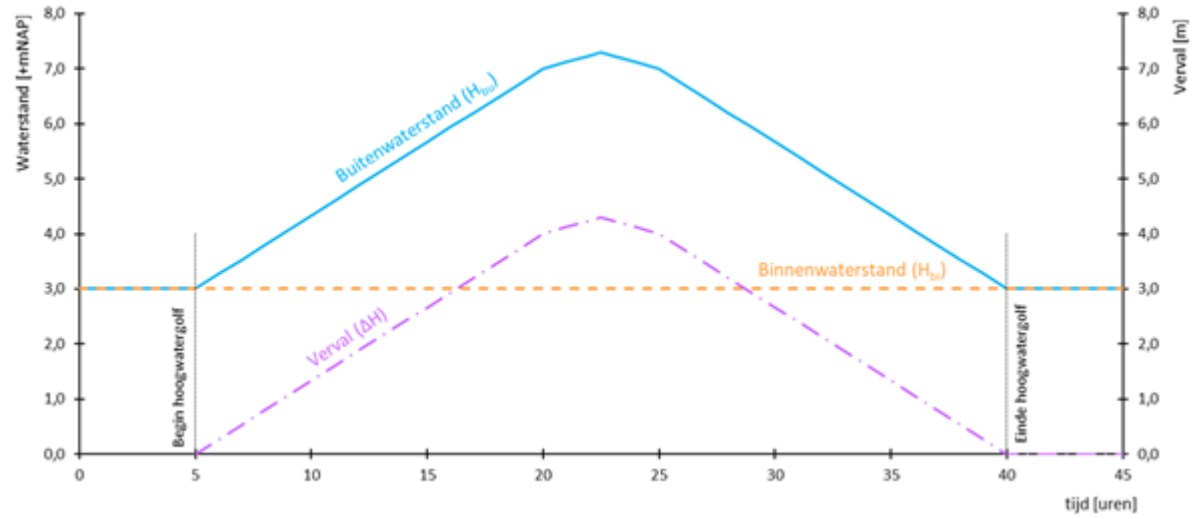
In dit geval heeft de hoogwatergolf geen bepalende bijdrage aan *betrouwbaarheid sluiting* omdat de komberging relatief dusdanig groot is dat de binnenwaterstand niet of nauwelijks stijgt. Dit onder de aanname dat de bodembescherming niet bezwijkt met als gevolg het bezwijken van het kunstwerk. Door het constante verval is ook de stroomsnelheid door het kunstwerk constant, waarmee de bodembescherming ook constant op dezelfde wijze wordt belast. Hieronder is in Figuur 2 het verloop van het instromend debiet en het totale volume weergegeven.



Figuur 2 Verloop instromend debiet bij constant verval (constant verloop hoogwatergolf).

Situatie B: Variërende buitenwaterstand en (zeer) grote komberging

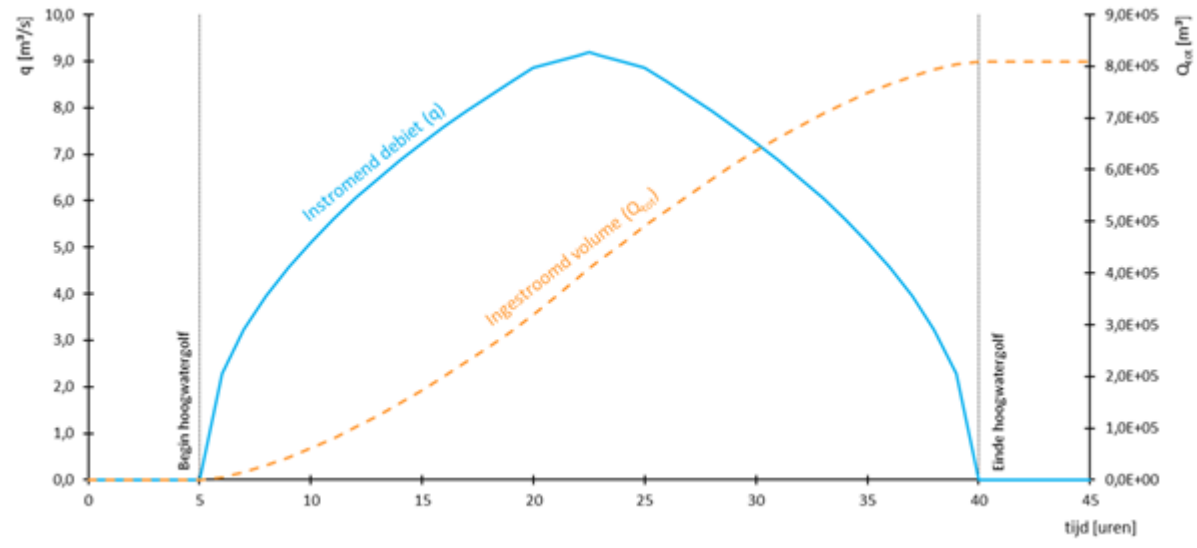
In dit geval verandert de buitenwaterstand gedurende de hoogwatergolf. Door de relatief grote komberging en daarmee de constante binnenwaterstand verandert daarmee ook het verval gedurende de hoogwaterperiode (zie Figuur 3).



Figuur 3 Verval en binnenwaterstand bij hoogwater met constante buitenwaterstand en relatief grote komberging.

Ook in dit geval is overschrijding van de komberging niet aan de orde, aangezien de binnenwaterstand niet toeneemt. Wel verandert de stroomsnelheid van het water door het kunstwerk omdat het verval gedurende het hoogwater verandert. Op de top van het hoogwater zal de stroomsnelheid het grootste zijn. Wanneer de bodembescherming bij deze stroomsnelheid niet bezwijkt, zal het kunstwerk gedurende het gehele hoogwater niet bezwijken.

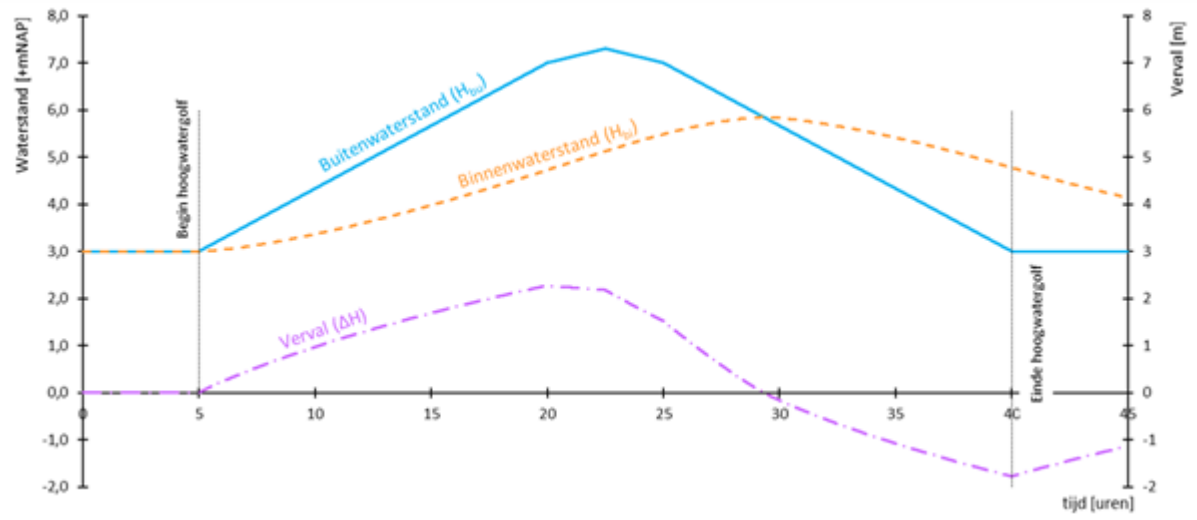
Hieronder is in Figuur 4 het verloop van het instromend debiet en totale volume weergegeven. De berekeningen kunnen via integraalberekeningen van het instromend debiet worden bepaald. De beschouwde situatie is reëel voor situaties met een relatief grote komberging.



Figuur 4 Verloop instromend debiet bij variërend verval (verlopende hoogwatergolf).

Situatie C: Variërende buitenwaterstand met beperkte vaste komberging

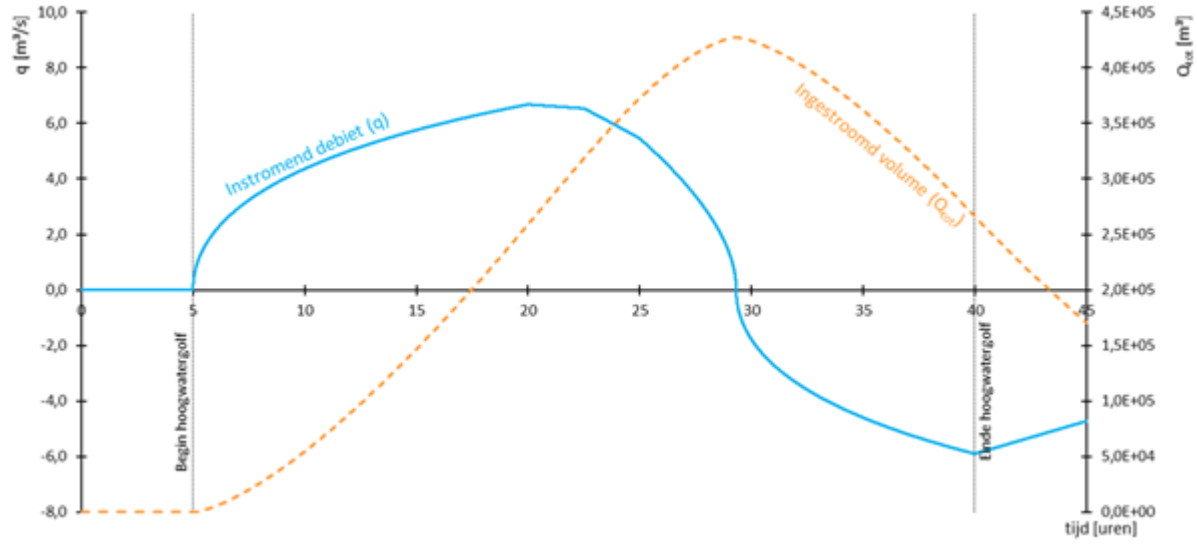
In dit geval varieert de buitenwaterstand gedurende een hoogwaterperiode en is er sprake van een relatief kleine komberging. Daardoor verloopt ook de binnenwaterstand gedurende de ongewenste instroming in de hoogwaterperiode. Hiermee is het verval ook aan verandering onderhevig (zie Figuur 5).



Figuur 5 Variërend verloop buitenwaterstand en verval en deels meelopende binnenwaterstand.

Bovenstaande figuur is een voorbeeld van een situatie waarbij de komberging voldoende groot is en op een gegeven moment de binnenwaterstand als gevolg van het instromende debiet en de weer dalende buitenwaterstand deze buitenwaterstand ‘inhaalt’. Het verval over de kering wordt op een gegeven moment dan ook negatief, zodat er water naar buiten stroomt. Wanneer dit lang genoeg duurt en het kunstwerk open blijft staan vindt uiteindelijk automatische nivellering plaats van binnen- en buitenwaterstand.

Hieronder is in Figuur 6 het verloop van het instromend debiet en totale volume weergegeven.



Figuur 6 Instromend debiet bij variërende buitenwaterstand en meelopende binnenwaterstand.

Situatie D: Variërende buitenwaterstand met beperkte niet constante komberging (bijvoorbeeld door regen in het achterland)

In het geval dat de buitenwaterstand varieert en de binnenwaterstand onafhankelijk van het instromende debiet door of over het desbetreffende kunstwerk ook niet constant is, wordt de situatie nog complexer. Zo kan de binnenwaterstand beïnvloed worden door toestroming vanuit het achterland, terwijl er ook instroming van buitenaf plaats vindt. Ook kan het zijn dat een gemaal tijdens een hoogwaterperiode water uit de kom slaat en op het buitenwater loost. In dit soort ingewikkelde situaties is het aan te bevelen om eerst uit te gaan van enkele conservatieve aannamen en daarmee te trachten de analyse uit te voeren. Een van de aannamen kan zijn om van de totale komberging een deel te reserveren voor berging van regen in het achterland en de rest beschikbaar te houden voor ongewenste instroming.

[1] De komberging is relatief groot wanneer het mogelijke debiet door het watervoerende element klein is ten opzichte van deze komberging.

Versie 1.0: 2 juli 2025

1.7 Kombergingsmodel voor betrouwbaarheid sluiting

Kombergingsmodel voor betrouwbaarheid sluiting

Het kunnen bergen van ongewenst instromend water zorgt ervoor dat bij het ongewenst niet gesloten zijn van het kunstwerk niet direct grote problemen optreden.

Basismodel

Het model voor komberging is in de basis heel simpel: falen treedt op als het totale instromende volume door een of meerdere niet-gesloten kunstwerken gedurende een hoogwatergebeurtenis groter is dan het volume dat zonder significante schade en/of slachtoffers in het achterliggende gebied kan worden geborgen. De faalkans voor de komberging $P_{f;kom}$ wordt dus bepaald met de volgende formule:

$$P_{f;kom} = P\left(V_{in|open} > V_c\right) \quad (1)$$

Waarin:

$P_{f;kom}$ Faalkans voor de komberging [1/jaar].

$V_{in|open}$ Ongewenst instromend volume water door het niet (hoogwaterkerend) gesloten zijn van een kunstwerk gedurende een hoogwaterperiode [m³].

V_c Maximaal aanwezige volume aan kombergend vermogen in het achterland waarbij geen significante gevolgen optreden [m³].

Het totale instromend volume via het niet-gesloten kunstwerk $V_{in|open}$ wordt bepaald door het overslag-/overloopdebiet over de keermiddelen en waterkerende constructiedelen, de breedte van de keermiddelen en waterkerende constructiedelen en de tijdsduur waarover instroming plaats vindt. In formulevorm geldt:

$$V_{in|open} = t_s \cdot Q_{in|open} \quad (2)$$

Waarin:

$V_{in|open}$ Ongewenst instromend volume water door het niet (hoogwater kerend) gesloten zijn van een kunstwerk gedurende een hoogwaterperiode [m³].

t_s Tijdsduur waarin overslag en/of overloop optreedt, ook wel aangeduid als stormduur [s].

$Q_{in|open}$ Gemiddeld optredend instromend debiet [m³/s]*.

* Indien sprake is van een overslag/overloop-situatie, en er wordt gebruik gemaakt van de formules die hiervoor gelden (zie artikel Inleiding faalmechanisme overslag en/of overloop bij kunstwerk), dan is:

$$Q_{in|open} = B_{kw} \cdot q_{os/ol} \quad (3)$$

Waarin:

B_{kw} Breedte van het kunstwerk [m].

$q_{os/ol}$ Gemiddeld optredend overslag-/overloopdebiet per strekkende meter [m³/s/m].

Het maximaal aanwezige volume aan kombergend vermogen in het achterliggende gebied V_c wordt bepaald door het oppervlak van de komberging en de toelaatbare peilstijging op de komberging:

$$V_c = A_{kom} \cdot \Delta h_{kom} \quad (4)$$

Waarin:

V_c Maximaal beschikbaar volume aan kombergend vermogen in het achterland waarbij geen substantiële gevolgen optreden [m³].

A_{kom} Het beschikbare oppervlak waarin water geborgen kan worden [m²].

Δh_{kom} Toelaatbare waterstandsverhoging in het kombergend gebied [m].

De verdere uitwerking van bovenstaande formules en de daarbij behorende parameters worden uitgebreid beschreven in hoofdstuk 10 van de 'Werkwijzer Ontwerpen Waterkerende kunstwerken' [Van Bree, et al., 2018]. Voor meer informatie hierover wordt hiernaar verwezen.

Verfijningen

Op bovenstaand basismodel kunnen enkele verfijningen worden toegepast ten aanzien van het totaal instromend volume $V_{in|open}$ en de bepaling van het beschikbare kombergend vermogen V_c per kunstwerk. In artikel Kombergingsmodel voor overslag en/of overloop wordt hierop verder ingegaan.

Versie 1.0: 2 juli 2025

1.8 Bodembeschermingsmodel voor betrouwbaarheid sluiting

Inleiding bodembeschermingsmodel voor betrouwbaarheid sluiting

Of een kunstwerk bezwijkt door het faalmechanisme *betrouwbaarheid sluiting* is theoretisch gezien in het licht van de overstromingsrisicobenadering alleen afhankelijk van het niet-gesloten zijn van het kunstwerk en de beschikbare komberging. Het bezwijken van het kunstwerk zonder dat het kombergend vermogen wordt overschreden leidt nog niet tot falen. Echter leidt het falen van een kunstwerk vermoedelijk wel tot het ontstaan van een bres en bresgroei, waardoor het kombergend vermogen eerder niet toereikend zal zijn. Vanuit dit perspectief is het ook van belang om de sterkte van de bodembescherming te analyseren, waarbij mede vanuit praktisch oogpunt het uitgangspunt is dat wanneer het kunstwerk bezwijkt ook falen zal optreden.

Het bezwijken van het kunstwerk wordt bij *betrouwbaarheid sluiting* voorgesteld als het bezwijken van de bodembescherming achter het kunstwerk, het ontstaan van ontgrondingskuilen, het instabiel worden van het kunstwerk en vervolgens het bezwijken van het kunstwerk (zie ook artikel Beschrijving faalproces betrouwbaarheid sluiting).

Het model voor het bezwijken van de bodembescherming als gevolg van het faalmechanisme *betrouwbaarheid sluiting* wordt in Model voor bezwijken bodembescherming beschreven. Tenslotte worden andere processen die kunnen leiden tot het bezwijken van een kunstwerk in Aanvullende processen leidend tot bezwijken kunstwerk.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Model voor bezwijken bodembescherming door betrouwbaarheid sluiting

Het model voor het bezwijken van de bodembescherming is feitelijk heel simpel: de kritieke stroomsnelheid van de aanwezige bodembescherming is kleiner dan de optredende stroomsnelheid bij instroming door het ongewenst niet-gesloten kunstwerk. De faalkans voor de bodembescherming $P_{f;bodembescherming}$ kan dus worden bepaald met de volgende formule:

$$P_{f;bodembescherming} = P(u_{optr} > u_k) \quad (1)$$

Waarin:

$P_{f;bodembescherming}$ Faalkans voor de bodembescherming [1/jaar].

u_k Kritieke stroomsnelheid waarbij de bodembescherming bezwijkt [m/s].

u_{optr} De optredende stroomsnelheid bij ongewenste instroming [m/s].

De optredende stroomsnelheid (uitgangspunt is de dieptegemiddelde waarde) over de bodembescherming varieert met de locatie van de bodembescherming ten opzichte van het watervoerende element van het kunstwerk. Ook varieert de stroomsnelheid tijdens een hoogwaterperiode omdat het verval over het kunstwerk niet constant zal zijn.

De kritieke stroomsnelheid waarbij de bodembescherming bezwijkt wordt vaak aangehouden op die stroomsnelheid waarbij begin van bewegen van stenen optreedt. Voor het ontwerpen wordt dat in ieder geval aanbevolen. Bij een beoordeling kan het nuttig zijn om uit te gaan van enig transport van stenen als randvoorwaarde voor bepaling van de kritieke stroomsnelheid.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Aanvullende processen leidend tot bezwijken kunstwerk door betrouwbaarheid sluiting

Het bezwijken van het kunstwerk wordt bij *betrouwbaarheid sluiting* voorgesteld als het bezwijken van de bodembescherming achter het kunstwerk en vervolgens het ontstaan van ontgrondingskuilen (A), het instabiel worden van het kunstwerk (B) en vervolgens het bezwijken van (delen van) het kunstwerk (C), zie ook artikel Beschrijving faalproces betrouwbaarheid sluiting.

Onder het bezwijken van het kunstwerk wordt hier het volgende verstaan:

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

A. Ontgrondingskuilen

Door het ontstaan van ontgrondingskuilen kan het evenwicht van de constructie worden beïnvloed. Dit is afhankelijk van de afmetingen (diepte en breedte) en de locatie van de ontgrondingskuilen ten opzichte van het kunstwerk. Ook speelt de tijd een belangrijke rol, omdat ontgrondingskuilen in eerste instantie zich relatief snel ontwikkelen, maar het lang kan duren voordat ze de maximale diepte bereiken. Dit betekent dat het ontstaan van een ontgrondingskuil nog niet betekent dat deze dusdanige vormen aanneemt dat binnen een hoogwaterperiode instabiliteit van de constructie optreedt.
Voor het berekenen van ontgrondingskuilen kan bijvoorbeeld gebruik worden gemaakt van wat geschreven is in hoofdstuk 16 van het handboek 'Ontwerp van schutsluizen' [Vrijburcht, 2000]. Meer achtergronden en nadere beschrijvingen kunnen worden gevonden in de 'Scour Manual' [Hoffmans en Verheij, 2021].

B. Instabiel worden kunstwerk

Wanneer een ontgrondingskuil zich in de nabijheid van het kunstwerk manifesteert, kan dit leiden tot het verlies van evenwicht van (delen van) de constructie. In welke mate dit optreedt is, naast de kenmerken van de ontgrondingskuil, ook afhankelijk van de funderingsconstructie (palen, damwandschermen) die er onder het kunstwerk aanwezig is.

Er kan sprake zijn van een directe instabiliteit, waarbij als gevolg van de ontgrondingskuil bijvoorbeeld het horizontale evenwicht van de constructie verloren gaat en het kunstwerk horizontaal verschuift. Een dergelijke invloed op de constructie kan in eerste instantie globaal worden bepaald via reguliere evenwichtsbeschouwingen van de ontstane situatie na het ontstaan van de ontgrondingen. Met behulp van geavanceerde rekenprogramma's (bijvoorbeeld Plaxis) is het wellicht mogelijk om nog nader te analyseren of deze vorm van directe instabiliteit optreedt.

Een vorm van indirecte instabiliteit is wanneer de ontgrondingskuil ertoe leidt dat de weerstand tegen *piping* vermindert, waardoor onder- of achterloopsheid kan gaan optreden. Als gevolg hiervan wordt het kunstwerk verder ondergraven en komen bijvoorbeeld kantel- en/of verticale instabiliteit in beeld.

C. Bezwijken kunstwerk

Wanneer instabiliteit optreedt van (delen van) het kunstwerk wil dat nog niet altijd zeggen dat dit leidt tot instroming van een groot volume water. Wanneer bijvoorbeeld het uitstroomwerk van een lange inlaatduiker instabiel wordt en bezwijkt, is de doorstroomopening en het buitendijkse instroomwerk nog niet bezweken en groeit de instroming niet door het bezwijken van het uitstroomwerk. Daarvoor moet dan weer verdere erosie van het dijklichaam plaatsvinden waarin de inlaatduiker is opgenomen.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Kritieke stroomsnelheid

Er zijn meerdere modellen beschikbaar waarmee de kritieke stroomsnelheid van de bodembescherming kan worden bepaald. Onder andere het model van Shields en van Pilarczyk zijn veel gebruikte modellen. Voor een beschrijving van deze modellen wordt verwezen naar de Werkwijzer ontwerpen waterkerende kunstwerken [Van Bree, et al., 2018] en andere vakliteratuur die op dit soort modellen ingaat.

Versie 1.0: 2 juli 2025

1.9 Bijlagen

Afleiding formule kans op falen door niet sluiten

Deze bijlage geeft de theoretische basis van de kans op falen door niet-sluiten en afleiding van de BOI-basisformule voor dit faalmechanisme.

Inleiding

Hieronder volgt een toelichting op de faalkans voor het faalmechanisme *niet sluiten*. Eerst wordt de meest algemene formulering afgeleid. Vervolgens worden enkele aannamen/bijzondere omstandigheden genoemd die leiden tot de BOI-basisformule.

De formules ogen misschien complex maar ze zijn weinig anders dan een bondig en nogal precies taalgebruik. De formules leest men als volgt:

- P(A) betekent ''de kans op A''.
- P(AB) betekent ''de kans op A gegeven B''.
- P({A of B}C) betekent ''de kans op A of B, gegeven C''.
- P(A of {BC}) betekent ''de kans op A, of B gegeven C''.
- Et cetera.

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

De volgende parameters komen geregeld terug en worden hier geduid:

$P_{f;ns}$ Faalkans kunstwerk als gevolg van het faalmechanisme niet sluiten [1/jaar].

h_{bu} Buitenwaterstand [m t.o.v. NAP].

$h_{bu;toel}$ Maximaal toelaatbare buitenwaterstand bij een niet hoogwaterkerend gesloten kunstwerk zonder dat er overstromingsgevolgen optreden [m t.o.v. NAP].

Verder staat de afkorting KW voor 'kunstwerk'.

Algemeen toepasbare formules

In de meest algemene zin geldt:

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

Met:

$$P(buitenwaterstand\ gevaarlijk\ hoog) = P(h_{bu} > h_{bu;toel})$$

wordt dit:

$$P_{f;ns} = P(h_{bu} > h_{bu;toel}) \cdot P(KW\ staat\ open \mid h > h_{bui;toel}) \qquad (2)$$

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

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

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

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

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

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

$$P(\{Niet\ in\ reparatie\ EN\ sluiting\ faalt\} \mid h_{bu} > h_{bu;toel}) \approx P(Sluiting\ faalt \mid h_{bu} > h_{bu;toel}) \qquad (3)$$

Er ontstaat dan:

$$P(KW\ staat\ open \mid h_{bu} > h_{bu;toel}) =$$
$$P(\{KW\ stond\ open\ EN\ sluiting\ faalt\} \mid h_{bu} > h_{bu;toel}) + \qquad (4)$$
$$P(\{KW\ stond\ open\ EN\ in\ reparatie\} \mid h_{bu} > h_{bu;toel})$$

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

$$P(KW\ staat\ open \mid h_{bu} > h_{bu;toel}) =$$
$$P(KW\ stond\ open \mid h_{bu} > h_{bu;toel}) \cdot P(Sluiting\ faalt \mid h_{bu} > h_{bu;toel}) + \quad (5)$$
$$P(\{KW\ stond\ open\ EN\ in\ reparatie\} \mid h_{bu} > h_{bu;toel})$$

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

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

$$P(KW\ staat\ open \mid h_{bu} > h_{bu;toel}) =$$
$$P(KW\ stond\ open \mid h_{bu} > h_{bu;toel}) \cdot P(Sluiting\ faalt \mid h_{bu} > h_{bu;toel}) + \quad (6)$$
$$P(KW\ stond\ open \mid h_{bu} > h_{bu;toel}) \cdot P(In\ reparatie \mid h_{bu} > h_{bu;toel})$$

Ofwel:

$$P(KW\ staat\ open \mid h_{bu} > h_{bu;toel}) = P(KW\ stond\ open \mid h_{bu} > h_{bu;toel}) \cdot$$
$$\left(P(Sluiting\ faalt \mid h_{bu} > h_{bui;toel}) + P(In\ reparatie \mid h_{bu} > h_{bui;toel})\right) \quad (7)$$

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

$$P(KW\ staat\ open \mid h_{bu} > h_{bu;toel}) =$$
$$P(KW\ stond\ open \mid h_{bu} > h_{bu;toel}) \cdot P(Sluiting\ faalt \mid h_{bu} > h_{bu;toel}) + \quad (8)$$
$$P(In\ reparatie \mid h_{bu} > h_{bu;toel})$$

Relatie met het BOI

Hieronder worden nog een aantal aannamen geïntroduceerd om uit te komen op bovenstaande formules. Zo wordt duidelijk wat er in het BOI impliciet wordt verondersteld. Om op de BOI-formules uit te komen, moeten we het volgende aannemen:

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

4. Bij reparaties blijft de kering altijd in geopende toestand.

De volgende parameters komen in onderstaande formules terug:

N_{open} Aantal sluitvragen per jaar vanuit de primaire functie(s) van een hoogwaterkerend keermiddel [1/jaar].

T_{open} De gemiddelde tijdsduur per cyclus van openen en sluiten waarin de hoogwaterkerende keermiddelen vanuit hun primaire functie(s) geopend staan [jaar].

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

P_{open} Kans op open kering bij een sluitvraag [-].

P_{ns} Kans op falen sluiting bij een sluitvraag [-].

$P_{f;ns}$ Faalkans kunstwerk als gevolg van het faalmechanisme niet sluiten [1/jaar].

h_{bu} Buitenwaterstand [m t.o.v. NAP].

$h_{bu;toel}$ Maximaal toelaatbare buitenwaterstand bij een niet hoogwaterkerend gesloten kunstwerk zonder dat er overstromingsgevolgen optreden [m t.o.v. NAP].

- **Aanname 1 impliceert:**

$$P\left(KW\ stond\ open \,\middle|\, h_{bu} > h_{bu;toel}\right) = N_{open} \cdot T_{open} \tag{9}$$

- **Aanname 2 impliceert:**

$$P\left(Sluiting\ faalt \,\middle|\, h_{bu} > h_{bu;toel}\right) = P(Sluiting\ faalt \,|\, willekeurige\ sluitvraag) = P_{ns} \tag{10}$$

- **Aannames 1, 2 en 3 impliceren:**

$$P\left(In\ reparatie \,\middle|\, h_{bu} > h_{bu;toel}\right) =$$
$$P(In\ reparatie \,|\, willekeurige\ sluitvraag) = N_{open} \cdot P_{ns} \cdot T_{rep} \tag{11}$$

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

$$P_{f;ns} = P\left(h_{bu} > h_{bu;toel}\right) \cdot P\left(KW\ staat\ open \,\middle|\, h_{bu} > h_{bu;toel}\right)$$

met (zie formule 8):

$$P\left(KW\ staat\ open \,\middle|\, h_{bu} > h_{bu;toel}\right) =$$
$$P\left(KW\ stond\ open \,\middle|\, h_{bu} > h_{bu;toel}\right) \cdot P\left(Sluiting\ faalt \,\middle|\, h_{bu} > h_{bu;toel}\right) +$$
$$P\left(In\ reparatie \,\middle|\, h_{bu} > h_{bu;toel}\right)$$

Invullen geeft:

$$P_{f;ns} = P\left(h_{bu} > h_{bu;toel}\right) \cdot P\left(KW\ staat\ open \,\middle|\, h_{bu} > h_{bu;toel}\right) \quad (12)$$

Het herschikken van termen geeft:

$$P_{f;ns} = P\left(h_{bu} > h_{bu;toel}\right) \cdot N_{open} \cdot P_{ns} \cdot \left(T_{open} + T_{rep}\right) \quad (13)$$

We introduceren nu de volgende term:

$$P_{open} = N_{open} \cdot \left(T_{open} + T_{rep}\right) \quad (14)$$

Dit leidt tot de basisformule zoals die in het instrumentarium is opgenomen:

$$P_{f;ns} = P\left(h_{bu} > h_{bu;toel}\right) \cdot P_{ns} \cdot P_{open} \quad (15)$$

Dit is de formule die in het instrumentarium is opgenomen in de Technische Leidraad en handleiding voor *betrouwbaarheid sluiting*.

De afleiding maakt duidelijk dat:

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

Versie 1.0: 2 juli 2025

2. Faalmechanisme overslag en/of overloop bij kunstwerk

Inleiding faalmechanisme overslag en/of overloop bij kunstwerk

De kerende hoogte van waterkerende kunstwerken moet groot genoeg zijn om de hoeveelheid golfoverslag of overloop binnen acceptabele grenzen te houden. Bij zowel een beoordeling als een ontwerpverificatie van de eisen (omgevingswaarden) uit de Omgevingswet gaat het hierbij om een overstroming met significante gevolgen. Dit is relevant voor kunstwerken die zelfstandig de kerende hoogte verzorgen zoals schutsluizen, keersluizen, in- en uitwateringssluizen en coupures. Bij kunstwerken waarbij de kerende hoogte wordt verzorgd door het dijklichaam (zoals duikers en persleidingen) is een beoordeling of ontwerpverificatie van het kunstwerk op *overslag en/of overloop* niet relevant.

De komende paragrafen (zie gerelateerde artikelen) gaan dieper in op het falen van een waterkering als gevolg van golfoverslag en/of overloop.

Versie 1.0: 2 juli 2025

2.1 Fenomenologische beschrijving falen door overslag en/of overloop

Beschrijving faalproces overslag en/of overloop

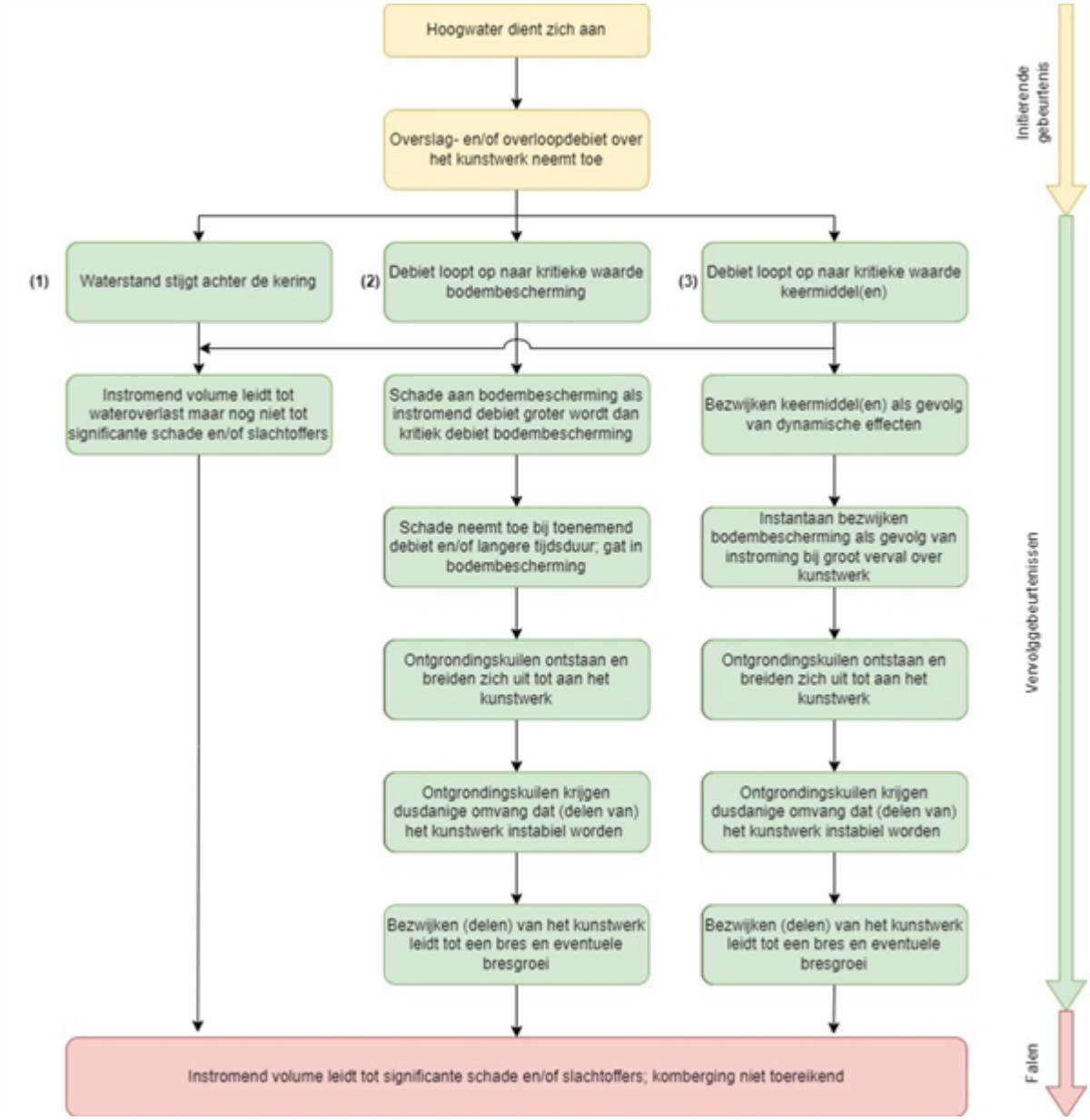
Falen als gevolg van *overslag en/of overloop* vindt plaats wanneer er door golfoverslag en/of overloop zoveel water over het gesloten kunstwerk of de aansluitconstructie gaat dat dit leidt tot substantiële schade en/of slachtoffers (overstromingsgevolgen). Dit wordt bij kunstwerken ook wel aangeduid als *overschrijden van het kombergend vermogen*. Falen van de waterkering treedt op als (zie ook Figuur 1):

zich een hoogwater aandient en het kunstwerk (deels of geheel) is gesloten

EN (1) het kunstwerk zelf intact blijft maar het instromend volume over het kunstwerk niet kan 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. 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 substantiële schade en/of slachtoffers (overstroming).[1]

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



Figuur 1 Faalproces overslag en/of overloop.

Het komt erop neer dat falen optreedt als de buitenwaterstand oploopt tot dusdanige hoogte dat, bij een gesloten kunstwerk, er ongewenst water binnenstroomt en vervolgens dit instromende debiet leidt tot overschrijding van het beschikbare kombergende volume, al dan niet inclusief bezwijken van het kunstwerk en eventuele bresgroei.

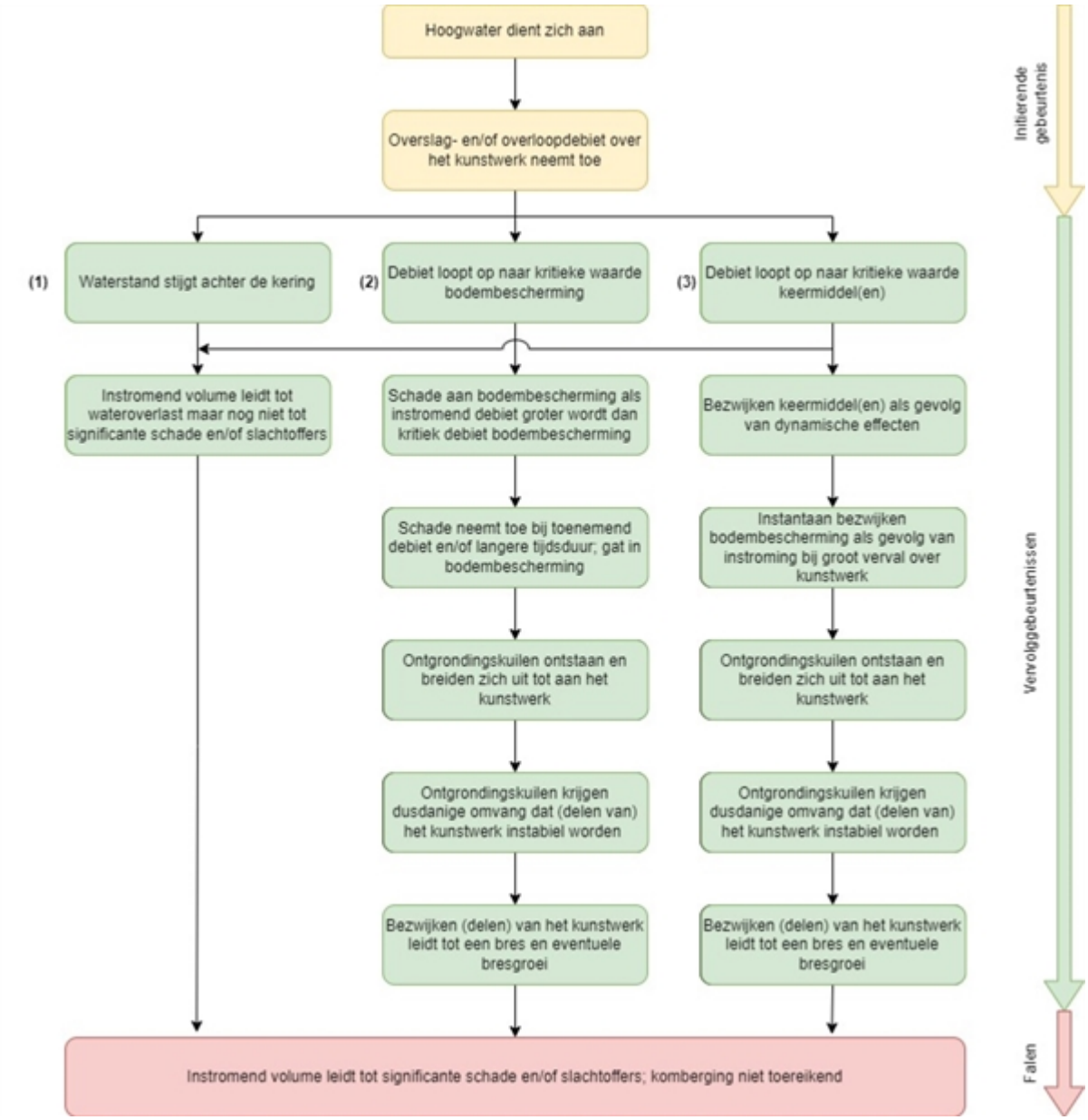
[1] In principe kan een kunstwerk bezwijken als gevolg van het overslaande water, zonder dat dit tot overstromingsgevolgen (substantiële schade en/of slachtoffers) leidt. Dat komt dan doordat de komberging heel groot is en de bresgroei beperkt blijft. In de praktijk is het erg lastig om dit aannemelijk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

Versie 1.0: 2 juli 2025

Nadere beschrijving faalproces overslag en/of overloop

Dit artikel beschrijft het faalproces door *overslag en/of overloop* verder in detail, zie ook artikel Beschrijving faalproces overslag en/of overloop. Vertrekpunt hierbij is dat het kunstwerk, nadat het zijn primaire functie heeft vervuld (het laten passeren van water, voertuigen, mensen et cetera van de waterkering) deels of geheel gesloten is. Er is dus een bepaalde kerende hoogte aanwezig (dit hoeft niet de maximaal beschikbare waterkerende hoogte van het kunstwerk te zijn).

In de lopende tekst komen nummers tussen haakjes voor die verwijzen naar Figuur 1 (overgenomen uit bovengenoemd artikel).



Figuur 1 Faalproces overslag en/of overloop.

Initiërende gebeurtenis

Het faalproces start met een toename van de hydraulische belasting op het kunstwerk. De belasting op het kunstwerk wordt gevormd door een combinatie van waterstand en golfhoogte. Bij toenemende waterstand en/of toenemende golfhoogte gaat er in eerste instantie door golfoverslag steeds meer water over de keermiddelen en waterkerende constructiedelen van het gesloten kunstwerk. Zolang de buitenwaterstand lager is dan de kerende hoogte van het kunstwerk is sprake

van een overslagsituatie. Dat wordt anders als de waterstand verder stijgt en hoger wordt dan de kerende hoogte van het kunstwerk. Er is dan sprake van overloop, waarbij de belasting bestaat uit een overstortende straal in combinatie met overslaande golven over de keermiddelen en waterkerende constructiedelen van het gesloten kunstwerk. De combinatie van waterstand en golven enerzijds en de kerende hoogte en breedte van de waterkerende constructiedelen anderzijds bepalen de hoeveelheid water die tijdens een hoogwatergebeurtenis over het kunstwerk naar binnen komt. De belastingduur speelt hierbij uiteraard ook een rol.

Vervolggebeurtenissen en falen van het kunstwerk

Falen van het kunstwerk (optreden van overstromingsgevolgen) treedt alleen op wanneer het kombergend vermogen niet meer toereikend is en er substantiële schade optreedt en/of er dodelijke slachtoffers vallen. Dit kan gebeuren bij een standzeker kunstwerk of nadat het kunstwerk is bezweken en een bres in de waterkering is ontstaan. Zoals in Figuur 1 is te zien, kan het kunstwerk bezwijken nadat de keermiddelen zijn bezweken of nadat de bodembescherming is bezweken.

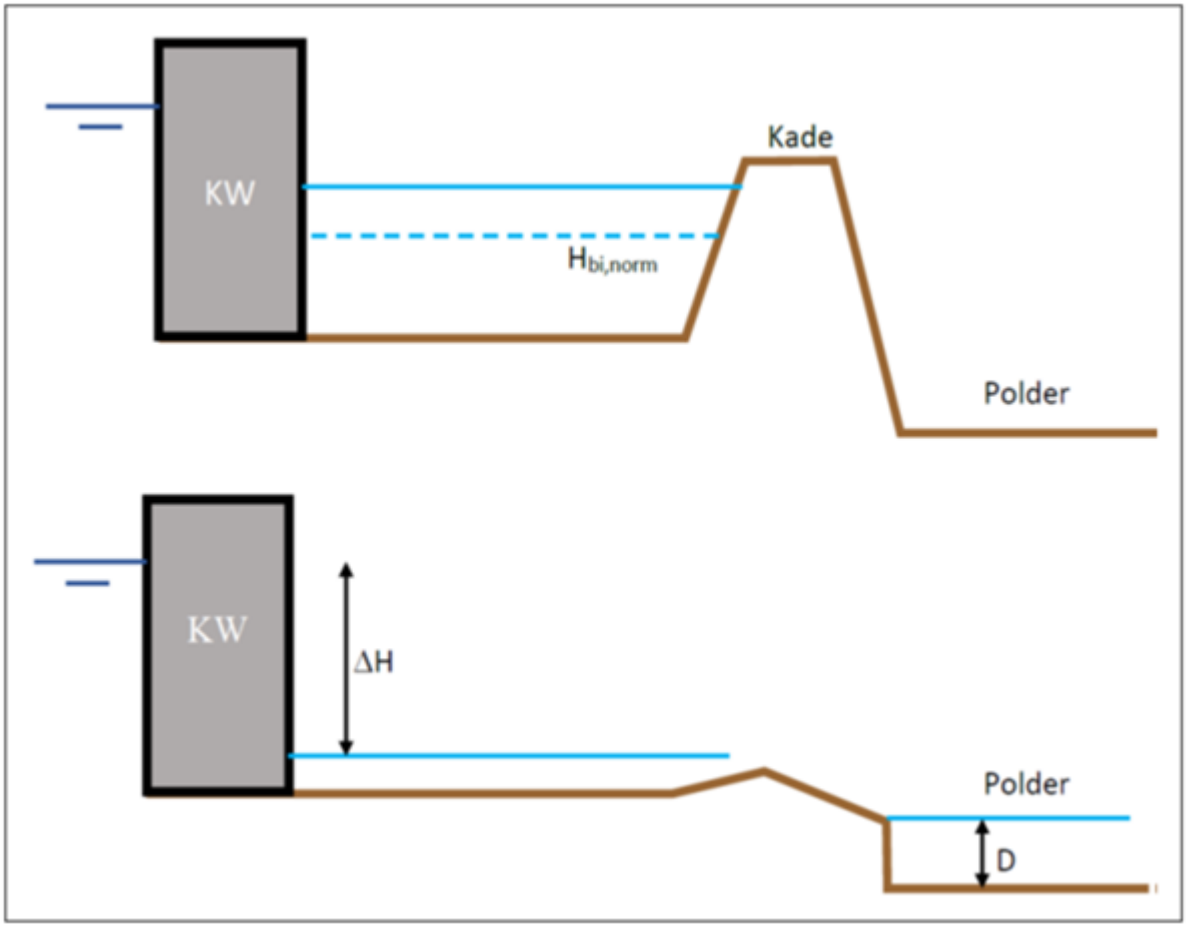
(1) Overschrijden komberging bij standzeker kunstwerk

Het overschrijden van het kombergend vermogen bestaat uit het instromen van dusdanig veel water in het achterliggende watersysteem of gebied dat sprake is van overstromingsgevolgen (substantiële schade en/of slachtoffers) in dat achterliggende gebied. Voor kunstwerken die geen onderdeel zijn van een voorliggende kering[1] zijn in de basis drie verschillende situaties te onderscheiden:

1. Achter het kunstwerk is een watersysteem aanwezig dat wordt omringd door zachte kades (grondlichamen). Als de kades bezwijken of overlopen door de toegenomen waterstand in het watersysteem, kan (een deel van) het watersysteem leeglopen in het achterliggende gebied.
2. Achter het kunstwerk is een watersysteem aanwezig dat wordt omringd door kades die praktisch niet kunnen doorbreken, bijvoorbeeld doordat sprake is van harde kades bij een haven of doordat de watergangen beneden het maaiveld gelegen zijn. In deze situatie kan dusdanig veel water over de randen van het watersysteem het achterliggende gebied in lopen dat sprake is van een overstroming.
3. Achter het kunstwerk is geen watersysteem aanwezig, er vindt direct inundatie van het achterliggende gebied plaats. Dit komt bij coupures veel voor.

Als sprake is van kleine watersystemen met ‘zachte’ kades hoeft falen van de kades niet direct te leiden tot overstromingsgevolgen doordat het volume dat dan het achterliggende gebied instroomt klein is. In deze situatie kan falen van de ‘zachte’ kade wel andere faalprocessen initiëren. Dit komt doordat ná falen van de kades de binnenwaterstand zover daalt dat het verval over het kunstwerk sterk toeneemt. Hierbij kunnen vervolggebeurtenissen worden onderscheiden die kunnen leiden tot bezwijken van het kunstwerk:

1. Door de afgenomen waterdiepte kan de stroomsnelheid ter plaatse van de bodembescherming achter het kunstwerk zodanig toenemen dat een faalproces met betrekking tot erosie bodembescherming in gang wordt gezet. Dit geldt voor zowel een gesloten kunstwerk als een kunstwerk dat onterecht open staat.
2. Bij een gesloten kunstwerk kan het toegenomen verval over het kunstwerk leiden tot bezwijken van waterkerende constructie-onderdelen of het instabiel worden van het kunstwerk.



Figuur 2 Voorbeeld van situatie waarin verval over het kunstwerk sterk toeneemt na bezwijken van de kades rond de komberging (boven: situatie vóór bezwijken kades, onder: situatie ná bezwijken kades komberging).

(2) Overschrijden komberging na bezwijken kunstwerk door falen bodembescherming

Bij toenemende overslag-/overloopdebieten neemt de stroomsnelheid boven de bodembescherming toe. Dit leidt tot falen van de bodembescherming als de kritieke stroomsnelheid van de bodembescherming wordt overschreden. In de praktijk is dit veelal het begin van een geleidelijk erosieproces, waarbij bij toenemende stroomsnelheid steeds grotere schade aan de bodembescherming ontstaat en uiteindelijk de ondergrond onder de bodembescherming bloot komt te liggen.

Na bezwijken van de bodembescherming kan transport van bodemmateriaal uit de ondergrond onder de bodembescherming plaatsvinden. Dit leidt tot ontgrondings-kuilen direct achter het kunstwerk. Deze ontgrondingskuilen worden groter en dieper naarmate de ondergrond langer belast wordt door de stroming als gevolg van het overslag-/overloopdebiet. Uiteindelijk kunnen deze ontgrondingskuilen dermate groot en diep worden dat dit leidt tot algehele instabiliteit en hiermee het bezwijken van (delen van) het kunstwerk.

Nadat de kritieke stroomsnelheid van de bodembescherming wordt overschreden moet er dus nog het nodige gebeuren voordat het kunstwerk als geheel bezwijkt en er een bres in de waterkering ontstaat:

- Doorgaand transport van elementen uit de toplaag en eventuele onderlagen van de bodembescherming en ontstaan van een gat in de bodembescherming.

- Optreden van erosie van de onbeschermde bodem als gevolg van de optredende stroomsnelheden. Dit proces leidt uiteindelijk tot het optreden van ontgrondingskuilen.
- Optreden van een afschuiving aan de rand van deze ontgrondingskuil, waarvan de inscharing het kunstwerk bereikt.
- Afmetingen (diepte, breedte) van de ontgrondingen ter plaatse van het kunstwerk worden dusdanig groot dat dit leidt tot instabiliteit (kantelen, verschuiven) van het kunstwerk. Dit kan optreden door het wegvallen van de passieve gronddruk aan de binnenzijde, maar ook het uitspoelen van gronddeeltjes onder de binnenzijde van het kunstwerk is mogelijk. Dit kan leiden tot een proces waarbij delen van het kunstwerk steeds verder vervormen dan wel verplaatsen. Ook kunnen ontgrondingskuilen leiden tot verminderde weerstand tegen *piping* van het kunstwerk.
- Het totale kunstwerk faalt als gevolg van kantelen en/of verschuiven van het geheel of het opeenvolgend bezwijken van onderdelen van de constructie. Afhankelijk van wat er bezwijkt, de gehele constructie dan wel een deel van de constructie, kan er een bres in de waterkering ontstaan en vervolgens bresgroei optreden. In dat geval wordt het gat in de waterkering groter en stijgt het instromende debiet. Het kombergend vermogen zal dan sneller niet toereikend zijn.

De mate waarin, en de snelheid waarmee bovenstaande processen na bezwijken van de bodembescherming optreden is afhankelijk van een groot aantal factoren. De belangrijkste zijn:

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

Het moge duidelijk zijn dat er na bezwijken van de bodembescherming nog een lange weg te gaan is voordat het kunstwerk is bezweken.

(3) Overschrijden komberging na bezwijken keermiddelen van het kunstwerk

Bij grote overslag- en/of overloopdebieten kunnen 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 door gebrek aan sterkte van het kunstwerk (faalmechanisme *sterkte en stabiliteit puntconstructies*). Omdat het echter direct samenhangt met het optreden van overslag en/of overloop is ervoor gekozen het binnen het faalmechanisme *overslag en/of overloop* te behandelen.

Over dit deelfaalmechanisme is zeer weinig bekend. Als eerste inschatting wordt in de praktijk vaak aangehouden dat de kering faalt als het overslag-/overloopdebiet groter wordt dan 1,0 $m^3/s/m$. Voor de beeldvorming: in een overloopsituatie (dus zonder golven) hoort een dergelijk debiet bij een waterstand die circa 0,65 m hoger is dan de kerende hoogte van het sluitmiddel. In voorkomende gevallen kan falen optreden bij een hoger of lager debiet, maar dit vraagt nadere onderbouwing.

Bezwijken van het keermiddel door dynamische effecten als gevolg van *overslag en/of overloop* leidt tot een openstaand kunstwerk waarover instantaan een groot verval staat. Enerzijds kan de instroming die hier het gevolg van is al leiden tot overschrijden van het kombergend vermogen en hiermee tot overstromingsgevolgen. Dit proces is onder (1) besproken. Anderzijds kan het leiden tot bezwijken van de bodembescherming en na het optreden van vervolgprocessen zoals benoemd onder (2) tot het bezwijken van het kunstwerk als geheel en een bres in de waterkering.

[1] Voor kunstwerken in een voorliggende kering ligt dit anders; hiervoor is binnen het programma Rijkskeringen van Rijkswaterstaat een werkwijze op maat ontwikkeld.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Historie en veiligheidsfilosofie faalmechanisme overslag en/of overloop

Historie

De tot 2017 vigerende kennisbasis is vastgelegd in de [Leidraad kunstwerken, 2003]. Deze Leidraad is eerder als groene versie gepubliceerd, namelijk als de [Leidraad waterkerende kunstwerken en bijzondere constructies, 1997] met het bijbehorende [Basisrapport waterkerende kunstwerken en bijzondere constructies, 1997]. In deze documenten wordt voor het eerst aandacht besteed aan het faalmechanisme *overslag en/of overloop*. De voorloper van de Leidraad waterkerende kunstwerken is de [Leidraad voor ontwerp, beheer en onderhoud van constructies en vreemde objecten in, op en nabij waterkeringen, 1976].

Na publicatie van de Leidraad kunstwerken zijn toetsvoorschriften opgesteld ten behoeve van de wettelijke toetsingen tot en met de derde toetsronde, onder andere [Voorschrift toetsen op veiligheid primaire waterkeringen 2006, 2007]. Hierin is zoveel mogelijk aangesloten op de Leidraad kunstwerken .

Na het verschijnen van de Leidraad kunstwerken en het VTV2006 is voor het faalmechanisme *overslag en/of overloop* nader onderzoek gedaan naar het optredend overslag- en overloopdebiet bij samengestelde constructies. Het resultaat is vastgelegd in de EurOtop, Manual on wave overtopping of sea defences and related structures [Van der Meer, et al., 2018].

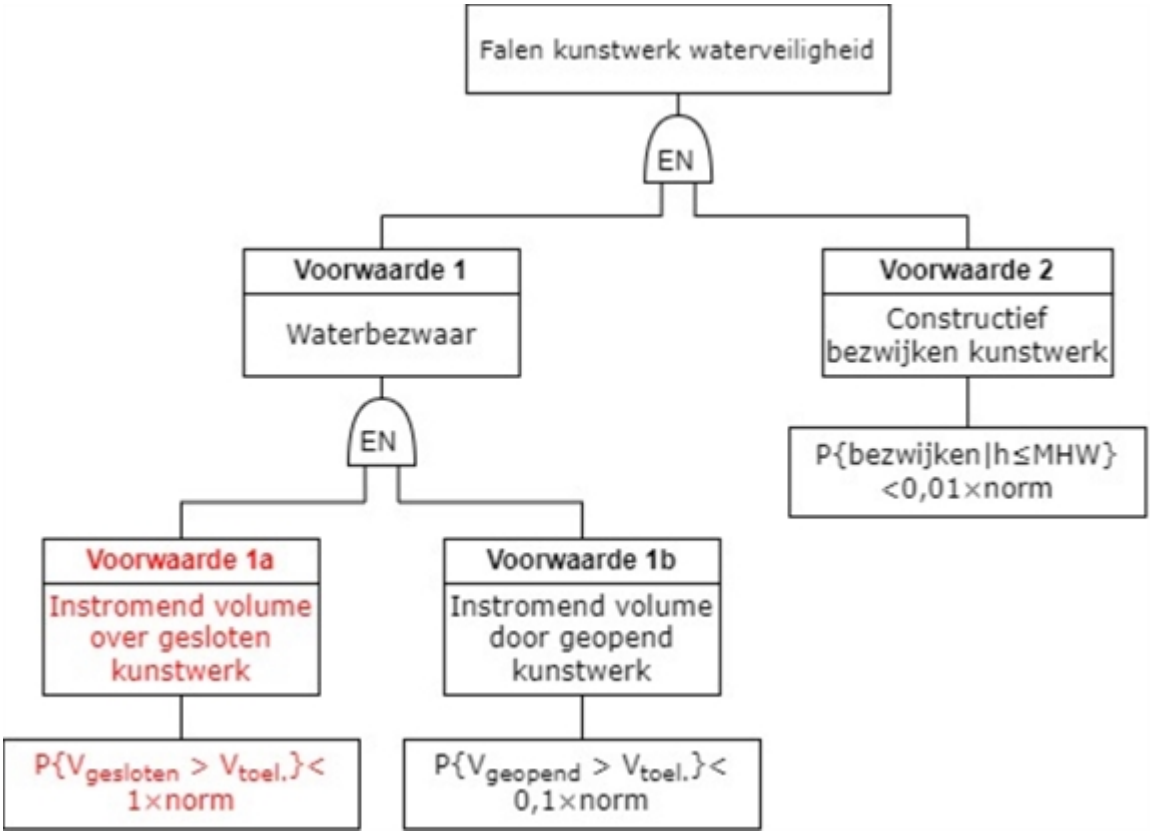
Veiligheidsfilosofie en beoordelingsmethodieken tot 2017

Zoals toegelicht in de [Grondslagen voor waterkeren, 1998] [1] vond vanaf 1998 ontwerp en beoordeling van waterkeringen plaats op basis van de overbelastingsbenadering, waarbij de waterkeringen ontworpen en getoetst werden bij een specifiek peil afhankelijk van de norm van de dijkring. Dit peil werd ook wel aangeduid met MHW (maatgevend hoogwater). Voor een verdere invulling van de eisen aan falen van kunstwerken werd in de Grondslagen verwezen naar de Leidraad kunstwerken.

Leidraad Kunstwerken 2003

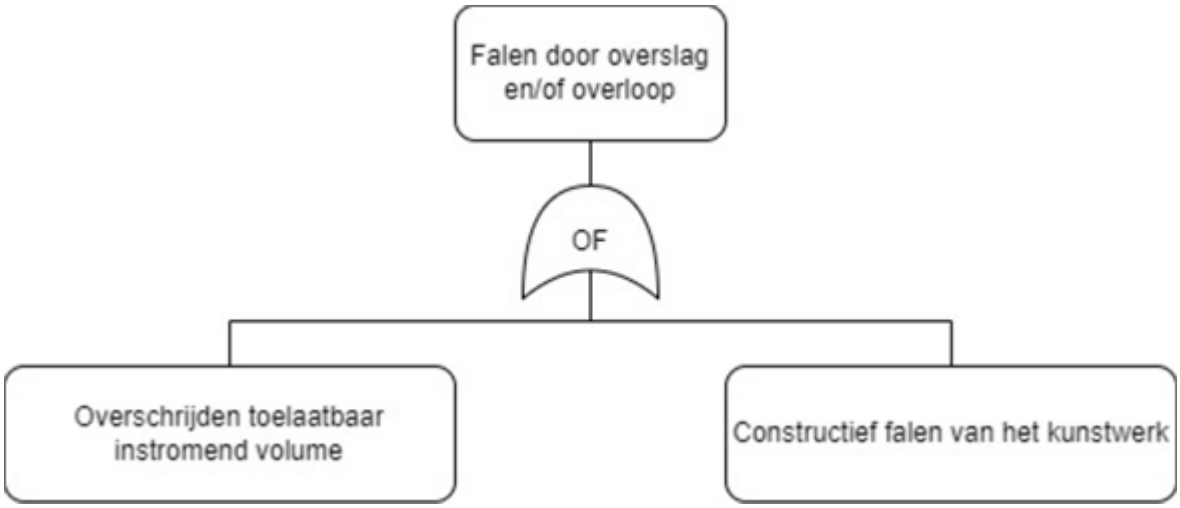
Het faalmechanisme *overslag en/of overloop* wordt in de Leidraad kunstwerken gepresenteerd als één van de drie hoofdfaalmechanismen die bij kunstwerken van toepassing zijn. Dit betreffen naast *overslag en/of overloop* ook de faalmechanismen *betrouwbaarheid sluiting* en *sterkte en stabiliteit*. Deze laatste werd opgedeeld in bezwijken constructieonderdelen, instabiliteit constructie en grondlichaam en onder- en achterloopsheid.

In de Leidraad kunstwerken is voor toetsen en ontwerpen het falen van een kunstwerk opgedeeld in een spoor *waterbezwaar* – hierin worden de faalmechanismen *overslag en/of overloop* en *betrouwbaarheid sluiting* beschouwd – en een spoor *constructief bezwijken* (zie Figuur 1). Uitgangspunt is de overbelastingsbenadering, waarin het optreden van waterbezwaar gelijk wordt gesteld aan falen van het kunstwerk. Eisen aan de kans op overschrijding van een toelaatbaar instromend volume buitenwater via het gesloten of het geopende kunstwerk zijn dan ook gekoppeld aan het optreden van waterbezwaar. Aanvullend hierop is een eis gesteld aan de kans op *constructief falen*, gegeven dat normomstandigheden[2] niet worden overschreden. Bij deze laatste tak werd verondersteld dat dit altijd tot een onbeheersbare situatie met substantiële gevolgen leidt. Overschrijding van een toelaatbaar instromend volume geeft weliswaar aanleiding tot (grote) problemen, maar de situatie hoeft niet direct onbeheersbaar te zijn.



Figuur 1 Faalpaden op hoofdlijnen volgens Leidraad Kunstwerken 2003. In het rood het pad voor overslag en/of overloop.

Voor het faalmechanisme *overslag en/of overloop* werd aan de eisen voldaan wanneer de faalkans kleiner was dan de veiligheidsnorm zoals destijds was vastgelegd in de Waterwet (en de voorganger: Wet op de waterkering). Dit was een normfrequentie per dijkring. Daarbij werd in eerste instantie gekeken naar het kombergend vermogen horend bij waterbezwaar[3]. Wel moest geverifieerd worden of de constructie constructief bestand is tegen het optredend overslag-/overloopdebiet dat hoort bij de toelaatbare hoeveelheid instromend water vanuit het oogpunt van komberging. Feitelijk komt het bij overslag en overloop erop neer dat de kans op falen bestaat uit de kans dat over het kunstwerk een ontoelaatbare hoeveelheid water stroomt die ofwel leidt tot constructief falen van het kunstwerk dan wel direct een ontoelaatbare situatie in het achterland tot gevolg heeft.



Figuur 2 Falen door overslag en/of overloop conform Leidraad kunstwerken.

[1] Inmiddels vervangen door de Grondslagen voor hoogwaterbescherming [Kok, et al., 2017].

[2] Waterstand inclusief bijbehorend golfregime met een overschrijdingsfrequentie per jaar gelijk aan de normfrequentie per jaar van de dijkring waartoe het kunstwerk behoorde.

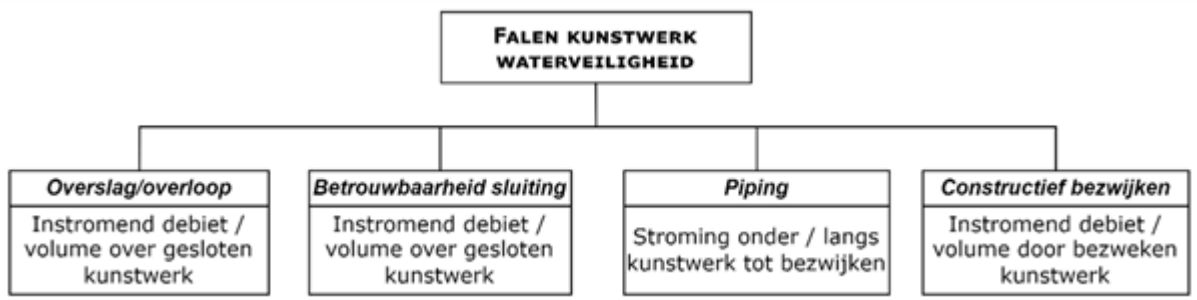
[3] Let op: het kombergend vermogend horend bij waterbezwaar (of: horend bij de overbelastingbenadering) is iets anders dan het kombergend vermogen horend bij een overstroming met substantiële schade of slachtoffers (of: horend bij de overstromingskansbenadering). Het begrip 'komberging' (zonder toevoegingen) kan dus gemakkelijk voor spraakverwarring zorgen.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Vigerende werkwijze faalmechanisme overslag en/of overloop

Sinds 2017 is de overstromingskansbenadering van toepassing. Hierbij wordt meer expliciet uitgegaan van overstromingsgevolgen als faalcriterium. Mede door de in de [Leidraad kunstwerken, 2003] gehanteerde termen 'waterbezwaar' als faalcriterium en 'open keerpeil' als maximaal toelaatbaar binnenpeil, lag de focus bij de overbelastingsbenadering op wateroverlast in plaats van substantiële gevolgen. Daar waar in de overbelastingsbenadering falen gekoppeld was aan wateroverlast, zijn nu overstromingsgevolgen (significante schade en/of slachtoffers) het criterium voor falen. Daarnaast is falen van het kunstwerk nu opgedeeld in vier faalmechanismen (zie Figuur 1), waarvan *overslag en/of overloop* er één is.

Voor een nadere uitwerking van de huidige werkwijze en modellen wordt verwezen naar de gerelateerde artikelen.



Figuur 1 Vigerende faalboom kunstwerken waterveiligheid.

Versie 1.0: 2 juli 2025

2.2 Veiligheidsanalyse faalmechanisme overslag en/of overloop

Beschrijving veiligheidsanalyse voor faalmechanisme overslag en/of overloop

Een veiligheidsanalyse ten aanzien van *overslag en/of overloop* kan op meerdere wijzen worden uitgevoerd. De basis van de analyse is echter altijd hetzelfde: de kans op overstroming door instroming over de waterkerende constructiedelen van het kunstwerk moet voldoende klein zijn.

Basisbegrippen

Bij de uitvoering van een veiligheidsanalyse voor *overslag en/of overloop* worden de volgende basisbegrippen gehanteerd:

- Waterkerend kunstwerk: een kunstwerk dat zich in de waterkering bevindt en dat voorzien is van keermiddelen waarmee naast mogelijke andere functies (bijvoorbeeld schutten) ongewenste directe instroming van buitenwater voorkomen kan worden.
- Primaire functie(s) van een waterkerend kunstwerk: de dagelijkse functie(s) waarvoor het

kunstwerk in de waterkering aanwezig is en zonder welke er geen kunstwerk benodigd zou zijn. Het keren van hoogwater is daarmee geen primaire maar een afgeleide functie van het kunstwerk.

- Maximaal toelaatbare binnenwaterstand: de waterstand op het achter het kunstwerk gelegen watersysteem die maximaal toelaatbaar is zonder dat dit leidt tot substantiële schade en/of slachtoffers (overstromingsgevolgen). Voor coupures geldt dat er geen binnendijkse watergang is en is dus sprake van een maximaal toelaatbare binnenwaterstand.
- Keermiddelen: de delen van de constructie die geopend en gesloten kunnen worden om de primaire functie van het kunstwerk mogelijk te maken en in gesloten toestand een verhoogde buitenwaterstand kunnen keren.
- Hoogwater kerende keermiddelen: het keermiddel of de keermiddelen die de maximaal kerende hoogte van het kunstwerk verzorgen.
- Kombergend vermogen: het volume aan water dat binnendijks in het achter het kunstwerk gelegen gebied (watersysteem) geborgen kan worden zonder dat dit tot overstromingsgevolgen leidt.

Eisen waterveiligheid

Het gewenste veiligheidsniveau van waterbouwkundige kunstwerken met een waterkerende functie ligt verankerd in de Omgevingswet. In deze wet is per dijktraject een omgevingswaarde vastgelegd. Dit kan een overstromingskansnorm of een faalkansnorm zijn. In beide gevallen geldt dat dit de enige 'harde' eis is die wordt gesteld. De omgang met deze eis vanuit waterveiligheid verschilt tussen ontwerpen en beoordelen.

Over het algemeen wordt bij beoordelen de faalkans voor *overslag en/of overloop* bepaald en wordt vervolgens gekeken of deze faalkans een substantiële bijdrage aan de overstromingskans van het normtraject heeft. Het totaal aantal kunstwerken in het normtraject speelt daarin geen directe rol; er wordt geen faalkanseis voor *overslag en/of overloop* voor een kunstwerk bepaald op basis van het aantal en de prestatie van de overige waterkerende kunstwerken in het normtraject.

Bij ontwerpen van een nieuw kunstwerk is het van belang om de prestatie en daarmee de faalkansbijdrage (nu en in de toekomst) van de overige kunstwerken en de andere onderdelen van het dijktraject aan de overstromingskans van het normtraject inzichtelijk te hebben. Op basis hiervan en de overstromingskansnorm van het dijktraject kan vervolgens bepaald worden welke faalkanseis aan het nieuwe kunstwerk moet worden gesteld. Daarbij dienen ook toekomstige ontwikkelingen (meer of minder kunstwerken in het normtraject of andersoortige aanpassingen) worden meegewogen. Het staat ontwerpers volkomen vrij deze faalkanseisen naar eigen inzicht af te leiden, maar daarbij gelden wel een paar algemene 'spelregels'. Voor praktische tips en handreikingen op dit gebied wordt verwezen naar hoofdstuk 2 van de Werkwijzer ontwerpen waterkerende kunstwerken [Van Bree, et al., 2018].

Eisen vanuit primaire/overige functie(s)

Specifiek voor de bodembescherming van een waterkerend kunstwerk geldt dat eisen vanuit andere functies (denk aan doorlaten water of scheepvaart) een doorslaggevende rol kunnen spelen bij het ontwerpen van de bodembescherming van een nieuw kunstwerk. Doorgaans zijn deze eisen bij het ontwerp leidend boven de eisen vanuit waterveiligheid.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Belastingen bij faalmechanisme overslag en/of overloop

De hydraulische belastingen bepalen in combinatie met de geometrie van het kunstwerk het debiet

dat door golfoverslag en/of overloop over het gesloten kunstwerk naar binnen stroomt. Dit overslag-/overloopdebiet leidt tot een belasting op de achterliggende bodembescherming, het aanwezige kombergend vermogen en een dynamische belasting op de keermiddelen. Voor het overslag-/overloopdebiet is de combinatie van waterstanden en golfhoogten aan de buitenzijde relevant. Tevens speelt het waterstandsverloop in de tijd een rol om het totale instromende volume tijdens een hoogwatergebeurtenis te bepalen.

Combinatie waterstand en golven

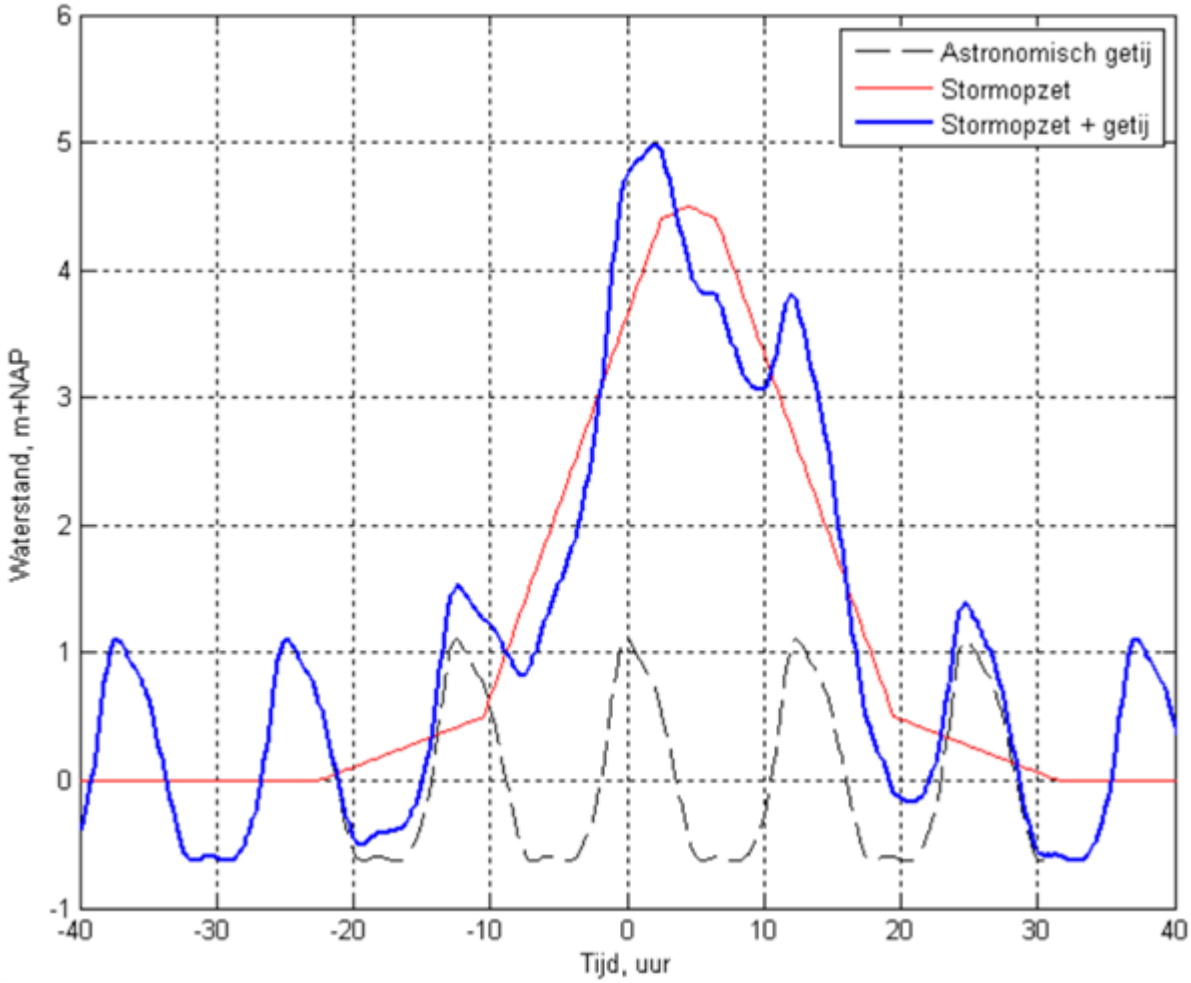
Het optredend overslag-/overloopdebiet wordt altijd bepaald door een combinatie van waterstand en golven. Een hoge waterstand met kleine golven kan hetzelfde overslag-/overloopdebiet geven als een lagere waterstand met hele grote golven. Het is dus belangrijk om gegevens over deze gecombineerde statistiek van waterstanden en golven te gebruiken.

Waterstandsverloop

De duur en het tijdsverloop van zowel de golfbelasting als de buitenwaterstand is bij het faalmechanisme *overslag en/of overloop* van belang, aangezien dit mede bepaalt hoeveel water er gedurende een hoogwatergolf over het gesloten kunstwerk naar binnen zal stromen. Dit volume van instromend water is van belang om te kunnen beoordelen of het kombergend vermogen wordt overschreden.

Gedurende een hoogwaterperiode kent de buitenwaterstand afhankelijk van het watersysteem (bovenrivieren, benedenrivieren, zee, meren) een bepaald verloop in de tijd. Globaal kan worden gesteld dat de duur van een hoogwater bij de zee en op de meren relatief kort duurt (maximaal enkele dagen), terwijl een hoogwaterperiode op de bovenrivieren vele dagen kan aanhouden.

Het verloop van een hoogwater is afhankelijk van het watersysteem waarvan het kunstwerk deel uitmaakt. Zo is het verloop van een hoogwatergolf in het benedenrivierengebied anders dan dat van een hoogwatergolf langs de kust. In onderstaande figuur is een voorbeeld gegeven van het verloop van een hoogwater in het benedenrivierengebied (Maasmond). Duidelijk zichtbaar is de invloed van het getij bij de waterstand gedurende de hoogwaterperiode.



Figuur 1 Verloop hoogwaterperiode in de tijd voor locatie in het benedenrivierengebied.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Model voor faalmechanisme overslag en/of overloop

Het model voor het faalmechanisme *overslag en/of overloop* wordt beschreven via onderstaande functie en volgt uit de beschrijving van het faalproces in Figuur 1 uit artikel Beschrijving faalproces overslag en/of overloop. Hierin zijn de volgende drie faalpaden te onderscheiden:

1. Optreden overstroming met substantiële schade of slachtoffers na overschrijding van het kombergend vermogen bij een standzeker kunstwerk.
2. Optreden overstroming met substantiële schade of slachtoffers na bezwijken van het kunstwerk als geheel na bezwijken van de bodembescherming en daaropvolgende erosieprocessen.
3. Optreden overstroming met substantiële schade of slachtoffers na bezwijken van het kunstwerk als geheel na bezwijken keermiddelen door dynamische effecten bij overslag en/of overloop.

In formulevorm kan dit als volgt samengevat worden:

$$P(F_{KW,HT}) = P(F_{komberging}\ OF\ F_{erosie}\ OF\ F_{keermiddelen}) \qquad (1)$$

Waarin:

P(·) De kans op een nader gespecificeerde gebeurtenis (hier: in een tijdspan van 1 jaar).

$F_{KW,HT}$ Het optreden van een overstroming met substantiële schade of slachtoffers door overslag en/of overloop.

$F_{komberging}$ Het optreden van een overstroming met substantiële schade of slachtoffers na overschrijden van het kombergend vermogen door overslag en/of overloop bij een standzeker kunstwerk.

F_{erosie} Het optreden van een overstroming met substantiële schade of slachtoffers na bezwijken kunstwerk in geval van bezweken bodembescherming door overslag en/of overloop.

$F_{keermiddelen}$ Het optreden van een overstroming met substantiële schade of slachtoffers na bezwijken keermiddelen onder dynamische belastingen door overslag en/of overloop.

Onder de vereenvoudigende aanname dat alle sterktetermen (de termen tussen de accolades in formule 1) (vrijwel) deterministisch zijn en het belastingverloop (waterstand + golven) blokvormig is, kan formule 1 uiteindelijk worden uitgewerkt tot (zie ook Bijlage A):

$$P(F_{KW,HT}) \approx P(q_{os/ol} > \min\left\{\frac{u_c \cdot (h_{bi} - h_{bb}) \cdot B_{sv}}{B} \; ; \; \frac{A_{kom} \cdot \Delta h_{kom}}{t_s \cdot B}; q_{c,km}\right\}) \qquad (2)$$

Waarin:

$q_{os/ol}$ Gemiddeld optredend overslag-/overloopdebiet per strekkende meter [$m^3/s/m$].

u_c Kritieke stroomsnelheid bodembescherming [m/s].

h_{bi} Binnenwaterstand [m t.o.v. NAP].

h_{bb} Hoogte bovenkant bodembescherming [m t.o.v. NAP].

B_{sv} Stroomvoerende breedte bodembescherming [m].

B Breedte van het kunstwerk [m].

A_{kom} Kombergend oppervlak [m^2].

Δh_{kom} Toegestane peilverhoging komberging [m] .

t_s Stormduur [s].

$q_{c,km}$ Kritiek tijdgemiddeld overslag-/overloopdebiet met betrekking tot sterkte keermiddel onder dynamische belastingen [$m^3/s/m$].

De diverse delen van bovenstaande formule worden in de volgende artikelen nader uitgewerkt: Kombergingsmodel voor overslag en/of overloop, Model voor bezwijken bodembescherming door overslag en/of overloop en Model voor sterkte keermiddel onder dynamische belasting. Voor de faalkans voor *overslag en/of overloop* is in ieder geval van belang hoe groot het instromende debiet is, zowel in relatie tot de bodembescherming, sterkte van de keermiddelen als de komberging. Daarom wordt eerst het instromingsmodel behandeld.

Versie 1.0: 2 juli 2025

2.3 Instromingsmodel voor overslag en/of overloop

Inleiding instromingsmodel voor overslag en/of overloop

Het instromende debiet als gevolg van *overslag en/of overloop* vormt de belasting voor zowel de bodembescherming (gerelateerd aan bezwijken kunstwerk), de komberging (gerelateerd aan overstromingsgevolgen) en de dynamische belasting op de keermiddelen (gerelateerd aan bezwijken van de keermiddelen). Het model waarmee het optredend overslag-/overloopdebiet wordt berekend, speelt daarmee een belangrijke rol bij de bepaling van de faalkans.

In deze paragraaf wordt kort ingegaan op de Historie en recente kennisontwikkeling, waarna de modellen worden behandeld waarmee de instroming (Optredend overslag-/overloopdebiet) kan worden berekend. In de artikelen Golfoverslag als niet-stationair verschijnsel en Gebruik van de EurOtop-manual worden verfijningen en handvaten voor eerdergenoemd instromingsmodel gegeven.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Historie en recente kennisontwikkeling overslag-/overloopdebiet

In de tweede helft van de jaren 90 is onderzoek verricht door WL|Delft Hydraulics naar het overslag-/overloopdebiet over constructies met een verticale wand, hetgeen heeft geleid tot de formules die uiteindelijk in de [Leidraad kunstwerken, 2003] terecht zijn gekomen. Deze formules vormen de vigerende kennisbasis voor ontwerp en beoordeling van kunstwerken met verticale keermiddelen (coupures, (keer)sluizen) in het Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium (BOI).

Ook na 2003 is verder onderzoek gedaan naar overslag bij verticale constructies. In 2007 is de eerste versie van de EurOtop-manual [Van der Meer, et al., 2018] verschenen. Met de EurOtop-manual is het mogelijk samengestelde constructies met verticale delen nauwkeuriger te berekenen. In 2014 is hiervan een update gekomen en in 2018 zijn de nieuwste inzichten gepubliceerd. In het artikel Gebruik van de EurOtop-manual wordt aangegeven op welke wijze EurOtop gebruikt kan worden om het overslag-/overloopdebiet scherper te bepalen.

Vastlegging vigerende kennisbasis en keuze BOI

De vigerende kennisbasis is vastgelegd in het Achtergrondrapport toetsspoor Hoogte I - Modellering optredend overslag-/overloopdebiet [Van Bree, 2015]. Hierin is tevens vastgelegd waarom binnen het BOI (destijds: WTI2017) is gekozen voor de modellering zoals in de Leidraad kunstwerken wordt gehanteerd in plaats van die uit de EurOtop-manual. In het artikel Optredend overslag- en/of overloopdebiet zijn de modellen opgenomen die binnen het BOI worden gehanteerd.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Optredend overslag- en/of overloopdebiet

In dit artikel worden de formules gegeven voor het bepalen van het optredend overslag-/overloopdebiet. Deze formules zijn geldig voor verticale wanden op relatief diep water (golfhoogte vlak voor de constructie niet groter dan ongeveer 1/3 van de waterdiepte) en waar geen zwaar golfbreken vlak voor de constructie plaatsvindt. Voor verticale wanden met een vooroever waarop de golven zich aanpassen wordt verwezen naar Gebruik van de EurOtop-manual.

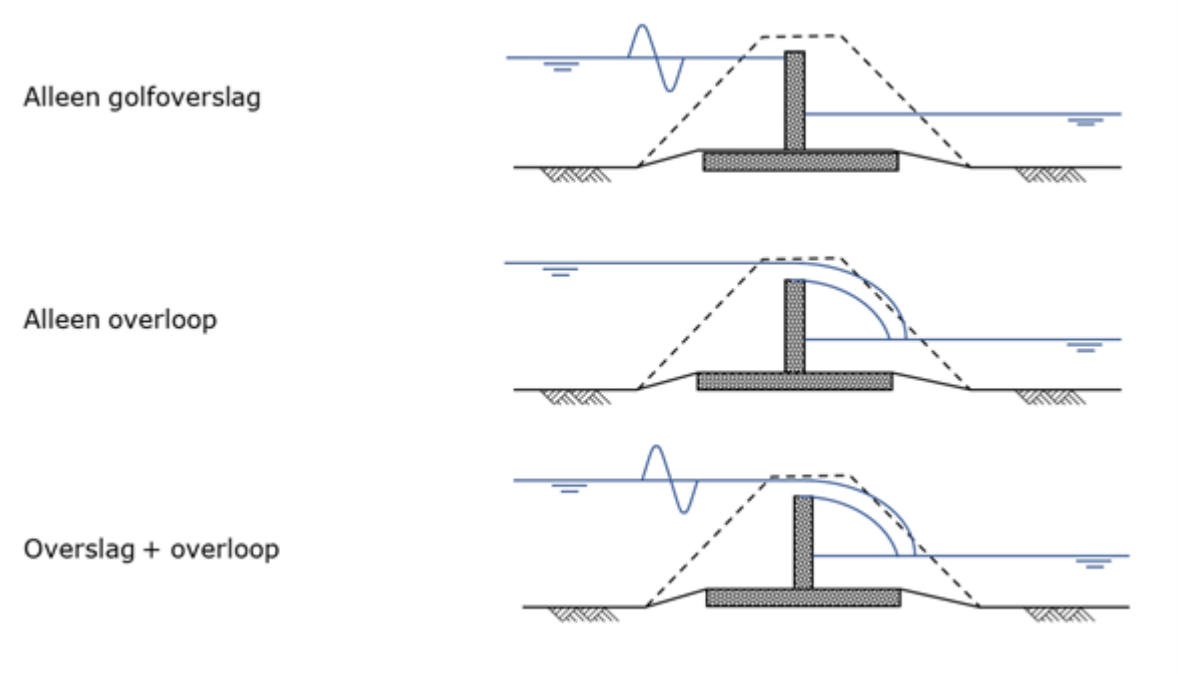
Bij het berekenen van het overslag-/overloopdebiet worden drie situaties onderscheiden, welke zijn weergegeven in onderstaande figuur:

1. Buitenwaterstand < kerende hoogte kunstwerk: alleen golfoverslag.

2. Buitenwaterstand > kerende hoogte kunstwerk EN geen of aflandige golven: overloop.

3. Buitenwaterstand > kerende hoogte kunstwerk EN golven: combinatieformule voor golfoverslag en

overloop.



Figuur 1 Schematische weergave van de verschillende situaties bij overslag en/of overloop over een verticale wand.

In alle drie de situaties is geen sprake van direct contact tussen buiten- en binnenwaterstand. De binnenwaterstand heeft daarom geen invloed op het overslag-/overloopdebiet.

Golfcondities

Om de overgang van aanlandige naar aflandige golven geleidelijk te laten verlopen wordt in de software Riskeer en Hydra-NL gebruik gemaakt van een invloedsfactor γ_s:

$$H_{m0} = \gamma_s \cdot H_{m0;input} \qquad (1)$$

met:

$$\begin{aligned} 0 < \beta \leq 80 \quad &\Rightarrow \quad \gamma_s = 1{,}0 \\ 80 < \beta \leq 110 \quad &\Rightarrow \quad \gamma_s = (110 - \beta)/30 \\ 110 < \beta \leq 180 \quad &\Rightarrow \quad \gamma_s = 0 \end{aligned} \qquad (2)$$

en:

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

Waarin:

H_{mo} Significante golfhoogte na correctie met invloedsfactor γ_s [m]; dit is de golfhoogte die wordt gebruikt om het overslagdebiet te berekenen.

γ_s Invloedsfactor aflandige golven [-].

$H_{mo,input}$ Significante golfhoogte in illustratiepunt Hydra-NL-berekening [m].

β Hoek van golfaanval [°]; dit is de hoek tussen de golfrichting en de normaal van het kunstwerk.

θ Golfrichting [°].

ψ Normaal van het kunstwerk [°].

Situatie met alleen golfoverslag

De formule voor het instromende debiet als gevolg van golfoverslag is de volgende[1]:

$$q_{os} = m_{os} \cdot \sqrt{gH_{m0}^3} \cdot e^{\left(-3{,}0 \cdot \frac{h_{kh}-h}{H_{m0}} \cdot \frac{1}{\gamma_\beta \cdot \gamma_{nc}}\right)} \qquad (4)$$

met[2]:

$$\begin{aligned} 0 < \beta \leq 20 \quad &\Rightarrow \quad \gamma_\beta = 1{,}0 \\ 20 < \beta \leq 180 \quad &\Rightarrow \quad \gamma_\beta = max\{cos(\beta - 20)\,;\, 0{,}7\} \end{aligned} \qquad (5)$$

en:

$$\begin{aligned} (h_{kh} - h)/H_{m0} \leq 0{,}5 \quad &\Rightarrow \gamma_n = 1{,}0 \\ 0{,}5 < (h_{kh} - h)/H_{m0} \leq 1{,}0 \quad &\Rightarrow \gamma_n = 1{,}3 - 0{,}6\,(h_{kh} - h)/H_{m0} \\ (h_{kh} - h)/H_{m0} > 1{,}0 \quad &\Rightarrow \gamma_n = 0{,}7 \end{aligned} \qquad (6)$$

Waarin:

q_{os} Gemiddeld overslagdebiet over een verticale wand [$m^3/s/m$].

m_{os} Modelfactor voor overslagdebiet (= 0,13) [-].

g Gravitatieversnelling [m/s^2].

H_{mo} Significante golfhoogte na correctie met invloedsfactor γ_s [m].

h Lokale buitenwaterstand [m t.o.v. NAP].

h_{kh} Kerende hoogte kunstwerk [m t.o.v. NAP].

β Hoek van golfaanval [°]; dit is de hoek tussen de golfrichting en de normaal van het kunstwerk.

$\gamma_{n,kw}$ Invloedsfactor neusconstructie [-].

γ_β Invloedsfactor scheve golfaanval [-].

Een neusconstructie kan worden aangebracht om het optredende overslag-/overloopdebiet te beperken. De invloedsfactor $\gamma_{n,kw}$ voor een neusconstructie kan worden berekend met formule 6.

In de [Leidraad Kunstwerken, 2003] wordt een aanvullende windfactor γ_w toegepast indien er kleine overslagdebieten optreden ($q_{os} \leq 10$ l/s/m). Omdat dergelijke kleine overslagdebieten zelden worden gehanteerd bij de beoordeling en het ontwerp van kunstwerken is deze factor niet in het instrumentarium geïmplementeerd. Voor de achtergronden wordt volstaan met een verwijzing naar de Leidraad kunstwerken.

Situatie met alleen overloop

Als het kunstwerk gesloten staat is er geen direct contact tussen binnen- en buitenwater. Het binnenwater heeft dan ook geen invloed op de grootte van het instromende debiet. De overloopformule is daarom ook afgeleid van een situatie met een volkomen overlaat:

$$q_{ol} = m_{ol} \cdot 0{,}55 \cdot \sqrt{g \cdot (h - h_{kh})^3} \qquad (7)$$

Waarin:

q_{ol} Gemiddeld overloopdebiet over een verticale wand [m³/s/m].

m_{ol} Modelfactor voor overloopdebiet [-].

g Gravitatieversnelling [m/s²].

h Lokale buitenwaterstand [m t.o.v. NAP].

h_{kh} Kerende hoogte kunstwerk [m t.o.v. NAP].

De factor m_{ol} varieert afhankelijk van de straal R van de kruin en de overloophoogte H:[3]

1. De maximum waarde van m_{ol} bedraagt 1,3 bij R/H = 0,6 à 2;
   voor grotere R/H neemt m af; bij R/H = 6 nadert m_{ol} tot 1 (een lange overlaat).
2. Voor R/H < 0,6 laat de stroming los en neemt m_{ol} ook af.
3. Voor een scherpe, beluchte overlaat (R/H = 0) nadert m_{ol} ook tot 1, mits de overstorthoogte veel kleiner is dan de bovenstroomse waterdiepte of de breedte van de straal veel kleiner is dan de bovenstroomse breedte.

Doorgaans wordt voor m_{ol} een waarde van 1,1 aangehouden.

Situatie met zowel golfoverslag als overloop

De formule voor het instromende debiet als er sprake is van zowel golfoverslag als overloop is de volgende:[4]

$$q_{os+ol} = m_{ol} \cdot 0{,}55 \cdot \sqrt{g \cdot (h - h_{kh})^3} + m_{os} \cdot \sqrt{g \cdot H_{m0}^3} \qquad (8)$$

Waarin:

q_{os+ol} Gemiddelde overslag- en overloopdebiet over een verticale wand bij gelijktijdig optreden van overslag en overloop [m³/s/m].

m_{ol} Modelfactor voor overloopdebiet [-]; doorgaans wordt voor m_{ol} een waarde van 1,1 aangehouden, zie toelichting in paragraaf ‘Situatie met alleen overloop’.

g Gravitatieversnelling [m/s²].

h Lokale buitenwaterstand [m t.o.v. NAP].

h_{kh} Kerende hoogte kunstwerk [m t.o.v. NAP].

m_{os} Modelfactor voor overslagdebiet (= 0,13) [-].

H_{mo} Significante golfhoogte na correctie met invloedsfactor γ_s [m].

[1] Dit was formule B2.4 uit [Leidraad kunstwerken, 2003].

[2] Deze formulering wijkt iets af van de [Leidraad kunstwerken, 2003] en [Van Bree, 2015], waar staat dat γ_β= 0 als β_g > 90°. Dit is gedaan om de overgang van aanlandige naar aflandige golven geleidelijk te laten verlopen.

[3] De overloophoogte H is het verschil tussen de stilwaterstand voor de overlaat en de hoogte van de kruin van de overlaat.

[4] Dit is formule B2.17 uit [Leidraad kunstwerken, 2003].

Versie 1.0: 2 juli 2025

Golfoverslag als niet-stationair verschijnsel

Het kritieke overslagdebiet is een tijdgemiddeld debiet. In werkelijkheid is er geen sprake van een constant debiet, maar gaat er per inkomende golf een hoeveelheid water over de constructie heen en dan weer enige tijd niets. Deze overslaghoeveelheden per golf hangen af van de golfhoogte en de afstand tussen de waterstand (stilwaterlijn) en de kerende hoogte. Hoe groter de golfhoogte hoe groter de hoeveelheden per overslaande golf zijn bij eenzelfde gemiddeld overslagdebiet. Dit aspect moet worden meegenomen bij het vaststellen van het kritieke overslagdebiet in verband met de sterkte van de bodembescherming en dat van het keermiddel onder dynamische belastingen. Voor het bepalen van het instromend volume voor komberging is alleen het tijdgemiddeld overslag-/overloopdebiet van belang en speelt dit aspect niet.

In de EurOtop-manual [Van der Meer, et al., 2018] is een relatie gelegd tussen de golfhoogte en het gemiddeld debiet. Hierbij moet bedacht worden dat:

- Dit met name van belang is voor kunstwerken waar het overslagdebiet rechtstreeks de bodembescherming belast (met name coupures). Voor kunstwerken waar het overslagdebiet in een watermassa achter het kunstwerk terecht komt is het volume per golf veel minder van belang.
- Het bij verificatie voor de hoogwatersituatie gaat om een proces van doorgaande erosie van de bodembescherming. Incidentele/lokale schade als gevolg van een enkele uitschieter in het overslagvolume hoeft nog direct niet tot falen te leiden (dit kan natuurlijk voor andere functies wel van belang zijn).
- Alle beschikbare formules om de kritieke sterkte van de bodembescherming te bepalen gebaseerd zijn op een tijdgemiddelde stroomsnelheid ter plaatse van de bodembescherming.

Al met al zijn er nauwelijks handvatten voor de ontwerper om het maximaal toelaatbare volume per individuele golf te bepalen. Als vuistregel kan worden aangehouden dat bij grote golfhoogten (bijvoorbeeld groter dan 3 m) voor het erosiemechanisme een minder groot gemiddeld kritiek golfoverslagdebiet moet worden aangehouden. Enig houvast is dan te vinden in paragraaf 3.3 van de EurOtop-manual.

Bij overlopen is het verschijnsel veel meer stationair en kunnen grote constante debieten ontstaan. Ook bij hoofdzakelijk overlopen in combinatie met golfoverslag zijn incidentele uitschieters in het overslagdebiet van ondergeschikt belang.

Versie 1.0: 2 juli 2025

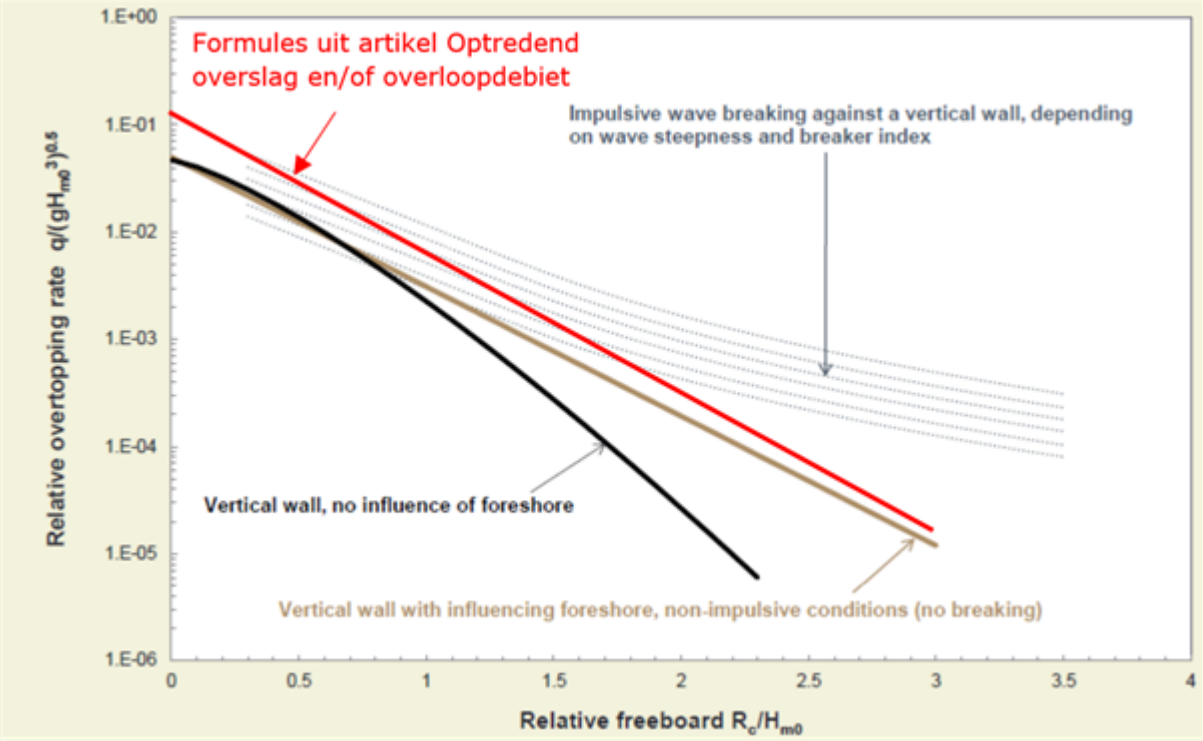
Gebruik van de EurOtop-manual

Wanneer EurOtop te gebruiken?

EurOtop [Van der Meer, et al., 2018] kent een breder toepassingsgebied dan de formules ter bepaling van het overslag-/overloopdebiet uit het artikel Optredend overslag- en/of overloopdebiet. EurOtop 2018 kan – naast de situatie verticale wand op diep water – ook worden gebruikt om het overslag-/overloopdebiet te bepalen als er geen sprake is van een verticale wand op relatief diep water.

Bij niet-brekende golven voor de constructie is het overigens niet noodzakelijk om EurOtop 2018 te gebruiken. Zoals uit Figuur 1 blijkt, zijn de formules uit Optredend overslag- en/of overloopdebiet – en die ook in Riskeer en Hydra-NL worden gebruikt – enigszins conservatief ten opzichte van de formules uit EurOtop 2018. EurOtop kan in deze situatie gebruikt worden om tot een scherper ontwerp of beoordeling te komen. De 'winst' die hiermee behaald kan worden in termen van benodigde kerende hoogte is orde 0,1 à 0,2 maal de golfhoogte in het deel van de grafiek waar de meeste constructies liggen (vrijboord (= hoogte van de kruin boven de lokale stilwaterstand) tussen 0,5 en 1,5 maal de golfhoogte).

Wanneer sprake is van brekende golven voor het kunstwerk dan zijn de formules uit Optredend overslag- en/of overloopdebiet met name bij grotere vrijboorden niet altijd conservatief. Aanbevolen wordt in dat geval expliciet te verifiëren of het nodig is gebruik te maken van EurOtop 2018. Onderstaande figuur kan hierbij als hulpmiddel gebruikt worden.



Figuur 1 Overzicht formules in grafische vorm voor verticale constructies uit EurOtop 2018 en artikel Optredend overslag- en/of overloopdebiet. Het vrijboord (R_c) is de hoogte van de kruin boven de lokale stilwaterstand. Basis: figuur 7.5 uit EurOtop 2018, de rode lijn is hieraan toegevoegd.

Omgang met verschillende constructievormen in EurOtop 2018

Met behulp van EurOtop 2018 kan het overslagdebiet voor een scala aan samengestelde constructies berekend worden. Voor de beoordeling en het ontwerp van waterkerende kunstwerken is met name het overslaand debiet bij verticale constructies (hoofdstuk 7 uit EurOtop 2018) van belang. Voor verticale wanden maakt EurOtop 2018 onderscheid tussen drie situaties:

1. Verticale wanden op relatief diep water. De golven veranderen nauwelijks door diepte-beperking. Dit komt verreweg het meeste voor bij waterkerende kunstwerken.
2. Verticale wanden met een vooroever waarop de golven zich aanpassen. Deze situatie komt bij kunstwerken zelden voor. Afhankelijk van de waterdiepte voor de constructie en de steilheid van de golven ontstaan brekende of niet-brekende golven tegen de verticale muur.

   2.1. Niet-brekende golven kunnen de bovenkant van de constructie bereiken en dan overslag geven, vergelijkbaar met verticale wanden op diep water. De overslagformule lijkt ook op die voor verticale wanden op diep water, maar het overslagdebiet ligt iets hoger.
   2.2. Brekende golven tegen de constructie gaan hoog de lucht in waarna een deel over de constructie heen gaat. Deze situatie geeft praktisch altijd golfoverslag, ongeacht de hoogte van de kering.

De optredende overslagdebieten per meter breedte voor de hierboven geschetste gevallen 1, 2a en 2b zijn gegeven in Figuur 1. De bijbehorende formules zijn gegeven in paragraaf 7.3.2 van EurOtop 2018.

Let op: ten behoeve van het ontwerpen worden formules horend bij de zogeheten 'design approach' in EurOtop 2018 gegeven. Voor beoordeling kunnen de formules horend bij de 'mean value approach' worden gebruikt. Daarnaast zijn in paragraaf 7.3.3 en verder diverse formules opgenomen voor samengestelde constructies.

Belastingstatistiek bij gebruik EurOtop-manual

Bij gebruik van de formules uit EurOtop 2018 moet altijd een golfhoogte ingevoerd worden. Hiervoor kan gebruik gemaakt worden van de illustratiepunten uit Riskeer of Hydra-NL (neem hiervoor de windrichting met de grootste kansbijdrage). Hoewel de formules uit de [Leidraad Kunstwerken, 2003] iets andere coëfficiënten hebben, zijn deze exact hetzelfde van opzet als de formules uit EurOtop 2018. Daardoor mag verwacht worden dat het illustratiepunt van een berekening met Riskeer of Hydra-NL nagenoeg hetzelfde zou zijn geweest als hierin de formules uit EurOtop 2018 opgenomen zouden zijn geweest. In de [Handleiding overstromingskansanalyse kunstwerken, 2023] worden concrete aanwijzingen gegeven hoe dit in een beoordeling of ontwerp verwerkt kan worden.

Versie 1.0: 2 juli 2025

2.4 Kombergingsmodel voor overslag en/of overloop

Kombergingsmodel voor overslag en/of overloop

Basismodel

Het model voor komberging is in de basis heel simpel: falen treedt op als het totale instromende volume door *overslag en/of overloop* over een of meerdere kunstwerken gedurende een hoogwatergebeurtenis groter is dan het volume dat zonder significante schade en/of slachtoffers in het achterliggende gebied kan worden geborgen. De faalkans voor de komberging $P_{f;komberging}$ wordt dus bepaald met de volgende formule:

$$P_{f;komberging} = P(V_{os/ol} > V_c) \quad (1)$$

De parameterdefinities staan onderaan formule 5.

Het totale instromend volume over het kunstwerk $V_{os/ol}$ wordt bepaald door het overslag-/overloopdebiet over de keermiddelen en waterkerende constructiedelen, de breedte van de keermiddelen en waterkerende constructiedelen en de tijdsduur waarover instroming plaats vindt. In formulevorm geldt:

$$V_{os/ol} = q_{os/ol} \cdot t_s \cdot B \quad (2)$$

Het maximaal aanwezige volume aan kombergend vermogen in het achterliggende gebied V_c wordt bepaald door het oppervlak van de komberging en de toelaatbare peilstijging op de komberging:

$$V_c = A_{kom} \cdot \Delta h_{kom} \quad (3)$$

Invullen in formule 1 levert:

$$P_{f;komberging} = P(V_{os/ol} > V_c) = P(q_{os/ol} \cdot t_s \cdot B_{kw} > A_{kom} \cdot \Delta h_{kom}) \quad (4)$$

Oftewel:

$$P_{f,komberging} = P\left(q_{os/ol} > \frac{A_{kom} \cdot \Delta h_{kom}}{t_s \cdot B}\right) \quad (5)$$

Waarin:

$P_{f;komberging}$ Faalkans voor de komberging [1/jaar].

$V_{os/ol}$ Inkomend volume als gevolg van overslag en/of overloop over het gesloten kunstwerk gedurende een hoogwaterperiode [m³].

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

$q_{os/ol}$ Gemiddeld optredend overslag-/overloopdebiet per strekkende meter [m³/s/m].

t_s Tijdsduur waarin overslag en/of overloop optreedt, ook wel aangeduid als stormduur [s].

B Breedte van het kunstwerk [m].

A_{kom} Kombergend oppervlak [m²].

Δh_{kom} Toegestane peilverhoging komberging [m].

Deze formule en de daarbij behorende parameters worden uitgebreid beschreven in hoofdstuk 10 van

de 'Werkwijzer ontwerpen waterkerende kunstwerken' [Van Bree, et al., 2018]. Voor meer informatie hierover wordt hiernaar verwezen.

Verfijningen

Op bovenstaand basismodel kunnen enkele verfijningen worden toegepast ten aanzien van het totaal instromend volume $V_{os/ol}$ en de bepaling van het beschikbare kombergend vermogen V_c per kunstwerk.

Verfijning model totaal instromend volume $V_{os/ol}$

Het instromende volume wordt bepaald door een sommatie van het tijdsafhankelijke instromende debiet. Deze tijdsafhankelijkheid wordt veroorzaakt doordat zowel de buitenwaterstand als de golfhoogte niet constant zijn gedurende een hoogwatergolf. Hiermee kan eenvoudig rekening worden gehouden door de duur van het hoogwater op te delen in een aantal tijdstappen en het instromend volume als gevolg van *overslag en/of overloop* tijdens al deze tijdstappen te sommeren:

$$V_{os/ol} = \sum_{i=1}^{t_s/\Delta t} q_{os/ol,i} \cdot \Delta t \cdot B \qquad (6)$$

Waarin:

$V_{os/ol}$ Totaal instromend volume [m^3].

$q_{os/ol,i}$ Gemiddeld optredend overslag-/overloopdebiet in tijdsinterval i [$m^3/s/m$].

t_s Tijdsduur waarin overslag en/of overloop optreedt, ook wel aangeduid als stormduur [s].

Δt Duur van een tijdsinterval [s].

B Breedte van het kunstwerk [m].

Ook middels integratie kan het instromende volume worden berekend. Eenvoudige benaderingen kunnen met behulp van bijvoorbeeld Excel worden gemaakt.

Bepaling beschikbare kombergend vermogen V_c per kunstwerk

Het maximaal aanwezige volume aan kombergend vermogen in het achterliggende gebied V_c wordt bepaald door het oppervlak van de komberging en de toelaatbare peilstijging op de komberging. Vaak is het zo dat het kombergend vermogen tijdens een hoogwater wordt aangesproken door meerdere kunstwerken tegelijkertijd. Bovendien kan ook door andere oorzaken dan hoogwater, zoals regen of gemalen die op de komberging uitslaan, een deel van het kombergend vermogen reeds worden opgesoupeerd. Door het uitwateren middels gemalen op het buitenwater kan ook extra kombergend vermogen beschikbaar komen tijdens een hoogwater.

Het kombergend vermogen kan door het meenemen van de diverse invloedsfactoren specifiek gemaakt worden voor één kunstwerk. Deze factoren kunnen voor het merendeel worden uitgedrukt in een volume dat de beschikbare komberging per kunstwerk positief dan wel negatief beïnvloedt. Hieronder is dat in de formule 2 toegevoegd, waardoor deze formule specifiek wordt gemaakt voor één kunstwerk.

$$V_{c,kw} = A_{kom} \cdot \Delta h_{kom} - \sum_{i=1}^{N} V_{kw,i} - V_{achterland} + V_{pompen} \quad (7)$$

Waarin:

$V_{c,kw}$ Kombergend volume per kunstwerk [m³].

A_{kom} Kombergend oppervlak [m²].

Δh_{kom} Toegestane peilverhoging komberging [m] .

$V_{kw,i}$ Instromend volume door of over kunstwerk 'i' dat aansluit ophetzelfde kombergend vermogen [m³].

N Aantal kunstwerken buiten het beschouwde kunstwerk dat op dezelfde komberging uitkomt [-].

$V_{achterland}$ Instromend volume als gevolg van aanvoer vanuit het achterland, bijvoorbeeld door regen of gemalen tijdens of al voorafgaand aan het daadwerkelijke hoogwater [m³].

V_{pompen} Volume dat gedurende een hoogwater kan worden weggepompt door inzet van bijvoorbeeld aanwezige gemalen of mobiele pompen [m³].

Versie 1.0: 2 juli 2025

2.5 Bodembeschermingsmodel voor overslag en/of overloop

Inleiding bodembeschermingsmodel voor overslag en/of overloop

Of een kunstwerk bezwijkt door het faalmechanisme *overslag en/of overloop* wordt theoretisch gezien in het licht van de overstromingsrisicobenadering alleen bepaald door het wel of niet overschrijden van de beschikbare komberging. Het op zichzelf bezwijken van het kunstwerk zonder dat het kombergend vermogen wordt overschreden leidt nog niet per se tot falen. Bezwijken van een kunstwerk leidt mogelijk wel tot het ontstaan van een bres en bresgroei, waardoor het kombergend vermogen eerder niet toereikend zal zijn. Daarom is het ook van belang om de sterkte van de bodembescherming te analyseren, waarbij mede vanuit praktisch oogpunt het uitgangspunt is dat wanneer het kunstwerk bezwijkt ook falen zal optreden. Daarnaast is het natuurlijk ook lastig uitlegbaar dat een bezweken kunstwerk vanuit het perspectief van waterveiligheid naar behoren heeft gefunctioneerd.

Bezwijken van het kunstwerk kan optreden na bezwijken van de bodembescherming achter het kunstwerk, het ontstaan van ontgrondingskuilen, het instabiel worden van het kunstwerk en vervolgens het bezwijken van het kunstwerk (zie Aanvullende processen leidend tot bezwijken kunstwerk door overslag en/of overloop). In de volgende artikelen wordt kort ingegaan op de Historie en recente kennisontwikkeling, waarna het model wordt behandeld waarmee Bezwijken van de bodembescherming kan worden berekend.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Historie en recente kennisontwikkeling bodembescherming

Al in de jaren dertig van de vorige eeuw zijn door Shields en Izbash belangrijke stabiliteitsrelaties afgeleid voor de stabiliteit van loskorrelige (granulaire) materialen onder stroming. Deze relaties vormden de basis voor verdere studie door andere onderzoekers. Dit heeft geleid tot nadere verfijningen van de relaties door Shields en Izbash. De (in Nederland meest gebruikte) formule van Pilarczyk, die in de jaren negentig is gepubliceerd, is hier een voorbeeld van. In de [Rock Manual, 2007]

en zijn voorlopers zijn deze relaties in de loop der tijd gepubliceerd.
Naar de stabiliteit van loskorrelige (granulaire) materialen onder stroming is in de loop der jaren veel onderzoek gedaan. Overige bodembeschermingstypen (denk aan blokkenmatten, steenasfaltmatten, mastiek, gepenetreerde materialen et cetera) zijn veel minder intensief beproefd. Met name in de jaren zeventig en tachtig is in Nederland onderzoek verricht naar de bodembeschermingstypen die men bij de Oosterscheldekering wilde toepassen (blokkenmatten, steenasfaltmatten en mastiek). Grootschalig, fundamenteel onderzoek ontbreekt echter. Binnen het onderzoeksprogramma's SBW (Sterkte en Belastingen Waterkeringen) en BOI (Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium) heeft op dit vlak geen kennisontwikkeling plaatsgevonden.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Model voor bezwijken bodembescherming door overslag en/of overloop

In de thans beschikbare modellen voor het bezwijken van de bodembescherming is het feitelijk heel simpel: falen treedt op als de optredende stroomsnelheid bij instroming over het kunstwerk groter is dan de kritieke stroomsnelheid van de aanwezige bodembescherming. De faalkans voor de bodembescherming $P_{f;bodembescherming}$ wordt dus bepaald met de volgende formule:

$$P_{f;bodembescherming} = P\left(u_{optredend} > u_c\right) \quad (1)$$

De parameterdefinities staan in dit artikel onderaan formule 6.

De kritieke stroomsnelheid met betrekking tot de bodembescherming is afhankelijk van de opbouw van de bodembescherming. Ter bepaling hiervan zijn meerdere modellen beschikbaar die allemaal hun eigen specifieke eigenschappen en randvoorwaarden kennen. In hoofdstuk 9 van de 'Werkwijzer ontwerpen waterkerende kunstwerken' [Van Bree, et al, 2018] worden voor de gangbare typen bodemverdediging modellen en de daarbij behorende parameters uitgebreid beschreven. Voor meer informatie hierover wordt hiernaar verwezen.

De optredende stroomsnelheid over de bodembescherming wordt bepaald door het totale overslag-/overloopdebiet over de keermiddelen en waterkerende constructiedelen en het beschikbare wateroppervlak waarover dit inkomende debiet verdeeld wordt. In formulevorm geldt:

$$Q_{os/ol} = q_{os/ol} \cdot B \quad (2)$$

$$A = (h_{bi} - h_{bb}) \cdot B_{sv} \quad (3)$$

$$u_{optredend} = \frac{Q_{os/ol}}{A} = \frac{q_{os/ol} \cdot B}{(h_{bi} - h_{bb}) \cdot B_{sv}} \quad (4)$$

Invullen in formule 1 levert:

$$P_{f;bodembescherming} = P\left(u_{optredend} > u_c\right) = P\left(\frac{q_{os/ol} \cdot B}{(h_{bi} - h_{bb}) \cdot B_{sv}} > u_c\right) \quad (5)$$

Oftewel:

$$P_{f,bodembescherming} = P\left(q_{os/ol} > \frac{u_c \cdot (h_{bi} - h_{bb}) \cdot B_{sv}}{B}\right) \quad (6)$$

Waarin:

$P_{f;bodembescherming}$ Faalkans voor de bodembescherming [1/jaar].

$u_{optredend}$ De optredende stroomsnelheid bij overslag en/of overloop [m/s].

u_c Kritieke stroomsnelheid bodembescherming [m/s].

$Q_{os/ol}$ Optredend overslag-/overloopdebiet over het kunstwerk bij een bepaalde waterstand [m³/s].

$q_{os/ol}$ Gemiddeld optredend overslag-/overloopdebiet per strekkende meter [m³/s/m].

B Breedte van het kunstwerk [m].

B_{sv} Stroomvoerende breedte bodembescherming [m].

A Natte oppervlak ter plaatse van bodembescherming [m²].

h_{bi} Binnenwaterstand [m t.o.v. NAP].

h_{bb} Hoogte bovenkant bodembescherming [m t.o.v. NAP].

Versie 1.0: 2 juli 2025

Aanvullende processen leidend tot bezwijken kunstwerk door overslag en/of overloop

Bezwijken van het kunstwerk door *overslag en/of overloop* treedt op als na het bezwijken van de bodembescherming achter het kunstwerk er vervolgens ook vervolggebeurtenissen optreden (zie ook Beschrijving faalproces overslag en/of overloop). In dit artikel wordt nader ingegaan op het ontstaan van ontgrondingskuilen (A), het instabiel worden van het kunstwerk (B) en vervolgens het bezwijken van (delen van) het kunstwerk (C).

Onder het bezwijken van het kunstwerk wordt hier het volgende verstaan:

Het dusdanig verzakken of kantelen van (delen van) de constructie dat er sprake is van een onbeheersbare situatie, waardoor een substantiële hoeveelheid water het achterland in kan stromen.

In zijn algemeenheid kan worden opgemerkt dat de kans op het bezwijken van het kunstwerk na bezwijken van de bodembescherming als gevolg van bovenstaande processen zeer lastig is in te schatten.

A. Ontgrondingskuilen

Door het ontstaan van ontgrondingskuilen kan het evenwicht van de constructie worden beïnvloed. Dit is afhankelijk van de afmetingen (diepte en breedte) en de locatie van de ontgrondingskuilen ten opzichte van het kunstwerk. Ook speelt de tijd een belangrijke rol, omdat ontgrondingskuilen zich in eerste instantie relatief snel ontwikkelen, maar het lang kan duren voordat ze de maximale diepte bereiken. Dit betekent dat het ontstaan van een ontgrondingskuil nog niet betekent dat deze dusdanige vormen aanneemt dat binnen een hoogwaterperiode instabiliteit van de constructie optreedt.

Voor het berekenen van ontgrondingskuilen kan bijvoorbeeld gebruik worden gemaakt van hetgeen hierover geschreven is in hoofdstuk 16 van 'Ontwerp van schutsluizen' [Vrijburcht, 2000]. Meer

achtergronden en nadere beschrijvingen kunnen worden gevonden in de 'Scour Manual' [Hoffmans en Verheij, 2021].

B. Instabiel worden kunstwerk

Wanneer een ontgrondingskuil zich in de nabijheid van het kunstwerk manifesteert, kan dit leiden tot het verlies van evenwicht van (delen van) de constructie. In welke mate dit optreedt is naast de kenmerken van de ontgrondingskuil ook afhankelijk van de funderingsconstructie (palen, damwandschermen) die er onder het kunstwerk aanwezig is.

Er kan sprake zijn van een directe instabiliteit, waarbij als gevolg van de ontgrondingskuil bijvoorbeeld het horizontale evenwicht van de constructie verloren gaat en het kunstwerk horizontaal verschuift. Een dergelijke invloed op de constructie kan in eerste instantie globaal worden bepaald via reguliere evenwichtsbeschouwingen van de ontstane situatie na het ontstaan van de ontgrondingen. Met behulp van geavanceerde rekenprogramma's (bijvoorbeeld Plaxis) is het soms mogelijk om nog nader te analyseren of deze vorm van directe instabiliteit optreedt.

Een vorm van indirecte instabiliteit is wanneer de ontgrondingskuil ertoe leidt dat de weerstand tegen *piping* verminderd, waardoor onder- of achterloopsheid kan gaan optreden. Als gevolg hiervan wordt het kunstwerk verder ondermijnd en komen bijvoorbeeld kantel- en/of verticale instabiliteit in beeld.

C. Bezwijken kunstwerk

Wanneer instabiliteit optreedt van (delen van) het kunstwerk wil dat nog niet altijd zeggen dat dit leidt tot instroming van een groot volume water. Wanneer bijvoorbeeld het uitstroomwerk van een lange inlaatduiker instabiel wordt en bezwijkt, is de doorstroomopening en het buitendijkse instroomwerk nog niet bezweken en groeit de instroming niet door het bezwijken van het uitstroomwerk. Daarvoor moet dan weer verdere erosie van het dijklichaam plaatsvinden waarin de inlaatduiker is opgenomen.

Versie 1.0: 2 juli 2025

2.6 Model voor sterkte keermiddel onder dynamische belastingen

Model voor sterkte keermiddel onder dynamische belastingen

Het model voor de sterkte van het keermiddel onder dynamische belastingen is niet echt een model en bestaat uit niet meer dan een vergelijking van het optredend overslag-/overloopdebiet met het kritieke debiet waarbij het keermiddel bezwijkt als gevolg van dynamische effecten door *overslag en/of overloop*. De faalkans $P_{f;keermiddel}$ wordt dus bepaald met de volgende formule:

$$P_{f;keermiddel} = P\left(q_{os/ol} > q_{c,km}\right) \quad (1)$$

Waarin:

$P_{f;keermiddel}$ Faalkans keermiddel als gevolg van dynamische belastingen [-].

$q_{os/ol}$ Gemiddeld optredend overslag-/overloopdebiet per strekkende meter [$m^3/s/m$].

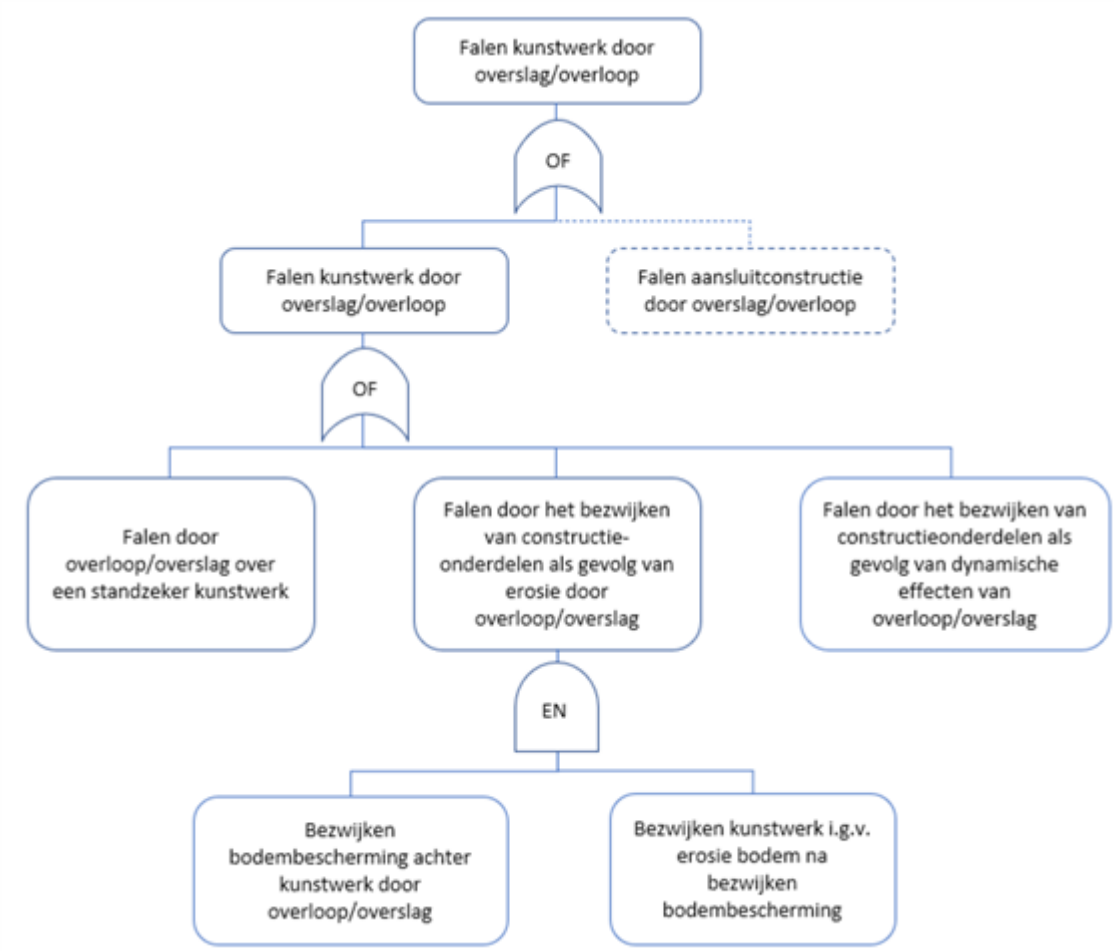
$q_{c,km}$ Kritiek tijdgemiddeld overslag-/overloopdebiet met betrekking tot sterkte keermiddel onder dynamische belastingen [$m^3/s/m$].

Versie 1.0: 2 juli 2025

2.7 Bijlagen

Bijlage A - Afleiding formule kans op falen door overslag en/of overloop

In Figuur 1 is de gangbare modellering van het faalmechanisme *overslag en/of overloop* ten behoeve van de faalkansbepaling opgenomen. Voor meer informatie wordt verwezen naar de [Handleiding overstromingskansanalyse kunstwerken, 2023].



Figuur 1 Gangbare modellering van het faalmechanisme overslag en/of overloop bij kunstwerk.

De definitie van falen in bovenstaande foutenboom is de volgende:

- *Falen als gevolg van overslag en/of overloop vindt plaats indien er door golfoverslag en/of overloop zoveel water over het gesloten kunstwerk of aansluitconstructie gaat dat dit leidt tot substantiële schade of slachtoffers (overstromingsgevolgen). Dit wordt bij kunstwerken ook wel aangeduid als 'overschrijden van het kombergend vermogen'.*

De faalkans voor *overslag en/of overloop* $P(F_{KW,HT})$ volgt uit de faalboom in Figuur 1. Hierin zijn de volgende vier deelfaalmechanismen te onderscheiden:

1. Bezwijken van de bodembescherming achter het kunstwerk (grenstoestandsfunctie Z_{HT1}).
2. Bezwijken van het kunstwerk als geheel nadat bezwijken van de bodembescherming heeft plaatsgevonden (grenstoestandsfunctie Z_{HT2}).
3. Overschrijden van het kombergend vermogen bij een standzeker kunstwerk (grenstoestandsfunctie Z_{HT3}).
4. Bezwijken keermiddelen door dynamische effecten bij overslag en/of overloop (grenstoestandsfunctie Z_{HT4}).

Uit de faalboom in Figuur 1 is op te maken dat geldt:

$$P(F_{KW,HT}) = P(\{Z_{HT1} < 0\ EN\ Z_{HT2} < 0\}\ OF\ Z_{HT3} < 0\ OF\ Z_{HT4} < 0) \quad (1)$$

Als wordt verondersteld dat de kans op het bezwijken van een kunstwerk na erosie van de bodembescherming gelijk is aan 1 dan reduceert formule 1 tot:

$$P(F_{KW,HT}) = P(Z_{HT1} < 0\ OF\ Z_{HT3} < 0\ OF\ Z_{HT4} < 0) \quad (2)$$

Waarin:

$P(F_{KW,HT})$ Kans op een overstroming met substantiële schade of slachtoffers door overslag en/of overloop [1/jaar].

$P(Z_{HT1}<0)$ Kans op bezwijken bodembescherming door overslag en/of overloop [1/jaar].

$P(Z_{HT2}<0)$ Kans op een overstroming met substantiële schade of slachtoffers na bezwijken kunstwerk in geval van bezweken bodembescherming [-].

$P(Z_{HT3}<0)$ Kans op een overstroming met substantiële schade of slachtoffers na overschrijden van het kombergend vermogen door overslag en/of overloop bij een standzeker kunstwerk [1/jaar].

$P(Z_{HT4}<0)$ Kans op een overstroming met substantiële schade of slachtoffers na bezwijken keermiddelen onder dynamische belastingen door overslag en/of overloop [1/jaar].

De grenstoestandsfuncties (Z-functies) behorend bij de deelfaalmechanismen 1 (bezwijken bodembescherming), 3 (overschrijden kombergend vermogen bij standzeker kunstwerk) en 4 (bezwijken keermiddelen door dynamische belastingen) zijn als volgt gedefinieerd:

$$Z_{HT1} = Q_c - Q_{os/ol} = q_{c,bb} \cdot B_{sv} - q_{os/ol} \cdot B = u_c \cdot (h_{bi} - h_{bb}) \cdot B_{sv} - q_{os/ol} \cdot B \quad (3)$$

$$Z_{HT3} = V_c - V_{os/ol} = A_{kom} \cdot \Delta h_{kom} - t_s \cdot q_{os/ol} \cdot B \quad (4)$$

$$Z_{HT4} = q_{c,km} - q_{os/ol} \quad (5)$$

Onder de vereenvoudigende aannamen dat alle sterktetermen (de linker termen in de vergelijkingen) in formules 3, 4 en 5 (vrijwel) deterministisch zijn en het belastingverloop (waterstand + golven) blokvormig is, kan formule 2 ten slotte worden herschreven tot:

$$P(F_{KW,HT}) \approx P\left(q_{os/ol} > \min\left\{\frac{u_c \cdot (h_{bi} - h_{bb}) \cdot B_{sv}}{B}\ ;\ \frac{A_{kom} \cdot \Delta h_{kom}}{t_s \cdot B}; q_{c,km}\right\}\right) \quad (6)$$

Waarin:

Q_c Kritiek debiet waarbij de bodembescherming bezwijkt [m^3/s].

$Q_{os/ol}$ Optredend overslag-/overloopdebiet over het kunstwerk bij een bepaalde waterstand [m^3/s].

$q_{c,bb}$ Kritiek overslag-/overloopdebiet met betrekking tot bodembescherming [$m^3/s/m$].

$q_{os/ol}$ Gemiddeld overslag-/overloopdebiet [$m^3/s/m$].

$q_{c,km}$ Kritiek tijdgemiddeld overslag-/overloopdebiet met betrekking tot sterkte keermiddel onder dynamische belastingen [$m^3/s/m$].

B_{sv} Stroomvoerende breedte bodembescherming [m].

B Breedte van het kunstwerk [m].

u_c Kritieke stroomsnelheid bodembescherming [m/s].

h_{bi} Binnenwaterstand [m t.o.v. NAP].

h_{bb} Hoogte bovenkant bodembescherming [m t.o.v. NAP].

V_c Maximaal aanwezige volume aan kombergend vermogen in het achterland waarbij geen significante gevolgen optreden [m^3].

$V_{os/ol}$ Inkomend volume als gevolg van overslag/overloop over het gesloten kunstwerk gedurende een hoogwaterperiode [m^3].

A_{kom} Kombergend oppervlak [m^2].

Δh_{kom} Toegestane peilverhoging komberging [m] .

t_s Tijdsduur waarin overslag en/of overloop optreedt, ook wel aangeduid als stormduur [s].

Voor grenstoestandsfunctie 2 (kans op bezwijken kunstwerk gegeven bezwijken bodembescherming) wordt als eerste benadering doorgaans aangehouden dat dit mechanisme altijd optreedt zodra de bodembescherming is bezweken. Aanscherping hiervan is mogelijk maar vergt een specialistische beschouwing. Het benutten van deze eventueel aanwezige aanvullende sterkte past overigens beter bij beoordelen dan bij ontwerpen.

Versie 1.0: 2 juli 2025

3. Faalmechanisme piping bij kunstwerk

Inleiding faalmechanisme piping bij kunstwerk

Onder een kunstwerk kunnen geconcentreerde kwelstromen ontstaan met uitspoeling van materiaal uit de ondergrond tot gevolg. Dit is in principe voor alle kunstwerken relevant, tenzij uitspoeling van gronddeeltjes op andere manieren wordt voorkomen (bijvoorbeeld middels een filterconstructie).

De komende paragrafen (zie gerelateerde artikelen) gaan dieper in op het falen van een waterkering als gevolg van piping.

Versie 1.0: 2 juli 2025

3.1 Fenomenologische beschrijving falen door piping bij kunstwerk

Beschrijving faalproces piping bij kunstwerk

Falen door *piping* vindt plaats als uitspoelen van gronddeeltjes optreedt ten gevolge van een geconcentreerde kwelstroom, waardoor holle ruimten ontstaan *onder* (onderloopsheid) of *naast* (achterloopsheid) een kunstwerk:

- Onder *achterloopsheid* wordt verstaan de vorming van kanaaltjes of holle ruimten aan de zijkant

van een kunstwerk als gevolg van het uitspoelen van grond. De maatgevende kwelweg is meestal zuiver horizontaal gericht (een kwelstroom langs het kunstwerk op het grensvlak van een cohesieve laag), maar kan ook verticale componenten bevatten (denk aan een uittrede onder een binnendijks scherm). In de praktijk wordt achterloopsheid echter vaak 1 op 1 gekoppeld aan situaties met een zuiver horizontale kwelweg.

- *Onderloopsheid* betreft het ontstaan van holle ruimten onder een kunstwerk als gevolg van een geconcentreerde kwelstroom waarbij gronddeeltjes worden meegevoerd. Hierbij loopt de kwelstroom onder het kunstwerk door op het grensvlak van constructie en zand. Onder een kunstwerk zijn doorgaans kwelschermen aanwezig, waardoor de kwelstroom ook verticale componenten omvat. Dit hoeft echter niet altijd het geval te zijn. Denk aan lange duikers en leidingen waarbij geen kwelschermen aanwezig zijn. In de praktijk wordt onderloopsheid echter vaak 1 op 1 gekoppeld aan situaties met een (deels) verticale kwelweg.

Het erosieproces hoeft niet altijd tot falen te leiden. Het kan weer stoppen als het waterstandsverschil niet groot genoeg is of niet lang genoeg aanhoudt om de erosie op gang te houden. Als het proces niet stopt, ontstaat een proces van terugschrijdende erosie waarbij deze holle ruimten uitgroeien tot een doorgaand kanaal onder het kunstwerk. Het erosieproces gaat dan ongecontroleerd verder en de erosie van gronddeeltjes onder en/of naast het kunstwerk neemt sterk toe. Hierdoor kan door kantelen of afschuiven de overall-stabiliteit van het hele kunstwerk onvoldoende worden, of een proces ontstaan waarbij opeenvolgend delen van het kunstwerk constructief bezwijken met het bezwijken van het totale kunstwerk als uiteindelijke gevolg. Tevens kan het zo zijn dat het kunstwerk wel blijft staan, maar de aansluitende dijk inzakt als gevolg van het erosieproces en uiteindelijk bezwijkt. Uiteindelijk kan hierdoor een bres in de waterkering ontstaan. En tenslotte kan zelfs bij een standzeker kunstwerk en dijklichaam een overstroming optreden door de open verbinding met het buitenwater onder het kunstwerk door.

Hoewel het in de praktijk niet vaak voorkomt, kan zich direct achter het kunstwerk ter plaatse van het uittredepunt een afsluitende, cohesieve laag bevinden. Deze laag moet eerst opbarsten voordat uitspoeling op kan treden (analoog aan het pipingproces bij dijken).

Falen van de waterkering treedt dus op als:

zich een hoogwater aandient en het kunstwerk (in ieder geval partieel) is gesloten.

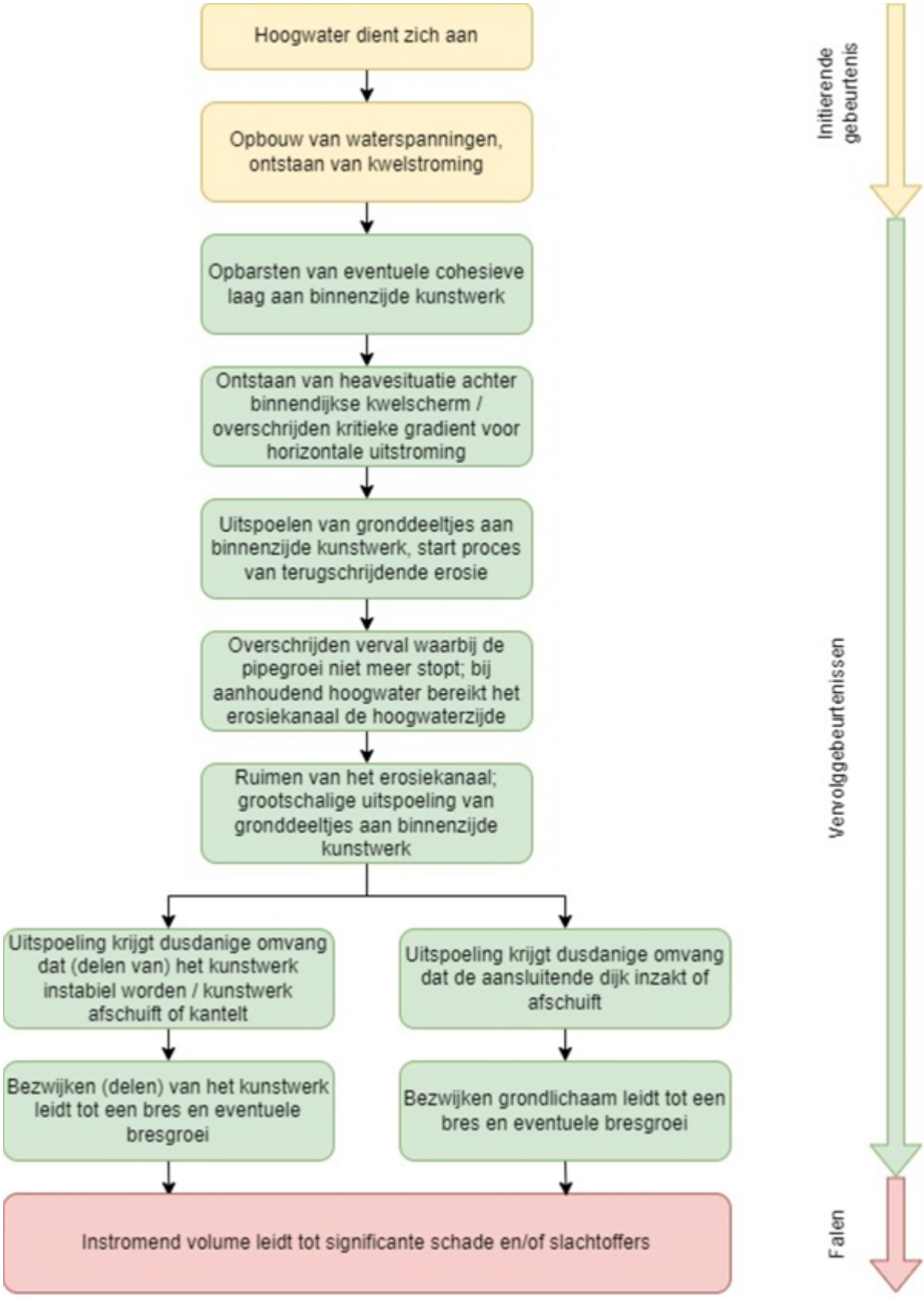
EN ingeval aan de binnenzijde van het kunstwerk een afsluitende laag aanwezig is: de waterspanningen aan de binnenzijde van het kunstwerk zo ver oplopen dat deze afsluitende laag opbarst.

EN als gevolg van een geconcentreerde kwelstroming zodanige uitspoeling van gronddeeltjes onder (onderloopsheid) en/of rondom (achterloopsheid) het kunstwerk optreedt dat een doorgaand erosiekanaal (pipe) ontstaat, waarna grootschalige erosie van gronddeeltjes optreedt.

EN het kunstwerk zelf bezwijkt als gevolg van afschuiven of kantelen van het kunstwerk of het successievelijk bezwijken van delen van het kunstwerk, met als gevolg een (voortschrijdende) bres in de waterkering. Aangenomen wordt dat deze situatie altijd leidt tot substantiële schade en/of slachtoffers (overstroming)[1].

OF de aansluitende dijk inzakt/afschuift als gevolg van het erosieproces en uiteindelijk bezwijkt, met als gevolg een (voortschrijdende) bres in de waterkering. Aangenomen wordt dat deze situatie altijd leidt tot substantiële schade en/of slachtoffers (overstroming)[1].

Het faalproces is in Figuur 1 nader uitgewerkt.



Figuur 1 Faalproces piping bij kunstwerk.

Tot slot wordt opgemerkt dat de term ‘piping’ in Nederland als synoniem voor terugschrijdende erosie wordt gebruikt, omdat vooral dat pipingmechanisme voor Nederland van belang is. Onder de

noemer piping vallen internationaal echter verschillende vormen van interne erosie. De twee belangrijkste mechanismen zijn terugschrijdende erosie en suffosie. Suffosie is het fenomeen dat alleen de fijnere fractie tussen de grovere fractie wordt weggespoeld en waarbij (althans in eerste instantie) het korrelskelet in stand blijft. Suffosie kan alleen optreden in zand met een sterk niet-uniforme korrelverdeling. Het Nederlandse zand is relatief fijnkorrelig en uniform. Dit betekent dat suffosie in Nederland vrijwel geen rol speelt en van deze twee mechanismen alleen terugschrijdende erosie relevant is. Verder is voor kunstwerken geconcentreerde lekerosie relevant (denk aan een spleet tussen kunstwerk en ondergrond). In hoofdstuk 4 van het Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen [Förster, et al., 2012] wordt hier nader op ingegaan.
[1] In principe kan een kunstwerk bezwijken als gevolg piping, zonder dat dit tot overstromingsgevolgen (substantiële schade en/of slachtoffers) leidt. Dat komt dan doordat de komberging heel groot is en de bresgroei beperkt blijft. In de praktijk is het erg lastig om dit aannemelijk te maken, vandaar de aanname dat bezwijken van delen van het kunstwerk altijd leidt tot overschrijden van het kombergend vermogen. Indien gewenst kan dit aspect natuurlijk door de beoordelaar of ontwerper alsnog in de beoordeling of het ontwerp betrokken worden.

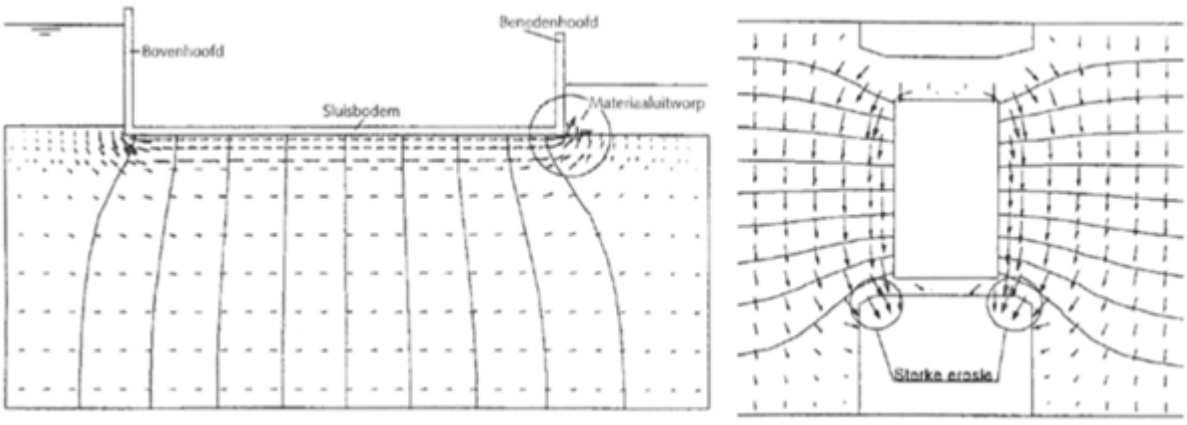
Versie 1.0: 2 juli 2025

Nadere beschrijving faalproces piping bij kunstwerk

Dit artikel beschrijft het faalproces in meer detail, zie ook Beschrijving faalproces piping bij kunstwerk. Vertrekpunt hierbij is dat het kunstwerk deels of geheel gesloten is en hierdoor een verval over het kunstwerk kan ontstaan.

Initiërende gebeurtenis

Het faalproces start met een toename van de hydraulische belasting op het kunstwerk. De belasting op het kunstwerk wordt gevormd door het verval over het kunstwerk, zijnde het verschil tussen de buitenwaterstand en de waterstand aan de binnenzijde van het kunstwerk. Bij toenemend verval neemt de grondwaterstroming onder en/of naast het kunstwerk toe. Dit leidt tot een geconcentreerde grondwaterstroming onder en/of naast het kunstwerk. In het voorbeeld van een sluis in Figuur 1 is links te zien dat het water vlak onder de bodem van het kunstwerk sneller zal stromen (pijlen dichter op elkaar) dan dieper in de ondergrond. Ter hoogte van het benedenhoofd komt het water weer aan de oppervlakte en is er sprake van concentratie van grondwaterstroming. Hier is het gevaar voor erosie dus het grootst en begint het pipingproces. In Figuur 1 is rechts een bovenaanzicht van hetzelfde kunstwerk getekend. Vlak naast het kunstwerk treedt een concentratie aan stroomlijnen op, waar erosieproblemen zich het eerste voor zullen doen als er geen maatregelen zijn getroffen.



Figuur 1 Links: onderloopsheid bij een kunstwerk (schematisatie langsdoorsnede). Rechts: achterloopsheid bij een kunstwerk (schematisatie bovenaanzicht). Beide figuren zijn ontleend aan

[Vrijburcht, 2000].
Mocht er direct achter het kunstwerk ter plaatse van het uittredepunt een afsluitende, cohesieve laag zitten dan moet deze laag eerst opbarsten voordat uitspoeling op kan treden (analoog aan het pipingproces bij dijken).

Naast het verval over het kunstwerk – veroorzaakt door het verschil tussen de waterstand aan buiten- en binnenzijde van het kunstwerk – speelt de belastingduur uiteraard ook een rol. De opbouw van waterspanningen in de ondergrond vraagt immers tijd en het verval over het kunstwerk moet dus lang genoeg in stand blijven om een grondwaterstroming te laten ontstaan. Hier wordt in paragraaf 'Tijdsafhankelijkheid' van dit artikel nader op ingegaan.

Vervolggebeurtenissen en falen van het kunstwerk

De weerstand tegen piping bestaat uit twee componenten: de lengte van de kwelwegen onder en/of naast het kunstwerk en de eigenschappen van de ondergrond waarop het kunstwerk gefundeerd is. Beide dragen bij aan de weerstand die de grondwaterstroming onder en naast het kunstwerk ondervindt.

De kwelweglengte is direct gerelateerd aan het kunstwerk zelf en wordt gevormd door de mate waarin de kwelstroom wordt geforceerd een langere route af te leggen door de ondergrond (kwelweg). Dit wordt bepaald door de geometrie en funderingswijze van het kunstwerk. De hoofdafmetingen van het kunstwerk worden doorgaans bepaald door de functie; met behulp van kwelschermen onder en naast het kunstwerk kan de kwelweg vervolgens verlengd worden. De fundatiewijze bepaalt of het deel van de kwelweg dat onder de constructie zit ook bijdraagt aan de weerstand die de grondwaterstroming onder en naast het kunstwerk ondervindt. Bij kunstwerken die op staal zijn gefundeerd is dit wel het geval. Bij kunstwerken die op palen zijn gefundeerd kan het voorkomen dat de ondergrond wel zakt en het kunstwerk niet. Hierdoor ontstaat een spleet tussen kunstwerk en ondergrond, waardoor de weerstand over dit deel van de kwelweg sterk afneemt. Dit deel van de kwelweg draagt dan veel minder bij aan de weerstand die de grondwaterstroming onder en naast het kunstwerk ondervindt.

De weerstand die de grondwaterstroming onder en naast het kunstwerk ondervindt is ook sterk afhankelijk van het materiaal waaruit de ondergrond bestaat. In cohesieve, slecht doorlatende grondlagen is de grondwaterstroming zeer klein. Daarnaast zorgt de onderlinge samenhang ervoor dat er geen gronddeeltjes uitspoelen. Cohesieve, slecht doorlatende grondlagen zijn daarom niet gevoelig voor piping. In niet-cohesieve, goed doorlatende grondlagen (zand, grind) is de grondwaterstroming veel groter. Daarnaast is er geen onderlinge samenhang tussen de deeltjes, zodat gronddeeltjes makkelijk door de grondwaterstroming kunnen worden meegevoerd.

De mate waarin niet-cohesieve grondlagen gevoelig zijn voor piping hangt af van de korreldiameter. Hierin spelen twee tegengestelde effecten een rol. De weerstand van de individuele korrel tegen uitspoelen neemt toe als de korrelgrootte toeneemt. De doorlatendheid van de ondergrond, en hiermee de grondwaterstroming, neemt echter ook toe bij toenemende korreldiameter. Het eerste (weerstandbiedende) effect is echter sterker, waardoor fijnkorrelige materialen gevoeliger zijn voor piping dan grofkorrelige.

Het faalproces van initiatiefase tot bezwijkfase

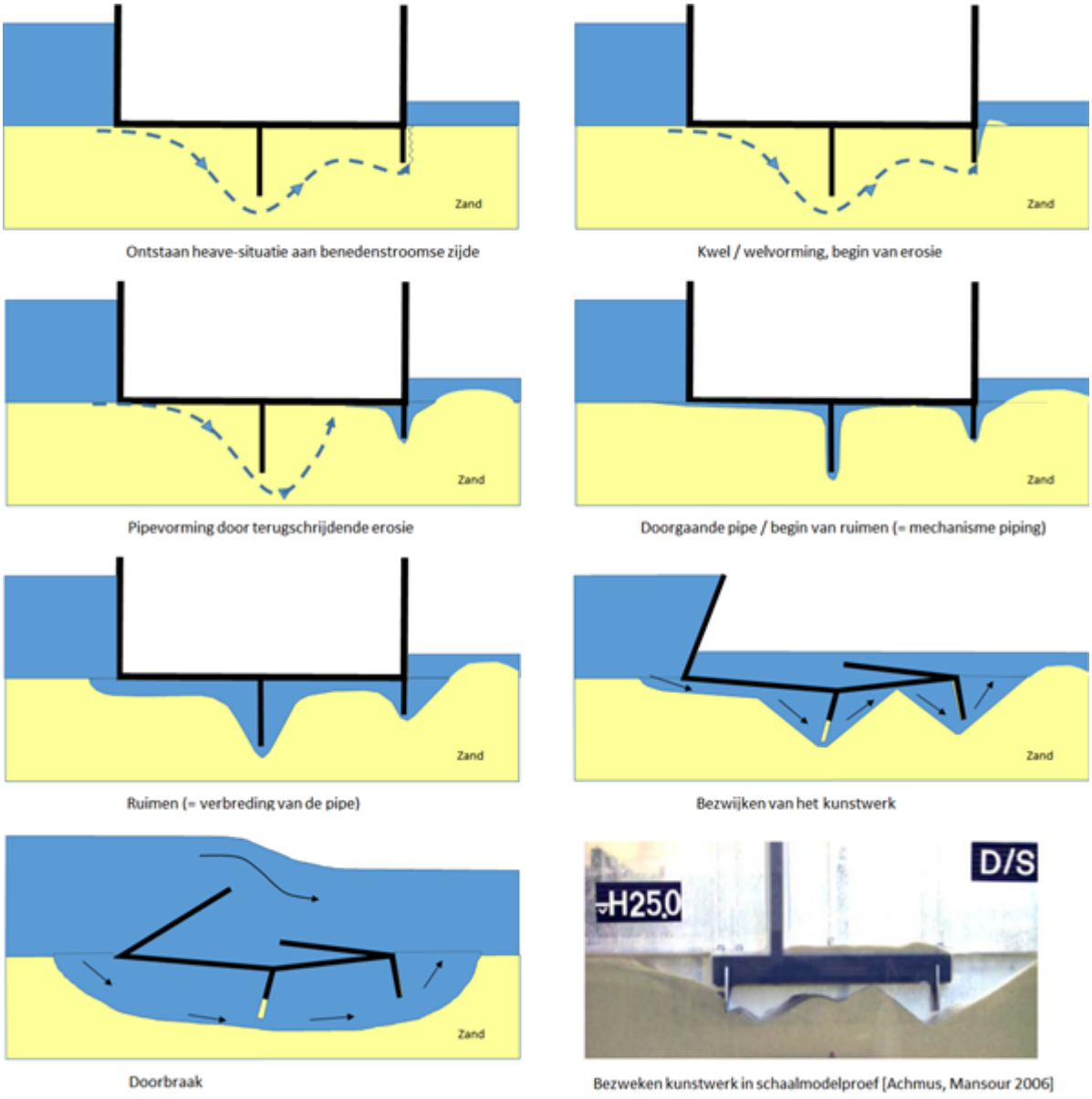
De grondwaterstroming onder en/of naast het kunstwerk neemt toe als bij stijgende buitenwaterstanden het verval over het kunstwerk toeneemt. Ter plaatse van het uittredepunt van de geconcentreerde grondwaterstroming (zie Figuur 1) neemt het debiet en hiermee de stroomsnelheid van het uittredende grondwater toe. In eerste instantie gaat het om 'schoon' grondwater en worden geen gronddeeltjes meegenomen. Wanneer de grondwaterstroming krachtig genoeg is dan worden

de volgende processen in gang gezet (zie Figuur 2):

- Erosie van de zandlaag.
  Bij kunstwerken met een benedenstrooms kwelscherm ontstaat een situatie waarbij het zand tussen de onderzijde van het kwelscherm en het uittredepunt in gefluïdiseerde toestand raakt (heave, zie plaatje linksboven in Figuur 2). Individuele zandkorrels worden meegevoerd en rondom de uitstroomopening van de wel afgezet. Dit wordt welvorming genoemd, zie plaatje rechtsboven in Figuur 2. In de zandlaag ontstaat hierdoor een holle ruimte ter plaatse van het uittredepunt, die zich later bovenin de zandlaag direct onder het kunstwerk in vorm van kanaaltjes (pipes) in bovenstroomse richting (richting buitenwater) uitbreidt. Dit wordt terugschrijdende erosie genoemd en is schematisch weergegeven het derde plaatje van Figuur 2.
- Het ontstaan van doorgaande pipes.
  Bij voldoende groot verval over het kunstwerk blijven de erosiekanaaltjes groeien, tot ze het buitenwater bereiken. Er is dan een open verbinding tussen buitenwater en uittredepunt ontstaan, waardoor het kunstwerk onderloops is geworden. Het mechanisme onderloopsheidof *piping* is daarmee een feit.
  Een hypothese is dat de kanaalvorming in eerste instantie een reducerende werking op het erosieproces heeft, doordat stromingsgradiënten afnemen zodat (bij gelijk blijvende buitenwaterstand) de terugschrijdende erosie tot stilstand komt. Wanneer het verval over de kering echter groot genoeg is, zal de terugschrijdende erosie zich zover doorzetten dat het erosieproces niet gereduceerd wordt, maar juist versterkt. Het verval, waarbij het proces van terugschrijdende erosie nog net stopt, wordt het kritieke verval genoemd. In de IJkdijkproeven is echter waargenomen dat als eenmaal een zandmeevoerende wel is ontstaan, het pipingproces niet meer tot stilstand komt. Bij gelijkblijvend verval stopt het zandtransport niet meer en de lengte van het kanaal blijft toenemen. Er ontstaat dus geen evenwichtssituatie. Dit lijkt in tegenspraak met de eerste hypothese.
- Verbreden van het doorgaande kanaal in benedenstroomse richting.
  Zodra het kanaaltje contact maakt met het water aan de bovenstroomse zijde van het kunstwerk (buitenzijde) treedt het ruimproces op. Onder ‘ruimen’ wordt het proces verstaan waarbij het kanaaltje door een drukgolf, die met de stroom meeloopt, vanaf de bovenstroomse naar de benedenstroomse kant versneld verder gaat eroderen. Deze drukgolf ontstaat als gevolg van het verdwijnen van het laatste stukje weerstand aan de bovenstroomse zijde van het kunstwerk.
- Bezwijken van het kunstwerk of naastliggende grondlichaam.
  Zodra het ruimproces de benedenstroomse zijde heeft bereikt, resulteert dit in een forse toename van zandtransport en debiet. In geval van achterloopsheid zal naast zand ook klei meespoelen en er vormt zich een zogenaamde modderfontein. Water stroomt met groot geweld door het geruimde kanaal. In dat geval ontstaat een onbeheersbaar proces dat mogelijk leidt tot bezwijken van (delen van) het kunstwerk.
  In geval van achterloopsheid zal het proces vergelijkbaar zijn met dat bij dijken. Bij dijken treden in de dijk grote scheuren op en de dijk zakt in elkaar. Dit leidt uiteindelijk tot verlies van het waterkerende vermogen van de waterkering met bresvorming tot gevolg.
  Bij onderloopsheid van het kunstwerk moet als gevolg van erosie van grond onder en langs het kunstwerk de overall-stabiliteit van het kunstwerk onvoldoende worden, waarna kantelen of afschuiven van het hele kunstwerk optreedt. Ook kan een proces in gang worden gezet waarbij successievelijk delen van het kunstwerk constructief bezwijken, met het falen van de kering als uiteindelijk gevolg. Bij voldoende hoge waterstand zal dan een bres in de waterkering ontstaan ter plaatse van het kunstwerk.

In Figuur 2 is dit proces gevisualiseerd voor het ontstaan van een doorgaande pipe onder het kunstwerk (onderloopsheid). Indien sprake is van pipevorming naast het kunstwerk op het grensvlak met een cohesieve laag (achterloopsheid) is het verloop van het pipingproces analoog aan het verloop van het pipingproces bij dijken. In paragrafen 4.3 en 4.6 van het Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen [Förster, et al., 2012] wordt het pipingproces voor dijken in meer detail beschreven.

Bovenstaande beschrijving is gebaseerd op een kunstwerk dat zich in een zandige laag bevindt. Indien het kunstwerk is opgenomen in een ondoorlatend pakket, dan kan piping optreden vanuit de hieronder gelegen watervoerende zandlagen. In paragraaf 4.3 van het Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen is het bijbehorende faalproces beschreven. Dit faalproces is in principe hetzelfde als piping in het dijkenspoor.



Figuur 2 Verschillende fasen bij het ontstaan van piping bij een in Nederland veel voorkomende situatie van de ondergrondopbouw bij een kunstwerk. Rechtsonder een foto van een bezweken kunstwerk in een schaalmodelproef [Achmus en Mansour, 2006].

Ook voor het faalmechanisme *piping bij kunstwerk* geldt in principe dat falen van het kunstwerk is

gekoppeld aan het optreden van overstromingsgevolgen, oftewel wanneer het kombergend vermogen niet meer toereikend is en er substantiële schade optreedt en/of er dodelijke slachtoffers vallen. In de praktijk wordt meestal aangenomen dat bezwijken van het kunstwerk of het naastliggende grondlichaam altijd leidt tot overschrijding van het kombergend vermogen en hiermee tot substantiële schade en/of slachtoffers (overstroming). Indien men het kombergend vermogen toch in het ontwerp of de beoordeling wil betrekken dan wordt verwezen naar de Technische Leidraad Hoogte bij kunstwerk (zie Inleiding faalmechanisme overslag en/of overloop bij kunstwerk) en Handleiding Hoogte bij kunstwerk.

Tijdsafhankelijkheid

Zoals uit bovenstaande paragraaf blijkt, moeten meerdere processen hun beslag krijgen voordat het kunstwerk bezwijkt na het overschrijden van het kritieke verval. Allereerst moet een doorgaande pipe worden gevormd onder of naast het kunstwerk. Uit experimenteel onderzoek bij dijken volgt dat het kanaal bij constant verval langzaam in bovenstroomse richting groeit. De snelheid waarmee kanaaltjes groeien is afhankelijk van het verval. Zodra het kanaaltje dat vanaf de benedenstroomse zijde stroomopwaarts is gegroeid en contact maakt met het water aan de bovenstroomse zijde van de dijk (buitenzijde, tijdsduur meerdere dagen in de IJkdijkproef), treedt het ruimproces op. Bij constant verval duurt het vervolgens nog geruime tijd (meer dan 24 uur in de IJkdijkproef) voordat het geruimde kanaal de benedenstroomse zijde bereikt. Dit proces zou sneller kunnen verlopen als het kritieke verval ruim wordt overschreden.

Zodra het ruimproces de benedenstroomse zijde heeft bereikt, resulteert dit in een forse toename van zandtransport en debiet. Wat dan gebeurt, is slecht te voorspellen. In geval van achterloopsheid zal het proces vergelijkbaar zijn met dat bij dijken en vrij snel bezwijken van het grondlichaam optreden. Bij onderloopsheid van het kunstwerk zal het erg afhangen van de fundatie en opbouw van de constructie hoe snel het bezwijkproces zal gaan. De volgende aspecten spelen een rol:

- Fundatie van het kunstwerk.
  Een kunstwerk dat op palen staat zal minder snel (deels) bezwijken dan een kunstwerk dat op staal gefundeerd is. Aan de andere kant gaat het proces van pipevorming bij kunstwerken op palen naar verwachting weer sneller indien sprake is van een spleet onder het kunstwerk.
- Aanwezigheid van kwelschermen.
  Het proces van pipevorming en ruiming van de doorgaande pipe gaat langzamer naarmate er meer of diepere kwelschermen aanwezig zijn.
- Geometrie van het kunstwerk.
  Een kort kunstwerk zal sneller kantelen of afschuiven dan een lang kunstwerk.

Concrete handvatten ontbreken echter om een enigszins betrouwbare inschatting te kunnen maken van de tijdsduur van het bezwijkproces van (delen van) het kunstwerk.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Historie en veiligheidsfilosofie faalmechanisme piping bij kunstwerk

Historie

Het faalmechanisme *piping bij kunstwerken* kent een lange historie. Door Bligh is in 1910 een aantal bezwijkgevallen van op staal gefundeerde gemetselde kleine stuwdammen op verschillende grondslag in India geïnventariseerd en geanalyseerd [Bligh, 1910]. Hieruit is een rekenregel afgeleid waarbij het toelaatbare verval over de constructie wordt berekend als product van de totale horizontale en verticale kwelweglengte (line of creep) onder de constructie en een factor die afhankelijk is van de grondslag. In de opvatting van Bligh worden horizontale en verticale stukken (verticale wanden van een constructie of verticale kwelwegen langs een scherm) even zwaar

meegerekend bij de bepaling van de kwelweg.
Door Lane is die aanpak sterk bekritiseerd. Hij stelde dat de verticale delen van de 'line of creep' een grotere bijdrage aan de weerstand leveren dan de horizontale. In 1935 is door Lane een, eveneens empirische, rekenregel opgesteld, waarbij horizontale en verticale delen van de kwelweg op gewogen wijze in rekening worden gebracht [Lane, 1935]. Bij dijkversterkingen in Nederland was de regel van Bligh tot begin van de jaren negentig in gebruik voor situaties waarin uitsluitend een horizontale kwelweg aanwezig was. Hiermee werd dus impliciet de kritiek van Lane onderschreven. Bij kunstwerken werd uitgegaan van de rekenregel van Lane (voor onderloopsheid) of Bligh (achterloopsheid). Van beide rekenregels werd altijd aangenomen dat ze conservatief van aard zijn. Recent onderzoek heeft echter uitgewezen dat dit voor de regel van Bligh bij dijken in ieder geval niet het geval is.

Door Harza is in 1935 een criterium voor heave opgesteld in termen van de kritieke 'flotation gradiënt' [Harza, 1935]. In latere onderzoeken is voortgeborduurd op dit concept. In 1995 zijn, gebaseerd op het heave-criterium, met behulp van het zogenoemde Fragmentenmodel (zie artikel Rekenmodellen voor berekening optredend verhang) ontwerpregels afgeleid voor het dimensioneren van kwelschermen.

Vanaf de jaren vijftig zijn in Nederland, Duitsland en de Verenigde Staten verschillende onderzoeksprogramma's van start gegaan met het doel het pipingproces beter te begrijpen en te modelleren. Met name in het Duitse onderzoek (vanaf de jaren zeventig) is door middel van modelproeven het proces van ontstaan en uitgroeien van erosiekanaaltjes in een zandlaag onder de ondoorlatende onderrand van een waterkering onderzocht. Het Nederlandse onderzoek resulteerde eind jaren tachtig van de vorige eeuw in de ontwikkeling van het wiskundige model van Sellmeijer [Sellmeijer, 1988], waarmee het erosieproces dat ten grondslag ligt aan piping fundamenteel wordt beschreven. In 1994 is het [Technisch rapport voor controle op het mechanisme piping bij rivierdijken, 1994] gepubliceerd, waarin ontwerpregels voor de ontwerp- en adviespraktijk zijn afgeleid gebaseerd op het model van Sellmeijer. De hierbij toegepaste veiligheidsfilosofie is gebaseerd op de overschrijdingskans van een bepaalde waterstand. Deze is dan vertaald naar sterktenormen. Dit was duidelijk anders dan het vooroorlogse onderzoek, waarin werd uitgegaan van afmetingen die zich in de praktijk hebben bewezen.

Zoals uit de titel 'Technisch rapport voor controle op het mechanisme piping bij rivierdijken' al blijkt, betreft het alleen ontwerpregels voor dijken. Voor kunstwerken is de [Leidraad voor ontwerp, beheer en onderhoud van constructies en vreemde objecten in, op en nabij waterkeringen, 1976] lange tijd vigerend. Hierin is voor onder- en achterloopsheid de formule van Lane opgenomen. In 1997 is de [Leidraad waterkerende kunstwerken en bijzondere constructies, 1997] uitgebracht als groene versie van de [Leidraad kunstwerken, 2003]. Opvallend is dat hierin voor onderloopsheid in eerste instantie wordt verwezen naar de formules van Bligh en Sellmeijer. Bij geconstateerde kwelwegtekorten worden damwandschermen vervolgens gedimensioneerd met de formules van heave en Lane. Deze werkwijze heeft de definitieve versie van de Leidraad kunstwerken 2003 niet gehaald. In de Leidraad kunstwerken 2003 wordt voor piping direct doorverwezen naar het [Technisch rapport zandmeevoerende wellen, 1999]. In het dit technisch rapport worden voor zowel dijken als kunstwerken de vigerende modellen van Bligh, Lane, Sellmeijer en heave voor de controle op piping gepresenteerd. Ook in de wettelijke toetsingen tot en met de derde toetsronde is in de toetsvoorschriften (onder andere het [Voorschrift toetsen op veiligheid primaire waterkeringen, 2007]) zoveel mogelijk aangesloten op de Leidraad kunstwerken 2003 en hiermee op het Technisch rapport zandmeevoerende wellen.

In 2012 is door het onderzoeksprogramma Sterkte en Belastingen Waterkeringen (SBW) het Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen gepubliceerd [Förster, et al., 2012]. In dit onderzoeksrapport wordt een verbeterde rekenregel voor het faalmechanisme piping gepresenteerd.

Het rapport is in juni 2013 door het ministerie van Infrastructuur en Milieu beschikbaar gesteld aan alle waterkeringbeheerders, met als toevoeging dat in 2013 aanvullend een werkwijzer piping wordt opgesteld. Deze [Werkwijzer piping bij dijken, 2014] is in juni 2014 gepubliceerd. De werkwijzer heeft echter specifiek betrekking op *piping bij dijken*. Het Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen is breder opgezet en hoewel ook hier de nadruk ligt op de dijken wordt tevens aandacht besteed aan *piping bij kunstwerken*. Het Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen kan hiermee als vigerende kennisbasis beschouwd worden.
Tot het moment van ter beschikking stellen van Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen was het Technisch rapport zandmeevoerende wellen vigerend voor zowel dijken als kunstwerken. De belangrijkste verschillen tussen beide documenten zijn dat in het Onderzoeksrapport de rekenregel gebaseerd op het model van Sellmeijer is aangepast en dat het model van Bligh niet meer van toepassing is verklaard.

Een uitgebreidere beschrijving van de historie van het faalmechanisme piping is te vinden in hoofdstuk 3 van het Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen.

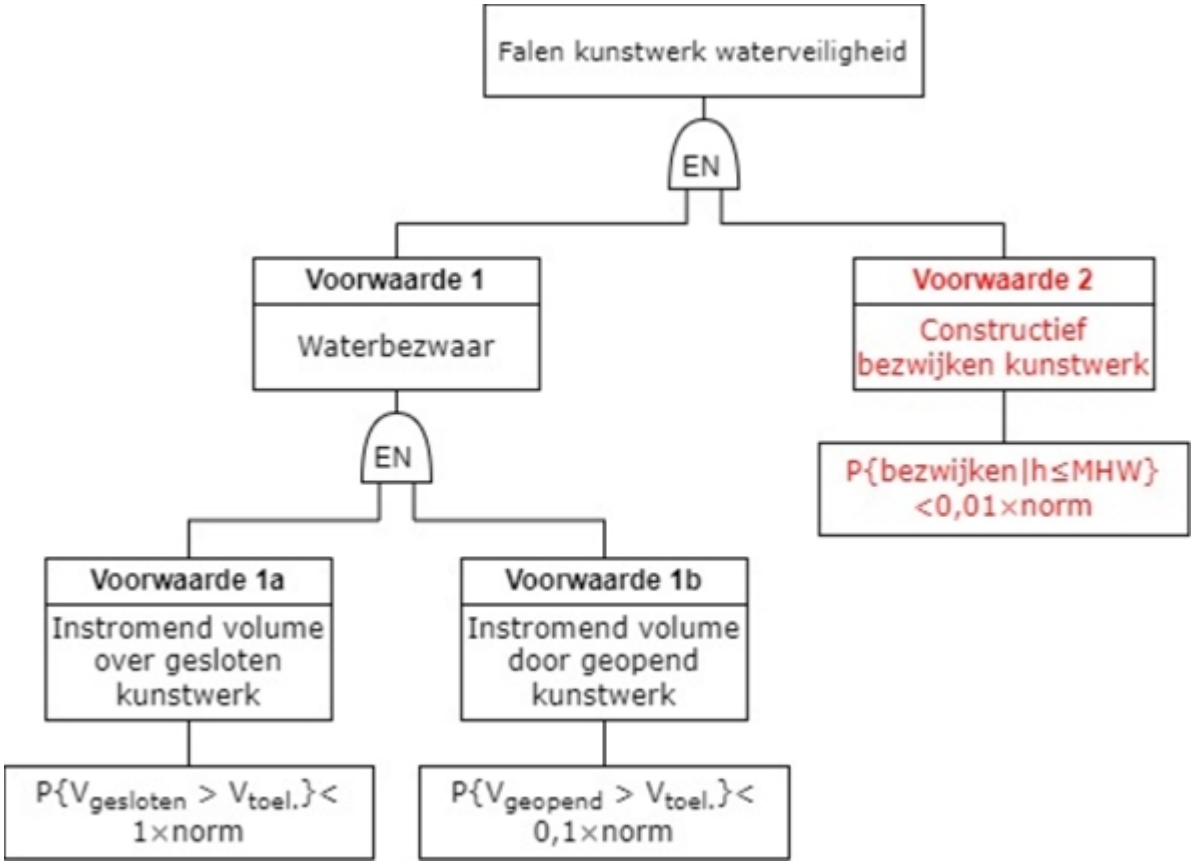
Veiligheidsfilosofie en beoordelingsmethodieken tot 2017

In de [Grondslagen voor waterkeren[1]1998] is aangegeven dat vanaf 1998 ontwerp en beoordeling van waterkeringen op basis van de overbelastings-benadering plaatsvond, waarbij de waterkeringen ontworpen en getoetst werden bij een specifiek peil afhankelijk van de norm van de dijkring. Dit peil werd ook wel aangeduid met MHW (maatgevend hoogwater). Voor een verdere invulling van de eisen aan falen van kunstwerken werd in de Grondslagen voor waterkeren verwezen naar de Leidraad kunstwerken.

Leidraad kunstwerken 2003

De Leidraad kunstwerken kent drie hoofdfaalmechanismen die bij kunstwerken van toepassing zijn: *overslag en/of overloop, betrouwbaarheid sluiting* en *sterkte en stabiliteit*. Deze laatste werd opgedeeld in bezwijken constructie-onderdelen, instabiliteit constructie en grondlichaam en onder- en achterloopsheid.

In de Leidraad is voor toetsen en ontwerpen het falen van een kunstwerk opgedeeld in een spoor *waterbezwaar* – hierin worden de faalmechanismen *overslag en/of overloop* en *betrouwbaarheid sluiting* beschouwd – en een spoor *constructief bezwijken* (zie Figuur 1). Uitgangspunt is de overbelastingsbenadering, die wat betreft *waterbezwaar* primair eisen stelt aan de kans op overschrijding van een toelaatbaar instromend volume buitenwater via het gesloten of het geopende kunstwerk. Aanvullend hierop is een eis gesteld aan de kans op *constructief falen*, gegeven dat normomstandigheden[2] niet worden overschreden. Bij deze laatste tak werd verondersteld dat dit altijd tot een onbeheersbare situatie met substantiële gevolgen leidt. Overschrijding van een toelaatbaar instromend volume geeft weliswaar aanleiding tot (grote) problemen, maar de situatie hoeft niet direct onbeheersbaar te zijn.



Figuur 1 Faalpaden op hoofdlijnen volgens Leidraad kunstwerken 2003. In het rood het pad voor piping.[3]

Voor het faalmechanisme *piping* werd aan de eisen voldaan wanneer de faalkans kleiner was dan 0,01 maal de getalswaarde van de wettelijke overschrijdingskans (de veiligheidsnorm) zoals destijds was vastgelegd in de Wet op de waterkering. Dit was een normfrequentie per dijkring.

VTV2006

In de wettelijke toetsingen tot en met de derde toetsronde is in de toets-voorschriften (onder andere [Voorschrift toetsen op veiligheid primaire waterkeringen, 2006]) zoveel mogelijk aangesloten op de Leidraad kunstwerken en hiermee op het Technisch rapport zandmeevoerende wellen. De toets volgt het algemene schema voor sterkte en stabiliteit en bestaat uit vier stappen:

1. Eenvoudige toets.
   In de eerste stap vindt een controle plaats aan de hand van eenvoudige criteria, die erop neerkomen dat een kunstwerk dat geheel is omsloten door een ondoorlatend pakket in principe niet getoetst hoeft te worden.
2. Gehanteerde ontwerpmethode.
   Als ontworpen is volgens Technisch rapport zandmeevoerende wellen of [Handreiking constructief ontwerpen, 1994] en de belasting is niet significant toegenomen dan voldoet het kunstwerk voor *piping*.
3. Gedetailleerde toetsing.
   In deze stap wordt een herberekening uitgevoerd conform Technisch rapport zandmeevoerende wellen.
4. Geavanceerde toetsing.
   Dit behelst met name gebruik van grondwaterstromingsmodellen om 3D-analyses uit te voeren of tijdsafhankelijk te rekenen, probabilistische piping- of heave analyses en toepassing van

bewezen sterkte.

[1] Inmiddels vervangen door de Grondslagen voor hoogwaterbescherming [Kok, et al., 2017].

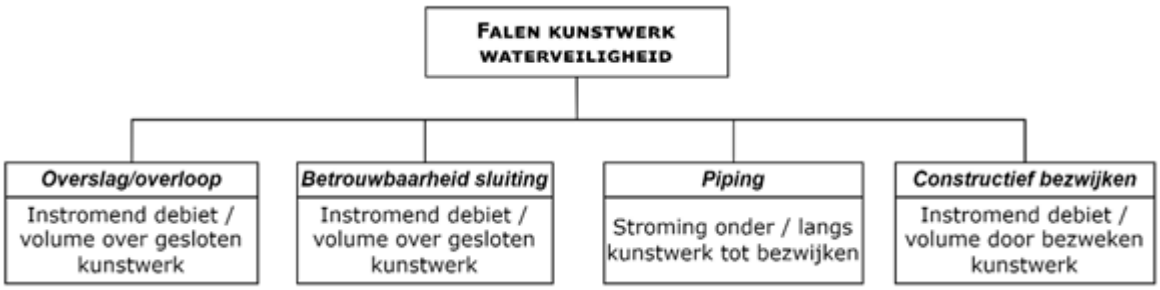
[2] Waterstand inclusief bijbehorend golfregime met een overschrijdingsfrequentie per jaar gelijk aan de normfrequentie per jaar van de dijkring waartoe het kunstwerk behoorde.

[3] Merk op dat in het onderste blok in de rechtertak eigenlijk had moeten staan P{bezwijken EN h<MHW} < 0,01*norm.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Vigerende werkwijze faalmechanisme piping bij kunstwerk

Sinds 2017 is de overstromingskansbenadering van toepassing. Voor *piping bij kunstwerk* is de werkwijze niet heel anders geworden, omdat constructief bezwijken – waar *piping bij kunstwerken* onderdeel van was – vrijwel altijd tot een onbeheersbare situatie met substantiële gevolgen leidt. Tevens werd al gewerkt met een faalkanseis per faalmechanisme. Het enige subtiele verschil is dat *piping bij kunstwerk* nu één van de vier hoofdfaalmechanismen is (zie Figuur 1), in plaats van dat het onderdeel is van het faalmechanisme *constructief bezwijken*. Dit is echter puur een administratieve wijziging.



Figuur 1 Vigerende faalboom kunstwerken waterveiligheid.

Opgemerkt wordt dat voor de beoordeling en het ontwerp voor *piping bij kunstwerk* wordt aangesloten op de tot 2017 vigerende wijze van ontwerpen en beoordelen. Dit betekent dat wordt verondersteld dat de faalkans verwaarloosbaar klein is als het kritieke verval kleiner is dan het optredende verval bij een buitenwaterstand met een overschrijdingskans die getalsmatig gelijk is aan het normgetal. Om het kritieke verval te bepalen zijn verschillende modellen beschikbaar. Hier wordt in Modellen voor faalmechanisme piping bij kunstwerk nader op ingegaan.

Versie 1.0: 2 juli 2025

3.2 Veiligheidsanalyse voor faalmechanisme piping bij kunstwerk

Beschrijving veiligheidsanalyse voor faalmechanisme piping bij kunstwerk

Een veiligheidsanalyse ten aanzien van *piping bij kunstwerk* kan op meerdere wijzen worden uitgevoerd. De basis van de analyse is echter altijd hetzelfde: de kans op overstroming door piping moet voldoende klein zijn.

Eisen waterveiligheid

Het gewenste veiligheidsniveau van waterbouwkundige kunstwerken met een waterkerende functie ligt verankerd in de Omgevingswet. In deze wet is per dijktraject een omgevingswaarde vastgelegd. Dit kan een overstromingskansnorm of een faalkansnorm zijn. In beide gevallen geldt dat dit de enige ‘harde’ eis is die wordt gesteld. De omgang met deze eis vanuit waterveiligheid hangt af van de wijze van beoordelen.

Over het algemeen wordt voor het faalmechanisme *piping bij kunstwerk* middels een deterministische beoordeling op basis van empirische modellen bepaald of de faalkans voor het faalmechanisme *piping* verwaarloosbaar klein is of niet. Hierbij wordt de Waterstand bij Norm, WBN, als buitenwaterstand gehanteerd. (Waterstand bij Norm is de buitenwaterstand met een overschrijdingskans die getalsmatig gelijk is aan de norm van het dijktraject.) Als het verval bij een buitenwaterstand gelijk aan WBN kleiner is dan een naar verwachting veilige waarde van het kritieke verval, dan is de faalkans verwaarloosbaar klein. Bij deze werkwijze is er geen verschil tussen beoordelen en ontwerpen.

Minder gangbaar is een werkwijze waarbij daadwerkelijk een faalkans wordt bepaald. Bij beoordelen wordt vervolgens gekeken of deze faalkans een substantiële bijdrage aan de overstromingskans van het normtraject heeft. Het totaal aantal kunstwerken in het normtraject speelt daarin geen directe rol; er wordt geen faalkanseis voor *piping* voor een kunstwerk bepaald op basis van het aantal en de prestatie van de overige waterkerende kunstwerken in het normtraject.

Bij ontwerpen van een nieuw kunstwerk is dit anders. Het is dan van belang om de prestatie en daarmee de faalkansbijdrage (nu en in de toekomst) van de overige kunstwerken aan de overstromingskans van het normtraject inzichtelijk te hebben. Op basis hiervan en de overstromingskansnorm van het dijktraject kan vervolgens bepaald worden welke faalkanseis aan het nieuwe kunstwerk moet worden gesteld. Daarbij dienen ook toekomstige ontwikkelingen (meer of minder kunstwerken in het normtraject of andersoortige aanpassingen) worden meegewogen. Het staat ontwerpers volkomen vrij deze faalkanseisen naar eigen inzicht af te leiden, maar daarbij gelden wel een paar algemene ‘spelregels’. Voor praktische tips en handreikingen op dit gebied wordt verwezen naar hoofdstuk 2 van de Werkwijzer ontwerpen waterkerende kunstwerken [Van Bree, et al., 2018].

Eisen vanuit primaire/overige functie(s)

Eisen vanuit andere functies (denk aan schutfunctie scheepvaart) bepalen doorgaans samen met de lokale geometrie de afmetingen van een kunstwerk. Vervolgens wordt in een ontwerp bekeken – gegeven de voor de primaire en overige functies benodigde afmetingen – welke kwelweglengte er middels kwelschermen aan toegevoegd moet worden om te voldoen aan de eisen.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Belastingen bij faalmechanisme piping bij kunstwerk

De hydraulische belastingen aan de buitenzijde van het kunstwerk bepalen in combinatie met de binnenwaterstand, de geometrie van het kunstwerk en de eigenschappen van de ondergrond de grondwaterstroming die onder en naast het kunstwerk tot stand komt. Ook de tijdsduur van de belasting speelt hierbij een rol. Op beide wordt in onderstaande paragrafen nader ingegaan.

Opgemerkt wordt dat ook andere omstandigheden (denk aan belastingsituaties die samenhangen met beheer en onderhoud) kunnen leiden tot langdurige vervallen over het kunstwerk. Deze belastingsituaties vallen buiten het kader van deze leidraad.

Verval over het kunstwerk

Het verval wordt bepaald door de combinatie van de buitenwaterstand en de binnenwaterstand.

Piping kan optreden bij hoge buitenwaterstanden, waarbij het verval over de waterkering langdurig groot is. Golven en stroming spelen geen rol bij het faalmechanisme *piping*.

Voor de binnenwaterstand moet dan rekening worden gehouden met een waarde die past bij de hoogwatersituatie. Deze kan worden beïnvloed door het gevoerde peilbeheer vlak vóór en tijdens hoogwater en de oriëntatie van het binnenwater. Bij ontwerpen moet rekening worden gehouden

met eventuele verlagingen van het waterpeil binnen de ontwerplevensduur. Tevens moet rekening worden gehouden met de invloed van afwaaiing en afmaling op het verval in de diverse ontwerpsituaties.
Naast hydraulische belastingen spelen er geen andere belastingen (zoals bijvoorbeeld verkeersbelastingen) een rol bij het faalmechanisme *piping*.

Tijdsduur van de belastingen

Voor een overstroming door het fenomeen *piping* moet de aandrijvende kracht die het erosieproces op gang houdt zich eerst opbouwen en dan langere tijd aanwezig blijven zodat het pipingproces zich volledig kan voltrekken. De duur van de belasting is van invloed op de ontwikkeling van de waterspanningen in de watervoerende en pipinggevoelige lagen onder en naast het kunstwerk:

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

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

Bij niet-stationaire grondwaterstroming zal de waterspanning in de watervoerende bodemlagen onder en achter de kering bij een gelijke top(buiten)waterstand minder hoog zijn dan bij stationaire grondwaterstroming. Dit is afhankelijk van het bergend vermogen van de bodemlagen (freatische berging in de onverzadigde grondlagen en elastische berging binnen het korrelskelet), de doorlatendheid en dikte van de bodemlagen en de duur van de belasting. Dit betekent dat bij niet-stationaire stroming de kracht op de korrels – en hiermee de kans op piping – kleiner is dan bij stationaire grondwaterstroming.

Tijdsafhankelijkheid van belastingsysteem

Hieronder wordt per belastingsysteem aangegeven of en in welke mate tijdsafhankelijkheid een rol speelt:

- *Bovenrivierengebied*. In het bovenrivierengebied is de belasting afvoergedomineerd en langdurig, waardoor tijdsafhankelijkheid nauwelijks een rol speelt en stationaire grondwaterstroming optreedt. In het algemeen treedt één langdurig hoogwater op. Het waterpeil stijgt langzaam tot aan de piekwaarde en bouwt zich dan langzaam weer af. De hele hoogwatergolf kan ongeveer twee tot drie weken duren. Hier speelt tijdsafhankelijkheid voor maatgevende omstandigheden dus nauwelijks een rol en kan stationair worden gerekend.
- *Benedenrivierengebied*. In het benedenrivierengebied ten westen van Schoonhoven, Gorinchem en Waalwijk kan tijdsafhankelijkheid een rol spelen. Hier wordt de waterstand deels bepaald door de rivierafvoer en deels bepaald door de waterstand op zee, waardoor de invloed van het getij enigszins merkbaar is en bovendien een kortdurende waterstandsverhoging door een storm boven zee kan optreden. Dit is het begin van het bergingsgebied van de benedenrivieren waar lagere afvoeren in combinatie met storm aan zee de meest bedreigende situatie opleveren. Er is dus sprake van een combinatie van stormgedomineerde (dus kortdurende) en afvoergedomineerde (dus langdurende) belasting.
- *IJsselmeergebied, Zeeuwse wateren*. In de meren en estuaria wordt de waterstand voornamelijk door windopzet bij storm bepaald. Er is dus sprake van een korte belastingduur, waardoor onder hoogwateromstandigheden vrijwel altijd sprake is van een niet-stationaire grondwaterstroming. In de westelijke delen van de meren, waar opwaaiing vooral optreedt bij

oostelijke windrichtingen, kan het echter ook gebeuren dat de extreme waterstanden primair bepaald worden door het meerpeilverloop (langdurige belasting maar met veel lagere maxima dan de piekwaterstanden).

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

Versie 1.0: 2 juli 2025

Modellen voor faalmechanisme piping bij kunstwerk

Voor het faalmechanisme *piping bij kunstwerk* zijn verschillende modellen beschikbaar. Om te bepalen welk model of welke modellen van toepassing zijn, moeten eerst de mogelijk maatgevende kwelwegen onder en/of langs het kunstwerk worden geïdentificeerd. De aard van de mogelijke kwelwegen bepaalt vervolgens welke modellen gebruikt kunnen worden. Onderscheid wordt gemaakt in kwelwegen met een verticale componenten kwelwegen die zuiver horizontaal lopen.

Als de kwelweg verticale componenten bevat, dan zijn de modellen van Lane en heave van toepassing. Een nadere uitwerking van deze modellen wordt in Inleiding model van Lane en Inleiding heave model gegeven.

Als de kwelweg zuiver horizontaal loopt, dan kunnen de modellen van Bligh en Sellmeijer mogelijk gebruikt worden. Het Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen [Förster, et al., 2012] doet de aanbeveling om het model van Bligh niet meer toe te passen. Deze aanbeveling was echter volledig gebaseerd op onderzoek dat voor dijken is uitgevoerd. Het model van Sellmeijer is alleen geschikt wanneer de kwelweg horizontaal en in één richting loopt. Dit is bij kunstwerken doorgaans niet het geval. Het model van Sellmeijer is dan niet geschikt en een passend alternatief voor Bligh is er momenteel niet. Dat betekent dat het model van Bligh voor ontwerp en beoordeling van kunstwerken gebruikt kan blijven worden. Een nadere uitwerking van de modellen van Bligh en Sellmeijer wordt gegeven in Inleiding model van Bligh en Inleiding model van Sellmeijer.

Direct achter het kunstwerk ter plaatse van het uittredepunt kan een afsluitende, cohesieve laag zitten. Deze laag moet eerst opbarsten voordat uitspoeling op kan treden (analoog aan het pipingproces bij dijken). Een controle op opbarsten wordt in de praktijk vaak achterwege gelaten omdat dit zelden van invloed is op het beoordelingsresultaat, maar volledigheidshalve wordt het opbarstmodel wel besproken in Model voor opbarsten.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Ontbreken relatie tussen veiligheidsfactor en faalkans bij modellen Bligh, Lane en heave

Bij de modellen van Bligh, Lane en heave ontbreekt vooralsnog een expliciete relatie tussen de berekende veiligheidsfactor en de faalkans. Verondersteld wordt dat de faalkans verwaarloosbaar klein is als het verval bij een buitenwaterstand gelijk aan Waterstand bij Norm (WBN) kleiner is dan het kritieke verval over de kering volgens deze modellen. (Waterstand bij Norm is de buitenwaterstand met een overschrijdingskans die getalsmatig gelijk is aan de norm van het dijktraject.) Alleen voor het model van Sellmeijer zijn gegevens voor een semi-probabilistische

ontwerpverificatie beschikbaar. In Safety format en modelbeschrijving model van Lane, Safety format en modelbeschrijving heave model en Safety format en modelbeschrijving model van Bligh wordt voor de afzonderlijke modellen ingegaan op het safety-format.
Versie 1.0: 2 juli 2025

3.3 Model voor opbarsten

Model voor opbarsten

Analoog aan het pipingproces bij dijken moet een eventueel aanwezige cohesieve laag achter een kunstwerk eerst opbarsten voordat uitspoeling op kan treden. Hoewel deze verificatie in de praktijk vaak achterwege wordt gelaten, wordt in dit artikel het model waarmee opbarsten kan worden berekend kort beschreven.

De formule om opbarsten te controleren ziet er als volgt uit:

$$\frac{(\gamma_{nat} - \gamma_w) \cdot d}{\gamma_w \cdot (\phi_z - h_p)} \geq \gamma_{up} \cdot \gamma_{b,u} \qquad (1)$$

Waarin:

γ_{nat} Natte volumegewicht van de cohesieve deklaag [kN/m^3].

γ_w Volumegewicht van water [kN/m^3].

d Dikte van de cohesieve deklaag [m].

ϕ_z Stationaire stijghoogte in de zandlaag [m t.o.v. NAP].

h_p Freatisch niveau ter plaatse van uittreepunt [m t.o.v. NAP].

γ_{up} Veiligheidsfactor voor het faalmechanisme opbarsten welke afhankelijk is van de gestelde betrouwbaarheidseis [-].

$\gamma_{b,u}$ Schematiseringsfactor voor het faalmechanisme opbarsten[-].

Voor nadere informatie en achtergronden omtrent het model wordt verwezen naar het artikel Opbarsten. Voor aanwijzingen omtrent de schematisering van de diverse parameters wordt verwezen naar de handleiding Overstromingskansanalyse kunstwerken [Rijkswaterstaat, 2023].

Versie 1.0: 2 juli 2025

3.4 Model van Lane

Inleiding model van Lane

Als de kwelweg verticale componenten bevat dan kan het model van Lane en het heave-model worden toegepast. In deze paragraaf wordt het model van Lane beschreven. Eerst wordt dieper ingegaan op de Historie en kennisbasis van het model, waarna het model zelf beschreven wordt in Safety format en modelbeschrijving model van Lane. Vervolgens wordt aandacht besteed aan het Geldigheidsgebied en tot slot worden in artikel Model van Lane of heave? de resultaten van berekeningen met de methodes van Lane en heave met elkaar vergeleken.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Historie en kennisbasis model van Lane

Historie

In 1935 is door Lane een onderzoek verricht aan 278 metselwerkdammen op verschillende grondslag [Lane, 1935]. Het doel van het onderzoek was om de benodigde lengte van de kwelweg te bepalen om bezwijken door *piping* te voorkomen. De kwelweg is de weg die het water langs het kunstwerk moet afleggen. Volgens Lane is de weerstand langs een verticale weg beduidend groter dan de weerstand langs een horizontale weg. Dit blijkt ook uit het onderzoek. De dammen die faalden hadden geringe verticale kwelweglengtes. Dit was reden voor Lane om, in tegenstelling tot de methode Bligh die in 1910 werd gepubliceerd en tot dan veel gebruikt werd, de weerstand van de verticale kwelweglengte een factor 3 hoger te stellen dan die van de horizontale kwelweglengte.

Daarnaast hanteert Lane andere zogeheten creep-factoren dan Bligh, die een maat zijn voor de weerstand van de ondergrond tegen uitspoelen. In Tabel 1 worden deze gegeven. Lane geeft ook waarden voor klei van 3 (zachte klei) tot 1,6 (stijve klei), met hierbij de toevoeging dat de waarden voor medium en zachte klei onzeker zijn. In de Nederlandse praktijk zijn deze waarden, waarschijnlijk om deze reden, niet overgenomen.

In zijn paper geeft Lane aan dat zowel de reductiefactor van 1/3 op de horizontale kwelweglengte als de waarden van de creep-factoren conservatief gekozen zijn; in zijn onderzoek stelt Lane dat geen enkel bezwijkgeval is gevonden bij dammen die zijn nagerekend met de voorgestelde creep-waarden. Dit is echter niet helemaal waar: er is één dam (zie Figuur 1) die bezweken is waarbij de creep-waarde groter is dan de door Lane voorgestelde creep-waarde.

Tabel 1 Creep-factoren voor het model van Lane.

Grondsoort	Mediane korreldiameter [µm][1]	$C_{w,creep}$ (Lane)
Uiterst fijn zand, silt	< 105	8,5
Zeer fijn zand	105 – 150	
Zeer fijn zand (mica)		7
Matig fijn zand (kwarts)	150 – 210	7
Matig grof zand	210 – 300	6
Zeer/uiterst grof zand	300 – 2000	5
Fijn grind	2000 – 5600	4
Matig grof grind	5600 – 16000	3,5

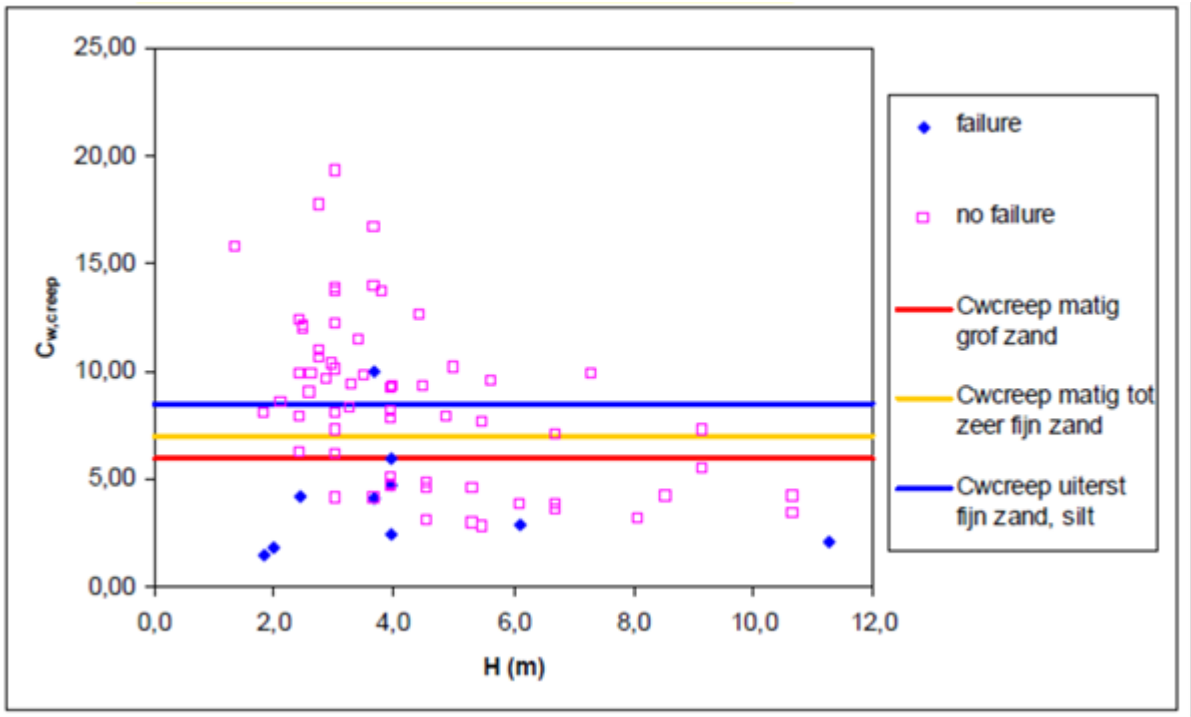
Zeer grof grind	> 16000	3

[1] Indicaties conform NEN 5104 (September 1989).

Kennisbasis

De vigerende kennisbasis voor het toetsspoor piping is vastgelegd in het Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen [Förster, et al., 2012]. Hierin worden de modellen van Lane en heave van toepassing verklaard indien sprake is van een kwelweg die verticale componenten bevat.

Binnen het onderzoeksprogramma Sterkte en Belastingen Waterkeringen, dat in 2007 van start is gegaan en in 2012 is opgegaan in het WTI2017, is onderzoek verricht naar *piping bij kunstwerken*. In [Luijendijk en Förster, 2012] zijn in hoofdstuk 3 de resultaten opgenomen van een literatuurstudie van experimentele onderzoeken naar piping bij kunstwerken. In paragraaf 5.4.6 worden de conclusies hiervan besproken. Voor zover bekend wordt momenteel geen experimenteel onderzoek uitgevoerd naar piping bij kunstwerken.



Figuur 1 Overzicht resultaten Lane voor grondsoorten representatief voor Nederland.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Safety format en modelbeschrijving model van Lane

Voor het model van Lane is het, net als in het model van Bligh, onduidelijk hoe betrouwbaar een waterkering precies is als deze is goedgekeurd of ontworpen met dit model. Binnen het project Veiligheid Nederland in Kaart (VNK2) is destijds wel een probabilistische benadering van dit model geïntroduceerd. De eigenschappen van de stochastische variabelen in beide modellen zijn hierbij geschat op basis van expert judgement. Deze methode is na VNK2 niet verder doorontwikkeld. Voor de probabilistische benadering kan gebruik worden gemaakt van de modellering zoals die destijds in PC-Ring is gebruikt.

In het model van Lane wordt geverifieerd of de rekenwaarde van het optredende verval over het kunstwerk ΔH (de belasting) kleiner is dan de rekenwaarde van het kritieke verval ΔH_c over het kunstwerk (de sterkte):

$$\Delta H < \Delta H_c \quad (1)$$

De rekenwaarde van het optredende verval is het verval met een overschrijdings-kans die getalsmatig gelijk is aan de maximaal toelaatbare overstromingskans. De rekenwaarde van het kritieke verval ΔH_c over het kunstwerk wordt volgens het model van Lane als volgt berekend:

$$\Delta H_c = \frac{L_v + L_h/3}{C_{w,creep}} \quad (2)$$

Waarin:

ΔH_c Kritieke verval over het kunstwerk [m].

ΔH Aanwezig verval over het kunstwerk [m].

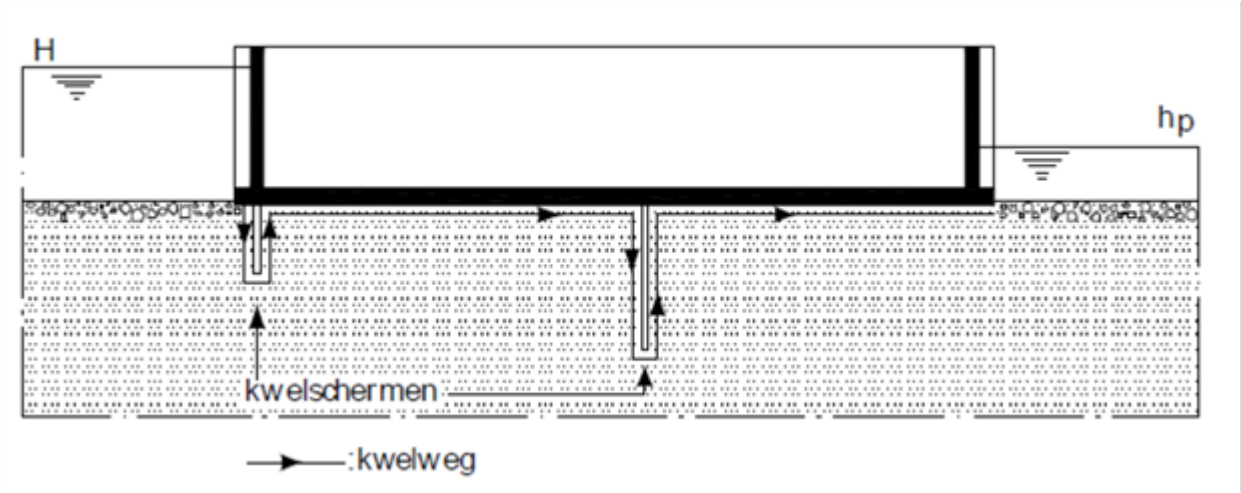
L_v Totale lengte van de verticale delen van de kwelweg [m].

L_h Totale lengte van de horizontale delen van de kwelweg [m].

$C_{w,creep}$ Gewogen creep-factor van Lane (materiaalconstante van de ondergrond) [-] . In Tabel 1 zijn de door Lane aangegeven waarden voor verschillende typen materiaal in de grondlaag weergegeven. Deze waarden kunnen worden opgevat als rekenwaarden.

In Figuur 1 is de kwelweg waarmee gerekend moet worden weergegeven. Hierbij is de verticale kwelweg langs een scherm gelijk aan twee keer de lengte van het scherm. Het in rekening brengen van de horizontale kwelweglengte is alleen toegestaan wanneer een goede aansluiting tussen de onderkant van de constructie en de ondergrond gewaarborgd is. Opgemerkt wordt dat de maatgevende kwelweg niet in één (verticaal of horizontaal) vlak hoeft te liggen. Het is zaak de kortst mogelijke kwelwegen na te gaan. De verticale en horizontale kwelweglengtes worden gevonden door sommatie van de verticale respectievelijk horizontale kwelwegonderdelen. Hier wordt in de handleiding Overstromingskansanalyse kunstwerken [Rijkswaterstaat, 2023] nader op ingegaan.

In het model van Lane wordt de verticale kwelweg door een eventueel opbarstkanaal niet nog eens expliciet in rekening gebracht; deze wordt immers al ‘meegerekend’ bij de verticale kwelwegdelen.



Figuur 1 Kwelweg bij waterkerend kunstwerk met kwelschermen [TAW, 1999].

De factor $C_{w,creep}$ is een materiaalconstante van de ondergrond en wordt de gewogen creep-factor genoemd. $C_{w,creep}$ is gebaseerd op een bovengrens wat impliceert dat deze waarden kunnen worden opgevat als rekenwaarden; hierop hoeft géén veiligheidsfactor te worden toegepast. In Tabel 1 zijn de door Lane aangegeven waarden voor verschillende typen materiaal in de grondlaag weergegeven.

Tabel 1 Creep-factoren voor het model van Lane.

Grondsoort	Mediane korreldiameter [µm][1]	$C_{w,creep}$(Lane)
Uiterst fijn zand, silt	< 105	8,5
Zeer fijn zand	105 – 150	
Zeer fijn zand (mica)		7
Matig fijn zand (kwarts)	150 – 210	7
Matig grof zand	210 – 300	6
Zeer/uiterst grof zand	300 – 2000	5
Fijn grind	2000 – 5600	4
Matig grof grind	5600 – 16000	3,5

Zeer grof grind	> 16000	3

[1] Indicaties conform NEN 5104 (september 1989).

Versie 1.0: 2 juli 2025

Geldigheidsgebied model van Lane

Lane merkt zelf op dat zijn methode alleen van toepassing is op metselwerkdammen die op staal zijn gefundeerd, of waarbij een goede aansluiting met een verticaal kwelscherm aanwezig is. In de praktijk wordt de methode breder toegepast voor alle voorkomende typen kunstwerken. Hier lijkt geen fundamenteel bezwaar tegen te zijn.

De methode Lane is nadrukkelijk van toepassing op kunstwerken met verticale schermen. Er zijn geen begrenzingen van het toepassingsgebied. In paragraaf 3.2.2 van [Deltares, 2009] is met betrekking tot de betrouwbaarheid van de regel van Lane voor de beoordeling op piping en heave bij waterkerende kunstwerken in Nederland het volgende gesteld.

De meest in Nederland onder waterkeringen voorkomende zanden variëren wat betreft de mediane korreldiameter (D_{50}) grofweg tussen 150 en 350 µm. Dit correspondeert ongeveer met de klassen “matig fijn zand” tot “matig grof zand” in Tabel 1. Dit wederom komt ongeveer overeen met de door Lane in één groep ondergebrachte grondsoorten zand, fijn zand en silt. In totaal zijn er in die groep 70 dammen geïnventariseerd, waarvan slechts 10 door piping zijn bezweken. In Figuur 1 is een overzicht gegeven van de gewogen kwelweglengte en het opgetreden verval over de dam voor zowel de bezweken als niet bezweken dammen. Tevens zijn de door Lane vastgestelde kritieke waarden voor $C_{w,creep}$ weergegeven. De criteria voor de keuze van deze waarden door Lane zijn echter niet geheel duidelijk. Op basis van het geringe aantal bezweken dammen en de vrij grote spreiding in de waarde van $C_{w,creep}$ lijkt het dat de door Lane gekozen kritieke waarden voor $C_{w,creep}$ niet geheel veilig zijn.

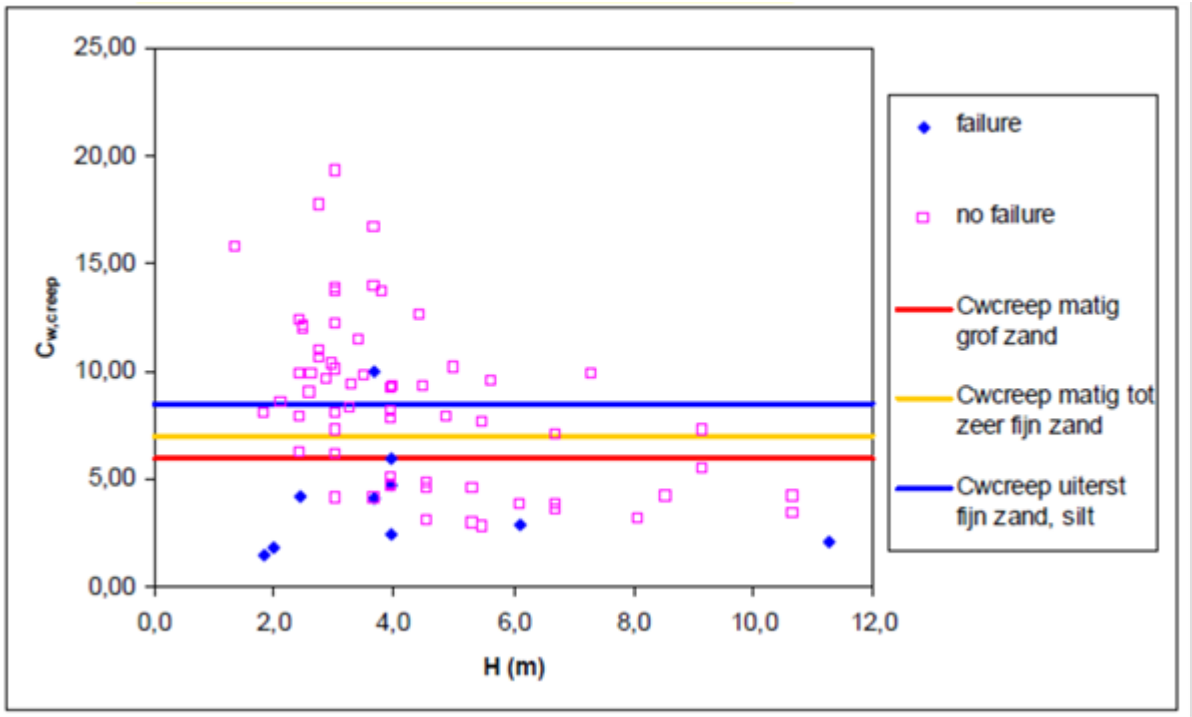
Tabel 1 Creep-factoren voor het model van Lane.

Grondsoort	Mediane korreldiameter [µm][1]	$C_{w,creep}$ (Lane)
Uiterst fijn zand, silt	< 105	8,5
Zeer fijn zand	105 – 150	
Zeer fijn zand (mica)		7
Matig fijn zand (kwarts)	150 – 210	7
Matig grof zand	210 – 300	6

Zeer/uiterst grof zand	300 – 2000	5
Fijn grind	2000 – 5600	4
Matig grof grind	5600 – 16000	3,5
Zeer grof grind	> 16000	3

[1] Indicaties conform NEN 5104 (september 1989).

Een vergelijking tussen heave berekeningen met de fragmentenmethode[1] en het criterium van Lane laat echter zien dat Lane in vrijwel alle gevallen conservatief is ten opzichte van het heave criterium, behalve in enkele (zelden voorkomende) situaties (zie artikel Model van Lane of heave?).



Figuur 1 Overzicht resultaten Lane voor grondsoorten representatief voor Nederland.

In Figuur 1 is de gewogen creep-factor uitgezet tegen het verval over de onderzochte dammen. Te zien is dat het verval veelal tussen de 2 en 10 meter ligt, met enkele uitschieters naar boven. De verticale kwelweglengte is bij slechts één van de onderzochte dammen kleiner dan 5 meter[2]. Dit betekent dat terughoudend moet worden omgegaan met het toepassen van de formule van Lane bij kwelwegen waarin de verticale component gering is.

Hoe betrouwbaar de regel is voor horizontale kwelwegen langs schermen tegen achterloopsheid is niet recent onderzocht. Hier wordt in Historie en kennisbasis model van Bligh nader op ingegaan.

[1] De fragmentenmethode is een semi-analytisch rekenmodel dat door de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW, thans Expertise Netwerk Waterveiligheid, ENW) specifiek voor heavecontroles bij dijken of waterkerende kunstwerken met verticale kwelschermen is

ontwikkeld. In paragraaf 4.2.4 van de Gebruikershandleiding Riskeer - Kunstwerken wordt de fragmentenmethode uitgebreid besproken.
[2] Dit is niet te zien in Figuur 1 maar blijkt uit de paper van Lane [Lane, 1935].

Versie 1.0: 2 juli 2025

Model van Lane of heave?

De empirische rekenregel van Lane is in beginsel bedoeld voor controle op piping (horizontale erosie), waarbij heave (verticaal uittreeverhang) impliciet ook getoetst wordt en voldoet als wordt voldaan aan het pipingcriterium volgens de rekenregel van Lane. In de regel van Lane wordt geen onderscheid gemaakt tussen deze twee verschillende mechanismen; bij gebruik van de geavanceerdere rekenregels van Sellmeijer (horizontale erosie) en heave (verticaal uittreeverhang) worden deze beide deelfaalmechanismen wel separaat beschouwd.

In de praktijk wordt in situaties met verticaal uittredende kwel, bijvoorbeeld achter een kwelscherm, de regel van Lane ook wel gebruikt als eerste grove controle op heave. Uitgangspunt daarbij is de veronderstelling dat deze regel altijd conservatiever is dan een expliciete controle op heave, bijvoorbeeld met de fragmentenmethode of eindige elementen grondwaterstromingsprogramma's. Aan de hand van een (beperkt) aantal vergelijkende berekeningen met de fragmenten-methode en het model van Lane is die veronderstelling getoetst [Calle, 1998]. Resultaat van die toetsing is dat in het merendeel van de beschouwde gevallen de veronderstelling juist is, behalve in de volgende (zelden voorkomende) situaties:

- Het kwelscherm aan de intredezijde is langer dan het kwelscherm aan de uittredezijde, zeker wanneer het watervoerende zandpakket een relatief grote dikte heeft ten opzichte van de lengte van het kunstwerk (in stromingsrichting gezien).
- Er is sprake van meerdere zeer korte (ten opzichte van de dikte van het watervoerende zandpakket) kwelschermen en een relatief lang kunstwerk.

Voor deze uitzonderingssituaties wordt aanbevolen het heave model te gebruiken (zie artikel Inleiding heave model).

Uit de praktijk komen ook geen directe aanwijzingen waaruit zou blijken dat het criterium van Lane niet conservatiever zou zijn dan de berekeningsmodellen voor heave. Met de fragmentenmethode en numerieke berekeningsmodellen is, in elk geval voor schermen tegen onderloopsheid, wel een wetenschappelijk beter onderbouwd instrument voor heavecontrole beschikbaar gekomen.

Versie 1.0: 2 juli 2025

3.5 Heave model

Inleiding heave model

Als de kwelweg verticale componenten bevat dan kunnen het model van Lane en het heave model toegepast worden. In deze paragraaf wordt het heave model beschreven. Eerst wordt dieper ingegaan op de Historie en kennisbasis van het heave model en volgt een nadere beschrijving van het mechanisme in artikel Mechanismebeschrijving heave. Vervolgens wordt het model zelf beschreven in Safety format en modelbeschrijving heave model. Tot slot wordt kort aandacht besteed aan enkele onderliggende Rekenmodellen voor de berekening van het optredend verhang.

Let op. In alle modellen wordt uitgegaan van een situatie met vrije uitstroming, dus zonder aanwezigheid van een afdekkende laag ter plaatse van het uittredepunt. Voor situaties waarin ter plaatse van het uittredepunt wel een afdekkende laag aanwezig is, is niet duidelijk hoe hiermee moet

worden omgegaan. Binnen diverse kennisontwikkelingssporen wordt momenteel gewerkt aan deze kennisleemte. Aanbevolen wordt in deze situatie de meest recente kennis actief op te zoeken en aansluiting te zoeken bij de kennisontwikkeling die momenteel omtrent heaveschermen in het dijkenspoor plaatsvindt.
Versie 1.0: 2 juli 2025

Historie en kennisbasis heave model

Door Harza [Harza, 1935] is een criterium voor heave opgesteld in termen van de kritieke 'flotation gradiënt'; in latere onderzoeken is voortgeborduurd op dit concept.

Het kritieke verhang is het verhang waarbij (in een homogeen veronderstelde zandlaag) benedenstrooms van het kwelscherm de opwaarts gerichte kracht op de korrels door een verticaal gerichte opwaartse stroming groter wordt dan het gewicht van de korrels. Het kritieke verhang wordt als volgt berekend:

$$i_c = \frac{(1-n)(\gamma_k - \gamma_w)}{\gamma_w} \qquad (1)$$

Waarin:

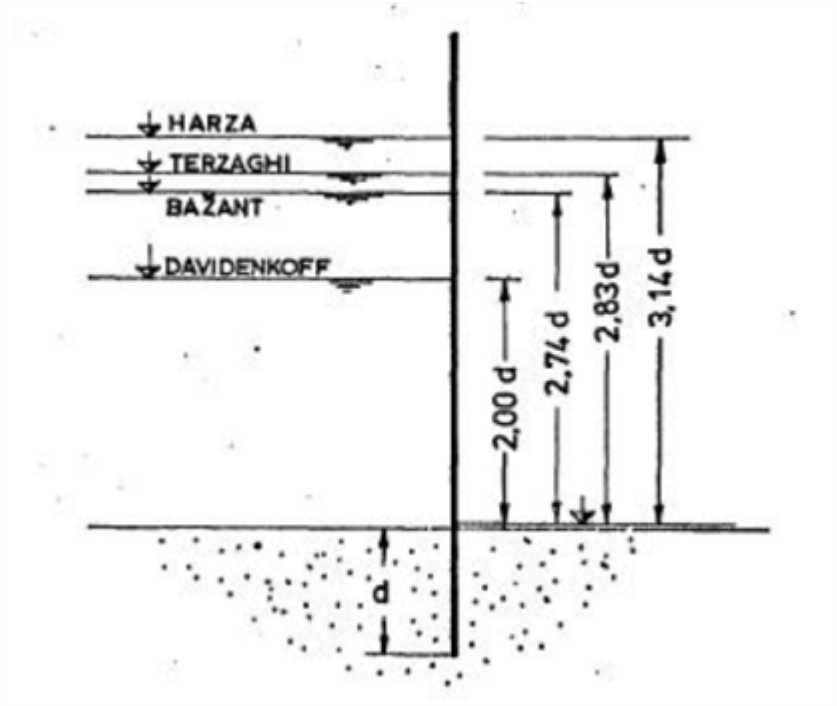
i_c Kritieke verhang [-].

n Poriëngehalte van de zandlaag achter het kwelscherm [-].

γ_k Volumegewicht van de korrel [kN/m^3].

γ_w Volumegewicht van water [kN/m^3].

Vergelijking 1 geldt voor verticale stroming door uniform zand waarbij de stroom- en equipotentiaallijnen parallel aan elkaar lopen, waarvan sprake is in bijvoorbeeld een kolomproef. Bij stroming onder een kwelscherm door vindt aan de onderzijde van het kwelscherm echter concentratie van stroomlijnen plaats, waardoor een andere situatie ontstaat. Voorts wordt de dichtheid van de stroomlijnen (een maat voor stromingsdruk) steeds groter in de richting van het kwelscherm. Het ligt dus voor de hand dat hydraulische grondbreuk als eerste plaats zal vinden in een grondprisma dicht bij het scherm. Diverse onderzoekers hebben verschillende hypothesen onderzocht wat betreft de vorm van het kritieke grondprisma, met de onderstaande uitkomsten (zie Figuur 1):



Figuur 1 Kritieke verval voor hydraulische grondbreuk volgens Davidenkoff (1956), Harza (1935), Terzaghi (1961) en Bazant (1953) [Van den Ham, 2009].

Figuur 1 geeft per mechanisme het verval weer waarbij hydraulische grondbreuk optreedt, voor de situatie van een damwand in een grondlichaam met een horizontaal maaiveld aan beide zijden van de wand. In dat geval geldt:

$$\frac{\Delta H}{d} = \frac{1}{a} \cdot \frac{(1-n)(\gamma_k - \gamma_w)}{\gamma_w} \qquad (2)$$

Hierin is ΔH het verschil in waterstand aan beide zijden van de wand [m], d de diepte van het kwelscherm [m] en voor a[-] worden de volgende waarden gegeven (zie Tabel 1):

Tabel 1 Waarde van a uit diverse onderzoeken.

Onderzoek	a [-]
Harza (1935)	3,14
Terzaghi (1961)	2,83
Bazant (1953)	2,74

Davidenkoff (1956)	2,00

In 1964 zijn door Müller-Kirchenbauer op schaal proeven uitgevoerd voor een situatie met kwelscherm dat omstroomd wordt. Hij concludeert dat voor een situatie zoals geschetst in Figuur 1, waarbij aan weerszijden van het scherm grond aanwezig is, voor de meest losse pakking (maximale waarde voor *n*) het criterium van Davidenkoff geldt. Voor de meest vaste pakking (minimale *n*) geldt het criterium van Harza. Voor pakking daartussenin kan het toelaatbare verval lineair geïnterpoleerd worden tussen deze grenzen. Indien aan de bovenstroomse zijde van het kwelscherm geen grond aanwezig is, dus als de stijghoogte aan de onderkant van het scherm gelijk is aan de buitenwaterstand, geldt het criterium van Davidenkoff, ongeacht de pakking. Het criterium in vergelijking 1 kan dan toegepast worden.

In 1995 zijn, gebaseerd op het heave-criterium, door Sellmeijer met behulp van het zogenoemde Fragmentenmodel ontwerpregels afgeleid voor het dimensioneren van kwelschermen. De teksten en figuren in dit artikel zijn ontleend aan het Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen [Förster, et al., 2012].

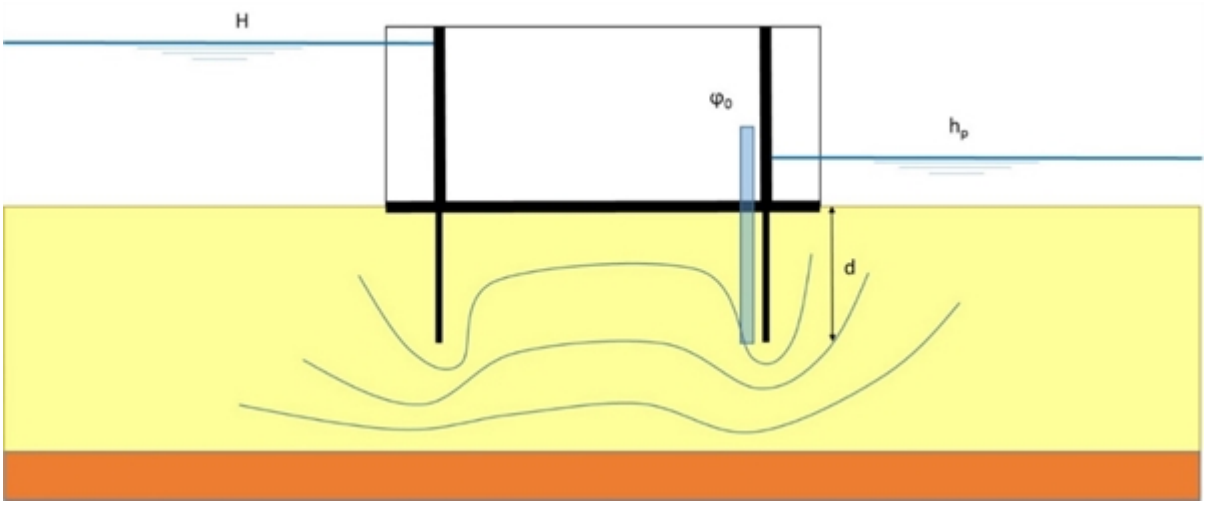
Versie 1.0: 2 juli 2025

Mechanismebeschrijving heave

Een beschrijving van het mechanisme heave is te vinden in paragraaf 4.7 van het Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen [Förster, et al., 2012]. Volledigheidshalve is dit artikel hier integraal overgenomen. Toevoegingen zijn *cursief* aangegeven.

Indien aan de binnenzijde van grondconstructies *en kunstwerken* op de watervoerende zandlaag geen of slechts een dunne afdekkende grondlaag aanwezig is, kunnen de verticale korrelspanningen aldaar wegvallen onder invloed van kwel. Dit wordt aangeduid met heave, wat overeenkomt met de vorming van drijfzand en met name optreedt bij verticaal uittredend grondwater.

Bij waterkerende kunstwerken en bij dijken kunnen kwelschermen worden toegepast. Kwelschermen vergroten de weerstand die een kwelstroom ondervindt. Het effect is dat de kwel vermindert en dat, nog belangrijker, de stroomsnelheid en daardoor de kans op erosie van de zandlaag afneemt. Bij kwelschermen aan de benedenstroomse zijde van de waterkering wordt de uittrederichting van de kwelstroom verticaal (zie Figuur 1). Hierbij doet zich het verschijnsel voor dat door de opwaartse kwelstroom de korrelspanningen in het zand achter het scherm afnemen. In het uiterste geval vallen de korrelspanningen geheel weg, waardoor feitelijk een drijfzandsituatie ontstaat. Dit mechanisme wordt heave genoemd.



Figuur 1 Mechanisme heave bij kunstwerken.

Heave kan twee gevolgen hebben [Calle en Sellmeijer, 1998]:

1. Een drijfzandsituatie treedt op, waardoor de op de zandlaag gelegen bescherming kapot gaat. Indien sprake is van een granulair stortebed, kan dit negatieve gevolgen hebben voor de eventuele filterwerking.
2. Door reductie van de effectieve korrelspanning in het gefluïdiseerde zand naar o wordt het krachtenevenwicht op het kwelscherm verstoord. Hierdoor kan de aansluiting tussen scherm en constructie verstoord worden, met desastreuze gevolgen, zoals piping (zie volgende punt).

Opgemerkt wordt dat beide effecten ook al kunnen optreden bij een geringere opwaartse kwelstroom dan noodzakelijk voor volledige fluïdisatie. Het ontbreken van een heldere grenstoestand moet bij de toetsing of het ontwerp worden afgedekt door een veiligheidsfactor (zie Safety format en modelbeschrijving heave model).

Een derde effect is niet beschreven in paragraaf 4.7 van het Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen, omdat het niet als maatgevend wordt beschouwd. Bij afwezigheid van een bescherming op de zandlaag kan uitspoeling van zanddeeltjes optreden. Hiermee wordt het pipingproces in gang gezet. Bij kunstwerken met een kwelscherm aan de benedenstroomse zijde is overschrijden van het heave-criterium nodig voordat piping kan ontstaan. Hierbij wordt aangetekend dat voor het uitspoelen van zanddeeltjes (lees: begin van piping) een veel groter kritiek verhang nodig is dan voor het ontstaan van een heave-situatie. In paragraaf 5.5 van het Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen wordt hier nader op ingegaan en wordt middels een rekenkundig voorbeeld aangegeven dat het benodigde kritieke verhang voor verticale piping een factor 30 groter is dan het kritieke verhang voor heave. Een geschikt rekenmodel ontbreekt echter en daarnaast bevat het voorbeeld een rekenfout, zodat met de theoretische beschouwing uit paragraaf 5.5 van het Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen terughoudend moet worden omgegaan. Wel kan geconcludeerd worden dat het veilig is te veronderstellen dat overschrijding van het heave-criterium zeker niet direct leidt tot piping, waarmee een veilige ondergrens is vastgesteld voor het kritieke verhang voor piping.

Bepalend voor dit mechanisme is de toename van waterspanningen, vanaf het maaiveld, met de diepte in het zand achter het kwelscherm (zie Figuur 1). Indien geen kwelstroming aanwezig is, dan is die toename hydrostatisch. In het zand is dan korrelspanning aanwezig. Bij een opwaartse kwelstroom zijn de waterspanningen groter dan hydrostatisch (er is dus wateroverspanning), wat leidt tot afname van de korrelspanningen. Een grenstoestand wordt bereikt wanneer de toename van de wateroverspanning met de diepte gelijk is aan de toename van de korrelspanning wanneer de waterspanning hydrostatisch zou zijn. De toename van de wateroverspanning kan worden uitgedrukt in termen van de verticale gradiënt van de grondwaterpotentiaal. De gradiënt waarbij de

grenstoestand optreedt wordt kritieke gradiënt genoemd. De feitelijke verticale gradiënt van de grondwater-potentiaal achter het kwelscherm, dus de toename van de wateroverspanning met de diepte, is in het algemeen niet constant. Daarom wordt bij heavecontroles gerekend met de over het kwelscherm gemiddelde verticale gradiënt van de grondwaterpotentiaal. Deze wordt getoetst aan de kritieke gradiënt, waarbij een veiligheidsfactor in acht wordt genomen.
Indien er sprake is van geconcentreerde lekkage door het kwelscherm ten gevolge van een gat, zal dit leiden tot een verlaging van het gemiddelde verhang over het gehele kwelscherm. In zoverre werkt geconcentreerde lekkage dus positief op de genoemde gevolgen van heave (eerder genoemde punten 1 en 2 hierboven). Voor een toetsing op heave hoeft dus geen rekening gehouden te worden met mogelijke gaten in het kwelscherm. Er kan echter wel een probleem ontstaan voor piping doordat de stroming door het gat leidt tot grotere stroomsnelheden bij het uittredepunt.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Safety format en modelbeschrijving heave model

Voor kunstwerken is – in tegenstelling tot dijken – alleen een deterministische verificatie beschikbaar. Hierbij wordt geverifieerd of de rekenwaarde van het optredende verhang over het benedenstroomse kwelscherm i (de belasting) kleiner is dan (een rekenwaarde van) het kritieke verhang i_c over het benedenstroomse kwelscherm (de sterkte):

$$i < i_c \tag{1}$$

De rekenwaarde van het optredend verhang i wordt als volgt bepaald:

$$i = \frac{\varphi_o - h_p}{d} \tag{2}$$

Het verhang waarbij heave optreedt, het kritieke verhang i_c, is (zie Figuur 1):

$$i_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{(1-n)(\gamma_k - \gamma_w)}{\gamma_w} \tag{3}$$

In de deterministische berekening wordt als rekenwaarde $i_{c;d}$ = 0,5 aangehouden[1]. Bij de controle op heave wordt dus nagegaan of de rekenwaarde van het optredende verhang over het benedenstroomse kwelscherm kleiner is dan het kritieke verticale verhang $i_{c,d}$ van 0,5. Opgemerkt wordt dat deze waarde algemeen wordt beschouwd als voldoende veilig, maar dat een nadere onderbouwing vooralsnog ontbreekt. De experimenten uit artikel Historie en kennisbasis heave model plaatsen deze waarde natuurlijk wel in perspectief.

Samenvoegen van bovenstaande formules levert de volgende formule voor de verificatie of heave optreedt:

$$\frac{\varphi_o - h_p}{d} \leq i_c \tag{4}$$

Hetgeen in de deterministische ontwerp- en beoordelingspraktijk neerkomt op:

$$\frac{\varphi_o - h_p}{d} \leq 0{,}5 \qquad (5)$$

Waarin:

φ_o Stijghoogte ter plaatse van de onderkant van het kwelscherm [m t.o.v. NAP].

h_p Polderpeil (vrije waterspiegel of maaiveld) [m t.o.v. NAP].

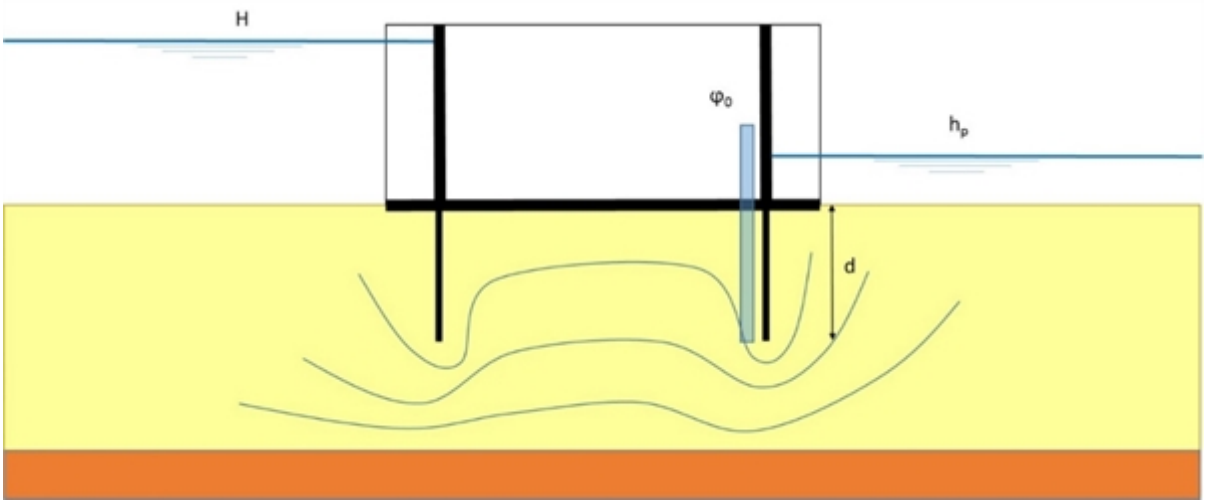
d Diepte van het kwelscherm [m].

γ' Ondergedompeld volumegewicht van de grond [kN/m³].

γ_w Volumegewicht van het (grond)water [kN/m³].

γ_k Volumegewicht van het korrelmateriaal (= 26) [kN/m³].

n Porositeit in de zandlaag [-].



Figuur 1 Mechanisme heave bij kunstwerken.

Het uittredeverhang i is sterk afhankelijk van het optredende verval over het kunstwerk en de geohydrologische configuratie en de plaats en diepte van eventuele kwelschermen.

Het kritieke verhang i_c is afhankelijk van de porositeit (zie formules 2 en 3). Uitgaande van een volumegewicht van de korrel van γ_k = 26,5 kN/m³ en een volumegewicht van water γ_w = 10,0 kN/m³, dan varieert het kritieke verhang afhankelijk van de porositeit n tussen 0,83 (n = 0,5) en 1,16 (n = 0,3). Als regel (voor het eerst opgenomen in [TAW, 1987] wordt op grond van praktijkervaringen een veilige toelaatbare waarde aangehouden van i_c = 0,5. Dat zou betekenen dat de veiligheidsfactor γ tussen 1,66 en 2,32 ligt. Door de in de praktijk aanwezige heterogeniteit van de ondergrond wordt deze theoretische veiligheid (homogene grond) echter veelal niet behaald.

Voor kunstwerken op een zandige ondergrond met kwelschermen wordt aangenomen dat wanneer het (verticale) uittredeverhang i groter is dan 0,5 zandmeevoerende wellen ontstaan en een verdergaande controle op piping vereist is. Afhankelijk van de gegradeerdheid en pakking van de zandlaag nabij het uittreepunt kunnen grotere toelaatbare verhangen dan 0,5 worden toegestaan. Daartoe zijn dichtheidsmetingen van de zandlaag nodig. In het Onderzoeksrapport Zandmeevoerende

wellen [Förster, et al., 2012] wordt hiervoor verwezen naar Bijlage A. Concrete aanwijzingen hieromtrent zijn echter niet opgenomen in deze bijlage. Nader onderzoek op dit punt is nodig indien optimalisatie van het heave-criterium gewenst is.
[1] Deze rekenwaarde voor het kritieke verhang is hoger dan bij dijken. Het verschil tussen heave achter een kwelscherm en heave over een deklaag is dat er bij een kwelscherm altijd een verticaal pad moet ontstaan door het aanwezige zand. Dit vergt fluïdisatie van het zandpakket benedenstrooms van het kwelscherm, waarvoor de benodigde gradiënt circa 1 is. Hierop is een veiligheidsfactor van circa 2 toegepast, hetgeen resulteert in een kritieke gradiënt van 0,5. Bij een deklaag wordt de ontstane scheur gevuld met een vloeibaar zand-water mengsel: deze scheur is in beginsel vrijwel nooit volledig gevuld met gepakt zand. Hierdoor kan de watersnelheid door de deklaag dermate groot worden dat het gat min of meer wordt schoongespoeld, hetgeen resulteert in een kleiner kritiek verhang.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Rekenmodellen voor berekening optredend verhang

Vanouds zijn kwelschermen bij dijken geweerd, omdat ze gezien werden als ‘vreemde elementen’. Door de Commissie Boertien is echter aanbevolen om kwelschermen als mogelijke optie voor ‘uitgekiend ontwerpen’ niet uit te sluiten. Deze aanbeveling heeft ertoe geleid dat goede en gemakkelijk te gebruiken rekenmodellen voor controle op het mechanisme heave zijn ontwikkeld. Met name de zogeheten fragmentenmethode – een semi-analytisch rekenmodel dat door de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW, thans Expertise Netwerk Waterveiligheid, ENW) specifiek voor heavecontroles bij dijken of waterkerende kunstwerken met verticale kwelschermen is ontwikkeld – wordt in de praktijk veel gebruikt. Een beschrijving van de beschikbare rekenmodellen voor de berekening van het optredend verhang ten behoeve van de controle op het mechanisme heave is te vinden in de Handleiding overstromingskansanalyse kunstwerken.

Versie 1.0: 2 juli 2025

3.6 Model van Bligh

Inleiding model van Bligh

Wanneer de kwelweg zuiver horizontaal loopt, kunnen de modellen van Bligh en van Sellmeijer gebruikt worden. In deze paragraaf wordt het model van Bligh beschreven.

Er wordt eerst ingegaan op de Historie en kennisbasis van het model, waarna het model zelf beschreven wordt in Safety format en modelbeschrijving model van Bligh. Vervolgens wordt aandacht besteed aan het Geldigheidsgebied. Tot slot wordt in artikel Wanneer Bligh en wanneer Sellmeijer gebruiken? besproken wanneer het model van Bligh toegepast kan worden en wanneer het model van Sellmeijer.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Historie en kennisbasis model van Bligh

De vigerende kennisbasis omtrent het model van Bligh is vastgelegd in het [Technisch rapport zandmeevoerende wellen, 1999]. In 1910 is door Bligh een empirische rekenregel opgesteld, op basis van een aantal bezwijkgevallen van op staal gefundeerde, kleine gemetselde dammen op verschillende grondslag in India. Met de rekenregel kan een veilige waarde voor het toelaatbare verval over de constructie berekend worden, als functie van de totale horizontale en verticale kwelweglengte (line of creep) onder de constructie en een factor die afhankelijk is van de grondslag.

In het model van Bligh worden verticale en horizontale kwelwegen even zwaar meegewogen, een aanpak die later door Lane sterk bekritiseerd is (zie Historie en kennisbasis model van Lane). In de

Nederlandse ontwerppraktijk voor zowel dijken als kunstwerken werd de regel van Bligh aanbevolen in situaties waarin uitsluitend horizontale kwelweg aanwezig was, daarmee werd dus impliciet de kritiek van Lane onderschreven.
Versie 1.0: 2 juli 2025

Safety format en modelbeschrijving model van Bligh

Voor het model van Bligh is het, net als in het model van Lane, onduidelijk hoe betrouwbaar een waterkering precies is als deze is goedgekeurd of ontworpen met dit model. Binnen het project VNK2 is destijds wel een probabilistische benadering van dit model geïntroduceerd. De eigenschappen van de stochastische variabelen in beide modellen zijn hierbij geschat op basis van expert judgement. Deze methode is na VNK2 niet verder doorontwikkeld en met de software die beschikbaar is in het BOI is het niet mogelijk om deze probabilistische benadering te doen.

In het model van Bligh wordt geverifieerd of de rekenwaarde van het optredende verval over het kunstwerk ΔH (de belasting) kleiner is dan de rekenwaarde van het kritieke verval ΔH_c over het kunstwerk (de sterkte):

$$\Delta H < \Delta H_c \tag{1}$$

De rekenwaarde van het optredende verval is het verval met een overschrijdings-kans die getalsmatig gelijk is aan de maximaal toelaatbare overstromingskans. De rekenwaarde van het kritieke verval ΔH_c over het kunstwerk wordt volgens het model van Bligh als volgt berekend:

$$\Delta H_c = \frac{L_h}{C_{creep}} \tag{2}$$

Indien een opbarstkanaal aanwezig is waardoor zand naar buiten moet worden afgevoerd, zal het gefluïdiseerde zand in het kanaal voor extra weerstand zorgen. Op basis van proeven door Sellmeijer (1981) is in het Technisch rapport Zandmeevoerende wellen [TAW, 1999] de volgende correctie op het model van Bligh voorgesteld, indien een opbarstkanaal aanwezig is:

$$\Delta H - 0{,}3\ d < \Delta H_c = \frac{L_h}{C_{creep}} \tag{3}$$

Waarin:

ΔH_c Kritieke verval over het kunstwerk [m].

ΔH Aanwezig verval over het kunstwerk [m].

L_h Totale lengte van de horizontale delen van de kwelweg [m].

C_{creep} Creep-factor van Bligh (materiaalconstante van de ondergrond) [-]. In Tabel 1 zijn de door Bligh aangegeven waarden voor verschillende typen materiaal in de grondlaag weergegeven. Deze waarden kunnen worden opgevat als rekenwaarden.

De kwelweglengte L is in de oorspronkelijke formule van Bligh gelijk aan de totale lengte van de horizontale en verticale delen van de kwelweg, de ‘line of creep‘. In de Nederlandse ontwerp- en

beoordelingspraktijk wordt de methode Bligh alleen gebruikt als de kwelweg zuiver horizontaal loopt, dus verticale delen van de kwelweg komen niet voor. Het in rekening brengen van de horizontale kwelweglengte is alleen toegestaan wanneer een goede aansluiting tussen de onderkant van de constructie en de ondergrond gewaarborgd is.
De factor C_{creep} is een materiaalconstante van de ondergrond en wordt de creep-factor genoemd. C_{creep} is gebaseerd op een bovengrens wat impliceert dat deze waarden kunnen worden opgevat als rekenwaarden; hierop hoeft géén veiligheidsfactor te worden toegepast. In Tabel 1 zijn de door Bligh aangegeven waarden voor verschillende typen materiaal in de grondlaag weergegeven.

Tabel 1 Creep-factoren voor het model van Bligh.

Grondsoort	Mediane korreldiameter [µm][1]	C_{creep}[-] (Bligh)
Uiterst fijn zand, silt	< 105	
Zeer fijn zand	105 – 150	18
Zeer fijn zand (mica)		18
Matig fijn zand (kwarts)	150 – 210	15
Matig grof zand	210 – 300	
Zeer/uiterst grof zand	300 – 2000	12
Fijn grind	2000 – 5600	9
Matig grof grind	5600 – 16000	
Zeer grof grind	> 16000	4

[1] Indicaties conform NEN 5104 (september 1989).

Versie 1.0: 2 juli 2025

Geldigheidsgebied model van Bligh

De methode Bligh is van toepassing op kunstwerken waarbij sprake is van een zuiver horizontale kwelweg. Er zijn verder geen begrenzingen van het toepassingsgebied.

In Geldigheidsgebied model van Lane wordt een beschouwing gegeven van het toepassingsgebied van de formule van Lane. In tegenstelling tot de studie van Lane is bij Bligh geheel onduidelijk hoeveel dammen per grondsoort geanalyseerd zijn en in hoeveel gevallen sprake was van bezwijken. Een analyse zoals in eerdergenoemd artikel voor Lane is gegeven, is dan ook niet te maken.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Wanneer Bligh en wanneer Sellmeijer gebruiken?

Wanneer de kwelweg zuiver horizontaal loopt, kunnen de modellen van Bligh en van Sellmeijer gebruikt worden. In dit artikel wordt aangegeven wanneer welk model van toepassing is.

Voor situaties waarbij sprake is van een volledig horizontale kwelweg én de kwelstroom loopt in één richting wordt het model van Sellmeijer gebruikt. Indien sprake is van een volledig horizontale kwelweg en de kwelstroom loopt niet in één richting – bij de aanwezigheid van kwelschermen – dan wordt in eerste instantie het model van Bligh gebruikt. Als met het model van Bligh niet kan worden aangetoond dat de faalkans verwaarloosbaar klein is, dan kan het model van Sellmeijer gebruikt worden om dit alsnog aan te tonen. De verwachting is overigens dat dit in de praktijk weinig soelaas zal bieden.

Toelichting bij toepasbaarheid model van Sellmeijer

Het model van Sellmeijer is onverkort toepasbaar voor de volgende situaties:

- Kwelweg onder het kunstwerk (onderloopsheid) indien er geen onderloopsheidschermen aanwezig zijn en de aansluiting tussen constructie en zandlaag goed is (geen spleten).
- Kwelweg naast het kunstwerk (achterloopsheid) indien er geen achterloopsheidschermen aanwezig zijn.

Indien de kwelweg onder of naast een kunstwerk loopt waarbij kwelschermen aanwezig zijn, is het model van Sellmeijer niet onverkort toepasbaar. Het model van Sellmeijer is bedoeld voor horizontale grondwaterstroming in één richting. Dit is het geval als de kwelweg onder het kunstwerk door loopt of langs het kunstwerk bij een kunstwerk zonder kwelschermen. In deze situaties is het model van Sellmeijer dus onverkort van toepassing.

Bij kunstwerken zijn echter bijna altijd kwelschermen aanwezig onder en naast het kunstwerk. Hierdoor wordt de kwelstroom gedwongen van richting te veranderen, waardoor de kwelweg langer wordt en de weerstand tegen piping toeneemt. Dit effect kan niet worden gekwantificeerd en meegenomen in het model van Sellmeijer. Onder verwaarlozing van de aanwezigheid van de kwelschermen is wel sprake van horizontale grondwaterstroming in één richting. Het model van Sellmeijer kan dan ook toegepast worden om te proberen alsnog aan te tonen dat de faalkans verwaarloosbaar klein is als dat met het model van Bligh niet gelukt is.

Toelichting bij toepasbaarheid model van Bligh

In het Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen [Förster, et al., 2012] is geconcludeerd dat het model van Bligh niet onder alle omstandigheden voldoende veiligheid biedt bij dijken. Dit is reden geweest om Bligh te schrappen en te vervangen door Sellmeijer of (indien Sellmeijer niet kan worden toegepast) Lane-[1]. Dit is echter geheel gebaseerd op onderzoek bij dijken. Bij kunstwerken is door de aanwezigheid van kwelschermen sprake van een ander grondwaterstromingsbeeld dan bij dijken. Voor kunstwerken met kwelschermen kunnen de ervaringen bij dijken daarom niet onverkort worden overgenomen.

Omdat geen specifiek onderzoek naar achterloopsheid bij kunstwerken gedaan is, zou met een schuin

oog naar praktijkwaarnemingen kunnen worden gekeken. In Nederland zijn veel kunstwerken gerealiseerd waarbij de lengtes van de achterloopsheidschermen zijn ontworpen met Bligh. Er zijn geen bezwijkgevallen bekend van kunstwerken op achterloopsheid waarbij de kwelschermen zijn ontworpen met Bligh. In de wetenschap dat (met name in regionale keringen maar ook wel in primaire keringen) veel kunstwerken een (bijna) maatgevende belasting hebben ondergaan, kan voorzichtig worden geconcludeerd dat de regel van Bligh voor kunstwerken in ieder geval niet evident onveilig is geweest. Omdat een beter model momenteel niet voorhanden is, is binnen het programma Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium (BOI) besloten het model van Bligh vooralsnog te handhaven voor de situatie waarbij de kwelweg volledig horizontaal loopt en er kwelschermen aanwezig zijn.

Resumé

Resumerend is binnen het WTI2017 de volgende keuze gemaakt:

- Voor situaties waarin sprake is van horizontale grondwaterstroming in één richting (dus géén onder- en achterloopsheidschermen) is de situatie bij kunstwerken volledig analoog aan de situatie bij dijken. Daarom mag het model van Bligh niet worden toegepast voor situaties waarin de kwelweg onder (onderloopsheid) het kunstwerk door gaat of naast (achterloopsheid) het kunstwerk loopt én er geen achterloopsheidschermen aanwezig zijn.
- Gebaseerd op de praktijkervaring lijkt het erop dat de methode van Bligh wel voldoende veiligheid biedt voor de situatie achterloopsheid bij kunstwerken mét een achterloopsheidscherm en daarom in deze situatie wel kan worden toegepast. Dit is mede ingegeven doordat er geen beter model beschikbaar is. Eventueel kan het model van Sellmeijer toegepast worden, waarbij dan geen rekening wordt gehouden met de achterloopsheidschermen.

Voor kunstwerken met achterloopsheidschermen wordt dus voorgesteld om, in afwijking van hetgeen over het model van Bligh staat geschreven in het Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen [Förster, et al., 2012], het model van Bligh wél te gebruiken.

[1] In paragraaf 5.8 van het Onderzoeksrapport wordt voor situaties met een volledig horizontale kwelweg alleen de rekenregel van Sellmeijer benoemd als zijnde van toepassing. In paragrafen 5.3.4 en 6.3.5 wordt echter gesteld dat de methode van Lane in alle gevallen mag worden toegepast, met name in gevallen waarin Sellmeijer niet kan worden toegepast.

Versie 1.0: 2 juli 2025

3.7 Model van Sellmeijer

Inleiding model van Sellmeijer

Wanneer de kwelweg zuiver horizontaal loopt, kunnen de modellen van Bligh en van Sellmeijer gebruikt worden. In deze paragraaf wordt het model van Sellmeijer beschreven.

Voor een beschrijving wanneer het model van Bligh toegepast kan worden en wanneer het model van Sellmeijer wordt verwezen naar het artikel Wanneer Bligh en wanneer Sellmeijer gebruiken? Voor de historie en kennisbasis van het model van Sellmeijer wordt verwezen naar het Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen [Förster, et al., 2012]. Het model zelf wordt kort beschreven in Safety format en modelbeschrijving model van Sellmeijer en het geldigheidsgebied in Geldigheidsgebied model van Sellmeijer.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Safety format en modelbeschrijving model van Sellmeijer

Voor het model van Sellmeijer is, in tegenstelling tot de modellen van Lane, Bligh en heave, wel een semi-probabilistische werkwijze beschikbaar. Onderstaand wordt nader ingegaan op de bepaling van de faalkans met dit model.

Bepaling faalkans

De faalkans voor piping $P_{f,KW,PI}$ volgt uit de faalboom in artikel Beschijving faalproces piping bij kunstwerk. Hierin zijn de volgende deelfaalmechanismen te onderscheiden:

1. Optreden onder- en/ of achterloopsheid (grenstoestandsfunctie Z_{PIP1}).
2. Het geheel bezwijken van het kunstwerk nadat onder- en/of achterloopsheid heeft plaatsgevonden (grenstoestandsfunctie Z_{PIP2}).

Voor grenstoestandsfunctie Z_{PIP2} (bezwijken kunstwerk in geval van optreden onder- en/of achterloopsheid) wordt in eerste instantie aangehouden dat bezwijken van het kunstwerk altijd optreedt zodra er sprake is van onder- en/of achterloopsheid ($P(Z_{PIP2} < 0) = 1$). Aanscherping hiervan is mogelijk maar vergt een specialistische beschouwing die buiten het kader van deze Technische leidraad valt.

Voor grenstoestandsfunctie Z_{PIP1} geldt:

$$Z_{PIP1} = \Delta H_c - (\Delta H - 0{,}3d) \qquad (1)$$

Waarin:

ΔH_c Kritieke verval zoals berekend met behulp van het model van Sellmeijer [m].

ΔH Aanwezig verval over het kunstwerk [m].

d Dikte van een eventuele afdekkende laag [m].

De rekenwaarde van het optredende verval is het verval met een overschrijdings-kans die getalsmatig gelijk is aan de maximaal toelaatbare overstromingskans.

De sterktevariabele ΔH_c wordt bepaald met behulp van het model van Sellmeijer. Het model van Sellmeijer is beschreven in paragraaf 7.3 van het Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen [Förster, et al., 2012]. De geactualiseerde versie die is opgenomen in het BOI is als volgt:

$$\Delta H_c = L \cdot F_{resistance} \cdot F_{scale} \cdot F_{geometry} \qquad (2)$$

met:

$$F_{resistance} = \frac{\gamma'_p}{\gamma_w}\{\eta \tan(\theta)\} \quad (3)$$

$$\gamma'_p = \gamma_p - \gamma_w \quad (4)$$

$$F_{scale} = \frac{d_{70m}}{\sqrt[3]{\kappa L}}\left(\frac{d_{70}}{d_{70m}}\right)^{0,4} \quad (5)$$

$$\kappa = \nu \cdot \frac{k}{g} \quad (6)$$

$$F_{geometry} = F(G) = 0,91\left(\frac{D}{L}\right)^{\frac{0,28}{\left(\frac{D}{L}\right)^{2,8}-1}+0,04} \quad (7)$$

Waarin:

ΔH_c Kritieke verval zoals berekend met behulp van het model van Sellmeijer [m].

L Kwelweg (horizontaal gemeten) [m].

$F_{resistance}$ Weerstandsfactor, beschrijft het grensevenwicht van zandkorrels op de bodem van de pipe [-].

F_{scale} Schaalfactor, reflecteert de verhouding tussen de processchaal van het mechanisme dat voor korreltransport zorgt en de processchaal van de grondwaterstroming die dit transportmechanisme aandrijft [-].

$F_{geometry}$ Geometriefactor, beschrijft de invloed van de vorm van de geometrie van de ondergrond op de grondwaterstroming [-]. De gepresenteerde formule is geldig voor een standaard configuratie met één homogene zandlaag onder het ondoorlatende kunstwerk. Bij een afwijkende geometrie moet de factor $F_{geometry}$ worden bepaald met de pipingmodule uit het grondwaterstromingsmodel MSeep.

γ'_p (Schijnbaar) volumegewicht van de zandkorrels onder water [kN/m^3].

γ_p Volumegewicht van zandkorrels (= 26) [kN/m^3].

γ_w Volumegewicht van water [kN/m^3].

θ Rolweerstandshoek van de zandkorrels (= 37) [°].

η Coëfficiënt van White (= 0,25) [-].

κ Intrinsieke doorlatendheid van de pipinggevoelige/bovenste zandlaag [m^2].

k Specifieke doorlatendheid van de pipinggevoelige/bovenste zandlaag [m/s].

ν Kinematische viscositeit van water bij 10°C (= 1,33·10^{-6}) [m^2/s].

g Versnelling van de zwaartekracht (= 9,81) [m/s^2].

d_{70} 70-percentielwaarde van de korrelverdeling [m].

d_{70m} Gemiddelde d_{70} van de in de kleine schaalproeven toegepaste zandsoorten, waarop deze formule is gefit (= 2,08·10^{-4}) [m].

D Dikte van het zandpakket [m].

Veiligheidsfactoren

In de semi-probabilistische ontwerpverificatie wordt de volgende veiligheids-factor toegepast op het kritieke verval:

γ_{pip} Veiligheidsfactor voor het faalmechanisme piping [-]. Deze is afhankelijk van de gestelde betrouwbaarheidseis.

Hiermee komt de verificatie-eis uitgaande van het model van Sellmeijer er als volgt uit te zien:

$$\frac{\Delta H_c}{\gamma_{pip}} > (\Delta H - 0{,}3d) \qquad (8)$$

Waarin:

ΔH_c Kritieke verval zoals berekend met behulp van het model van Sellmeijer [m].

ΔH Aanwezig verval over het kunstwerk [m].

d Dikte van een eventuele afdekkende laag [m].

De veiligheidsfactor voor piping γ_{pip} die wordt toegepast in het model van Sellmeijer wordt bepaald met behulp van de volgende formule:

$$\gamma_{pip} = 1{,}04 \cdot e^{(0{,}37\beta_{eis,KW,PI} - 0{,}43\beta_{max})} \qquad (9)$$

Waarin:

$\beta_{eis,KW,PI}$ Betrouwbaarheidsindex behorend bij de faalkanseis $P_{eis,KW,PI}$. Te bepalen als: $\beta_{eis,KW,PI} = -\Phi^{-1}(P_{eis,KW,PI})$ [-].

β_{max} Betrouwbaarheidsindex behorend bij de maximaal toelaatbare overstromingskans P_{max}. Te bepalen als: $\beta_{max} = -\Phi^{-1}(P_{max})$ [-].

Φ^{-1} Inverse van de standaardnormale verdeling.

Omgekeerd kan formule 9 ook gebruikt worden om tot een schatting van de faalkans door piping te komen. Hierbij geldt de volgende relaties:

$$P_{f,PIP1} = \Phi\left(\frac{ln\left(\frac{F_p}{1{,}04}\right) + 0{,}43\beta_{max}}{0{,}37}\right) \qquad (10)$$

met:

$$F_p = \frac{\Delta H_c}{\gamma_b \cdot (\Delta H - 0{,}3d)} \qquad (11)$$

Waarin:

$P_{f,PIP1}$ Faalkans voor onder- en/of achterloopsheid [1/jaar].

Φ Standaard (cumulatieve) normale verdeling.

F_p Stabiliteitsfactor [-].

β_{max} Betrouwbaarheidsindex behorend bij de maximaal toelaatbare overstromingskans van het dijktraject P_{max}. Te bepalen als: $\beta_{max} = -\Phi^{-1}(P_{max})$ [-].

ΔH_c Kritieke verval zoals berekend met behulp van het model van Sellmeijer [m].

ΔH Optredend verval over het kunstwerk [m].

γ_b Schematiseringsfactor [-].

d Dikte van een eventuele afdekkende laag [m].

Omgang met schematiseringsonzekerheid

Indien sprake is van schematiseringsonzekerheid, kan met scenario's worden gewerkt. Per scenario kan met formule 10 een faalkans geschat worden. Door de faalkans per scenario te wegen met de scenariokansen en vervolgens te sommeren kan de overall-betrouwbaarheid bepaald worden.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Geldigheidsgebied model van Sellmeijer

De aangepaste regel van Sellmeijer is gevalideerd van een d_{70} van 150 µm (kleinste d_{70} toegepast bij kleine schaalproeven) tot een d_{70} van 500 µm en een relatieve dichtheid van >50%.

Ten aanzien van de geometriefactor $F_{geometry}$ dringt de vraag zich op of een kunstwerk ook valt onder de definitie van een standaard dijkconfiguratie. Omdat een kunstwerk per definitie een ondoorlatende onderzijde heeft, kan formule 5 uit het artikel Safety format en modelbeschrijving model van Sellmeijer ook gebruikt worden voor kunstwerken op een ondergrond die bestaat uit één doorlatende zandlaag.

Versie 1.0: 2 juli 2025

4. Faalmechanisme sterkte en stabiliteit puntconstructies

Inleiding faalmechanisme sterkte en/of stabiliteit puntconstructies

De sterkte en/of stabiliteit van waterkerende kunstwerken moet groot genoeg zijn om de kans op bezwijken ten gevolge van extreme verval- en golfbelasting voldoende klein te houden. Bij zowel een beoordeling als een ontwerpverificatie van de eisen uit de Omgevingswet gaat het hierbij om een overstroming met significante gevolgen na het bezwijken of instabiel worden van het kunstwerk. Het faalmechanisme heeft dus betrekking op succesvol of deels succesvol gesloten waterkerende kunstwerken. Het faalmechanisme bestaat uit twee deel-faalmechanismen: *bezwijken van de waterkerende constructieonderdelen (STCO)* en *instabiliteit van het kunstwerk en het aansluitende grondlichaam (STCG)*.

De komende paragrafen (zie gerelateerde artikelen) gaan dieper in op dit faalmechanisme.

Versie 1.0: 2 juli 2025

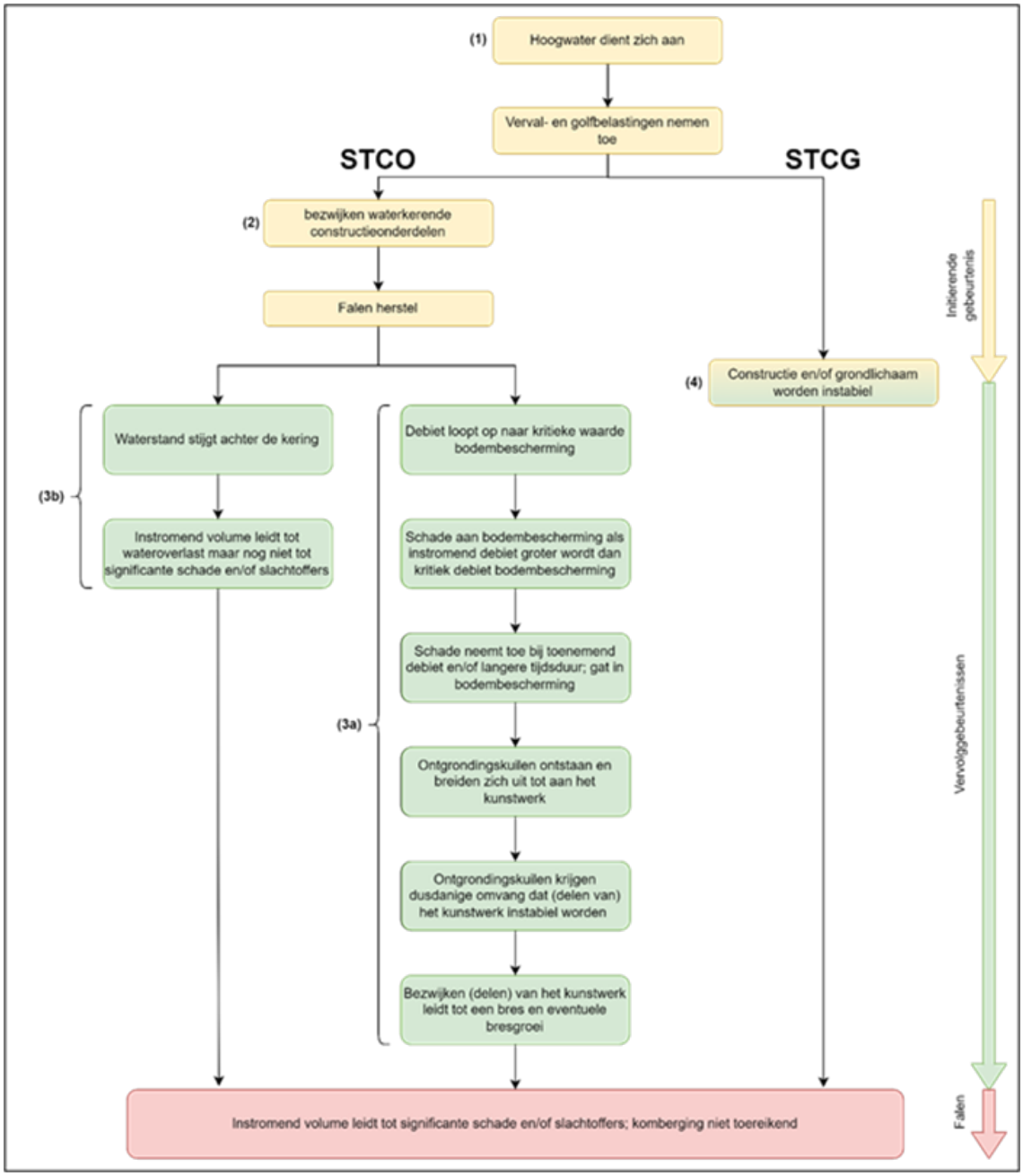
4.1 Fenomenologische beschrijving falen door sterkte en/of stabiliteit

Beschrijving faalproces sterkte en/of stabiliteit

Falen door het faalmechanisme *sterkte of stabiliteit* treedt op wanneer de belastingen dusdanig groot worden dat het kunstwerk (of delen ervan) bezwijkt, of dat het kunstwerk instabiel wordt (kantelen, verzakken, verschuiven) en er vervolgens zoveel water instroomt dat dit leidt tot substantiële schade en/of slachtoffers (overstromingsgevolgen). Afhankelijk van het type constructie, de locatie en de overige functies naast water keren, kan een overstroming optreden ten gevolge van verschillende belastingsituaties. In het algemeen is de hoogwaterbelastingsituatie dominant voor overstromingsgevolgen. Het aantal andere belastingsituaties met dezelfde gevolgen is meestal beperkt, zodat in de komende artikelen (zie gerelateerde artikelen) enkel de fenomenologische beschrijving in de hoogwatersituatie wordt uitgewerkt. In Figuur 1 is het bijbehorende faalproces opgenomen. In een ontwerpverificatie of beoordeling dient echter wel te worden nagegaan of andere belastingsituaties relevant zijn om mee te nemen, zoals aanvaren in dagelijkse situaties.

Falen door aanvaren

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



Figuur 1 Faalproces Sterkte en/of Stabiliteit

Falen ten gevolge van bezwijken waterkerende constructieonderdelen (STCO)

Deze paragraaf beschrijft het falen als gevolg van het bezwijken van de waterkerende constructieonderdelen in de hoogwaterbelastingsituatie. De onderstaande foutenboom in woorden volgt het faalproces in Figuur 1.

Falen treedt op als:

(1) Zich een hoogwater aandient

EN (2) Er als gevolg hiervan dusdanig grote belastingen optreden dat de sterkte van de waterkerende constructieonderdelen niet meer toereikend is en deze bezwijken. Een groot volume water stroomt nu binnen.

EN (3a) De bodembescherming achter het kunstwerk bezwijkt, waarna ontgrondingskuilen in de (niet

meer beschermde) ondergrond ontstaan. Het kunstwerk verliest zijn standzekerheid (bezwijkt) met als gevolg een voortschrijdende bres in de waterkering en substantiële schade en/of slachtoffers (overstroming).[1]
OF (3b) Het kunstwerk behoudt haar standzekerheid en blijft staan, maar het instromend volume door de constructie ten gevolge van het bezwijken van de waterkerende onderdelen kan niet worden geborgen in het achterliggende (water)systeem zonder dat dit leidt tot substantiële schade en/of slachtoffers (overstroming).

Het komt erop neer dat falen optreedt als de verval- en golfbelasting dusdanig oploopt dat, bij een (deels) gesloten kunstwerk, de keermiddelen bezwijken en er ongewenst water binnenstroomt. Vervolgens leidt dit instromende debiet tot overschrijding van het beschikbare kombergende volume, al dan niet inclusief bezwijken van het kunstwerk en eventuele bresgroei.

Falen ten gevolge van instabiliteit constructie en grondlichaam (STCG)

Deze paragraaf beschrijft het falen als gevolg van instabiliteit van constructie en grondlichaam in de hoogwaterbelastingsituatie. De onderstaande foutenboom in woorden volgt het faalproces in Figuur 1.

Falen treedt op als:

(1) Zich een hoogwater aandient

EN (4) Er als gevolg hiervan dusdanige belastingen op het kunstwerk en het aansluitende grondlichaam optreden dat instabiliteit in de vorm van verticaal of horizontaal verplaatsen dan wel kantelen optreedt. De instabiliteit leidt tot bezwijken van grote delen van de constructie en verlies van standzekerheid, wat weer leidt tot het optreden van een voortschrijdende bres in de waterkering en substantiële schade en/of slachtoffers (overstroming).

Het komt erop neer dat falen optreedt als de vervalbelasting dusdanig oploopt dat, bij een (deels) gesloten kunstwerk, het gehele kunstwerk instabiel wordt en vervolgens bezwijkt en er ongewenst water binnenstroomt. Vervolgens leidt dit instromende debiet tot overschrijding van het beschikbare kombergende volume.

[1] In sommige gevallen kan het na het ontstaan van ontgrondingskuilen en verlies van standzekerheid gebeuren dat er toch geen voortschrijdende bres ontstaat, omdat het kunstwerk bijvoorbeeld volledig is ingebed in harde kadeconstructies. In dat geval komt de situatie overeen met 3b. Vanuit de primaire functie van het kunstwerk zal een dergelijke benadering bij het ontwerp echter niet gewenst zijn. In geval van een beoordeling/toetsing vanuit waterveiligheid kan het wel worden gebruikt om aan te tonen dat wordt voldaan aan de eisen.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Nadere beschrijving faalproces sterkte en/of stabiliteit

Dit artikel beschrijft het faalproces verder in detail. Vertrekpunt hierbij is dat het kunstwerk, nadat het zijn primaire functie heeft vervuld (het laten passeren van water, voertuigen, mensen et cetera van de waterkering) deels of geheel gesloten is.

Initiërende gebeurtenis STCO

De initiërende gebeurtenis voor STCO in een hoogwaterbelastingsituatie betreft het optreden van een verval- en golfbelasting waarbij de sterkte van een waterkerend constructieonderdeel niet meer toereikend is om deze belasting te weerstaan. In eerste instantie zullen grote vervormingen ontstaan waarna bij verder oplopende belastingen de waterkerende constructieonderdelen zullen bezwijken.

Dit proces wordt gevat in de initiële gebeurtenis: *bezwijken van waterkerende constructieonderdelen (STCO)*.

Initiërende gebeurtenis STCG

De initiërende gebeurtenis voor STCG betreft het optreden van een vervalbelasting waarbij het kunstwerk en het aansluitende grondlichaam instabiel raken en grote verplaatsingen ondergaan. Op dat moment zal de constructie over het algemeen ook substantieel vervormen, wat leidt tot bezwijken en verlies van het waterkerende vermogen. Dit leidt tot een bres en, afhankelijk van de wijze waarop de constructie is ingebed in de waterkering, vervolgens tot een voortschrijdende bres. De vervolg-gebeurtenis treedt dus automatisch op wanneer de initiële gebeurtenis plaatsvindt, zodat er geen onderscheid tussen beide wordt gemaakt. Dit proces wordt gevat in de initiële gebeurtenis én tegelijkertijd het volledige faalmechanisme: *instabiliteit van constructie en grondlichaam (STCG)*.

Alleen de hoogwaterbelastingsituatie en eventueel het droogzetten van de constructie kan leiden tot dergelijke instabiliteit. Andere belastingsituaties hoeven hier niet beschouwd te worden. Omdat droogzetten een gecontroleerde situatie is en dus kan worden voorkomen, wordt in artikel Inleiding faalmechanisme sterkte en/of stabiliteit puntconstructies alleen de hoogwaterbelastingsituatie beschouwd.

De stabiliteit van de achterliggende bodembescherming is hier niet van belang, aangezien deze moet voorkomen dat instabiliteit van het kunstwerk kan optreden als gevolg van ontgrondingen. Omdat instabiliteit van het kunstwerk reeds is opgetreden als gevolg van dit faalmechanisme heeft de bodembescherming geen positieve invloed meer op het bezwijkproces.

Vervolggebeurtenissen STCO en STCG

Falen van het kunstwerk (optreden van overstromingsgevolgen) treedt alleen op wanneer het kombergend vermogen niet meer toereikend is en er substantiële schade optreedt en/of er dodelijke slachtoffers vallen. Dit kan gebeuren nadat het kunstwerk is bezweken, waarbij een bres in de waterkering is ontstaan, of bij een standzeker kunstwerk. Er wordt aangenomen dat het instromende volume water in geval van een bres per definitie leidt tot overstromingsgevolgen, wat meestal ook zo is. In alle overige gevallen is dit een conservatief uitgangspunt.

STCO

In het geval van STCO zijn twee vervolggebeurtenissen mogelijk: Overschrijden komberging na bezwijken kunstwerk door falen bodembescherming (3a) en Overschrijden komberging bij standzeker kunstwerk (3b) (zie ook het artikel Beschrijving faalproces sterkte en/of stabiliteit). Hierbij is vervolggebeurtenis 3a het meest waarschijnlijke scenario. Een bodembescherming is namelijk meestal niet bestand tegen een instromend debiet dat optreedt bij een extreem verval waarbij de keermiddelen zijn bezweken.

Beide vervolggebeurtenissen zijn in de artikelen Nadere beschrijving faalproces overslag en/of overloop en Nadere beschrijving faalproces betrouwbaarheid sluiting uitgebreid beschreven.

STCG

In het geval van STCG treedt falen per definitie op bij een bezweken kunstwerk, omdat de opgetreden instabiliteit automatisch leidt tot bezwijken van het kunstwerk en het ontstaan van een bres. Oftewel de vervolggebeurtenis is reeds samengenomen met de initiële gebeurtenis, zie de paragraaf Initiërende gebeurtenis STCG hierboven. De sterkte van de achterliggende bodembescherming is hier dus niet van belang, aangezien deze moet voorkomen dat instabiliteit van het kunstwerk kan optreden als gevolg van ontgrondingen door instromend water. Omdat instabiliteit van het kunstwerk reeds is opgetreden als gevolg van dit faalmechanisme heeft de bodembescherming dus geen positieve invloed meer op het bezwijkproces.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Historie en veiligheidsfilosofie faalmechanisme sterkte en/of stabiliteit

Historie

De tot 2017 vigerende kennisbasis, die in de volgende paragraaf nader wordt toegelicht, is vastgelegd in de [Leidraad kunstwerken, 2003]. Deze is eerder als groene versie gepubliceerd, namelijk als [Leidraad waterkerende kunstwerken en bijzondere constructies, 1997] met het bijbehorende [Basisrapport, 1997]. De voorloper van de Leidraad waterkerende kunstwerken en bijzondere constructies is de [Leidraad voor ontwerp, beheer en onderhoud van constructies en vreemde objecten in, op en nabij waterkeringen, 1976]. In dit laatste document wordt voor het eerst aandacht besteed aan constructief bezwijken in relatie tot waterkeren.

Na publicatie van de Leidraad kunstwerken zijn toetsvoorschriften opgesteld ten behoeve van de wettelijke toetsingen tot en met de derde toetsronde (onder andere het [Voorschrift toetsen op veiligheid, 2006]. Hierin is zoveel mogelijk aangesloten op de Leidraad kunstwerken.

Na het verschijnen van de Leidraad kunstwerken en het VTV2006 is voor het faalmechanisme sterkte en/of stabiliteit nader onderzoek gedaan naar het bepalen van de juiste rekenwaarden voor een semi-probabilistische toetsing [Meinen, et al., 2017].

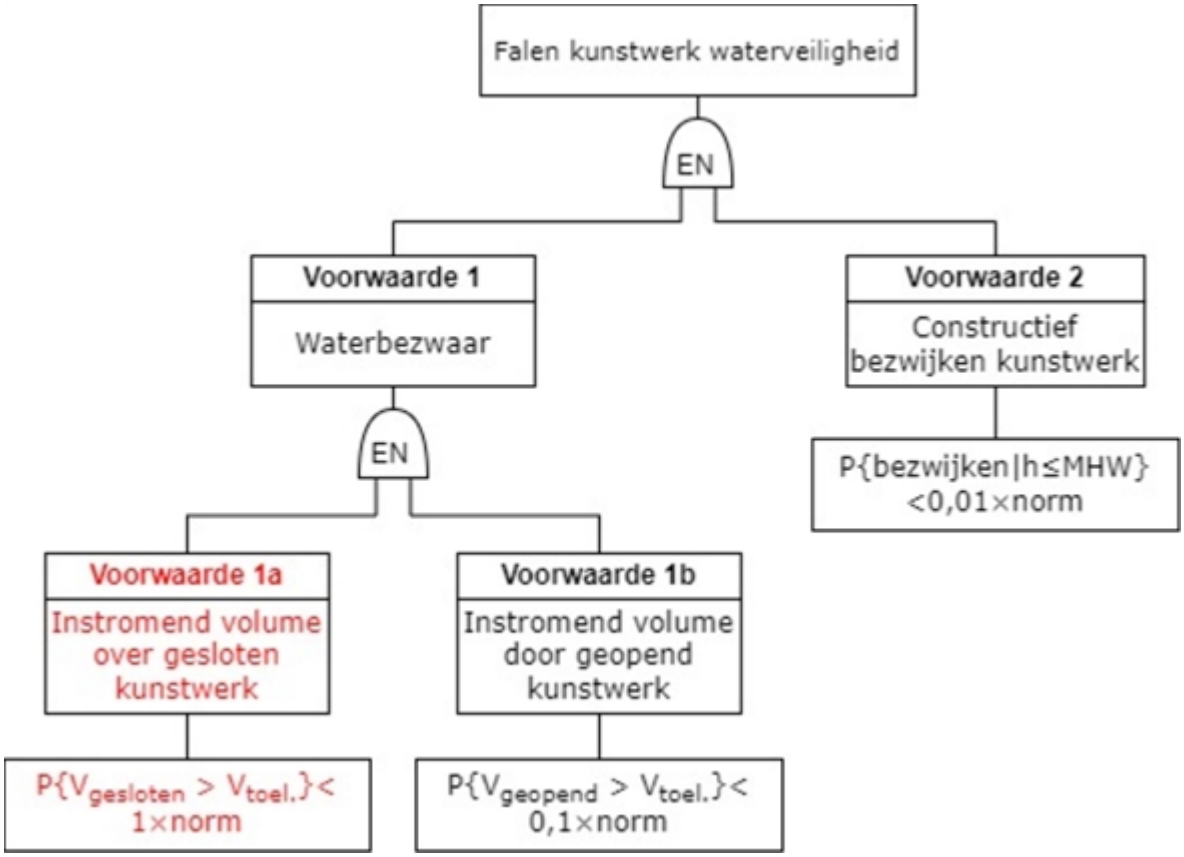
Veiligheidsfilosofie en beoordelingsmethodieken tot 2017

Zoals toegelicht in de [Grondslagen voor waterkeren, 1998] vond vanaf 1998 ontwerp en beoordeling van waterkeringen plaats op basis van de overbelastingsbenadering, waarbij de waterkeringen ontworpen en getoetst werden bij een specifiek peil afhankelijk van de norm van de dijkring. Dit peil werd ook wel aangeduid met MHW (maatgevend hoogwater). Voor een verdere invulling van de eisen aan falen van kunstwerken werd in de Grondslagen verwezen naar de Leidraad kunstwerken. (De Grondslagen voor waterkeren zijn inmiddels vervangen door de Grondslagen voor hoogwaterbescherming [Kok, et al., 2017].

Leidraad kunstwerken

Het faalmechanisme sterkte en/of stabiliteit wordt in de Leidraad kunstwerken gepresenteerd als één van de drie hoofdfaalmechanismen die bij kunstwerken van toepassing zijn. Dit betreffen naast *sterkte en/of stabiliteit* ook de faalmechanismen *overslag en overloop* en *niet sluiten (betrouwbaarheid sluiting)*. *Sterkte en/of stabiliteit* werd opgedeeld in bezwijken constructieonderdelen, instabiliteit constructie en grondlichaam en onder- en achterloopsheid.

In de Leidraad kunstwerken is voor toetsen en ontwerpen het falen van een kunstwerk opgedeeld in een spoor *waterbezwaar* – hierin worden de faalmechanismen *overslag en/of overloop* en *betrouwbaarheid sluiting* beschouwd – en een spoor *constructief bezwijken* (zie Figuur 1). Uitgangspunt is de overbelastingsbenadering, waarin het optreden van waterbezwaar gelijk wordt gesteld aan falen van het kunstwerk. Eisen aan de kans op overschrijding van een toelaatbaar instromend volume buitenwater via het gesloten of het geopende kunstwerk zijn dan ook gekoppeld aan het optreden van waterbezwaar. Aanvullend hierop is een eis gesteld aan de kans op *constructief falen*, gegeven dat normomstandigheden niet worden overschreden. (Normomstandigheden: waterstand inclusief bijbehorend golfregime met een overschrijdingsfrequentie per jaar gelijk aan de normfrequentie per jaar van de dijkring waartoe het kunstwerk behoorde.) Bij deze laatste tak werd verondersteld dat dit altijd tot een onbeheersbare situatie met substantiële gevolgen leidt. Overschrijding van een toelaatbaar instromend volume geeft weliswaar aanleiding tot (grote) problemen, maar de situatie hoeft niet direct onbeheersbaar te zijn.



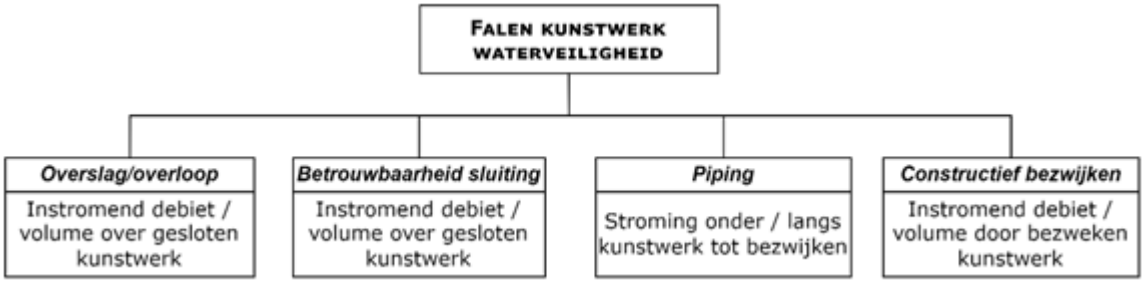
Figuur 1 Faalpaden op hoofdlijnen volgens Leidraad kunstwerken. Voorwaarde 2 is van toepassing op sterkte en/of stabiliteit.

Voor het faalmechanisme *sterkte en/of stabiliteit* werd aan de eisen voldaan wanneer de faalkans kleiner was dan 1/100 van de veiligheidsnorm zoals destijds was vastgelegd in de Waterwet (en de voorganger: Wet op de Waterkering). Dit was een normfrequentie per dijkring.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Vigerende werkwijze faalmechanisme sterkte en/of stabiliteit

Sinds 2017 is de overstromingskansbenadering van toepassing. Hierbij wordt meer expliciet uitgegaan van overstromingsgevolgen als faalcriterium. Mede door de in de [Leidraad kunstwerken, 2003] gehanteerde termen 'waterbezwaar' als faalcriterium en 'open keerpeil' als maximaal toelaatbaar binnenpeil, lag de focus bij de overbelastingsbenadering op wateroverlast in plaats van substantiële gevolgen. Daar waar in de overbelastingsbenadering falen gekoppeld was aan wateroverlast, zijn nu overstromingsgevolgen (significante schade en/of slachtoffers) het criterium voor falen. Daarnaast is falen van het kunstwerk nu opgedeeld in vier faalmechanismen (zie Figuur 1), waarvan *sterkte en/of stabiliteit* er één is. Een nadere uitwerking van de huidige werkwijze en modellen wordt verderop in dit hoofdstuk gegeven (zie gerelateerde artikelen).



Figuur 1 Vigerende faalboom kunstwerken waterveiligheid.

Versie 1.0: 2 juli 2025

4.2 Veiligheidsanalyse voor faalmechanisme sterkte en/of stabiliteit

Beschrijving veiligheidsanalyse voor faalmechanisme sterkte en/of stabiliteit

Een veiligheidsanalyse ten aanzien van *sterkte en/of stabiliteit* kan op meerdere wijzen worden uitgevoerd. De basis van de analyse is echter altijd hetzelfde: de kans op overstroming door instroming na bezwijken keermiddelen of instabiliteit van het kunstwerk moet voldoende klein zijn.

Basisbegrippen

Bij de uitvoering van een veiligheidsanalyse voor *sterkte en/of stabiliteit* worden de volgende basisbegrippen gehanteerd:

- Waterkerend kunstwerk: een kunstwerk dat zich in de waterkering bevindt en dat voorzien is van keermiddelen waarmee naast mogelijke andere functies (bijvoorbeeld schutten) ongewenste directe instroming van buitenwater voorkomen kan worden.
- Primaire functie(s) van een waterkerend kunstwerk: de dagelijkse functie(s) waarvoor het kunstwerk in de waterkering aanwezig is en zonder welke er geen kunstwerk benodigd zou zijn. Het keren van hoogwater is daarmee geen primaire maar een afgeleide functie van het kunstwerk.
- Maximaal toelaatbare binnenwaterstand: de waterstand op het achter het kunstwerk gelegen watersysteem die maximaal toelaatbaar is zonder dat dit leidt tot substantiële schade en/of slachtoffers (overstromingsgevolgen). Voor coupures geldt dat er geen binnendijkse watergang is en is dus sprake van een maximaal toelaatbare binnenwaterstand.
- Keermiddelen: de delen van de constructie die geopend en gesloten kunnen worden om de primaire functie van het kunstwerk mogelijk te maken en in gesloten toestand een verhoogde buitenwaterstand kunnen keren.
- Hoogwater kerende keermiddelen: de/het keermiddel(en) die de maximaal kerende hoogte van het kunstwerk verzorgen.
- Kombergend vermogen: het volume aan water dat binnendijks in het achter het kunstwerk gelegen gebied (watersysteem) geborgen kan worden zonder dat dit tot overstromingsgevolgen leidt.

Eisen waterveiligheid

Het gewenste veiligheidsniveau van waterbouwkundige kunstwerken als het gaat om overstromingsgevolgen ligt verankerd in de Omgevingswet. In deze wet is per dijktraject een omgevingswaarde vastgelegd. Dit kan een overstromingskansnorm of een faalkansnorm zijn. In beide gevallen geldt dat dit de enige ‘harde’ eis is die wordt gesteld. De omgang met de eis vanuit waterveiligheid verschilt tussen ontwerpen en beoordelen.

Op dit punt is met het verschijnen van Staatsblad 2021, 147 op 2 maart 2021 de huidige groene versie van de [Werkwijzer ontwerpen waterkerende kunstwerken, 2018] verouderd. In de Werkwijzer wordt nog gesteld dat ten aanzien van overstromingsgevolgen ook aan de eisen in het Bouwbesluit moet worden voldaan. En dat de zwaarste eis, vanuit de Omgevingswet of Bouwbesluit, leidend is. De Werkwijzer ontwerpen waterkerende kunstwerken wordt op korte termijn hierop aangepast.

NB: op het moment van ingaan van de Omgevingswet is het Bouwbesluit vervallen en vervangen door Besluit Bouwwerken Leefomgeving (BBL), onderdeel van de Omgevingswet (zie het artikel Historie van voorschriften aan waterkerende kunstwerken). De inhoudelijke wijziging in het Bouwbesluit, hierboven beschreven, is op 2 maart 2021 ook doorgevoerd in de BBL (artikel 2.10a).

Over het algemeen wordt bij beoordelen de faalkans voor *sterkte en/of stabiliteit* bepaald en wordt vervolgens gekeken of deze faalkans een substantiële bijdrage aan de overstromingskans van het normtraject heeft. Het totaal aantal kunstwerken in het normtraject speelt daarin geen directe rol; er wordt geen faalkanseis voor *sterkte en/of stabiliteit* voor een kunstwerk bepaald op basis van het aantal en de prestatie van de overige waterkerende kunstwerken in het normtraject.

Bij ontwerpen van een nieuw kunstwerk is het van belang te weten hoeveel faalkansruimte er nu en in de toekomst aanwezig is. Daarvoor is inzicht in de faalkansbijdrage (nu en in de toekomst) van de overige kunstwerken en de andere onderdelen van het dijktraject aan de overstromingskans van het normtraject nodig. Op basis hiervan en de overstromingskansnorm van het dijktraject kan vervolgens bepaald worden welke faalkanseis aan het nieuwe kunstwerk en vervolgens de individuele faalmechanismen, zoals *sterkte en/of stabiliteit*, moet worden gesteld. Daarbij dienen ook toekomstige ontwikkelingen (meer of minder kunstwerken in het normtraject of andersoortige aanpassingen) worden meegewogen. Het staat ontwerpers volkomen vrij deze faalkanseisen naar eigen inzicht af te leiden, maar daarbij gelden wel een paar algemene 'spelregels'. Voor praktische tips en handreikingen op dit gebied wordt verwezen naar hoofdstuk 2 van de Werkwijzer ontwerpen waterkerende kunstwerken [Van Bree, et al., 2018].

Eisen vanuit primaire/overige functie(s)

Het gewenste veiligheidsniveau van waterbouwkundige kunstwerken als het gaat om andere gevolgen dan overstromingsgevolgen bij bezwijken/instabiel worden van de constructie(onderdelen), ligt verankerd in het BBL van de Omgevingswet.

Specifiek voor de bodembescherming van een waterkerend kunstwerk geldt dat eisen vanuit andere functies (denk aan doorlaten water of scheepvaart) een doorslaggevende rol kunnen spelen bij het ontwerpen van de bodembescherming van een nieuw kunstwerk. Doorgaans zijn deze eisen bij het ontwerp leidend boven de eisen vanuit waterveiligheid. Specifiek voor de bewegingswerken gelden eisen vanuit de Machinerichtlijn.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Faalkansmodel voor faalmechanisme sterkte en/of stabiliteit

Het faalkansmodel voor het faalmechanisme *sterkte en/of stabiliteit* wordt beschreven via onderstaande functie en volgt uit de beschrijving van het faalproces in Figuur 1 van het artikel Beschrijving faalproces sterkte en/of stabiliteit. Hierin zijn de volgende drie faalpaden te onderscheiden:

1. Optreden overstroming met substantiële schade en/of slachtoffers na overschrijding van het kombergend vermogen na bezwijken van de waterkerende constructieonderdelen bij een standzeker kunstwerk (onderdeel van *STCO*).
2. Optreden overstroming met substantiële schade en/of slachtoffers na bezwijken van de waterkerende constructieonderdelen en vervolgens het bezwijken van het kunstwerk als

geheel na het bezwijken van de bodembescherming en daaropvolgende erosieprocessen (onderdeel van *STCO*).

3. Optreden overstroming met substantiële schade en/of slachtoffers na het instabiel worden van de gehele constructie en grondlichaam door een extreme vervalbelasting en vervolgens het bezwijken van het kunstwerk als geheel (onderdeel van *STCG*).

In formulevorm kan het faalkansmodel dit als volgt samengevat worden:

$$P(F_{KW,S\&S}) = P(F_{STCO,komberging}\ OF\ F_{STCO,erosie}\ OF\ F_{STCG}) \qquad (1)$$

Waarin:

P(·) De kans op een nader gespecificeerde gebeurtenis (hier: in een tijdspanne van 1 jaar).

$F_{KW,S\&S}$ Faalpad waarbij een overstroming optreedt (substantiële schade of slachtoffers) door een tekort aan sterkte en/of stabiliteit.

$F_{STCO,komberging}$ Faalpad waarbij een overstroming optreedt (substantiële schade en/of slachtoffers) na overschrijden van het kombergend vermogen door bezwijken van waterkerende constructieonderdelen (onderdeel van *STCO*).

$F_{STCO,erosie}$ Faalpad waarbij een overstroming optreedt (substantiële schade en/of slachtoffers) na bezwijken kunstwerk in geval van bezweken bodembescherming door bezwijken waterkerende constructieonderdelen (onderdeel van *STCO*).

F_{STCG} Faalpad waarbij een overstroming optreedt (substantiële schade en/of slachtoffers) na bezwijken van de gehele constructie door instabiliteit van constructie en grondlichaam (sub-faalmechanisme *STCG*).

In het artikel Belastingen bij faalmechanisme sterkte en/of stabiliteit worden de belastingen en in Sterkte bij faalmechanisme sterkte en/of stabiliteit de sterkteparameters toegelicht die in alle bovenstaande faalpaden een rol spelen. Vervolgens worden de modellen nodig voor het uitwerken van de diverse faalpaden nader uitgewerkt, namelijk: model voor de initiële faalgebeurtenis bezwijken waterkerende constructieonderdelen, model voor de initiële faalgebeurtenis instabiliteit constructie en grondlichaam, model voor het instromend volume/debiet, model voor overschrijden kombergend vermogen en model voor overschrijden kritisch debiet voor de bodembescherming.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Belastingen bij faalmechanisme sterkte en/of stabiliteit

Aangezien de hoogwaterbelastingsituatie centraal staat hebben de hydraulische belastingen de focus. De hydraulische belasting bestaat uit verval- en golfbelastingen.

Vervalbelastingen

Deze ontstaan door een hoogteverschil tussen de binnen- en buitenwaterstand. De buitenwaterstand is hierbij de waterstand aan de buitenzijde van de waterkering, terwijl de binnenwaterstand betrekking heeft op de waterstand van de watergang die binnendijks van de waterkering aanwezig is. De binnenwaterstand wordt doorgaans onder normale omstandigheden vanuit het aspect waterbeheer in grote mate gereguleerd. Ten tijde van hoogwaters kan een afwijkend beheersregime gelden. Hiermee dient dan rekening te worden gehouden. In sommige situaties wordt er niet gereguleerd en is statistiek nodig. Ook kan in het geval het binnenwater een groot oppervlak heeft, scheefstand ontstaan door de wind. De buitenwaterstand wordt beïnvloed door de afvoer van rivieren

en/of de waterstanden op zee en daarnaast door de wind. De wind kan zorgen voor aanvullende golfbelastingen maar ook voor een opzet van de waterstand.

Golfbelastingen

Golven kunnen door verschillende oorzaken ontstaan. Voor waterkeringen geldt doorgaans dat onder hoogwateromstandigheden wind geïnduceerde golven maatgevend zijn. Afhankelijk van locatie en geometrie worden (onderdelen van) de constructies belast door golven. Golven worden beschreven aan de hand van de golfhoogte, de golflengte, golfperiode en golfrichting. Van deze vier parameters zijn vele combinaties mogelijk, wat leidt tot een heel scala aan golfvormen. De hele lange golven (seiches) kunnen leiden tot een waterstandsverhoging die langere periode aanhoudt (10 minuten tot 2 uur). De kortere golven kunnen in veel gevallen vertaald worden naar een hydrostatische belasting, maar kunnen ook leiden tot golfklappen op onderdelen van de constructie. Golfklappen kunnen bij vrije, maar ook bij niet-vrije waterspiegelsituaties optreden. Van de laatste is een kokerconstructie een voorbeeld, waarbij golven bij een bepaalde range aan waterstanden tot grote verticale belastingen kunnen leiden. Voor faalgebeurtenis *bezwijken waterkerende constructieonderdelen (STCO)* zijn zowel de lange als de korte golven van belang. Bij faalgebeurtenis *instabiliteit constructie en grondlichaam (STCG)* spelen, met uitzondering van seiches, golven geen rol.

De databases met statistiek van buitenwaterstanden en golfcondities die gebruikt worden bij beoordelen en ontwerpen van de primaire waterkeringen worden binnen Nederland door het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat aangeleverd en worden ontsloten met de instrumenten Hydra-Ring (onderdeel van Riskeer) en Hydra-NL.

Overige belastingen

In de hoogwaterbelastingsituatie dient gekeken te worden of overige belastingen ook van toepassing kunnen zijn in combinatie met hoogwateromstandigheden. In alle gevallen zullen dat de permanente belastingen zijn, zoals het eigengewicht, maar mogelijk ook andere belastingen.

Per kunstwerk dient vervolgens ook te worden bekeken of andere belastingcombinaties tot overstromingsgevolgen kunnen leiden, los van de hoogwateromstandigheden. Een voorbeeld hiervan is aanvaring bij dagelijkse waterstanden van een gesloten kering, zie ook het artikel K4101 - Beschrijving faalproces sterkte en/of stabiliteit. In onderstaande Tabel 1 zijn diverse belastingen weergegeven, waarbij onderscheid gemaakt wordt in permanente, veranderlijke en bijzondere belastingen. In de Werkwijzer ontwerpen waterkerende kunstwerken [Van Bree, et al., 2018] wordt hier in meer detail op ingegaan.

Tabel 1 Overige belastingen op waterkerende kunstwerken.

Permanent	Veranderlijk	Bijzonder
Eigen gewicht	Stroming	Aanvaring
Gronddruk	Scheepsgolven	Aardbeving
Grondwaterdruk	Scheepsstroming	Explosie

	Troskrachten	IJs
	Temperatuur	Vandalisme/sabotage/terrorisme
	Verkeersbelasting	

Voor de veranderlijke belastingen geldt dat deze met name van toepassing zijn onder dagelijkse omstandigheden en niet in combinatie met een hoogwaterbelasting. Ditzelfde geldt ook voor de bijzondere belastingen.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Sterkte bij faalmechanisme sterkte en/of stabiliteit

De sterkte en stabiliteit wordt bepaald door de aanwezige constructieonderdelen en het grondlichaam en kan met behulp van de methodes van de constructiemechanica en geotechniek worden vastgesteld. Hoe hier gestalte aan wordt gegeven voor beoordelen en ontwerpen wordt in respectievelijk de Werkwijzer ontwerpen waterkerende kunstwerken [Van Bree, et al., 2018] en de materiaal gebonden Eurocodes NEN-EN199 (2 t/m 9) behandeld.

Vermoeiing van constructieonderdelen wordt veroorzaakt door repeterende spanningswisselingen en heeft een effect op de sterkte van een constructie. Zo dient bij een stalen keermiddel van een constructie in een getijdengebied ook de FAT-grenstoestand te worden beschouwd. Wanneer dat niet gebeurt kan bij een beoordeling van het waterkerend vermogen de werkelijke sterkte door vermoeiing kleiner zijn dan verondersteld.

In het geval van *STCO* zal ook de grootte van de maximale komberging en de sterkte van de bodembescherming invloed hebben op de faalkans. De grootte van de komberging en de sterkte van de bodembescherming zijn in die zin dus sterkteparameters van het sub-faalmechanisme *STCO*.

Versie 1.0: 2 juli 2025

4.3 Model voor bezwijken waterkerende constructieonderdelen en instabiliteit constructie en grondlichaam

Model voor bezwijken waterkerende constructieonderdelen en instabiliteit constructie en grondlichaam

In dit artikel wordt het model voor de faalgebeurtenissen *bezwijken waterkerende constructieonderdelen (STCO)* en *instabiliteit constructie en grondlichaam (STCG)* toegelicht, zie ook het artikel Beschrijving faalproces sterkte en/of stabiliteit.

Voor beide mechanismen is er feitelijk niet één model. Het mechanisme *bezwijken waterkerende constructieonderdelen* betreft een verzameling van alle mogelijke constructieve faalmechanismen die we kennen bij constructies, zoals bezwijken door een tekort aan dwarskrachtcapaciteit of weerstand tegen knikinstabiliteit. Het mechanisme *instabiliteit constructie en grondlichaam* betreft een verzameling van alle mogelijke geotechnische faalmechanismen, zoals opdrijven of kantelen. Deze faalmechanismen zijn te vinden in de literatuur over respectievelijk constructieve mechanica en geotechniek.

De door het BBL van de Omgevingswet aangewezen Eurocodes als bouwvoorschriften behandelen vele van deze faalmechanismen voor constructies, met het doel deze te kunnen verifiëren aan de eisen vanuit deze wetgeving. Hoewel de eisen vanuit de Omgevingswet anders zijn, is het verstandig om deze werkwijze en terminologie aan te houden, omdat constructeurs daarmee gewend zijn om te gaan. Van de Eurocodes mag af worden geweken, wanneer aan dezelfde beginselen wordt voldaan en minimaal dezelfde prestatie van de constructie wordt verkregen als bij gebruik van de Eurocodes.

In het algemeen wordt een faalmechanisme beschreven met een grenstoestandfunctie, bestaande uit belastingcomponenten en sterkte of weerstandscomponenten. Dit kan worden opgevat als een generiek model voor alle faalmechanismen. In Eurocode NEN-EN 1990 Grondslagen van het constructief ontwerp wordt onderscheid gemaakt tussen bruikbaarheidsgrenstoestanden en uiterste grenstoestanden. Voor elk faalmechanisme wordt een afzonderlijke grenstoestand geformuleerd.

- Bij overschrijding van de bruikbaarheidsgrenstoestand kan de constructie (of onderdelen daarvan) een gewenste gebruiksfunctie niet langer vervullen, maar is nog geen sprake van bezwijken. Een voorbeeld hiervan zijn grote vervormingen.
- Bij overschrijding van de uiterste grenstoestand bezwijkt de constructie. Een constructie(onderdeel) kent meerdere bezwijkmechanismen. Zo kan een constructieonderdeel bezwijken door een tekort aan dwarskracht-, moment- of normaalkrachtcapaciteit in een bepaalde snede. Maar ook kiep- of knikinstabiliteit of vermoeiing kan een probleem zijn.

De NEN-EN 1990 maakt onderscheid tussen de volgende uiterste grenstoestanden[1]:

- STR: Intern bezwijken of buitensporige vervorming van de constructie of van constructieve elementen, met inbegrip van funderingen op staal, palen, kelderwanden enzovoorts, waarbij de sterkte van bouwmaterialen van de constructie bepalend is.
- GEO: Bezwijken of buitensporige vervorming van de grond waarbij de sterktes van grond bepalend zijn voor de te leveren weerstand.
- FAT: Bezwijken van de constructie of constructieve elementen door vermoeiing.

Overstromingsgevolgen zullen over het algemeen optreden bij het overschrijden van de uiterste grenstoestand, omdat dit betrekking heeft op het verlies van de waterkerende functie. Deze zijn van de categorie STR en kan worden beschreven door een uiterste grenstoestandfunctie (U.G.T.). Deze functie geeft voor elke mogelijke combinatie van belastingen en sterkte-eigenschappen aan of de kering bezwijkt/instabiel wordt of niet. Deze functie heeft een negatieve waarde als de belasting groter is dan de sterkte en de kering faalt. In een grenstoestandfunctie komen alle afmetingen, variabelen en parameters voor die de sterkte van een constructie(onderdeel) en de belasting op een constructie(onderdeel) beschrijven.

De uiterste grenstoestand voor iedere constructieve of geotechnisch faalmechanisme wordt overschreden indien de aanwezige sterkte van de constructie lager is dan de belastingeffecten. Dit komt tot uitdrukking in de volgende generieke grenstoestandfunctie Z (model)[2]:

$$Z = R - E \quad (1)$$

Met (conform NEN-EN 1990):

$$R = \sum f(X_i, \theta_i, a_i)$$

$$E = \sum f(F_j, \theta_j, a_j)$$

Σ betekent "combinatie van"

Waarin:

R Sterkte van de constructie(onderdeel).

X_i Materiaalsterkte i.

θ_i Modelonzekerheid i.

a_i Geometrisch gegeven van constructie(onderdeel) i.

E Belastingeffect.

F_j Belasting j.

θ_j Modelonzekerheid j.

a_j Geometrisch gegeven van constructie(onderdeel) j.

Het totale belastingeffect (E) is het resultaat van (een combinatie van) beschouwde belastingen (F_i) in combinatie met geometrische eigenschappen van de constructie en modelonzekerheden. Voor de hoogwaterbelasting betreft dit de vervalbelasting, golfbelasting en in mindere mate het eigengewicht.

De totale sterkte R ten aanzien van de betreffende sterktegrootheid wordt bepaald door de betrokken constructieonderdelen met hun materiaalsterkten (X_i) en de gebruikte sterktemodellen uit de constructiemechanica met hun onzekerheden.

De uiterste grenstoestand wordt overschreden wanneer:

R < E

Ofwel:

Z < o

De faalkans wordt dus bepaald met de volgende formules/faalkansmodellen:

$$P(F_{bezwijken\ waterkerende\ constructieond.}) = P(R_{constructieonderdelen} < E) \quad (2)$$

$$P(F_{STCG}) = P\left(R_{constructie\ en\ grondlichaam} < E\right) \quad (3)$$

[1] Daarnaast kent de NEN-EN 1990 de uiterste grenstoestand EQU: Verlies van statisch evenwicht van de constructie, of van welk deel ervan ook, beschouwd als star lichaam. Deze grenstoestand is geen vorm van constructief falen in het geval van een waterkerend kunstwerk belast door hoogwater.

[2] In de literatuur wordt in deze generieke grenstoestandfunctie vaak S gebruikt in plaats van E. S staat echter voor belasting en E staat voor belastingeffect. Bij constructief falen wordt in de grenstoestandfunctie het belastingeffect gebruikt, conform NEN-EN1990. NB: in NEN-EN1990 wordt voor belasting F gebruikt in plaats van S.

Versie 1.0: 2 juli 2025

4.4 Instromingsmodel voor sterkte en/of stabiliteit

Instromingsmodel voor sterkte en/of stabiliteit

Met een instromingsmodel kan worden beschouwd hoeveel water er ongewenst binnenkomt wanneer constructieonderdelen zijn bezweken. Daarmee is dit model benodigd voor de faalgebeurtenissen *instromend volume groter dan kombergend vermogen* en *instromend debiet groter dan kritisch debiet van de bodembescherming* binnen het faalmechanisme *STCO*. Hier wordt uitgebreid op ingegaan in het artikel Inleiding instromingsmodel voor overslag en/of overloop. Bij overslag en/of overloop wordt het instromend volume beschouwd bij een succesvol gesloten kunstwerk, waarbij de kerende hoogte gelijk is aan de hoogte van de keermiddelen. In het geval van *STCO* zijn de keermiddelen bezweken en niet aanwezig, zodat het kunstwerk keert met de drempel van de constructie. Het model wordt niet expliciet toegepast bij *STCG*.

Versie 1.0: 2 juli 2025

4.5 Kombergingsmodel voor sterkte en/of stabiliteit

Kombergingsmodel voor sterkte en/of stabiliteit

Dit model beschrijft de faalgebeurtenis instromend volume groter dan kombergend vermogen binnen het faalmechanisme *STCO*. Hier wordt uitgebreid op ingegaan in het artikel Kombergingsmodel voor overslag en/of overloop. Het model wordt niet toegepast bij *STCG*.

Versie 1.0: 2 juli 2025

4.6 Bodembeschermingsmodel

Bodembeschermingsmodel voor sterkte en/of stabiliteit

Dit model beschrijft de faalgebeurtenis *instromend debiet groter dan kritisch debiet van de bodembescherming* binnen het faalmechanisme *STCO*. Hier wordt uitgebreid op ingegaan in het artikel Inleiding bodembeschermingsmodel voor overslag en/of overloop. Het model wordt niet toegepast bij *STCG*.

Versie 1.0: 2 juli 2025

4.7 Betrouwbaarheidsverificatie

Inleiding betrouwbaarheidsverificatie

In een ontwerp- of beoordelingsverificatie wordt de betrouwbaarheid (faalkans) van het te toetsen object geconfronteerd met de betrouwbaarheidseis (faalkanseis). In het algemeen kan de verificatie op probabilistische of een semi-probabilistische wijze worden uitgevoerd. In een probabilistische verificatie wordt expliciet met onzekerheden van parameters gewerkt en in een semi-probabilistische verificatie op impliciete wijze, door met veilige waarden te rekenen. In CUR-rapport 190 [Kansen in de civiele techniek, 1997] wordt gedetailleerd op beide werkwijzen ingegaan.

Als het gaat om constructief of geotechnisch bezwijken/instabiel worden van constructies, worden momenteel de meeste verificaties op semi-probabilistische wijze uitgevoerd. In de wettelijke waterveiligheidsbeoordeling wordt weliswaar vaak probabilistisch getoetst, maar in deze analyses zijn constructies noodzakelijkerwijs zeer vereenvoudigd, wat leidt tot conservatieve uitkomsten. Terwijl

men juist conservatisme wil vermijden door het inzetten van probabilistische rekentechnieken. Bij hoge uitzondering wordt een constructie volledig probabilistisch getoetst, maar daarvoor is specialistische kennis nodig.
Het vigerende semi-probabilistische safety format voor de hoogwaterveiligheidssituatie voor waterkerende kunstwerken wordt uitvoerig behandeld in de Werkwijzer ontwerpen waterkerende kunstwerken [Van Bree, et al., 2018]. Deze is nodig voor hedendaags ontwerpen, maar ook voor het toekomstig beoordelen van nu ontworpen constructies. Het safety format geeft namelijk weer hoe betrouwbaar de constructie is en hoe de betrouwbaarheid is geborgd. Wanneer bestaande kunstwerken worden beoordeeld is het van belang het safety format te kennen dat is voorgeschreven in de bouwvoorschriften tijdens het maken van het ontwerp. Het safety format is door de jaren heen een aantal keren gewijzigd, een overzicht hiervan is opgenomen in bijlage B van de [Handleiding overstromingskansanalyse kunstwerken, 2023].

In het artikel Historie van voorschriften aan waterkerende kunstwerken wordt aanvullend op bijlage B van de [Handleiding overstromingskansanalyse kunstwerken, 2023] ingegaan op de historie van de bouwvoorschriften. Vervolgens wordt in Vigerende voorschriften aan waterkerende kunstwerken ingegaan op de vigerende voorschriften.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Historie van voorschriften aan waterkerende kunstwerken

De bouwvoorschriften, voorheen de Technische Grondslagen voor Bouwvoorschriften (TGB) en de vigerende Eurocodes, stellen door de jaren heen constructieve betrouwbaarheidseisen aan constructies. De bouwvoorschriften zijn relevant voor waterkerende constructies, hoewel er geen aandacht wordt besteed aan de specifieke belastingen op waterkerende constructies. Deze voorschriften worden periodiek herzien of gewijzigd, evenals de bovenliggende wetgeving. Ook de wetgeving ten aanzien van de waterveiligheid wordt periodiek herzien, alsmede de beoordelings- en ontwerpinstrumenten waarmee constructieve betrouwbaarheidseisen worden geverifieerd en vertaald naar een fysieke constructie.

In dit artikel zijn de voorschriften toegelicht en hun historie tot aan de vigerende beschreven, voor zover van belang voor waterkerende kunstwerken. Op de vigerende voorschriften wordt in het artikel Vigerende voorschriften aan waterkerende kunstwerken ingegaan.

Bouwvoorschriften en -wetgeving

Tot de invoering van de Omgevingswet vormt de Woningwet de basis voor de bouw- en gebruiksvoorschriften uit het Bouwbesluit. Het Bouwbesluit bevat voorschriften over (ver)bouw van bouwwerken, over de staat en het gebruik van bouwwerken, open erven en terreinen, over sloop en over veiligheid tijdens bouwen en slopen. Vanaf 1955 verwees het Bouwbesluit voor een groot deel van die inhoud naar de Technische Grondslagen voor Bouwvoorschriften (TGB). Vanaf 2012 verwijst het Bouwbesluit naar de Eurocodes.

De TGB en Eurocodes bestaan uit: de grondslagen, een deel over de belastingen en het materiaal gebonden deel. In de grondslagen worden de constructieve betrouwbaarheidseisen en de veiligheidsfilosofie en -format behandeld. Tot 2 maart 2021 (zie het artikel Beschrijving veiligheidsanalyse voor faalmechanisme sterkte en/of stabiliteit) zijn deze constructieve betrouwbaarheidseisen van toepassing op alle bouwwerken ten aanzien van alle belastingsituaties en hun gevolgen. Dus ook voor waterkerende kunstwerken waarbij in geval van bezwijken een overstroming optreedt. In het deel belastingen van de bouwvoorschriften wordt echter geen invulling gegeven aan specifieke belastingen op waterkerende constructies, zodat de betrouwbaarheidseis niet kan worden vertaald naar een vereiste sterkte van het kunstwerk in die situaties. Vanaf 1997 is hiertoe

in de Leidraad waterkerende kunstwerken en bijzondere constructies en vanaf 2003 in de Leidraad kunstwerken een aanvulling opgenomen.
Vanaf 2 maart 2021 gelden de eisen in het Bouwbesluit niet meer voor belastingsituaties die bij bezwijken leiden tot een overstroming. Vanaf dan gelden in die situaties alleen de eisen uit de Waterwet. Voor alle overige bezwijksituaties van waterkerende kunstwerken dient wel voldaan te worden aan de constructieve betrouwbaarheidseisen in het Bouwbesluit.

Wetgeving en voorschriften ten behoeve van waterveiligheid

Naar aanleiding van de watersnoodramp in 1953 werd de eerste Deltawet[1] van kracht in 1958, met als doel het Deltaplan formeel vast te leggen. Hierdoor kon begonnen worden aan de Deltawerken. In 1995 is de Deltawet opgegaan in de Wet op de Waterkering, welke vanaf 2009 is opgevolgd door de Waterwet. Deze wetgeving verzorgt de normen en eisen ten aanzien de waterveiligheid in Nederland. De Waterwet werd in 2017 vernieuwd, waarbij is overgestapt van de overschrijdingskansbenadering naar de overstromingskansbenadering met de daarbij horende nieuwe overstromingskansnormen aan waterkeringen.

Ten behoeve van waterkerende kunstwerken zijn door de jaren heen diverse leidraden geschreven. Deze zijn niet verplicht te gebruiken, maar dienen om partijen te helpen de wettelijke eisen op een zo goed mogelijke wijze toe te passen in ontwerp en beoordeling. Hoe om te gaan met specifiek falen door sterkte en stabiliteit wordt hier ook in beschreven, net zoals hoe om te gaan met de andere faalmechanismen. In het artikel Historie en veiligheidsfilosofie faalmechanisme sterkte en/of stabiliteit wordt per leidraad een toelichting gegeven.

De Leidraad kunstwerken had met betrekking tot het faalmechanisme sterkte en/of stabiliteit een verbindende functie tussen de bouwwetgeving en de wetgeving voor de waterveiligheid. Beide stelden eisen aan dit mechanisme en in de Leidraad kunstwerken werden deze eisen vertaald naar een safety format. Dit format moest in 2012 worden herzien door de toenmalige update van het Bouwbesluit, waarbij de Eurocodes met strengere eisen dan in de TGB werd aangeroepen [Calle en Vrouwenvelder, 2012].

[1] Officieel genaamd: *deWet van 8 mei 1958, houdende de afsluiting van de zeearmen tussen de Westerschelde en de Rotterdamsche Waterweg en de versterking van de hoogwaterkering ter beveiliging van het land tegen stormvloeden.*

Versie 1.0: 2 juli 2025

Vigerende voorschriften aan waterkerende kunstwerken

Vanaf 2024 is de Omgevingswet in werking getreden. De Omgevingswet werkt door in vier algemene maatregelen van bestuur (AMvB's): het Omgevingsbesluit, het Besluit kwaliteit leefomgeving (BKL), het Besluit activiteiten leefomgeving en het Besluit bouwwerken leefomgeving (BBL). In deze AMvB's staan regels voor het praktisch uitvoeren van de wet. Het Bouwbesluit is overgaan in de BBL. De Waterwet is overgegaan in de BKL (de normen) en de Omgevingsregeling (overige deel).

Ten aanzien van ontwerpen is de vigerende werkwijze met betrekking tot de constructieve betrouwbaarheid van waterkerende kunstwerken dan als volgt: normen en uitgangspunten voor bezwijksituaties die leiden tot een overstroming komen uit de Omgevingsregeling en BKL, behorende bij de Omgevingswet. Voor de vertaling van deze eisen naar een ontwerp is de Technische leidraad sterkte of stabiliteit (zie het artikel Inleiding faalmechanisme sterkte en/of stabiliteit puntconstructies) en vervolgens de Werkwijzer ontwerpen waterkerende kunstwerken (WOWK) [Van Bree, et al., 2018] vigerend, waarbij ten aanzien van de sterkte gebruik wordt gemaakt van de Eurocodes. Deze werkwijze wordt gedetailleerd toegelicht in de WOWK. Voor de overige bezwijksituaties gelden de

eisen en werkwijze uit de BBL, welke de Eurocodes aanwijst.
Ten aanzien van de wettelijke beoordeling gelden de eisen en uitgangspunten uit de Omgevingsregeling en BKL van de Omgevingswet. Voor de beoordeling is de Handleiding overstromingskansanalyse kunstwerken het vigerende instrument.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Literatuurverwijzingen

Van Bree, B., R. Delhez, R. Jongejan en A. Casteleijn. *Werkwijzer ontwerpen waterkerende kunstwerken : Ontwerpverificaties voor de hoogwatersituatie ; Definitief, groene versie D2*. Rijkswaterstaat (RWS WVL), rapport, november 2018.

Leidraad kunstwerken. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW) en Rijkswaterstaat (RWS DWW), rapport DWW-2003-059, mei 2003.

_____

Basisrapport behorende bij de TAW-leidraad Waterkerende kunstwerken en bijzondere constructies. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), juni 1997.

Leidraad waterkerende kunstwerken en bijzondere constructies. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), juni 1997.

Leidraad kunstwerken. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW) en Rijkswaterstaat (RWS DWW), rapport DWW-2003-059, mei 2003.

Grondslagen voor waterkeren. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), januari 1998.

_____

Leidraad kunstwerken. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW) en Rijkswaterstaat (RWS DWW), rapport DWW-2003-059, mei 2003.

_____

Van Bree, B., R. Delhez, R. Jongejan en A. Casteleijn. *Werkwijzer ontwerpen waterkerende kunstwerken : Ontwerpverificaties voor de hoogwatersituatie ; Definitief, groene versie D2*. Rijkswaterstaat (RWS WVL), rapport, november 2018.

_____

Casteleijn, A. en B. van Bree. *Werkwijze bepalen kans op niet sluiten per sluitvraag met scoretabellen : Actualisatie van de gedetailleerde methode van betrouwbaarheid sluiten van kunstwerken voor beoordelen en ontwerpen*. Rijkswaterstaat (RWS WVL), november 2017.

Van Bree, B. *Handreiking borging betrouwbaarheid sluiting in draaiboeken : Achtergrondrapport bij het gebruik van de scoretabellen voor het faalmechanisme niet sluiten*. Rijkswaterstaat (RWS WVL), november 2017.

Van Bree, B., R. Delhez, R. Jongejan en A. Casteleijn. *Werkwijzer ontwerpen waterkerende kunstwerken : Ontwerpverificaties voor de hoogwatersituatie ; Definitief, groene versie D2*. Rijkswaterstaat (RWS WVL), rapport, november 2018.

_____

Nortier, I.W. en P. de Koning. *Toegepaste vloeistofmechanica : Hydraulica voor waterbouwkundigen*. Houten : Stam Techniek, 1996.

_____

Nortier, I.W. en P. de Koning. *Toegepaste vloeistofmechanica : Hydraulica voor waterbouwkundigen*. Houten : Stam Techniek, 1996.

_____

Van Bree, B., R. Delhez, R. Jongejan en A. Casteleijn. *Werkwijzer ontwerpen waterkerende kunstwerken : Ontwerpverificaties voor de hoogwatersituatie ; Definitief, groene versie D2*. Rijkswaterstaat (RWS WVL),

rapport, november 2018.

_____

Hoffmans, G.J.C.M. en H.J. Verheij (eds.). Scour Manual : Current-Related Erosion ; Second Edition. CRC Press / Balkema, 2021.

Vrijburcht, A. *Ontwerp van schutsluizen*. Rijkswaterstaat (RWS BD), juni 2000.

_____

Van Bree, B., R. Delhez, R. Jongejan en A. Casteleijn. *Werkwijzer ontwerpen waterkerende kunstwerken : Ontwerpverificaties voor de hoogwatersituatie ; Definitief, groene versie D2*. Rijkswaterstaat (RWS WVL), rapport, november 2018.

_____

Leidraad kunstwerken. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW) en Rijkswaterstaat (RWS DWW), rapport DWW-2003-059, mei 2003.

Leidraad waterkerende kunstwerken en bijzondere constructies. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), juni 1997.

*Basisrapport behorende bij de TAW-leidraad Waterkerende kunstwerken en bijzondere constructie*s. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), juni 1997.

Leidraad voor ontwerp, beheer en onderhoud van constructies en vreemde objecten in, op en nabij waterkeringen. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), april 1976.

Voorschrift toetsen op veiligheid primaire waterkeringen 2006. Ministerie van Verkeer en Waterstaat en Rijkswaterstaat (RWS DWW), augustus 2007.

Van der Meer, J.W., N.W.H. Allsop, T. Bruce, J. De Rouck, A. Kortenhaus, et al. *EurOtop : Manual on wave overtopping of sea defences and related structures : An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application ; Second edition 2018*.

Grondslagen voor waterkeren. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), januari 1998.

Kok, M., R.B. Jongejan, M.W.C. Nieuwjaar en I.C. Tánczos. *Grondslagen voor hoogwaterbescherming ; Tweede herziene druk*. Expertise Netwerk Waterveiligheid (ENW), november 2017.

_____

Leidraad kunstwerken. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW) en Rijkswaterstaat (RWS DWW), rapport DWW-2003-059, mei 2003.

_____

Van Bree, B., R. Delhez, R. Jongejan en A. Casteleijn. *Werkwijzer ontwerpen waterkerende kunstwerken : Ontwerpverificaties voor de hoogwatersituatie ; Definitief, groene versie D2*. Rijkswaterstaat (RWS WVL), rapport, november 2018.

_____

Leidraad kunstwerken. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW) en Rijkswaterstaat (RWS DWW), rapport DWW-2003-059, mei 2003.

Van der Meer, J.W., N.W.H. Allsop, T. Bruce, J. De Rouck, A. Kortenhaus, et al. *EurOtop : Manual on wave overtopping of sea defences and related structures : An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application ; Second edition 2018*.

Van Bree, B. *WTI 2017 Kunstwerken : Achtergrondrapport toetsspoor Hoogte I - Modellering optredend overslag-/overloopdebiet*. Deltares, rapport 1220087-001-GEO-0004, december 2015.

_____

Leidraad kunstwerken. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW) en Rijkswaterstaat (RWS DWW), rapport DWW-2003-059, mei 2003.

Van Bree, B. *WTI 2017 Kunstwerken : Achtergrondrapport toetsspoor Hoogte I - Modellering optredend overslag-/overloopdebiet*. Deltares, rapport 1220087-001-GEO-0004, december 2015.

Nortier, I.W. en P. de Koning. *Toegepaste vloeistofmechanica : Hydraulica voor waterbouwkundigen*. Houten : Stam Techniek, 1996.

_____

Van der Meer, J.W., N.W.H. Allsop, T. Bruce, J. De Rouck, A. Kortenhaus, et al. *EurOtop : Manual on wave overtopping of sea defences and related structures : An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application ; Second edition 2018*.

_____

Handleiding overstromingskansanalyse kunstwerken ; Groene versie ; BOI2023. Rijkswaterstaat, juli 2023.

Leidraad kunstwerken. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW) en Rijkswaterstaat (RWS DWW), rapport DWW-2003-059, mei 2003.

Van der Meer, J.W., N.W.H. Allsop, T. Bruce, J. De Rouck, A. Kortenhaus, et al. *EurOtop : Manual on wave overtopping of sea defences and related structures : An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application ; Second edition 2018*.

_____

Van Bree, B., R. Delhez, R. Jongejan en A. Casteleijn. *Werkwijzer ontwerpen waterkerende kunstwerken : Ontwerpverificaties voor de hoogwatersituatie ; Definitief, groene versie D2*. Rijkswaterstaat (RWS WVL), rapport, november 2018.

_____

The Rock Manual : The use of rock in hydraulic engineering ; Second edition. CIRIA, 2007.

_____

Van Bree, B., R. Delhez, R. Jongejan en A. Casteleijn. *Werkwijzer ontwerpen waterkerende kunstwerken : Ontwerpverificaties voor de hoogwatersituatie ; Definitief, groene versie D2*. Rijkswaterstaat (RWS WVL), rapport, november 2018.

_____

Hoffmans, G.J.C.M. en H.J. Verheij (eds.). *Scour Manual : Current-Related Erosion ; Second Edition*. CRC Press / Balkema, 2021.

Vrijburcht, A. *Ontwerp van schutsluizen*. Rijkswaterstaat (RWS BD), juni 2000.

_____

Handleiding overstromingskansanalyse kunstwerken ; Groene versie ; BOI2023. Rijkswaterstaat, juli 2023.

_____

Förster, U., G. van den Ham, E.O.F. Calle en G.A.M. Kruse. *Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen*. Deltares, rapport 1202123-003-GEO-0002, maart 2012.

Achmus, M. en B.G.S. Mansour. *Considerations and model tests on the design of river barrages with respect to piping*. Proceedings Third International Conference on Scour and Erosion. Amsterdam, 2006.

Förster, U., G. van den Ham, E.O.F. Calle en G.A.M. Kruse. *Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen*. Deltares, rapport 1202123-003-GEO-0002, maart 2012.

Vrijburcht, A. *Ontwerp van schutsluizen*. Rijkswaterstaat (RWS BD), juni 2000.

Bligh, W.G. *Dams barrages and weirs on porous foundation*s. Engineering News 64 (26), 708-710, 1910.

Calle, E.O.F. en J.B. Weijers. *Technisch rapport voor controle op het mechanisme piping bij rivierdijken*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), januari 1994.

Förster, U., G. van den Ham, E.O.F. Calle en G.A.M. Kruse. *Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen*. Deltares, rapport 1202123-003-GEO-0002, maart 2012.

Grondslagen voor waterkeren. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), januari 1998.

Handreiking constructief ontwerpen : Onderzoek en berekening naar het constructief ontwerp van de dijkversterking. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), april 1994.

Harza, L.F. *Uplift and seepage under dams on sand*. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 100 (1), 1352-1385, 1935.

Kok, M., R.B. Jongejan, M.W.C. Nieuwjaar en I.C. Tánczos. *Grondslagen voor hoogwaterbescherming ; Tweede herziene druk*. Expertise Netwerk Waterveiligheid (ENW), november 2017.

Lane, E.W. *Security from under-seepage-masonry dams on earth foundation*s. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 100 (1), 1235-1272, 1935.

Leidraad kunstwerken. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW) en Rijkswaterstaat (RWS DWW), rapport DWW-2003-059, mei 2003.

Leidraad voor ontwerp, beheer en onderhoud van constructies en vreemde objecten in, op en nabij waterkeringen. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), april 1976.

Leidraad waterkerende kunstwerken en bijzondere constructies. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), juni 1997.

Sellmeijer, J.B. *On the mechanism of piping under impervious structures*. Technische Universiteit Delft, doctoral thesis, 1988.

Technisch rapport zandmeevoerende wellen. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), rapport TAW99-26, maart 1999.

Voorschrift toetsen op veiligheid primaire waterkeringen 2006. Ministerie van Verkeer en Waterstaat en Rijkswaterstaat (RWS DWW), augustus 2007.

Werkwijzer piping bij dijken ; Versie 1.0. Ministerie van Infrastructuur en Milieu, januari 2014.

Van Bree, B., R. Delhez, R. Jongejan en A. Casteleijn. *Werkwijzer ontwerpen waterkerende kunstwerken : Ontwerpverificaties voor de hoogwatersituatie ; Definitief, groene versie D2*. Rijkswaterstaat (RWS WVL), rapport, november 2018.

———————————————————————

Förster, U., G. van den Ham, E.O.F. Calle en G.A.M. Kruse. *Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen*. Deltares, rapport 1202123-003-GEO-0002, maart 2012.

———————————————————————

Handleiding Overstromingskansanalyse kunstwerken ; Groene versie ; BOI2023. Rijkswaterstaat, juli 2023.

———————————————————————

Förster, U., G. van den Ham, E.O.F. Calle en G.A.M. Kruse. *Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen*. Deltares, rapport 1202123-003-GEO-0002, maart 2012.

Lane, E.W. *Security from under-seepage-masonry dams on earth foundations*. Transactions of the American Society of Civil Engineers 100 (1), 1235-1272, 1935.

Luijendijk, S. en U. Förster. *SBW Piping Kunstwerken ; 4. Bureaustudie inventarisatie problemen en oplossingen piping bij historische kunstwerken*. Deltares, rapport 1204201-004-GEO-0001, februari 2012.

———————————————————————

Handleiding Overstromingskansanalyse kunstwerken ; Groene versie ; BOI2023. Rijkswaterstaat, juli 2023.

Technisch rapport zandmeevoerende wellen. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), rapport TAW99-26, maart 1999.

———————————————————————

Gebruikershandleiding Riskeer - Kunstwerken. Rijkswaterstaat, juni 2023.

Lane, E.W. *Security from under-seepage-masonry dams on earth foundations*. Transactions of the American Society of Civil Engineers 100 (1), 1235-1272, 1935.

Van den Ham, G.A. *SBW Piping Kunstwerken : KW6. Aanbevelingen toetsmethode onder- en achterloopsheid bij (historische) kunstwerken*. Deltares, rapport 1200675-006-GEO-0001, december 2009.

———————————————————————

Calle, E.O.F. *Vergelijking rekenregel van Lane en Heave-analyse o.b.v. fragmentenmethode ; Memo aan Rijkswaterstaat DWW*. December 1998.

———————————————————————

Förster, U., G. van den Ham, E.O.F. Calle en G.A.M. Kruse. *Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen*. Deltares, rapport 1202123-003-GEO-0002, maart 2012.

Harza, L.F. *Uplift and seepage under dams on sand.* Transactions of the American Society of Civil Engineers, 100 (1), 1352-1385, 1935.

Van den Ham, G.A. *SBW Piping Kunstwerken : KW6. Aanbevelingen toetsmethode onder- en achterloopsheid bij (historische) kunstwerken*. Deltares, rapport 1200675-006-GEO-0001, december 2009.

———————————————————————

Calle, E.O.F. en J.B. Sellmeijer. *Probabilistische gevoeligheidsanalyse heave Fase 5 ; Eindrapportage*. GeoDelft, rapport 370250/54, 1998.

Förster, U., G. van den Ham, E.O.F. Calle en G.A.M. Kruse. *Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen*. Deltares, rapport 1202123-003-GEO-0002, maart 2012.

———————————————————————

Förster, U., G. van den Ham, E.O.F. Calle en G.A.M. Kruse. *Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen*. Deltares, rapport 1202123-003-GEO-0002, maart 2012.

Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken : Deel 1 - Bovenrivierengebied. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), september 1985.

_____

Technisch rapport zandmeevoerende wellen. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), rapport TAW99-26, maart 1999.

_____

Technisch rapport zandmeevoerende wellen. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), rapport TAW99-26, maart 1999.

_____

Förster, U., G. van den Ham, E.O.F. Calle en G.A.M. Kruse. *Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen*. Deltares, rapport 1202123-003-GEO-0002, maart 2012.

_____

Förster, U., G. van den Ham, E.O.F. Calle en G.A.M. Kruse. *Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen*. Deltares, rapport 1202123-003-GEO-0002, maart 2012.

_____

Förster, U., G. van den Ham, E.O.F. Calle en G.A.M. Kruse. *Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen*. Deltares, rapport 1202123-003-GEO-0002, maart 2012.

_____

Grondslagen voor waterkeren. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), januari 1998.

Kok, M., R.B. Jongejan, M.W.C. Nieuwjaar en I.C. Tánczos. *Grondslagen voor hoogwaterbescherming ; Tweede herziene druk.* Expertise Netwerk Waterveiligheid (ENW), november 2017.

Leidraad kunstwerken. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW) en Rijkswaterstaat (RWS DWW), rapport DWW-2003-059, mei 2003.

Leidraad waterkerende kunstwerken en bijzondere constructies. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), juni 1997.

Basisrapport behorende bij de TAW-leidraad Waterkerende kunstwerken en bijzondere constructies. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), juni 1997.

Leidraad voor ontwerp, beheer en onderhoud van constructies en vreemde objecten in, op en nabij waterkeringen. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), april 1976.

Meinen, N., R.D.J.M. Steenbergen, R.B. Jongejan en A. Casteleijn. *Kalibratie toetsvoorschrift constructief falen onder hoogwaterbelasting voor RBK-NAT*. TNO, rapport 2017 R10778, juni 2017.

Voorschrift toetsen op veiligheid primaire waterkeringen 2006. Ministerie van Verkeer en Waterstaat en Rijkswaterstaat (RWS DWW), augustus 2007.

_____

Leidraad kunstwerken. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW) en Rijkswaterstaat (RWS DWW), rapport DWW-2003-059, mei 2003.

_____

Van Bree, B., R. Delhez, R. Jongejan en A. Casteleijn. *Werkwijzer ontwerpen waterkerende kunstwerken : Ontwerpverificaties voor de hoogwatersituatie ; Definitief, groene versie D2*. Rijkswaterstaat (RWS WVL), rapport, november 2018.

_____

Van Bree, B., R. Delhez, R. Jongejan en A. Casteleijn. *Werkwijzer ontwerpen waterkerende kunstwerken : Ontwerpverificaties voor de hoogwatersituatie ; Definitief, groene versie D2*. Rijkswaterstaat (RWS WVL), rapport, november 2018.

_____

Van Bree, B., R. Delhez, R. Jongejan en A. Casteleijn. *Werkwijzer ontwerpen waterkerende kunstwerken : Ontwerpverificaties voor de hoogwatersituatie ; Definitief, groene versie D2*. Rijkswaterstaat (RWS WVL), rapport, november 2018.

_____

Handleiding overstromingskansanalyse kunstwerken ; Groene versie ; BOI2023. Rijkswaterstaat, juli 2023.

Kansen in de civiele techniek : Deel 1 Probabilistisch ontwerpen in theorie. CUR, rapport 190, 1997.

Van Bree, B., R. Delhez, R. Jongejan en A. Casteleijn. *Werkwijzer ontwerpen waterkerende kunstwerken : Ontwerpverificaties voor de hoogwatersituatie ; Definitief, groene versie D2*. Rijkswaterstaat (RWS WVL), rapport, november 2018.

_____

Calle, E.O.F. en A.C.W.M. Vrouwenvelder. *Afstemming Leidraad kunstwerken en Eurocode : Activiteit 2: belastingfactor dagelijkse omstandigheden*. Deltares, rapport 1204875-002-GEO-0011, maart 2012.

_____

Handleiding overstromingskansanalyse kunstwerken ; Groene versie ; BOI2023. Rijkswaterstaat, juli 2023.

Van Bree, B., R. Delhez, R. Jongejan en A. Casteleijn. *Werkwijzer ontwerpen waterkerende kunstwerken : Ontwerpverificaties voor de hoogwatersituatie ; Definitief, groene versie D2*. Rijkswaterstaat (RWS WVL), rapport, november 2018.

_____