



KUNSTWERKEN

Gebruikershandleiding Riskeer





Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

RWS INFORMATIE

Gebruikershandleiding Riskeer – Kunstwerken

Colofon

Uitgegeven door	Rijkswaterstaat
Informatie	www.iplo.nl
Versie	Juli 2023

Inhoud

1	Inleiding	7
1.1	Het Beoordelings- en ontwerpinstrumentarium (BOI)	7
1.2	Gebruikershandleiding Riskeer – faalmechanismen kunstwerken	8
1.2.1	Doel en doelgroep van deze handleiding	8
1.2.2	Riskeer	8
1.2.3	Relatie met Handleiding kunstwerken	8
1.3	Leeswijzer van deze handleiding	8
2	Analyse met behulp van Riskeer – overslag en/of overloop	10
2.1	Overzichtstabel parameters Riskeer	10
2.2	Deelfaalmechanisme Z_{11} : bezwijken bodembescherming	13
2.2.1	Kritiek overslag-/overloopdebiet	14
2.2.2	Stroomvoerende breedte bodembescherming	20
2.2.3	Optredend overslag-/overloopdebiet	22
2.2.3.1	Modelfactor overslagdebiet	25
2.2.3.2	Kerende hoogte kunstwerk	26
2.2.3.3	Invloedsfactor neusconstructie	26
2.2.3.4	Oriëntatie normaal van het kunstwerk	27
2.2.3.5	Modelfactor overloopdebiet volkomen overlaat	28
2.2.4	Breedte van de kruin van het kunstwerk	29
2.3	Deelfaalmechanisme Z_{12} : kans bezwijken kunstwerk als gevolg van erosie bodem	30
2.3.1	Faalkans gegeven erosie bodem	30
2.4	Deelfaalmechanisme Z_{13} : overschrijden kombergend vermogen	34
2.4.1	Modelfactor kombergend vermogen	34
2.4.2	Kombergend oppervlak	35
2.4.3	Toegestane peilverhoging	37
2.4.4	Modelfactor instromend volume	39
2.4.5	Stormduur	40
2.4.6	Optredend overslag-/overloopdebiet	41
2.4.7	Breedte van de kruin van het kunstwerk	41
2.5	Deelfaalmechanisme Z_{14} : toelaatbaar overslag-/overloopdebiet in verband met dynamische effecten op het keermiddel	41
3	Analyse met behulp van Riskeer – niet sluiten	43
3.1	Overzichtstabel parameters Riskeer	43
3.2	Deelfaalmechanisme Z_{12} : bezwijken kunstwerk als gevolg van erosie bodem	45
3.2.1	Faalkans gegeven erosie bodem	46
3.3	Deelfaalmechanisme Z_{21} : overschrijden bergend vermogen	49
3.3.1	Modelfactor kombergend vermogen	50
3.3.2	Kombergend oppervlak	51
3.3.3	Toegestane peilverhoging	53
3.3.4	Modelfactor instromend volume	55
3.3.5	Factor voor stormduur hoogwater	55
3.3.6	Stormduur	56
3.3.7	Instromend debiet door kunstwerk gegeven geopend kunstwerk	58
3.3.7.1	Oriëntatie	60
3.3.7.2	Breedte doorstroomopening	61
3.3.7.3	Modelfactor overloopdebiet volkomen overlaat	62

3.3.7.4	Modelfactor overslagdebiet	63	
3.3.7.5	Kerende hoogte bij niet hoogwater gesloten zijn van kunstwerk		63
3.3.7.6	Modelfactor lange overlaat	64	
3.3.7.7	Binnenwaterstand	65	
3.3.7.8	Drempelhoogte	66	
3.3.7.9	Afvoercoëfficiënt	67	
3.3.7.10	Doorstroomoppervlak	68	
3.4	Deelfaalmechanisme Z22: falen bodembescherming	69	
3.4.1	Kritiek instromende debiet	70	
3.4.2	Stroomvoerende breedte bodembescherming	76	
3.5	Deelfaalmechanisme Z23: falen sluitproces	78	
3.5.1	Kans op open staan bij naderend hoogwater	78	
3.5.2	Kans mislukken sluiting	86	
3.5.3	Aantal identieke doorstroomopeningen	89	
3.6	Deelfaalmechanisme Z24: falen van herstel van het sluitproces		91
3.6.1	Faalkans herstel van gefaalde situatie	91	
4	Analyse met behulp van Riskeer – sterkte en/of stabiliteit puntconstructies		97
4.1	Beperkingen Riskeer	97	
4.2	Overzichtstabel parameters Riskeer	98	
4.3	Deelfaalmechanisme Z411 Bezwijken waterkerende constructieonderdelen t.g.v. verval en golven		
	101		
4.3.1	Parameters voor het model van Goda-Takahashi	102	
4.3.1.1	Bermbreedte	104	
4.3.1.2	Kerende hoogte	104	
4.3.1.3	Afstand onderkant wand en teen van dijk/berm (Bermhoogte)	105	
4.3.1.4	Aantal golven per stormgebeurtenis	105	
4.3.1.5	Modificatiefactor voor geometrie van constructie	106	
4.3.1.6	Modificatiefactor voor aard van constructie	106	
4.3.1.7	Oriëntatie (van de normaal van de constructie)	106	
4.3.2	Parameters voor deelfaalmechanisme Z411	107	
4.3.2.1	Modelfactor belastingeffect	108	
4.3.2.2	Analysehoogte	108	
4.3.2.3	Lineaire belastingschematisering constructieve sterkte (lineair belastingmodel)		111
4.3.2.4	Kwadratische belastingschematisering constructieve sterkte (kwadratisch belastingmodel)		120
4.3.2.5	Binnenwaterstand bij constructief falen	122	
4.4	Deelfaalmechanisme Z43 Falen door instabiliteit constructie en grondlichaam (STCG)	123	
4.4.1	Lineaire belastingschematisering stabiliteit (lineair belastingmodel)	124	
4.4.2	Kwadratische belastingschematisering stabiliteit (kwadratisch belastingmodel)		125
4.5	Deelfaalmechanisme Z422 Kans op aanvaring tweede keermiddel	125	
4.5.1	Aantal nivellerings per jaar	126	
4.5.2	Kans op aanvaring tweede keermiddel per nivellering	129	
4.6	Deelfaalmechanisme Z421 Aanvaarenergie groter dan kritieke waarde	130	
4.6.1	Bezwijkwaarde aanvaarenergie	130	
4.6.2	Massa van het schip	132	
4.6.3	Modelfactor voor aanvaarbelasting	134	
4.6.4	Aanvaarsnelheid	134	
4.7	Deelfaalmechanisme Z423 Kans op falen van het herstel van een fatale aanvaring		137
4.7.1	Kritieke stroomsnelheid sluiting eerste keermiddel	138	
4.7.2	Binnenwaterstand	140	
4.8	Deelfaalmechanisme Z21 Onvoldoende bergend vermogen	140	
4.8.1	Modelfactor kombergend vermogen	141	

4.8.2	Kombergend oppervlak	142	
4.8.3	Toegestane peilverhoging komberging	145	
4.8.4	Modelfactor instromend volume	146	
4.8.5	Factor voor stormduur hoogwater	146	
4.8.6	Stormduur	147	
4.8.7	Instromend debiet door kunstwerk gegeven geopend kunstwerk	148	
4.8.7.1	Breedte van doorstroomopening	149	
4.8.7.2	Modelfactor voor lange overlaat	151	
4.8.7.3	Binnenwaterstand	151	
4.8.7.4	Drempelhoogte	153	
4.8.7.5	Afvoercoëfficiënt	154	
4.8.7.6	Doorstroomoppervlak	154	
4.9	Deelfaalmechanisme Z22 Falen bodembescherming achter constructie	155	
4.9.1	Kritiek instromend debiet	156	
4.9.2	Stroomvoerende breedte bodembescherming	159	
4.9.3	Deelfaalmechanisme Z12 Bezwijken kunstwerk a.g.v. erosie bodem	161	
4.9.4	Faalkans gegeven erosie bodem	162	
4.10	Deelfaalmechanisme Z412 Falen herstel sluiting na bezwijken keermiddel (STCO)	165	
4.10.1	Faalkans herstel van gefaalde situatie	166	
5	Parameterbepaling faalmechanisme piping bij kunstwerk	168	
5.1	Parameters model van Lane	168	
5.1.1	Horizontale kwelweglengte	168	
5.1.2	Verticale kwelweglengte	172	
5.1.3	Creep-factor behorend bij model van Lane	175	
5.1.4	Buitenwaterstand	177	
5.1.5	Binnenwaterstand	178	
5.2	Parameters heave-model	178	
5.2.1	Stijghoogte op niveau onderzijde benedenstreams kwelscherm	179	
5.2.2	Freatisch niveau ter plaatse van uittreepunt	180	
5.2.3	Lengte benedenstreams kwelscherm	180	
5.2.4	Een hulpmiddel om de heave-toets uit te voeren: de fragmentenmethode	181	
5.3	Parameters model opbarsten	185	
5.3.1	Natte volumegewicht cohesieve deklaag	185	
5.3.2	Volumegewicht water	186	
5.3.3	Dikte cohesieve deklaag	186	
5.3.4	Freatisch niveau ter plaatse van uittreepunt	187	
5.3.5	Stationaire stijghoogte in de zandlaag	187	
5.3.6	Veiligheidsfactor voor opbarsten	189	
5.3.7	Schematiseringsfactor	189	
5.4	Parameters model van Bligh	189	
5.4.1	Horizontale kwelweglengte	190	
5.4.2	Creep-factor behorend bij model van Bligh	190	
5.4.3	Buitenwaterstand	191	
5.4.4	Binnenwaterstand	191	
5.5	Parameters model van Sellmeijer	191	
5.5.1	Kwelweglengte	191	
5.5.2	d_{70}	192	
5.5.3	Doorlatendheid	192	

Literatuur 194

Bijlage A	Afleiding formule voor kans op falen door niet sluiten in Riskeer	197
Bijlage B	Falen bij hoogfrequente waterstanden	202
Bijlage C	Veiligheidsfilosofie constructieve veiligheid en haar historie	206
Bijlage D	Afleiding kwelweglengte bij horizontaal short path	210

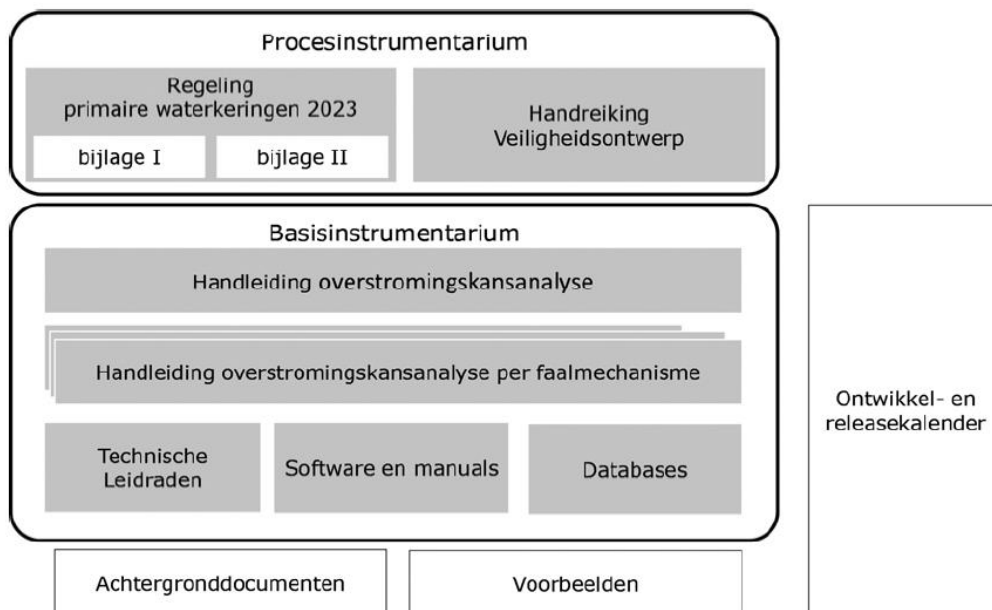
1 Inleiding

Om te komen tot een geloofwaardige, herleidbare en stabiele bepaling van de bijdrage aan de overstromingskans van een waterkerend kunstwerk in een dijktraject is een realistische parameterbepaling van groot belang. In deze gebruikershandleiding worden daarom handvatten gegeven voor de diverse parameters die bij de beoordeling van de relevante faalmechanismen bij kunstwerken – *overslag en/of overloop, betrouwbaarheid sluiting, piping bij kunstwerk en sterkte en stabiliteit* - een rol spelen. Dit is gedaan aan de hand van de modellering van het faalmechanisme in Riskeer. In de toelichting zijn ook diverse voorbeelden opgenomen.

1.1 Het Beoordelings- en ontwerpinstrumentarium (BOI)

Het Rijk stelt de regels voor het uitvoeren van de veiligheidsbeoordeling op en stelt documenten beschikbaar voor het ontwerp en het beheer van primaire keringen. Onder het beheer van een waterkering wordt het geheel van activiteiten verstaan dat erop gericht is de bestaande kering zijn functies duurzaam te laten vervullen. Als hulpmiddel bij de veiligheidsbeoordeling en bij ontwerp stelt het Rijk het Beoordelings- en ontwerpinstrumentarium (BOI) beschikbaar.

Het BOI bestaat uit proces- en basisinstrumenten. Het procesinstrumentarium bestaat uit de Omgevingsregeling en de twee bijlagen die de regels bevatten voor het uitvoeren van de beoordeling, en de handleiding Veiligheidsontwerp [37]. Het basisinstrumentarium bestaat uit handleidingen, technische leidraden, software-applicaties en databases. Deze instrumenten kunnen worden gebruikt om de overstromingskans van een dijktraject te bepalen. In onderstaande figuur is deze indeling weergegeven.



Figuur 1: Overzicht BOI

Voorliggende handleiding kan worden gezien als een manual en is daarmee onderdeel van het basisinstrumentarium.

1.2 Gebruikershandleiding Riskeer – faalmechanismen kunstwerken

1.2.1 Doel en doelgroep van deze handleiding

Deze gebruikershandleiding is geschreven met het doel handvatten te bieden voor de parameterbepaling in Riskeer om in de beoordeling een geloofwaardige, herleidbare en stabiele overstromingskans te bepalen. De handleiding is geschreven voor een deskundig gebruiker die bekend is met de voorschriften en de (deel)faalmechanismen en modellen die van toepassing zijn voor deze handleiding.

Voor ontwerpen wordt momenteel gewerkt aan een update van de Werkwijzer Ontwerpen Waterkerende Kunstwerken [16]. Vooralsnog wordt aanbevolen om bij ontwerpen hierop aan te sluiten.

1.2.2 Riskeer

De modellen en applicaties die onderdeel uitmaken van het BOI kunnen gebruikt worden om de kans van optreden van bepaalde mechanismen te berekenen. Riskeer is één van de modellen en kan gebruikt worden om hydraulische belastingen te bepalen en voor de faalmechanismen *overslag en/of overloop*, *niet sluiten* en *sterkte en/of stabiliteit* kan een faalkans worden berekend. Hierbij voert de gebruiker in Riskeer een schematisering van de sterkte van (onderdelen van) het kunstwerk in, waarna met het faalmechanismemodel in Riskeer de kans kan worden bepaald dat de sterkte kleiner is dan de belastingen voor het betreffende faalmechanisme.

In Riskeer kunnen ook de beoordelingsresultaten van alle faalmechanismen worden geadmistreerd en geassembleerd tot een inschatting van de overstromingskans van het dijktraject.

Voor het faalmechanisme *piping bij kunstwerken* is geen probabilistisch model aanwezig in Riskeer. Uiteraard is het ook voor dit faalmechanisme belangrijk om in de beoordeling tot geloofwaardige, herleidbare en stabiele beoordelingsresultaten te komen. Daarom is ervoor gekozen om de handvatten ten aanzien van de parameterbepaling voor dit faalmechanisme aan deze handleiding toe te voegen.

1.2.3 Relatie met Handleiding kunstwerken

Deze gebruikershandleiding heeft een nauwe relatie met de handleiding Kunstwerken [38] en de technische leidraden voor de diverse faalmechanismen ([4]-[7]) en moet in samenhang met deze documenten gebruikt worden.

1.3 Leeswijzer van deze handleiding

In deze handleiding wordt per faalmechanisme ingegaan op de wijze van parameterbepaling aan de hand van de modellen in Riskeer:

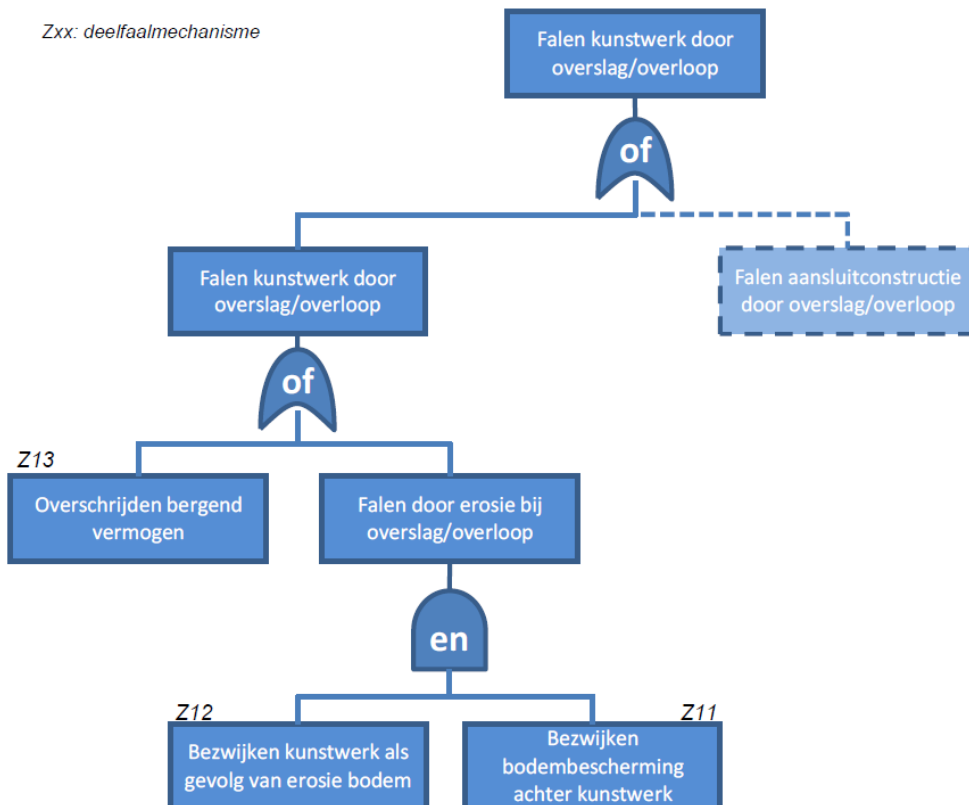
Onderwerp	Locatie
Faalmechanisme <i>overslag en/of overloop</i>	Hoofdstuk 2
Faalmechanisme <i>niet sluiten</i>	Hoofdstuk 3
Faalmechanisme <i>sterkte en stabiliteit</i>	Hoofdstuk 4
Faalmechanisme <i>piping bij kunstwerk</i>	Hoofdstuk 5

Ieder hoofdstuk begint met de modellering van het betreffende faalmechanisme in Riskeer. In de fputenbomen zijn diverse deelfaalmechanismen te onderscheiden. Per deelfaalmechanisme wordt de Z-functie beschreven en worden handvatten gegeven voor de relevante parameters die in deze Z-functie een rol spelen. Voor fenomenologische beschrijvingen, modelbeschrijvingen et cetera wordt verwezen naar de handleiding Kunstwerken [38] en de technische leidraden [4]-[7] per faalmechanisme.

2 Analyse met behulp van Riskeer – overslag en/of overloop

In dit hoofdstuk is de bepaling van de faalkans met behulp van Riskeer (onderdeel van het instrumentarium van BOI) voor het faalmechanisme *overslag en/of overloop* opgenomen. Er wordt daarbij ingegaan op het afleiden van waarden voor de diverse betrokken parameters. Per parameter wordt aangegeven wat de parameter precies inhoudt, hoe de waarde kan worden bepaald, wat aandachtspunten zijn et cetera. Daarnaast worden op diverse plaatsen voorbeelden gegeven hoe de parameterwaarde te bepalen.

Basis voor de faalkansberekening is onderstaande modellering van het faalmechanisme *overslag en/of overloop* in Riskeer. Deze wijkt enigszins af van de foutenboom in de handleiding kunstwerken [38], waar enkele verduidelijkingen zijn aangebracht en het deelfaalmechanisme *Falen door bezwijken constructieonderdelen als gevolg van dynamische effecten van overslag en/of overloop* expliciet in naar voren is gebracht. Dit deelfaalmechanisme wordt in dit hoofdstuk als deelfaalmechanisme Z₁₄ behandeld maar is via deelfaalmechanisme Z₁₁ te modelleren in Riskeer.



Figuur 2: Modellering faalmechanisme overslag en/of overloop in Riskeer

2.1 Overzichtstabel parameters Riskeer

Per modelparameter wordt in Tabel 1 een aantal standaardgegevens gepresenteerd. Ook de naamgeving en verwijzing naar benamingen van invoer in Riskeer is in deze tabel opgenomen. Voor de duiding van de gegeven parameterwaarden voor het gemiddelde μ en de standaardafwijking σ / variatiecoëfficiënt V_r is de indeling gebruikt die vermeld is in Tabel 2.

Tabel 1: Waarden behorende bij de statistische gegevens voor de relevante parameters

symbool	benaming	eenheid	type	μ	V. of σ	Groep *	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t	Par.	CSV-bestand Riskeer
q_c	Kritiek instromend debiet	[m ³ /s/m]	logn	Invoer	$V_r=0,15$	4(μ) en 2(V_r)	-	0	-	1	2.2.1	KW_HOOGTE4
B_{sv}	Stroomvoerende breedte bodembescherming	[m]	logn	Invoer	$\sigma=0,05$	4(μ) en 2(σ)	-	0	-	1	2.2.2	KW_HOOGTE3
m_{os}	Modelfactor overslagdebiet	[-]	logn	0,09	$\sigma=0,06$	1(μ) en 1(σ)	-	0	-	1	2.2.3.1	-
h_{kr}	Kerende hoogte kunstwerk	[m+NAP]	nor	invoer	$\sigma=0,05$	4(μ) en 2(σ)	-	0	-	1	2.2.3.2	KW_HOOGTE2
γ_n	Invloedsfactor neusconstructie	[-]	det	invoer	-	4(μ)	-	0	-	1	2.2.3.3	-
ψ_{kw}	Oriëntatie normaal van het kunstwerk	[°N]	det	invoer	-	4(μ)	-	0	-	1	2.2.3.4	KW_HOOGTE1
m_{ol}	Modelfactor overloopdebiet volkomen overlaat	[-]	nor	1,1	$\sigma=0,05$	2(μ) en 1(σ)	-	0	-	1	2.2.3.5	-
B	Breedte van de kruin van het kunstwerk <i>In Riskeer: Breedte van doorstroomopening</i>	[m]	nor	invoer	$\sigma=0,05$	4(μ) en 2(σ)	-	0	-	1	2.2.4	KW_HOOGTE5
$P_{f,kw erosie\ bodem}$	Faalkans gegeven erosie bodem	[-]	det	1,0	-	2(μ)	-	1	-	1	2.3.1	KW_HOOGTE6
m_{kom}	Modelfactor kombergend vermogen	[-]	logn	1,0	$\sigma=0,20$	1(μ) en 1(σ)	-	0	-	1	2.4.1	-
A_{kom}	Kombergend oppervlak	[m ²]	logn	Invoer	$V_r=0,10$	4(μ) en 2(V_r)	-	0	-	1	2.4.2	KW_HOOGTE7
Δh_{kom}	Toegestane peilverhoging komberging	[m]	logn	Invoer	$\sigma=0,10$	4(μ) en 2(σ)	-	0	-	1	2.4.3	KW_HOOGTE8
m_{in}	Modelfactor instromend volume	[-]	det	1,0	-	1(μ)	-	-	-	1	2.4.4	-
t_s	Stormduur	[uur]	logn	6,0	$V_r=0,25$	2(μ) en 1(V_r)	-	1	-	0	2.4.5	-

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

Tabel 2: Indeling bij duiding van de parameterwaarden

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

In Tabel 3 zijn de statistische parameters die gebruikt zijn in Tabel 1 nader toegelicht.

Tabel 3: Toelichting gegevens vermeld bij parameters in Tabel 1

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

2.2 Deelfaalmecanisme Z_{11} : bezwijken bodembescherming

De bodembescherming achter de constructie faalt als de kritieke stroomsnelheid van de bodembescherming wordt overschreden. Deze kritieke stroomsnelheid hoort bij een bepaald kritiek debiet q_c , dat berekend kan worden door de stroomsnelheid te vermenigvuldigen met de binnenwaterstand. Dit kritieke debiet per strekkende meter [$m^3/s/m$] wordt vermenigvuldigd met de stroomvoerende breedte B_{sv} ter plaatse van de bodembescherming om het totale kritieke debiet Q_c [m^3/s] te berekenen. Dit is de 'sterktekant' van de Z-functie van het deelfaalmecanisme Z_{11} welke er in formulevorm uit ziet als:

$$Q_c = q_c \cdot B_{sv}$$

1

De parameters q_c en B_{sv} zijn aan elkaar gekoppeld via de exacte locatie die wordt bekeken. Achter een kunstwerk is immers vaak sprake van een bodembescherming, die uiteindelijk overgaat in een aansluiting op de natuurlijke bodem. Het ontstaan van erosiekuilen kan plaatsvinden ter plaatse van de bodembescherming, maar ook ter plaatse van onbeschermde bodem aansluitende op de bodembescherming. Dit laatste is alleen van belang indien dit leidt tot instabiliteit van het kunstwerk. Wanneer de bodembescherming voldoende lang is, leiden erosiekuilen achter de bodembescherming niet meer tot instabiliteit van het kunstwerk. Wellicht leidt dit wel tot schade aan de bodembescherming, maar dit leidt dan niet tot instabiliteit van de constructie. Normaliter is de lengte van de bodembescherming hier ook op ontworpen. Welke lengte van de bodembescherming voldoende is, is afhankelijk van de specifieke situatie. Per geval dient hiervoor een afweging te worden gemaakt. Aanwijzingen hiervoor zijn onder andere te vinden in [9], [11] en [12]. Uiteindelijk bepaalt de combinatie van het kritieke debiet per strekkende meter en de stroomvoerende breedte wat het maatgevende totale kritieke debiet (Q_c) is.

Het optredend overslag-/overloopdebiet is afhankelijk van de oriëntatie, hydraulische belastingen en de afmetingen (hoogte en breedte) van de keermiddelen en de vaste waterkerende constructiedelen van het kunstwerk. Het optredend overslag-/overloopdebiet $q_{os/ol}$ wordt bepaald met het formulepark beschreven in paragraaf 2.2.3. Dit is een debiet per strekkende meter [$m^3/s/m$], dat wordt vermenigvuldigd met de breedte van de keermiddelen en/of de constructie B om het totale kritieke overslag-/ overloopdebiet $Q_{os/ol}$ [m^3/s] te berekenen:

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

De kans dat het overslag-/overloopdebiet groter is dan het kritieke debiet wordt bepaald door de volgende parameters:

- Kritiek debiet per strekkende meter (q_c)
- Stroomvoerende breedte ter plaatse van de bodembescherming (B_{sv})
- Optredend overslag-/overloopdebiet ($q_{os/ol}$)
- Breedte van de kruin van het kunstwerk (B)

De eerste twee parameters betreffen de 'sterkte' van het systeem, de laatste twee de 'belasting'. De Z-functie voor het bezwijken van de bodembescherming als gevolg van overslag en/of overloop is:

$$Z = Q_c - Q_{os/ol} = q_c \cdot B_{sv} - q_{os/ol} \cdot B \quad 3$$

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

2.2.1 Kritiek overslag-/overloopdebiet

Wat is het

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

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

Het kritiek (overslag-/overloop)debiet (q_c [$m^3/s/m$]) is het debiet per strekkende meter dat door overslag/overloop over het kunstwerk komt en tot dusdanige stroomsnelheden aan de bodem leidt dat de bodem(bescherming) bezwijkt. Onder bezwijken wordt hier verstaan het optreden van

doorgaande erosie van de bodem(bescherming). Praktisch gezien is een eerste conservatieve benadering te maken door uit te gaan van het criterium dat bewegen van individuele stenen optreedt. Verondersteld wordt dat het kritiek debiet lognormaal is verdeeld. Om die verdeling te karakteriseren moet de verwachtingswaarde μ worden opgegeven. Voor de variatiecoëfficiënt V_r is er een aanbevolen waarde van 0,15 [-], maar die waarde kan worden aangepast.

Hoe te bepalen

Van groot belang bij het bepalen van het kritieke debiet is de beschikbare informatie omtrent de bodembescherming en de instroomsituatie die bij een gesloten kunstwerk ontstaat (zie paragraaf 4.6.2 van de handleiding kunstwerken [38]). Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen twee belastingsituaties:

1. De bodembescherming wordt belast door horizontale stroming.
2. De bodembescherming wordt rechtstreeks belast door een overstortende straal.

Beide situaties worden hieronder behandeld.

1. De bodembescherming wordt belast door horizontale stroming

Het kritieke debiet wordt bepaald door de kritieke stroomsnelheid met betrekking tot de bodembescherming te vermenigvuldigen met de aan de binnenzijde aanwezige waterdiepte. Hierbij wordt de stroomsnelheid dus over de diepte constant verondersteld. In formulevorm betekent dit:

$$q_c = u_c \cdot (h_{bi} - h_{bb}) \quad 4$$

Waarin:

u_c	Dieptegemiddelde kritieke stroomsnelheid met betrekking tot de bodembescherming [m/s].
h_{bi}	Binnenwaterstand [m+NAP].
h_{bb}	Hoogte bovenkant bodembescherming [m+NAP].

De kritieke stroomsnelheid met betrekking tot de bodembescherming kan worden bepaald met de beschikbare formules van bijvoorbeeld Izbash, Shields en Pilarczyk. Handvatten voor het gebruik van deze formules worden gegeven in hoofdstuk 2 van het *Achtergrondrapport bepaling kritiek overslag-/overloop-/instroomdebiet bij kunstwerken* [2]. De waterdiepte boven de bodembescherming ($h_i - h_{bb}$) kan met de beschikbare gegevens van binnenwaterstand en ligging bodembescherming worden bepaald. Voor de binnenwaterstand moet een waarde aangehouden worden die past bij een situatie met hoge overslag (bijvoorbeeld als hoge buitenwaterstanden en lage boezemwaterstanden sterk gecorreleerd zijn dan moet hier rekening mee worden gehouden bij de inschatting van de binnenwaterstand).

Als er geen bodembescherming aanwezig is (of deze is geërodeerd), dan is de kritieke stroomsnelheid afhankelijk van de grondsoort. Op basis van deels empirische bevindingen [13], [12] en [15] is in onderstaande tabel hiervan een overzicht samengesteld. Deze waarden kunnen worden gebruikt als eerste richtgetallen.

Tabel 4: Kritieke stroomsnelheden onbeschermd bodem

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

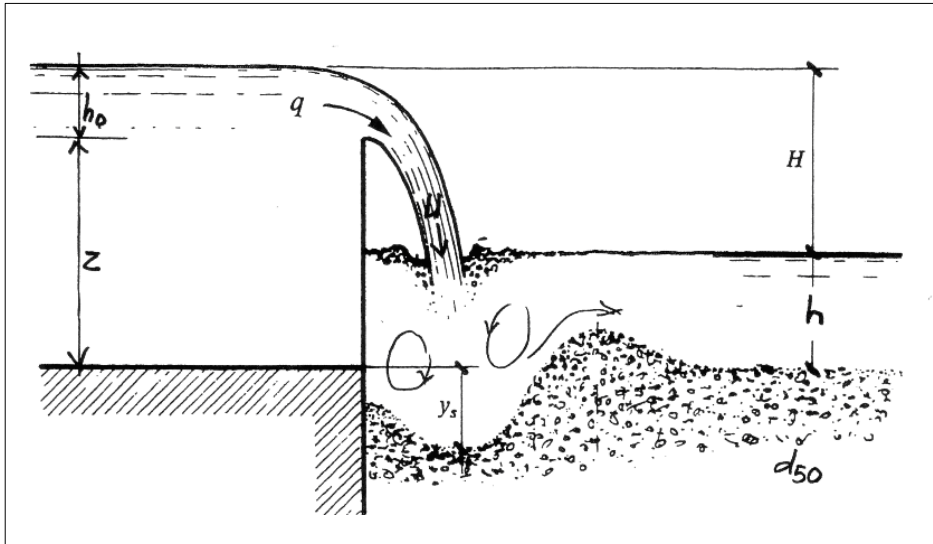
2. De bodembescherming wordt rechtstreeks belast door een overstortende straal
 Bij coupures, keer- en schutsluizen is er sprake van een (al dan niet pulserende) overstortende straal bij het faalmechanisme *overslag en/of overloop*. Deze waterstraal komt aan de binnenzijde uit in de daar aanwezige waterdiepte (keer-, schutsluizen) of belast de bodembescherming rechtstreeks (coupures). Indien achter het keermiddel een betonnen vloer aanwezig is, zal de energie van de overstortende straal kunnen worden opgenomen door het betonwerk. De overstortende straal zorgt in dat geval niet voor de maatgevende belasting op die bodem(bescherming). Het kritieke debiet kan dan worden gekoppeld aan de bodembescherming die aansluit op de betonnen bodem. In dat geval kan gebruik worden gemaakt van de benadering die hierboven is gepresenteerd.

Indien de overstortende straal terecht komt boven een bodem die niet van beton is, maar beschermd wordt middels een bestorting of een andere soort van bodembescherming, moet een andere benadering gekozen worden. Voor deze specifieke situatie is weinig kennis over de stabiliteit van bodembeschermingen beschikbaar. Gebruik kan worden gemaakt van de richtwaarden gegeven in Tabel 5.

Tabel 5: Richtwaarden voor het kritieke debiet voor bodembescherming die worden belast door een overstortende straal

Type	Richtwaarde kritiek debiet	Randvoorwaarde
Coupure	0,05 m ³ /s/m bij elementbestrating 0,1 m ³ /s/m bij asfaltbestrating	Water kan direct wegglopen of worden afgevoerd
Sluizen	1,0 m ³ /s/m	Achter keermiddelen is waterlaag aanwezig van enige diepte en er is een bodembescherming aanwezig

Voorts is een iets gedetailleerder model van Vrijburcht beschikbaar [15]. De betrouwbaarheid van dit model wordt echter ingeschat als niet zo groot, en dus moet de methode terughoudend en met kennis van zaken worden ingezet. De schematisering kan plaatsvinden met behulp van Figuur 3.



Figuur 3: Overstortende straal met ontgrondingskuil achter de constructie [15]

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

$$q_c = 1,705 \cdot \sqrt{h_0^3} \quad 5$$

Waarin:

q_c kritiek debiet per meter breedte [$\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$].
 h_0 overstorthoogte boven de kruin [m].

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

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

Waarin:

y_s erosiediepte als evenwichtswaarde ≥ 0 [m].
 q_c kritiek debiet per meter breedte [$\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$].
 H hoogteverschil boven- benedenstroomse waterstand [m] = $z + h_0 - h$.
 z hoogte sluisdeur boven benedenstroomse bodem [m].
 h waterdiepte benedenstroomse zijde [m].
 h_0 overstorthoogte boven de kruin [m].
 d_{50} diameter korrels of stenen [m].

Bij een bepaalde erosiediepte van een laag kan worden gesteld dat deze laag bezweken is. In het document [15] wordt voorgesteld om hier een waarde van 0,50 tot 0,60 van de oorspronkelijke laagdikte voor aan te houden.

Voor de beoordeling is het van belang om vast te stellen welk debiet leidt tot ontgrondingskuilen met dusdanige diepte dat de stabiliteit van het kunstwerk in gevaar

komt. Dit betekent dat aan de hand van de hoogte van de verticale wand, de diepte van de benedenstroomse watergang en de maximaal toelaatbare diepte van de erosiekuil via een iteratief proces een bijbehorend kritiek debiet kan worden afgeleid. Hierbij kan gebruik worden gemaakt van meerdere lagen van de bodem.

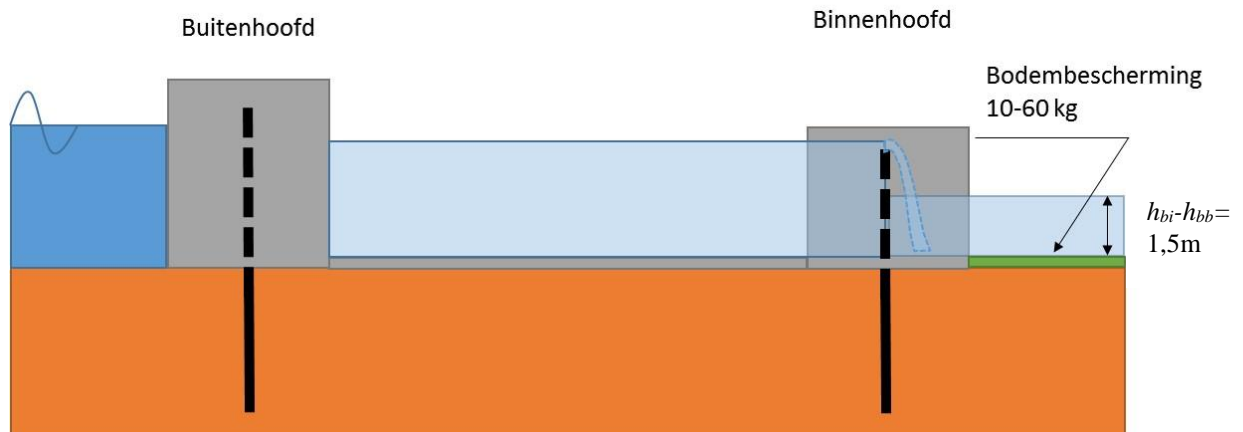
Aandachtspunten

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

- Naast de aanwezigheid van bodembescherming is het ook van belang dat bekend is wat de conditie van deze bodembescherming is. Vaak is dit gegeven niet direct voorhanden, omdat hiervoor een inspectie moet plaatsvinden. Lodingen van de bodem kunnen een indicatie geven omtrent de aanwezigheid en volledigheid van de bodembescherming. Bij het detecteren van kuilen in de bodem kan vaak worden gesteld dat de bodembescherming niet meer intact is. Indien de conditie van de bodembescherming niet bekend is en de bodembescherming is niet recent aangelegd of hersteld (periode < 5 jaar), wordt aanbevolen te starten met voorzichtige keuzes met betrekking tot de conditie van de bodembescherming bij de bepaling van de kritieke stroomsnelheid.
- Bodembeschermingen bij kunstwerken worden vaak aangelegd vanuit een andere functie dan waterkeren. Het kan gaan om schroefstraalbelastingen of stroomsnelheden die optreden bij lozing van water. Dit in gedachten nemende kan vanuit de functie van het kunstwerk ook een inschatting van toelaatbare stroomsnelheden worden gedaan (of wellicht worden teruggevonden in de ontwerpdocumenten).
- Een nadere analyse van de kritieke stroomsnelheid kan worden gemaakt door de stroming nauwkeuriger te modelleren. Dit kan door bijvoorbeeld rekening te houden met het theoretische verloop van de stroomsnelheid over de waterdiepte. Een dergelijke exercitie is alleen nuttig indien gedetailleerde gegevens van de bodembescherming bekend zijn (opbouw, actuele conditie en hoogteligging van deze bodembescherming).
- Welke lengte van de bodembescherming voldoende is, is afhankelijk van de specifieke situatie. Per geval dient hiervoor een afweging te worden gemaakt. Aanwijzingen hiervoor zijn onder andere te vinden in [11], [12] en [9].
- Van belang is dat het kritieke debiet per strekkende meter (q_c) altijd wordt gezien in combinatie met de stroomvoerende breedte B_{sv} (zie paragraaf 2.2.2).
- Met betrekking tot schutsluizen geldt dat de bodembescherming vaak is uitgelegd op schroefstraalbelastingen. De toelaatbare stroomsnelheden kunnen dan behoorlijk oplopen. In hoofdstuk 16 van 'Ontwerp van schutsluizen' [11] wordt het ontwerp van bodembeschermingen bij schutsluizen behandeld en zijn ook voorbeelden aanwezig.

Voorbeeld 1

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



Figuur 4: Sluis met bodembescherming belast door overtrekkende stroming

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

Van de bodembescherming is uit een recente inspectie bekend dat deze zich in goede staat bevindt. De kritieke stroomsnelheid kan nu als volgt berekend worden (zie *Achtergrondrapport bepaling kritiek overslag-/overloop-/instroomdebiet bij kunstwerken* [2] voor achtergrondinformatie bij het gebruik van de diverse formules).

Als vertrekpunt wordt de formule van Pilarczyk genomen:

$$D = \frac{\phi_{sc} 0,035 k_n k_t^2 u_c^2}{\Delta \psi_{cr} k_{sl} 2g} \quad 7$$

Deze is te herschrijven als:

$$u_c = \sqrt{\frac{2g\Delta D\psi_{cr}k_{sl}}{\phi_{sc}0,035k_n k_t^2}} \quad 8$$

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

Hierin worden de volgende waarden ingevuld:

- D Karakteristieke elementafmeting [m], voor granulaire materialen geldt: $D = D_{n50}$. Bij sortering 10-60 kg hoort een D_{n50} van 0,24 m (zie bijvoorbeeld Bijlage I van CUR 197 Breuksteen in de praktijk).
- ψ_{cr} Als startwaarde voor de schuifspanningsparameter wordt uitgegaan van $\psi_{cr} = 0,035$ [-] voor granulaire materialen. Indien nodig kan dit zonder problemen worden aangescherpt naar $\psi_{cr} = 0,05$.

ϕ_{sc}	Ervan uitgaande dat de bodembescherming niet boven de drempel van het binnenhoofd uitsteekt kan worden uitgegaan van een waarde van de stabiliteitsparameter ϕ_{sc} van 0,75 [-], horende bij breuksteen in een doorgaande laag (minimaal twee lagen stenen).
Δ	Relatieve dichtheid [-]: $\Delta = (\rho_s - \rho_w) / \rho_w = (2650 \text{ kg/m}^3 - 1000 \text{ kg/m}^3) / 1000 \text{ m}^3 = 1,65$.
k_h	$k_h = (1 + (h_{bi} - h_{bb})/D)^{-0,2}$ voor niet-volledig ontwikkeld snelheidsprofiel zoals hier. Invullen levert $k_h = (1 + 1,5/0,24)^{-0,2} = 0,67$ [-].
k_{sl}	Taludfactor [-]. Niet van toepassing, de bodembescherming ligt horizontaal.
k_t	Vanwege de korte afstand tussen betonwerk en begin van de bodembescherming wordt een hoge waarde voor de turbulentiefactor aangehouden van $k_t^2 = 2,0$ [-].
u_c	Dieptegemiddelde kritieke stroomsnelheid [m/s].
g	Zwaartekrachtversnelling (=9,81) [m/s ²].

Invullen van formule 4-8 levert een kritieke stroomsnelheid op van 2,8 m/s. Vermenigvuldiging met de waterdiepte van 1,5 m levert een waarde voor het in te vullen kritiek debiet q_c op van 4,2 m³/s/m.

Voorbeeld 2

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

Met behulp van de stroomvoerende breedte kan nu voor de waarde van kritiek debiet per strekkende meter een waarde worden ingevoerd. Stel dat de stroomvoerende breedte 2,0 m bedraagt, dan is een inschatting van de waarde van q_c gelijk aan $1,0 / 2,0 = 0,5$ m³/s/m.

Voorbeeld 3

Beschouw een coupure in stedelijk gebied. Achter de coupure is een bestrating aanwezig bestaande uit klinkers. In dat geval kan eenvoudigweg een kritiek debiet van 0,05 m³/s/m (50 l/s/m) gehanteerd worden.

2.2.2 Stroomvoerende breedte bodembescherming

Wat is het

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

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

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

Hoe te bepalen

De stroomvoerende breedte dient te worden betrokken op de bodem(bescherming) waarvoor het kritieke debiet (zie paragraaf 2.2.1) is bepaald. Samen met de kritieke stroomsnelheid behorende bij de bodem(bescherming) levert de stroomvoerende breedte het totale kritieke debiet op.

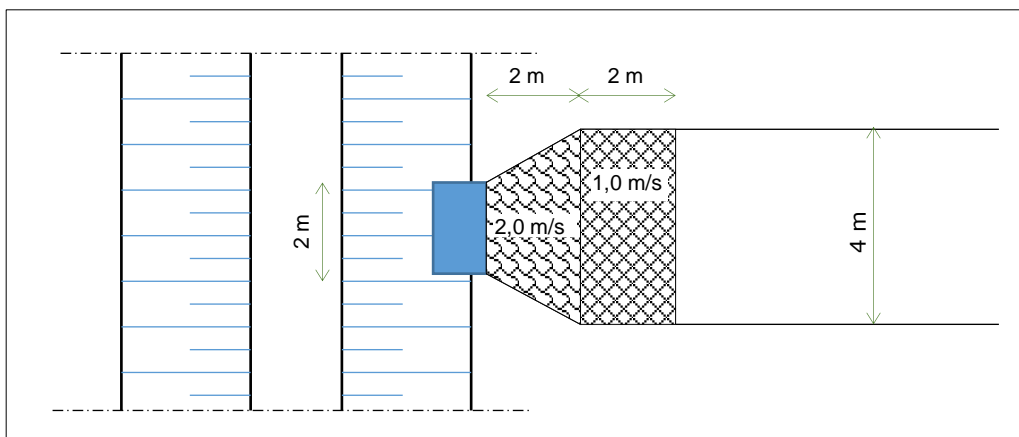
Het vaststellen van de stroomvoerende breedte kan met behulp van tekeningen of metingen in het veld. Een globale schatting is ook nog mogelijk met GIS-applicaties. Indien dit laatste wordt gehanteerd verdient het de aanbeveling om de standaardafwijking σ wat op te voeren naar 0,25. Bij de bepaling van de stroomvoerende breedte dient rekening te worden gehouden met eventuele neren).

Aandachtspunten

Van belang is dat de stroomvoerende breedte B_{sv} altijd wordt gezien in combinatie met het kritieke debiet per strekkende meter (q_c) zie paragraaf 2.2.1).

Voorbeeld

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



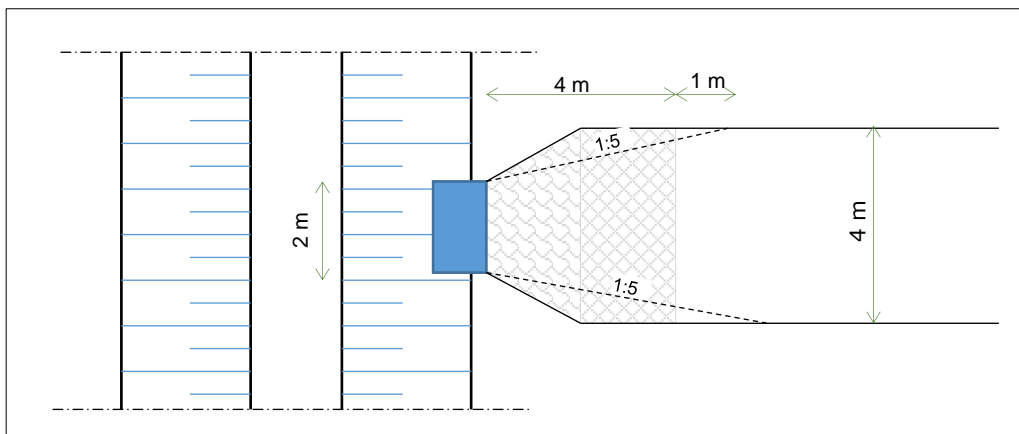
Figuur 5: Gemaal met bodembescherming belast door overtrekkende stroming

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

Stel dat is bepaald dat de spreiding van het debiet in deze specifieke situatie in horizontale richting plaats vindt onder een hoek van 1:5 (zie Figuur 6).

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

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



Figuur 6: Gemaal met bodembescherming belast door overtrekkende stroming

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

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

Bij een dergelijk korte bodembescherming moet ook de overgang worden beschouwd naar de onbeschermde bodem omdat wordt ingeschat dat de ontgrondingskuil ook het kunstwerk kan bereiken. Met betrekking tot de aansluiting tussen bodembescherming en onbeschermde bodem geldt een maximaal toelaatbaar debiet van (voor redelijk vaste klei is een kritieke stroomsnelheid van 1,0 m/s aangehouden, zie Tabel 4):

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

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

2.2.3 Optredend overslag-/overloopdebiet

Wat is het

Het optredend overslag-/overloopdebiet (q_{os} , q_{os+ol} of q_{ol} [$\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^1$]) is het debiet dat via overslaand en/of overlopend water over de keermiddelen van het hoogwaterkerend gesloten kunstwerk naar binnen stroomt. Voor het berekenen van het overslaande / overlopende debiet over het kunstwerk zijn drie modellen beschikbaar:

- 1) alleen overslag.
- 2) zowel overslag als overloop.
- 3) alleen overloop (bij geen of aflatende golven).

Voor achtergrondinformatie over de modellen wordt verwezen naar het *Achtergrondrapport bij toetsspoor hoogte I: Modellerings optredend overslag-/overloopdebiet* [1].

Golfhoogte in modellen 1 en 2

De waarde van de golfhoogte H_{m0} die in de modellen voor de bepaling van het overslag-/overloopdebiet wordt gehanteerd is – voor zeer scheef invallende golven – een gereduceerde

waarde van de golfhoogte $H_{m0,HR}$ die vanuit de hydraulische randvoorwaarden als input wordt gegenereerd:

$$H_{m0} = \gamma_s \cdot H_{m0,HR} \quad 9$$

De invloedsfactor γ_s is geïntroduceerd om een geleidelijke overgang van aanlandige naar aflandige golfrichtingen mogelijk te maken om convergentieproblemen rondom deze overgang te voorkomen:

$$\begin{aligned} 0 < \beta \leq 80 & \Rightarrow \gamma_s = 1 \\ 80 < \beta \leq 110 & \Rightarrow \gamma_s = (110 - \beta) / 30 \\ 110 < \beta \leq 180 & \Rightarrow \gamma_s = 0 \end{aligned} \quad 10$$

Hierin is de hoek van golfval β als volgt gedefinieerd:

$$\begin{aligned} |\theta - \Psi_{KW}| \leq 180 & \Rightarrow \beta = |\theta - \Psi_{KW}| \\ |\theta - \Psi_{KW}| > 180 & \Rightarrow \beta = \left| (|\theta - \Psi_{KW}|) - 360 \right| \end{aligned} \quad 11$$

Waarin:

γ_s	Invloedsfactor om geleidelijke overgang van aanlandige naar aflandige golfrichtingen mogelijk te maken i.v.m. voorkomen convergentieproblemen [-].
H_{m0}	Significante golfhoogte als input voor modellen 1 en 2 [m].
$H_{m0,HR}$	Significante golfhoogte die vanuit de hydraulische randvoorwaarden als input wordt gegenereerd [m].
β	Hoek van golfaanval [°].
θ	Golfrichting [°N].
ψ_{KW}	Oriëntatie normaal van kunstwerk [°N].

Alleen de **vetgedrukte** parameter ψ_{KW} is een invoerparameters voor Riskeer. Deze wordt besproken in paragraaf **2.2.3.4**. De overige parameters hoeven niet in Riskeer ingevoerd te worden. Het betreft hydraulische belastingen die door het beoordelingsinstrumentarium zelf worden gegenereerd (H_{m0} , $H_{m0,HR}$, θ) of parameters die het resultaat weergeven van een berekening (β).

Ad 1) Alleen overslag

Als sprake is van invallende golven bij een waterstand die lager dan of gelijk is aan het niveau van het keermiddel (geen overloop) dan wordt het golfoverslagdebiet q_{os} bepaald met de volgende formule:

$$q_{os} = m_{os} \cdot \sqrt{g \cdot (H_{m0})^3} \cdot e^{\left(-3.0 \cdot \frac{h_{kr} - h}{H_{m0}} \cdot \frac{1}{\gamma_\beta \cdot \gamma_n} \right)} \quad 12$$

Het effect van de hoek van golfval (voor definitie zie formule 4-11) wordt verdisconteerd middels de reductiefactor γ_β :

$$\begin{aligned} 0 \leq \beta \leq 20 & \Rightarrow \gamma_\beta = 1.0 \\ 20 < \beta \leq 180 & \Rightarrow \gamma_\beta = \max\{\cos(\beta - 20); 0.7\} \end{aligned} \quad 13$$

Waarin:

q_{os}	Gemiddeld overslagdebiet over een verticale wand [$m^3/s/m^1$].
m_{os}	Modelfactor voor overslagdebiet [-].
g	Zwaartekrachtversnelling (=9,81) [m/s^2].
H_{m0}	Significante golfhoogte [m].
h	Lokale buitenwaterstand [m+NAP].
h_{kr}	Kerende hoogte kunstwerk [m+NAP].
β	Hoek van golfaanval [$^\circ$].
γ_n	Invloedsfactor neusconstructie [-].
γ_β	Invloedsfactor scheve golfaanval [-].

Een aantal parameters hoeft niet in Riskeer ingevoerd te worden. Dit betreft een deterministische variabele met een standaardwaarde (g), hydraulische belastingen die door het beoordelingsinstrumentarium zelf worden gegenereerd (H_{m0} , h) of parameters die het resultaat weergeven van een berekening (β , γ_β , q_{os}). De overige **vetgedrukte** parameters betreffen invoerparameters voor Riskeer. Deze worden stuk voor stuk besproken in de navolgende subparagrafen. De invloedsfactor neusconstructie is geen invoerparameter, maar kan via een omweg wel verdisconteerd worden. Deze parameter wordt daarom eveneens in de navolgende subparagrafen besproken.

Ad 2) Zowel overslag als overloop

Als sprake is van invallende golven bij een waterstand die hoger is dan het niveau van het keermiddel (gecombineerde overslag / overloop) dan wordt het overslag-/overloopdebiet q_{os+ol} bepaald met de volgende formule:

$$q_{ol+os} = m_{ol} \cdot 0.55 \cdot \sqrt{-g \cdot (h_{kr} - h)^3} + m_{os} \cdot \sqrt{g \cdot (H_{m0})^3} \quad 14$$

Waarin:

q_{os+ol}	Gemiddeld gecombineerde overloop- en overslagdebiet over een verticale wand [$m^3/s/m^1$].
m_{ol}	Modelfactor voor overloopdebiet [-].
m_{os}	Modelfactor voor overslagdebiet [-].
g	Zwaartekrachtversnelling (=9,81) [m/s^2].
h	Lokale buitenwaterstand [m+NAP].
h_{kr}	Kerende hoogte kunstwerk [m+NAP].
H_{m0}	Significante golfhoogte [m].

Ook hier geldt dat alleen de **vetgedrukte** parameters invoerparameters voor Riskeer betreffen. De overige parameters zijn een deterministische variabele met een standaardwaarde (g), hydraulische belastingen die door het beoordelingsinstrumentarium zelf worden gegenereerd (H_{m0} , h) of een parameter die het resultaat weergeeft van een berekening ($q_{os/ol}$).

Ad 3) Alleen overloop

Als sprake is van de afwezigheid van golven bij een waterstand die hoger is dan het niveau van het keermiddel (alleen overloop) dan wordt het overloopdebiet q_{ol} bepaald met de volgende formule:

$$q_{ol} = m_{ol} \cdot 0.55 \cdot \sqrt{-g \cdot (h_{kr} - h)^3} \quad 15$$

Waarin:

- q_{ol} Overloopdebiet over een verticale wand [$m^3/s/m^1$].
 m_{ol} **Modelfactor voor overloopdebiet** [-].
 g Zwaartekrachtversnelling (=9,81) [m/s^2].
 h Lokale buitenwaterstand [$m+NAP$].
 h_{kr} **Kerende hoogte kunstwerk** [$m+NAP$].

Ook hier geldt dat alleen de **vetgedrukte** parameters invoerparameters voor Riskeer betreffen. De overige parameters zijn een deterministische variabele met een standaardwaarde (g), hydraulische belastingen die door het beoordelingsinstrumentarium zelf worden gegenereerd (H_{m0} , h) en een parameterwaarde die het resultaat weergeeft van een berekening (q_{ol}).

Bovenstaande kan worden samengevat in de volgende formule:

$$q_{ol/os} = ALS(h \leq h_{kr}; q_{os}; ALS(H_{m0} = 0; q_{ol}; q_{ol+os})) \quad 16$$

Alle **vetgedrukte** parameters betreffen dus de invoerparameters voor Riskeer. Deze worden stuk voor stuk besproken in de navolgende subparagrafen.

2.2.3.1 Modelfactor overslagdebiet

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
m_{os}	[-]	logn	0,09 ¹	$\sigma=0,06$ ¹	-	0	-	1

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

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

Hoe te bepalen

De vaste waarden voor deze parameter zijn gebaseerd op literatuurstudie.

Aandachtspunten

Opgemerkt wordt dat de gegeven waarden voor μ en σ anders zijn dan in de Leidraad Kunstwerken [10] staan aangegeven. De waarden die in paragraaf B.2.4.1 van de Leidraad Kunstwerken staan weergegeven ($\mu=0,34$ en $\sigma=0,09$) zijn niet correct.

Voorbeeld

n.v.t.

2.2.3.2 Kerende hoogte kunstwerk

Wat is het

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

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

De *kerende hoogte kunstwerk* (h_{kr} [+mNAP]) is de fysiek aanwezige kerende hoogte van het kunstwerk als de hoogwaterkerende keermiddelen gesloten zijn. Verondersteld wordt dat de *kerende hoogte kunstwerk* normaal is verdeeld. Om die verdeling te karakteriseren moet de verwachtingswaarde μ worden opgegeven. Voor de standaardafwijking σ is de aanbevolen waarde 0,05 m, maar die waarde kan worden aangepast.

Hoe te bepalen

De parameter kan worden bepaald uit inmeetgegevens of tekeningen van het object. Het betreft de kerende hoogte die aanwezig is op het moment dat de hoogwater kerende keermiddelen gesloten zijn. Hierin moet de verwachte zetting en bodemdaling tot de peildatum van de beoordeling verdisconteerd worden.

Aandachtspunten

Tekeningen zijn een veel gebruikte bron van informatie. Idealiter wordt gebruik gemaakt van actueel ingemeten hoogtegegevens. Bij het gebruik van informatie van tekening kan het nodig zijn om de standaardafwijking wat te vergroten. Indien het zeer recent ingemeten waarden betreft, kan de standaardafwijking eventueel worden verlaagd.

Voorbeeld

Beschouw een schutsluis die is uitgerust met in elk hoofd een stel schutdeuren. De deuren in het buitenhoofd fungeren naast schutdeur ook als stormvloeddeur en hebben een kerende hoogte die conform ontwerp-tekening gelijk is aan NAP +4,0 m. In het binnenhoofd zijn schutdeuren aanwezig met een kerende hoogte NAP +2,50 m. Inmetingen en revisietekeningen zijn niet beschikbaar. Voorts is bekend is dat het sluishoofd op palen is gefundeerd. Zettingen van het kunstwerk worden derhalve niet verwacht en met autonome bodemdaling hoeft geen rekening te worden gehouden omdat de paalfundering tot in de pleistocene zandlaag is doorgezet. Voor de kerende hoogte wordt dan een hoogte ingevoerd van NAP+4,0 m. Voor de standaardafwijking volstaat in dit geval de waarde van 0,05 m om de onzekerheid in de werkelijk aanwezige hoogte (vanwege het ontbreken van een 'as built' tekening) af te dekken.

2.2.3.3 Invloedsfactor neusconstructie

Wat is het

De *invloedsfactor neusconstructie* (γ_n [-]) is een reductiefactor bij het overslagdebiet om de invloed van een neusconstructie op de golfoverslag bij een verticale wand in rekening te brengen. Een neusconstructie is een veelal zeewaarts gekromde bovenste rand van een waterkerende wand, een constructiedetail ter beperking van de golfoverslag.

Hoe te bepalen

Indien een neusconstructie aanwezig is, kan de invloedsfactor neusconstructie worden bepaald aan de hand van paragraaf B2.4.1 van de *Leidraad kunstwerken* [10].

Aandachtspunt

Binnen het beoordelingsinstrumentarium is de parameter invloedsfactor neusconstructie niet opgenomen. Middels een omweg kan de invloed van een neusconstructie in Riskeer toch meegenomen worden. In onderstaand voorbeeld wordt dit nader uitgewerkt.

Voorbeeld

Stel een kunstwerk heeft een kerende hoogte h_{kr} van NAP+4,0 m. In het ontwerppunt van de overslagberekening is te zien dat de waterstand h NAP+3,7 m bedraagt en de significante golfhoogte $H_{m0} = 1,5$ m is bij een loodrechte golfinval ($\gamma_{\beta} = 1$). Tevens is een neusconstructie aanwezig, waarvan de invloedsfactor 0,85 zou bedragen als deze zou kunnen worden meegenomen. De berekende faalkans zonder het meenemen van de neusconstructie leidt niet tot een oordeel 'III_v voldoet aan de ondergrens en mogelijk aan de signaleringswaarde' of beter, zodat het wenselijk is de invloedsfactor neusconstructie wel te verdisconteren.

Dit kan in rekening worden gebracht door de kerende hoogte kunstmatig te vergroten. De extra kerende hoogte die in rekening gebracht mag worden als gevolg van de neusconstructie kan als volgt worden berekend. Het optredend overslagdebiet wordt berekend met onderstaande formule (zie formule 4-12):

$$q_{os} = m_{os} \cdot \sqrt{g \cdot (H_{m0})^3} \cdot e^{\left(-3,0 \cdot \frac{h_{kr} - h}{H_{m0}} \cdot \frac{1}{\gamma_{\beta} \cdot \gamma_n} \right)} \quad 17$$

Met de huidige invoer is het getal tussen haakjes van de e-macht gelijk aan -0,6. Als de invloedsfactor neusconstructie zou kunnen worden meegenomen, dan zou dit getal gelijk zijn aan -0,7. Als de kerende hoogte h_{kr} wordt verhoogd van NAP+4,0 m naar NAP+4,05 m, dan is het getal tussen haakjes van de e-macht eveneens gelijk aan -0,7. Hiermee kan de invloedsfactor neusconstructie via een omweg dus toch in rekening gebracht worden. Overigens zal de 'winst' in faalkans zeer beperkt zijn; de ontwerpwaterstand zal ook ongeveer 0,05 m hoger komen te liggen. Dit is ook te zien aan het overslagdebiet, wat zonder neusconstructie 0,284 m³/s/m bedraagt en met neusconstructie 0,257 m³/s/m (bij $m_{os}=0,09$). Aanbevolen wordt om te controleren of de nieuwe waarde van q_{os} in het ontwerppunt in lijn ligt met de berekende waarde op grond van vergelijking 4-12.

2.2.3.4 Oriëntatie normaal van het kunstwerk

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

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r/σ	Δx	ρ_x	Δt	ρ_t
ψ_{kw}	[°]	det	invoer ⁴	-	-	-	-	-

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

De *oriëntatie normaal van het kunstwerk* (ψ_{kw} [°N]) is de oriëntatie van de normaal (de as) van het kunstwerk ten opzichte van het noorden. De *oriëntatie normaal van het kunstwerk* is voor de beoordeling op hoogte een deterministische variabele: gerekend moet worden met de verwachtingswaarde μ die door de gebruiker moet worden ingevoerd.

Hoe te bepalen

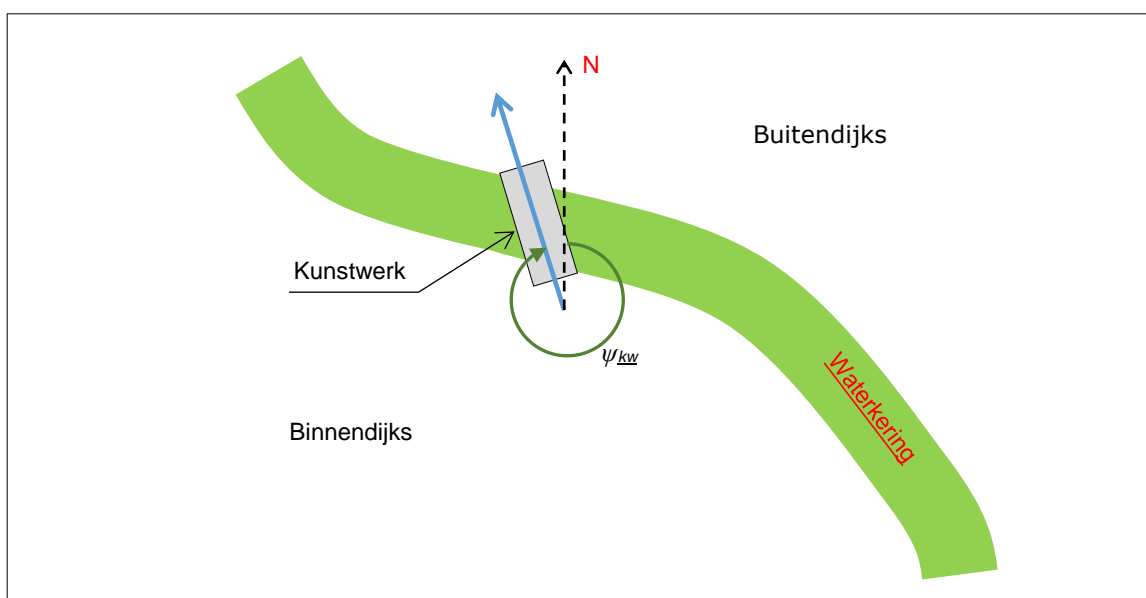
De in te voeren waarde voor deze parameter kan worden afgelezen/opgemeten uit tekeningen of met behulp van kaarten. De normaal van het kunstwerk is hierbij gedefinieerd als de lijn die loodrecht op de keermiddelen van het kunstwerk staat en buitenwaarts gericht is. De in te voeren hoek is gelijk aan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

Aandachtspunt

Aandachtspunt is dat de hoek wordt gemeten van de noordrichting met de wijzers van de klok mee.

Voorbeeld

In onderstaande figuur is voor een denkbeeldige situatie de oriëntatie van een kunstwerk weergegeven. Deze bedraagt in dit geval circa 340°N.



Figuur 7: Wijze van bepaling hoek kunstwerknormaal ten opzichte van Noord

2.2.3.5 Modelfactor overloopdebiet volkomen overlaat

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
m_{OL}	[-]	nor	1,1 ²	$\sigma=0,05$ ¹	-	0	-	1

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

De *modelfactor overloopdebiet volkomen overlaat* (m_{ol} [-]) is de modelfactor die de onzekerheid in rekening brengt die hoort bij de berekening van het overloopdebiet met de formule voor een volkomen overlaat. Verondersteld wordt dat de modelfactor normaal is verdeeld. Die verdeling wordt gekarakteriseerd door een verwachtingswaarde $\mu = 1,1$ [-] en een standaardafwijking $\sigma = 0,05$ [-]. De verwachtingswaarde kan wel door de gebruiker worden aangepast, de standaardafwijking betreft een vaste waarde.

Hoe te bepalen

De parameter betreft een modelparameter die behoort bij een situatie waarin sprake is van volkomen stroming. Dit betekent dat het instromend debiet niet beïnvloed wordt door het binnenwater. In de formules 4-14 en 4-15 wordt m_{oi} vermenigvuldigd met een waarde van 0,55. Deze waarde volgt uit de theoretische afleiding van de formule voor de volkomen overlaat.

De standaardwaarde voor het gemiddelde van m_{oi} is een conservatieve waarde. Aanpassing van deze waarde wordt echter niet aanbevolen, tenzij er een goede onderbouwing voor is.

De standaardafwijking kan niet worden aangepast door de gebruiker.

Aandachtspunten

Met betrekking tot deze parameter zijn er geen verdere aandachtspunten.

Voorbeeld

Voor voorbeelden voor aanpassing van de parameter wordt verwezen naar de diverse vakliteratuur zoals [13].

2.2.4 Breedte van de kruin van het kunstwerk

Wat is het

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

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

De *breedte van de kruin van het kunstwerk* (B [m]) is de breedte van de kruin van het kunstwerk waarover overslag en/of overloop plaatsvindt. Verondersteld wordt dat de *breedte van de kruin van het kunstwerk* normaal is verdeeld. Die verdeling wordt gekarakteriseerd door een verwachtingswaarde en een standaardafwijking ($\sigma= 0,05$ [m]). De verwachtingswaarde moet worden opgegeven, de standaardafwijking kan eventueel door de softwaregebruiker worden aangepast.

In Riskeer wordt deze parameter *Breedte van doorstroomopening* genoemd.

Hoe te bepalen

De breedte van de kruin van het kunstwerk waarover overslag en/of overloop plaatsvindt, kan vanaf tekening worden bepaald, of middels een inmeting worden vastgesteld.

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

Aandachtspunten

Doorgaans is de aan te houden breedte gelijk aan de breedte van de keermiddelen. Indien de hoofden naast de keermiddelen min of meer dezelfde hoogte hebben als de keermiddelen, en de afwatering van overslaand en/of overlopend water vindt via het kunstwerk plaats, dan moet hiermee in de beschouwing rekening gehouden worden. In onderstaand voorbeeld wordt hier nader op ingegaan.

Voorbeeld

Stel een sluis heeft keermiddelen met een kerende hoogte h_{kr} van NAP+4,0 m en een breedte van 12 meter (bron: ontwerpkening). Het sluishoofd is aan weerszijden 7,5 meter breed en heeft een kerende hoogte van NAP+4,5 m. Het sluishoofd heeft een verticaal front en het overslag-/overloopdebiet van het sluishoofd komt uiteindelijk ook in de sluiskolk terecht. In dat geval wordt eerst een berekening gemaakt waarin alleen de breedte van de keermiddelen wordt meegenomen. Stel nu dat in het ontwerppunt van de overslagberekening de waterstand h NAP+3,7 m bedraagt en de significante golfhoogte H_{m0} 1,5 m is bij een loodrechte golfval ($\gamma_\beta=1$). Het totale overslagdebiet bedraagt dan $0,284 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ (zie paragraaf 2.2.3.3) $\times 12 \text{ m} = 3,41 \text{ m}^3/\text{s}$. Handmatig kan dan met behulp van formule 4-14 berekend worden dat het overslagdebiet over het sluishoofd $0,10 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ bedraagt en het totale overslagdebiet over dit sluishoofd dus $2 \times 7,5 \times 0,1 = 1,5 \text{ m}^3/\text{s}$. De rekenwaarde van de breedte van de keermiddelen moet dan dus worden gecorrigeerd met een factor $(3,41+1,5)/3,41 = 1,44$ naar 17,3 m. Aanbevolen wordt om te controleren of de waterstand en golfhoogte in het nieuw berekende ontwerppunt ongeveer overeenkomen met de waarden in het oude ontwerppunt. Indien dit niet het geval is, moet een nieuwe iteratieslag uitgevoerd worden.

2.3 Deelfaalmechanisme Z₁₂: kans bezwijken kunstwerk als gevolg van erosie bodem

De kans op bezwijken van het kunstwerk als gevolg van het eroderen van de bodem wordt geschematiseerd middels de parameter *Faalkans gegeven erosie bodem* ($P_{f,kw|erosie\ bodem}$). Voordat dit deelfaalmechanisme op kan treden, moet het deelfaalmechanisme Z₁₁ *Bezwijken bodembescherming* zijn opgetreden. Dit deelfaalmechanisme is in paragraaf 2.2 besproken.

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

$$Z = -\Phi^{-1}(P_{f,kw|erosie\ bodem}) - u \tag{18}$$

Waarin:

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

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

2.3.1 Faalkans gegeven erosie bodem

Wat is het

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

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

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

Hoe te bepalen

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

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

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

- Indien de fundatie van het kunstwerk aan de binnenzijde van de waterkering geheel met damwanden is omgeven (bijvoorbeeld als gevolg van bouwen op onderwaterbetonvloer) is het instabiel worden van het kunstwerk als gevolg van ontgrondingskuilen niet direct te verwachten. Een waarde van bijvoorbeeld 0,01 voor $P_{f,kw|erosie\ bodem}$ kan dan worden toegepast.¹
- Bepalen van locatie en afmetingen (breedte en diepte) van de ontgrondingskuilen als bekend is welke grondsoort aanwezig is. Indien dit niet bekend is, kan een conservatieve schatting worden gemaakt. De afmetingen van ontgrondingskuilen kunnen bijvoorbeeld aan de hand van de modellen in het handboek *Ontwerp van schutsluizen* [11] worden bepaald. Indien de afmetingen zeer beperkt zijn, is de invloed op de stabiliteit van het kunstwerk vermoedelijk ook klein. Een waarde tussen 1,0 en 0,01 voor $P_{f,kw|erosie\ bodem}$ is dan wellicht verdedigbaar. De keuze hangt af van de diepte van de berekende ontgrondingskuil, de afstand uit het kunstwerk en de opbouw van (met name) de fundatie van het kunstwerk.
- Bepalen van de opbouw van de constructie. Het gaat hierbij vooral om de fundatiewijze van het kunstwerk en de aanwezigheid van damwandschermen ter plaatse van de overgang van betonwerk naar bodembescherming. Bij de aanwezigheid van een lang damwandscherm in relatie tot de diepte van een mogelijke ontgrondingskuil, welke niet als draagkrachtig fundatie-element fungeert, is de invloed van eventuele ontgrondingskuilen mogelijk zeer beperkt. De horizontale stabiliteit is in de meeste gevallen niet direct afhankelijk van het grondlichaam dat aan de uiteinden van de bodem van het kunstwerk hier tegenaan drukt, maar meer van bodem- en wandwrijvingen en specifieke funderingselementen. Een damwandscherm kan voorkomen dat erosie onder de vloerconstructie van het kunstwerk ontstaat, wat in eerste instantie de verticale draagkracht kan beïnvloeden. Bij de aanwezigheid van lange schermen, relatief ten opzichte van de afmetingen van optredende ontgrondingskuilen, is een waarde voor $P_{f,kw|erosie\ bodem}$ van 1,0 tot 0,01 aannemelijk. Deze waarde kan moeilijk kwantitatief worden onderbouwd. De onderbouwing zal dus overwegend moeten plaatsvinden op basis van een 'educated guess' aan de hand van een beschrijving van het bezwijkproces.
- Indien het kunstwerk uit meerdere delen bestaat (bijvoorbeeld instroomwerk, leiding, uitstroomwerk) kan worden bekeken of het bezwijken van bijvoorbeeld het binnendijks gelegen in- of uitstroomwerk, leidt tot het bezwijken van het gehele kunstwerk dan wel de waterkering en daarmee tot het ontstaan van een bres. Indien bijvoorbeeld alleen het instroomwerk bezwijkt, maar verdere aantasting van het kunstwerk dan wel de waterkering kan worden uitgesloten of niet tot bresvorming leidt, is een waarde voor $P_{f,kw|erosie\ bodem}$ kleiner dan 1,0 verdedigbaar. Ook hier zal onderbouwing dus overwegend moeten plaatsvinden op basis van een 'educated guess' aan de hand van een beschrijving van het bezwijkproces.

¹ Deze waarde is niet meer dan een educated guess; nadere onderbouwing ontbreekt

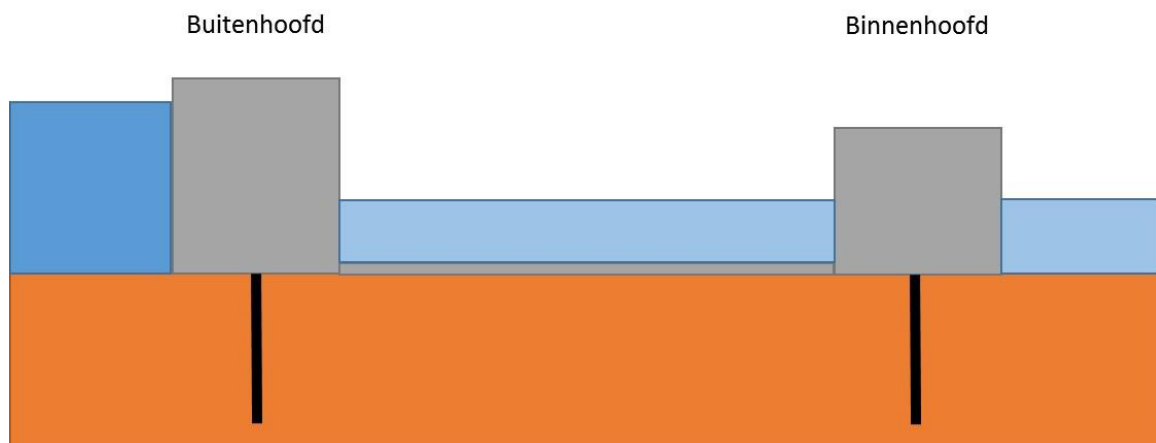
Aandachtspunten

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

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

Voorbeeld

Bij een schutsluis bestaande uit een buitenhoofd, schutkolk en binnenhoofd treedt een zeer groot overslag-/overloopdebiet op. Als gevolg hiervan stroomt er een grote hoeveelheid water de polder in.



Figuur 8: Globale schets situatie gesloten kunstwerk

Onder zowel het buitenhoofd als het binnenhoofd is een damwandscherm aanwezig. De lengte hiervan bedraagt in beide gevallen 3 m.

De volgende gegevens zijn nog voorhanden:

- Bij de condities waaronder de bodembescherming bezwijkt (ontwerppunt) treedt een stroomsnelheid ter plaatse van de bodem aan de binnenzijde op van 2,0 m/s.
- De bodem bestaat uit zand met een kritieke stroomsnelheid van 0,5 m/s.
- De waterdiepte boven de bodem aan de binnenzijde is 2 m ($h_{bin}=h_{bi}-h_{bb}$).
- De relatieve dichtheid van het zand ($\Delta_z = (\rho_{zand}-\rho_w)/\rho_w = (2650-1000)/1000 = 1,65$).
- Coëfficiënt voor invloed turbulentie (a) = 2.
- Uit een constructieve analyse is gebleken dat de kans dat het scherm onderuit gaat of grote krachten op het instroomwerk gaat uitoefenen groot is bij een ontgroning van 1,5 meter. Dit leidt tot een grote kans op ernstige ondermijning van het instroomwerk, wat vervolgens weer kan leiden tot bresvorming.

Met behulp van de formules 16.31a en 16.31b uit [11]² kan worden benaderd wanneer de ontgrondingskuil een diepte heeft van 1,5 m:

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

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

Hierin is:

y_{max}	Maximum kuil diepte na tijd t [m].
h_{bin}	Waterdiepte boven initiële bodemligging [m].
t_1	Tijd waarop de maximum kuil diepte gelijk is aan de initiële waterdiepte ($y_{max} = h_{bin}$) [uur].
u	Dieptegemiddelde stroomsnelheid [m/s].
a	Coëfficiënt voor invloed turbulentie (= $1,5 + 5 r$) [-].
r	Relatieve turbulentie-intensiteit [-].
Δ_z	Relatieve dichtheid = $(\rho_{zand} - \rho_w)/\rho_w = (2650 \text{ kg/m}^3 - 1000 \text{ kg/m}^3)/1000 \text{ kg/m}^3 = 1,65$ [-].
u_{kr}	Kritieke stroomsnelheid bodemmateriaal [m/s].

Invullen levert:

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

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

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

² Bij het toepassen van formules omtrent ontgrondingskuilen is het van belang dat aandacht geschonken wordt aan het geldigheidsgebied van deze formules. Dit om onrealistische waarden te voorkomen.

2.4 Deelfaalmecanisme Z₁₃: overschrijden kombergend vermogen

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

- Modelfactor kombergend vermogen (m_{kom}).
- Kombergend oppervlak (A_{kom}).
- Kritieke peilverhoging komberging (Δh_{kom}).
- Modelfactor instromend volume (m_{in}).
- Stormduur (t_s).
- Optredend overslag-/overloopdebiet ($q_{os/ol}$).

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

$$V_c = m_{kom} \cdot A_{kom} \cdot \Delta h_{kom} \quad 19$$

De laatste 3 parameters betreffen de 'belasting' van het systeem. Zij bepalen het instromend volume als gevolg van overslag/overloop over het gesloten kunstwerk gedurende een hoogwaterperiode ($V_{os/ol}$). Het maximaal inkomend volume $V_{os/ol}$ is gedefinieerd als:

$$V_{os/ol} = m_{in} \cdot t_s \cdot q_{os/ol} \cdot B \quad 20$$

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

$$Z = V_c - V_{os/ol} = m_{kom} \cdot A_{kom} \cdot \Delta h_{kom} - m_{in} \cdot t_s \cdot q_{os/ol} \cdot B \quad 21$$

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

In hoofdstuk 10 van de *Werkwijzer Ontwerpen Waterkerende kunstwerken* [16] wordt dieper op de achtergronden van komberging ingegaan.

2.4.1 Modelfactor kombergend vermogen

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r/σ	Δx	ρ_x	Δt	ρ_t
m_{kom}	[-]	logn	1,0 ¹	$\sigma=0,20$ ¹	-	0	-	1

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

De *modelfactor kombergend vermogen* (m_{kom} [-]) is de modelfactor die de onzekerheden in het model voor de beschikbare komberging in rekening brengt. Verondersteld wordt dat de *modelfactor*

kombergend vermogen lognormaal is verdeeld. Die verdeling wordt gekarakteriseerd door de verwachtingswaarde $\mu = 1,0$ [-] en een standaardvariatie $\sigma=0,20$ [-].

Hoe te bepalen

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

Aandachtspunten

n.v.t.

Voorbeeld

n.v.t.

2.4.2 Kombergend oppervlak

Wat is het

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

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

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

Hoe te bepalen

Afhankelijk van de vormgeving van de beschikbare komberging kan de bepaling zeer eenvoudig zijn, maar ook zeer complex. Het kombergend oppervlak onderhoudt een sterke relatie met de voor komberging beschikbare peilverhoging op het binnenwater Δh_{kom} (zie paragraaf 2.4.3).

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

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

Aandachtspunten

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

- 1 Toestroming van water vanuit het achterland kan niet specifiek gemodelleerd worden. Deze toestroming kan plaatsvinden onder normaal verval, maar ook via poldergemalen die hun water lozen op de boezem.
- 2 Een kombergend volume kan worden benut door meerdere kunstwerken en dijkstrekkingen in een dijktraject. Indien de correlatie met betrekking tot *overslag en/of overloop* groot is tussen deze kunstwerken³, kan het nodig zijn om het totaal beschikbare volume te verdelen over deze

³ Bijvoorbeeld kunstwerken die (nagenoeg) identiek zijn met betrekking tot hoogwaterbelastingen en kerende hoogte

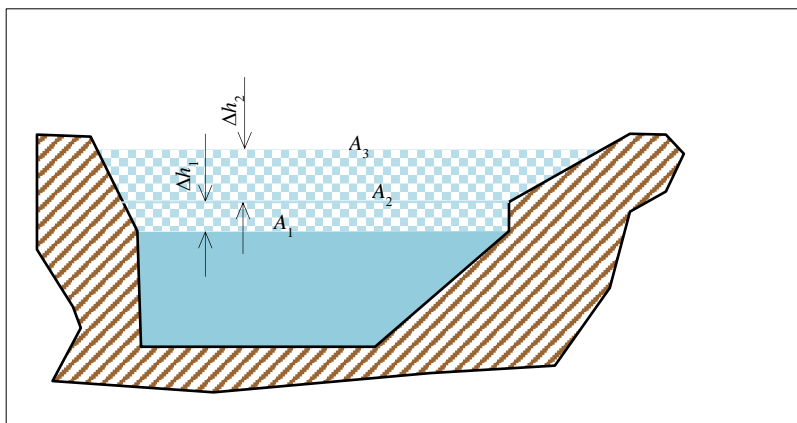
kunstwerken. Indien de correlatie beperkt is, dan mag de kans dat de kunstwerken gelijktijdig een beroep doen op het kombergend vermogen verwaarloosbaar klein worden geacht.

- 3 Een kombergend volume kan worden aangesproken door meerdere kunstwerken die behoren tot verschillende dijktrajecten. Hier gelden dezelfde overwegingen als bij het vorige punt.
- 4 Tijdens hoogwater kan het voorkomen dat gemalen worden ingezet om hoogwater te lozen op het buitenwater. Hierdoor komt feitelijk meer kombergend vermogen beschikbaar. Om dit in rekening te brengen dient rekening te worden gehouden met de duur van de hoogwatergolf en de capaciteit van de afvoerende gemalen.

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

Voorbeeld

Achter een keersluis is een watergang aanwezig met de dwarsdoorsnede gegeven in Figuur 9. De kritieke peilverhoging Δh_{kom} is gelijk aan $\Delta h_1 + \Delta h_2$. Er zijn drie oppervlakten in de dwarsdoorsnede bepaald, te weten A_1 , A_2 en A_3 .



Figuur 9: Schematische weergave dwarsdoorsnede voor voorbeeld

In het dijktraject bevinden zich nog drie kunstwerken die uitkomen op dezelfde watergang. Dit betreft een gemaal dat gedurende hoogwater water uitmaalt (Q_{pomp} [m^3/s]), een schutsluis en nog een keersluis. De schutsluis beschikt over een stormvloeddeur met een kerende hoogte die significant hoger is dan de beide keersluizen. De tweede keersluis betreft eenzelfde soort constructie als het beschouwde kunstwerk, alleen is de breedte van dit kunstwerk tweemaal zo klein. Het beschikbare kombergend volume wordt gedurende een hoogwater ook benut door toestromend water vanuit het achterland met een gemiddelde toevoer van $Q_{achterland}$ [m^3/s]. De totale duur van de hoogwatergolf is gelijk aan t_s .

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

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

Waarin:

$V_{c,kw}$	Kombergend vermogen (volume) beschikbaar voor het beschouwde kunstwerk [m ³].
A_{gem}	Het voor komberging gemiddeld beschikbare oppervlak [m ²].
Δh_{kom}	Kritieke peilverhoging komberging (zie paragraaf 2.4.3) [m].
$V_{kw,i}$	Instromend volume door kunstwerk i dat aansluit op dezelfde komberging [m ³].
n	Aantal kunstwerken buiten het beschouwde kunstwerk dat op dezelfde komberging uitkomt [-].
$V_{achterland}$	Instromend volume als gevolg van aanvoer vanuit het achterland [m ³].
V_{pompen}	Volume dat gedurende een hoogwater kan worden weggepompt door inzet van bijvoorbeeld aanwezige gemalen of mobiele pompen [m ³].

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

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

De diverse parameters kunnen nu worden uitgewerkt:

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

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

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

n In dit geval gelijk aan 1. Er is namelijk nog één andere keersluis die een vergelijkbare kerende hoogte bezit. De aanspraak van de schutsluis op het kombergend vermogen wordt in dit voorbeeld verwaarloosbaar geacht. Hetzelfde geldt voor de aangrenzende dijkstrekkingen.

$V_{kw,i}$ Het volume dat over de andere keersluis stroomt, zal in het voorbeeld verhoudingsgewijs 2 keer zo klein zijn als het volume over het beschouwde kunstwerk. De breedte is namelijk 2 keer zo klein. $V_{kw,i}$ is hier daarom gelijk aan $\frac{1}{2} \cdot V_{c,kw}$.

De voor het kunstwerk beschikbare komberging is nu gelijk aan:

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

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

Het in te voeren kombergend oppervlak wordt nu:

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

2.4.3 Toegestane peilverhoging

Wat is het

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

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

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

Hoe te bepalen

De kritieke peilverhoging kan bepaald worden middels onderstaande formule:

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

Waarin:

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

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

- het normpeil van het regionale watersysteem wordt overschreden (indien het watersysteem van de komberging is omringd door 'zachte' kades)
- er staat 0,2 m water op straat/maaiveld (gemiddeld in een groter gebied (postcodegebied)) (indien het watersysteem van de komberging is omringd door kades die niet door kunnen breken of als achter de kering geen regionaal watersysteem aanwezig is)

In een nadere analyse kan nog worden beschouwd of dit nog verder kan worden aangescherpt.

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

Het binnenpeil is het peil dat onder normale omstandigheden gehandhaafd wordt op het open binnenwater. Dit kan een ander peil zijn dan het streefpeil van het betreffende binnenwater. Het binnenpeil is afhankelijk van het gevoerde waterbeheer vlak vóór en tijdens hoogwater en optredende kwel. Indien het binnenpeil tijdens hoogwater niet bekend is, of niet gecontroleerd wordt, kan als vertrekpunt worden uitgegaan van het winterpeil. Wel moet geverifieerd worden of deze als gevolg van met name kwel⁴ niet alsnog hoger kan zijn. Het meenemen van ervaringen van recente hoogwaterperioden is gewenst bij het bepalen van het aan te houden binnenpeil.

⁴ Afwatering van andere kunstwerken op het betreffende binnenwater is onder de parameter A_{kom} reeds beschouwd

Aanbevolen wordt om de standaardwaarde van de standaardafwijking niet aan te passen.

Aandachtspunten

De parameter heeft een sterke relatie met het kombergend oppervlak. In deze schematiseringshandleiding is ervoor gekozen om middels de parameter van het kombergend oppervlak (A_{kom} , zie paragraaf 2.4.2) overige invloeden op het kombergend vermogen te verrekenen. Hier kan uiteraard van worden afgeweken.

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

Voorbeeld

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

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

2.4.4 Modelfactor instromend volume

Wat is het

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

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

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

Hoe te bepalen

Deze is als een deterministische variabele met een vaste standaardwaarde van 1 in Riskeer opgenomen. Feitelijk speelt deze parameter in de modellering dus geen rol.

Aandachtspunten

n.v.t.

Voorbeeld

n.v.t.

2.4.5 Stormduur

Wat is het

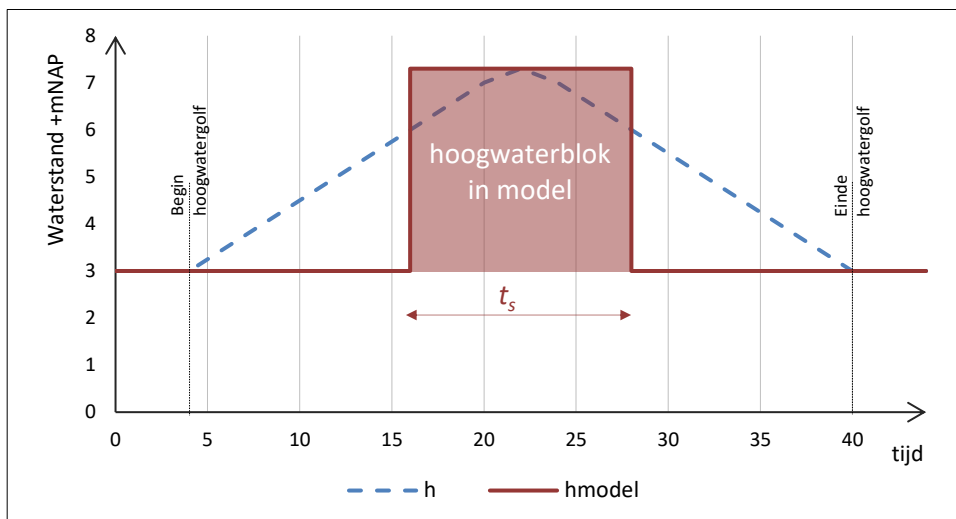
Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
t_s	[uur]	logn	6,0 ²	$V_r=0,25$ ¹	-	1	-	0

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

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

Hoe te bepalen

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



Figuur 10: Schematisering verloop hoogwatergolf in Riskeer

In Riskeer wordt de verwachtingswaarde voor de stormduur door de gebruiker opgegeven. Aanbevolen wordt om voor windgedomineerde belastingsystemen in eerste instantie te rekenen met een verwachtingswaarde van 6 uur. Dit kan met name langs de kust vaak angescherpt worden door rekening te houden met het faseverschil tussen windopzet en getij, waardoor de piek van hoogste golf en hoogste waterstand niet samenvallen. Zie ook paragraaf 3.6 van de Werkwijzer Ontwerpen Waterkerende Kunstwerken [16].

Bij afvoergedomineerde belastingsystemen wordt aanbevolen om gebruik te maken van de Waterstandsverlooptool om een betere inschatting van het instromende volume te bepalen. In hoofdstukken 5 en 11 van de Werkwijzer Ontwerpen Waterkerende Kunstwerken [16] worden hiervoor aanwijzingen gegeven. Met name als sprake is van overloop in het illustratiepunt van de faalkansberekening kan het nodig zijn de stormduur (fors) te verhogen.

Vanwege de vele onzekerheden omtrent de werkelijke stormduur is de relatief grote variatiecoëfficiënt niet aanpasbaar.

Aandachtspunten

n.v.t.

Voorbeeld

n.v.t.

2.4.6 *Optredend overslag-/overloopdebiet*
Hiervoor wordt verwezen naar paragraaf 2.2.3.

2.4.7 *Breedte van de kruin van het kunstwerk*
Hiervoor wordt verwezen naar paragraaf 2.2.4.

2.5 **Deelfaalmechanisme Z₁₄: toelaatbaar overslag-/overloopdebiet in verband met dynamische effecten op het keermiddel**

Wat is het

Het toelaatbaar overslag-/overloopdebiet in verband met dynamische effecten op het keermiddel is het overslag-/overloopdebiet waarbij verondersteld wordt dat het keermiddel kan bezwijken als gevolg van het effect van dynamische belastingen door de overstortende straal.

Hoe te bepalen

Het toelaatbaar overslag-/overloopdebiet in verband met dynamische effecten op het keermiddel is heel lastig vast te stellen. De algemene onderhoudstoestand en constructieve opbouw van het keermiddel speelt hierin een belangrijke rol. Algemeen kan bij een keermiddel in een 'normaal goede' staat van onderhoud een maximaal toelaatbaar debiet van 1,0 m³/s/m als vertrekpunt worden genomen.

Aandachtspunten

Het deelfaalmechanisme Z₁₄ is niet opgenomen in Riskeer. Het kan middels een omweg worden gemodelleerd via het deelfaalmechanisme Z₁₁ bezwijken bodembescherming. De Z-functie voor dit deelfaalmechanisme ziet er immers als volgt uit:

$$Z = q_c \cdot B_{sv} - q_{os/ol} \cdot B \quad \text{(zie formule 3)}$$

De Z-functie voor het deelfaalmechanisme Z₁₄ *toelaatbaar overslag-/overloopdebiet in verband met dynamische effecten op het keermiddel* is eenvoudig en behelst alleen het toelaatbaar overslag-/overloopdebiet minus het optredende overslag-/overloopdebiet:

$$Z = q_c - q_{os/ol} \quad 22$$

In deze formules is eenvoudig te zien dat als de parameters B_{sv} (stroomvoerende breedte bodembescherming) en B (breedte van de kruin van het kunstwerk) aan elkaar gelijk zijn, ook de uitkomsten van de beide Z-functies aan elkaar gelijk zijn. Hier moet dus bij de invoer in Riskeer op gelet worden.

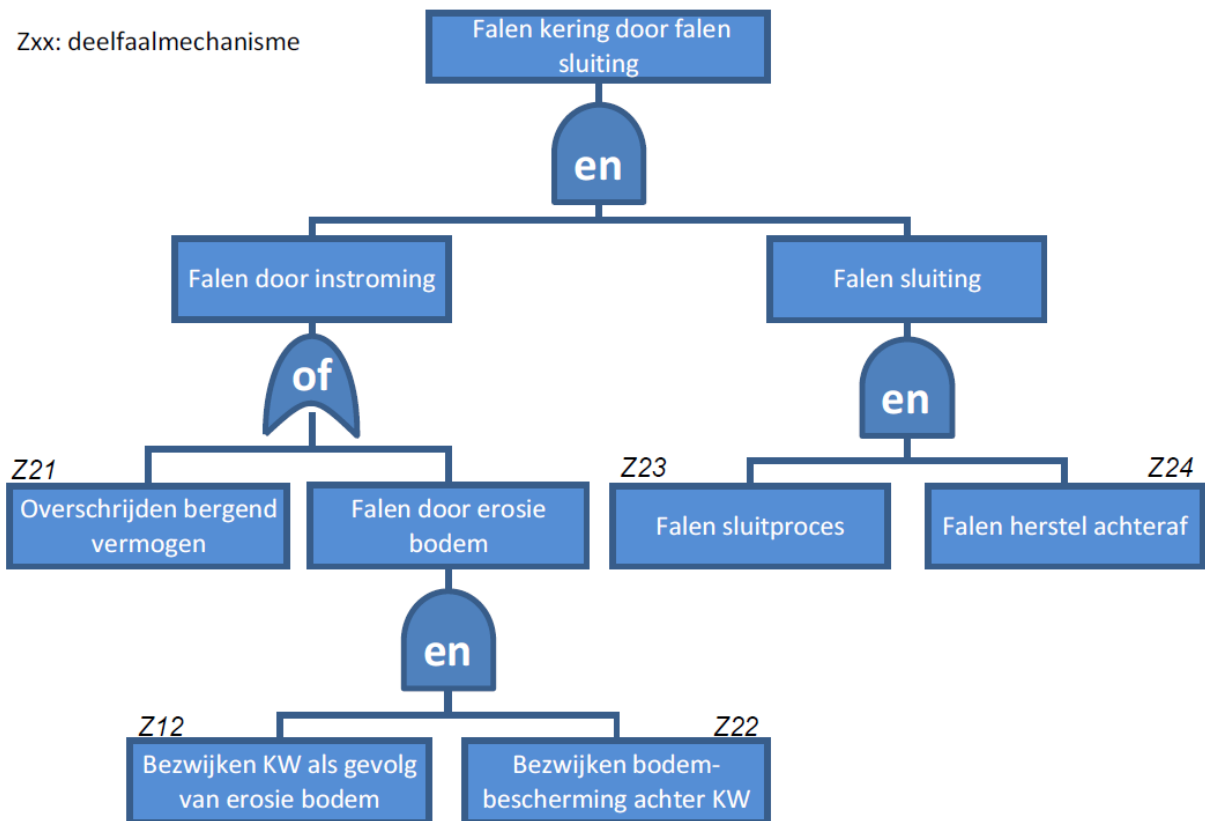
Voorbeeld

Stel een sluis met een breedte van de kruin van 10 meter, een stroomvoerende breedte ter plaatse van de bodembescherming van 15 meter, een bodembescherming die een stroomsnelheid van 2,5 m/s kan weerstaan en een waterdiepte van 3 meter aan de binnenzijde. In dat geval is q_c vanuit het oogpunt van sterkte van de bodembescherming 7,5 m³/s/m en is eenvoudig te zien dat het deelfaalmecanisme Z_{14} *toelaatbaar overslag-/overloopdebiet in verband met dynamische effecten op het keermiddel* maatgevend is. In dit geval wordt dus in Riskeer een waarde voor q_c van 1,0 m³/s/m ingevoerd. Voor de parameters B en B_{sv} kan iedere willekeurige waarde worden ingevoerd, zolang deze waarden maar aan elkaar gelijk zijn. Aanbevolen wordt om dan aan te sluiten bij de fysieke situatie en de waarde die hoort bij de breedte van de kruin van het keermiddel (in dit geval dus 10 meter) aan te houden.

3 Analyse met behulp van Riskeer – niet sluiten

In dit hoofdstuk is de bepaling van de faalkans met behulp van Riskeer (onderdeel van het instrumentarium van BOI) voor het faalmechanisme *niet sluiten* opgenomen. Er wordt daarbij ingegaan op het afleiden van waarden voor de diverse betrokken parameters. Per parameter wordt aangegeven wat de parameter precies inhoudt, hoe de waarde kan worden bepaald, wat aandachtspunten zijn et cetera. Daarnaast worden op diverse plaatsen voorbeelden gegeven hoe de parameterwaarde te bepalen.

Basis voor de faalkansberekening is onderstaande modellering van het faalmechanisme *niet sluiten* in Riskeer. Deze wijkt enigszins af van de foutenboom in de handleiding kunstwerken [38], waar enkele verduidelijkingen zijn aangebracht.



Figuur 11: Modellering faalmechanisme niet sluiten in Riskeer

3.1 Overzichtstabel parameters Riskeer

Per modelparameter wordt in onderstaande Tabel 6 een aantal standaardgegevens gepresenteerd. Ook de naamgeving en verwijzing naar benamingen van invoer in Riskeer is in deze tabel opgenomen. Voor de duiding van de gegeven parameterwaarden voor het gemiddelde μ en de standaardafwijking σ / variatiecoëfficiënt V_r is de indeling gebruikt die vermeld is in Tabel 7.

Tabel 6: Waarden behorende bij de statistische gegevens voor de relevante parameters

symbool	benaming	eenheid	type	μ	V_r of σ	Groep	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t	Par.	CSV-bestand Riskeer
$P_{r,kw erosie\ bodem}$	Faalkans gegeven erosie bodem	[-]	det	1,0	-	2(μ)	-	1	-	1	3.2.1	-
m_{kom}	Modelfactor kombergend vermogen	[-]	logn	1,0	$\sigma=0,20$	1(μ) en 1(σ)	-	0	-	1	3.3.1	-
A_{kom}	Kombergend oppervlak	[m ²]	logn	Invoer	$V_r=0,10$	4(μ) en 2(V_r)	-	0	-	1	2.4.2	KW_BETSLUIT1
Δh_{kom}	Toegestane peilverhoging komberging	[m]	logn	Invoer	$\sigma=0,10$	4(μ) en 2(σ)	-	0	-	1	2.4.3	KW_BETSLUIT2
m_{in}	Modelfactor instromend volume	[-]	det	1,0	-	1(μ)	-	-	-	1	3.3.4	-
$f_{ts open}$	Factor voor stormduur hoogwater	[-]	det	1,0	-	2(μ)	-	-	-	1	3.3.5	-
t_s	Stormduur	[uur]	logn	6,0	$V_r=0,25$	2(μ) en 1(V_r)	-	1	-	0	2.4.5	-
ψ_{kw}	Oriëntatie	[°]	det	invoer	-	4(μ)	-	0	-	1	3.3.7.1	KW_BETSLUIT3
B	Breedte van doorstroomopening	[m]	nor	invoer	$\sigma=0,05$	4(μ) en 2(σ)	-	0	-	1	3.3.7.2	KW_BETSLUIT4
m_{OL}	Modelfactor overloopdebiet volkomen overlaat	[-]	nor	1,1	$\sigma=0,05$	2(μ) en 1(σ)	-	0	-	1	3.3.7.3	-
m_{os}	Modelfactor overslagdebiet	[-]	logn	0,09	$\sigma=0,06$	1(μ) en 1(σ)	-	0	-	1	3.3.7.4	-
$h_{kr;NS}$	Kruinhoogte niet gesloten kering	[m+NAP]	nor	invoer	$\sigma=0,05$	4(μ) en 2(σ)	-	0	-	1	3.3.7.5	KW_BETSLUIT5
m_{vl}	Modelfactor lange overlaat	[-]	nor	0,9	$\sigma=0,05$	1(μ) en 1(σ)	-	0	-	1	3.3.7.6	-
h_{bi}	Binnenwaterstand	[m+NAP]	nor	Invoer	$\sigma=0,10$	4(μ) en 2(σ)	-	0	12uur	0	3.3.7.7	KW_BETSLUIT6
h_{dr}	Drempelhoogte	[m+NAP]	nor	Invoer	$\sigma=0,10$	4(μ) en 2(σ)	-	0	-	1	3.3.7.8	KW_BETSLUIT7
μ	Afvoercoëfficiënt	[-]	logn	1,0	$\sigma=0,20$	2(μ) en 2(σ)	-	0	-	1	3.3.7.9	-
A	Doorstroomoppervlak	[m ²]	nor	Invoer	$\sigma=0,01$	4(μ) en 2(σ)	-	0	-	1	3.3.7.10	KW_BETSLUIT8
q_c	Kritiek instromend debiet	[m ³ /s/m]	logn	Invoer	$V_r=0,15$	4(μ) en 2(V_r)	-	0	-	1	3.4.1	KW_BETSLUIT9
B_{sv}	Stroomvoerende breedte bodembescherming	[m]	logn	Invoer	$\sigma=0,05$	4(μ) en 2(σ)	-	0	-	1	3.4.2	KW_BETSLUIT10
P_{open}	Kans op open staan bij naderend hoogwater	[-]	det	Invoer	-	4(μ)	-	-	-	-	3.5.1	KW_BETSLUIT11
P_{ns}	Kans mislukken sluiting	[-]	det	Invoer	-	4(μ)	-	-	-	0	3.5.2	KW_BETSLUIT12
n	Aantal identieke doorstroomopeningen	[-]	det	Invoer	-	4(μ)	-	-	-	-	3.5.3	KW_BETSLUIT13
$P_{f,kherstel}$	Faalkans herstel van gefaalde situatie (niet sluiten)	[-]	det	1,0	-	2(μ)	-	-	-	-	3.6.1	KW_BETSLUIT14

* ¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 7)

Tabel 7: Indeling bij duiding van de parameterwaarden

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

In Tabel 8 zijn de statistische parameters die gebruikt zijn in Tabel 7 nader toegelicht.

Tabel 8: Toelichting gegevens vermeld bij parameters in Tabel 7

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

3.2 Deelvalmechanisme Z12: bezwijken kunstwerk als gevolg van erosie bodem

De kans op bezwijken van het kunstwerk als gevolg van het eroderen van de bodem wordt in het WBI 2017 geschematiseerd middels de parameter *Faalkans gegeven erosie bodem* ($P_{f,kw|erosie\ bodem}$). Voordat dit deelvalmechanisme op kan treden, moet het deelvalmechanisme Z_{22} *Falen bodembescherming achter constructie* zijn opgetreden. Dit deelvalmechanisme wordt in paragraaf 2.5 besproken.

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

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

Waarin:

\square^{-1} : inverse van de standaardnormale verdeling

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

3.2.1 Faalkans gegeven erosie bodem

Wat is het

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

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 7)

De faalkans gegeven erosie bodem ($P_{f,kw|erosie\ bodem}$ [-]) is de kans op het bezwijken van het kunstwerk als gevolg van het eroderen van de bodem nadat de bodembescherming is bezweken. Deze faalkans is voor het faalmechanisme *niet sluiten* een deterministische variabele.

Hoe te bepalen

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

Aanbevolen wordt om in de beoordeling in eerste instantie de standaardwaarde van 1,0 te hanteren. Dit past binnen de werkwijze van grof naar fijn. Een waarde van 1,0 is een conservatieve waarde die impliceert dat er geen reststerkte is.

Indien aanscherping van de waarde gewenst is, bijvoorbeeld omdat de erosie van de bodem(bescherming) substantieel bijdraagt aan de faalkans, worden hieronder enkele aandachtspunten gegeven. Opgemerkt wordt dat niet voor elk deelproces modellen beschikbaar zijn die een kwantitatieve waarde opleveren. Er kan dus ook sprake zijn van een kwalitatieve onderbouwing op basis van expert judgment. De hieronder gegeven aandachtspunten zijn niet uitputtend.

- Indien de fundatie van het kunstwerk aan de binnenzijde van de waterkering geheel met damwanden is omgeven (bijvoorbeeld als gevolg van bouwen op onderwaterbetonvloer) is het instabiel worden van het kunstwerk als gevolg van ontgrondingskuilen niet direct te verwachten. Een waarde van 0,01 voor $P_{f,kw|erosie\ bodem}$ kan dan ook direct in de beoordeling worden toegepast.⁵
- Bepalen van locatie en afmetingen (breedte en diepte) van de ontgrondingskuilen als bekend is welke grondsoort aanwezig is. Indien dit niet bekend is, kan een conservatieve schatting worden gemaakt. De afmetingen van ontgrondingskuilen kunnen bijvoorbeeld aan de hand van de modellen in het handboek 'Ontwerp van schutsluizen' [11] worden bepaald. Indien de afmetingen zeer beperkt zijn, is de invloed op de stabiliteit van het kunstwerk vermoedelijk ook klein. Een waarde tussen 1,0 en 0,01 voor $P_{f,kw|erosie\ bodem}$ is dan wellicht verdedigbaar. De keuze hangt af van de diepte van de berekende ontgrondingskuil, de afstand uit het kunstwerk en de opbouw van (met name) de fundatie van het kunstwerk.
- Bepalen van de opbouw van de constructie. Het gaat hierbij vooral om de fundatiewijze van het kunstwerk en de aanwezigheid van damwandschermen ter plaatse van de overgang van

⁵ Deze waarde is niet meer dan een educated guess; nadere onderbouwing ontbreekt

betonwerk naar bodembescherming. Bij de aanwezigheid van een in relatie tot de diepte van een mogelijke ontgrondingskuil lang damwandscherm, welke niet als draagkrachtig fundatie-element fungeert, kan de invloed van eventuele ontgrondingskuilen zeer beperkt zijn. De horizontale stabiliteit is in de meeste gevallen niet direct afhankelijk van het grondlichaam dat aan de uiteinden van de bodem van het kunstwerk hier tegenaan drukt, maar meer van bodem- en wandwrijvingen en specifieke funderingselementen. Een damwandscherm kan voorkomen dat erosie onder de vloerconstructie van het kunstwerk ontstaat, wat in eerste instantie de verticale draagkracht kan beïnvloeden. Bij de aanwezigheid van lange schermen, relatief ten opzichte van de afmetingen van optredende ontgrondingskuilen, is een waarde voor $P_{f,kw|erosie\ bodem}$ van 1,0 tot 0,01 aannemelijk. Deze waarde kan moeilijk kwantitatief worden onderbouwd. De onderbouwing zal dus overwegend moeten plaatsvinden op basis van een 'educated guess' aan de hand van een beschrijving van het bezwijkproces.

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

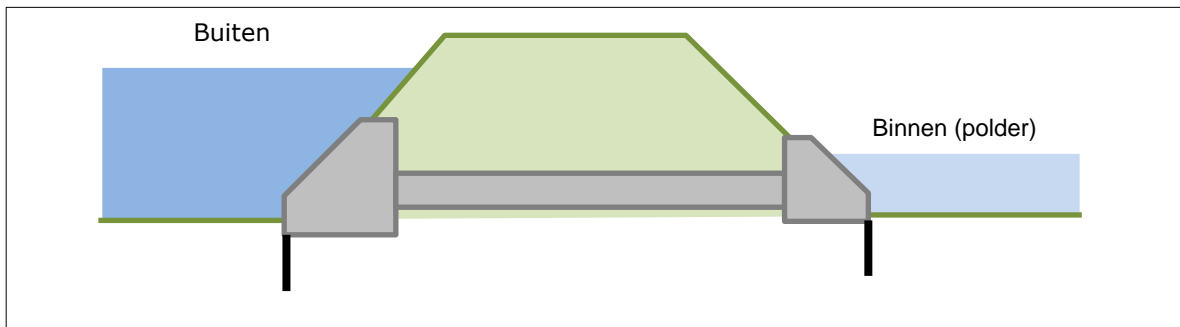
Aandachtspunten

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

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

Voorbeeld

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



Figuur 12: Globale schets van doorsnede dijk met uitwateringssluis

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

Voor dit specifieke voorbeeld zijn de volgende gegevens nog voorhanden (geldigheid van de aangehouden waarden is afhankelijk van de specifieke situatie):

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

Met behulp van de formules 16.31a en 16.31b uit [11]⁶ kan worden benaderd wanneer de ontgrondingskuil een diepte heeft van 1,5 m:

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

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

Waarin:

y_{max} Maximum-kuildiepte na tijd t [m].

h Waterdiepte boven initiële bodemligging [m].

t_1 Tijd waarop maximum-kuildiepte gelijk is aan waterdiepte ($y_{max} = h_{bin}$) [m].

u Over de verticaal gemiddelde stroomsnelheid [m/s].

α Coëfficiënt voor invloed turbulentie [-]

Δ Relatieve dichtheid [-] = $(\rho_{zand} - \rho_{water}) / \rho_{water} = (2650 \text{ kg/m}^3 - 1000 \text{ kg/m}^3) / 1000 \text{ m}^3 = 1,65$ [-].

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

⁶ Bij het toepassen van formules omtrent ontgrondingskuilen is het van belang dat aandacht geschonken wordt aan het geldigheidsgebied van deze formules. Dit om onrealistische waarden te voorkomen.

Invullen levert:

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

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

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

3.3 Deelfaalmecanisme Z21: overschrijden bergend vermogen

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

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

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

$$V_c = m_{kom} \cdot A_{kom} \cdot \Delta h_{kom} \quad 24$$

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

$$V_{instroom} = m_{in} \cdot f_{ts|open} \cdot t_s \cdot Q_{in|open} \quad 25$$

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

$$Z = V_c - V_{instroom} = m_{kom} \cdot A_{kom} \cdot \Delta h_{kom} - m_{in} \cdot f_{ts|open} \cdot t_s \cdot Q_{in|open} \quad 26$$

Belangrijk aandachtspunt is dat het bovengenoemde kombergingsmodel in de volgende situaties niet toegepast hoeft te worden. De komberging moet dan op een andere wijze worden meegenomen:

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

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

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

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

3.3.1 Modelfactor kombergend vermogen

Wat is het

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

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 7)

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

Hoe te bepalen

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

Aandachtspunten

n.v.t.

Voorbeeld

n.v.t.

3.3.2 Kombergend oppervlak

Wat is het

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

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 7)

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

Hoe te bepalen

Afhankelijk van de vormgeving van de beschikbare komberging kan de bepaling zeer eenvoudig zijn, maar ook zeer complex. Het kombergend oppervlak onderhoudt een sterke relatie met de voor komberging beschikbare peilverhoging op het binnenwater Δh_{kom} (zie paragraaf 2.4.3).

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

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

Aandachtspunten

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

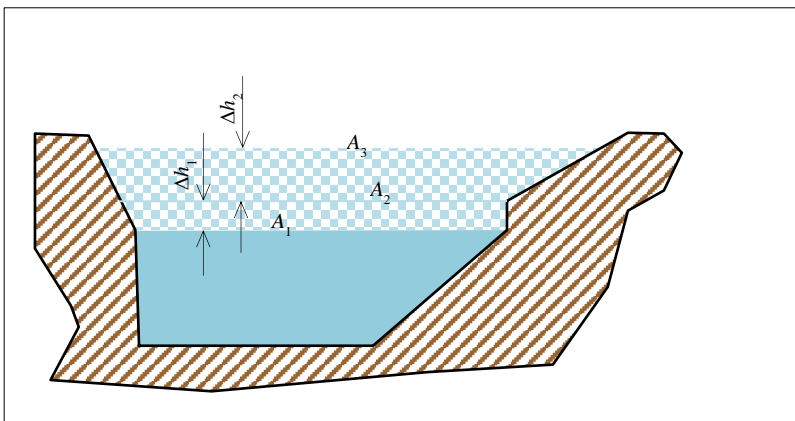
- 1 Toestroming van water vanuit het achterland kan niet specifiek gemodelleerd worden. Deze toestroming kan plaatsvinden onder normaal verval, maar ook via poldergemalen die hun water lozen op de boezem.
- 2 Een kombergend volume kan worden benut door meerdere kunstwerken in een dijktraject. Indien de correlatie met betrekking tot *niet sluiten* groot is tussen deze kunstwerken⁷, kan het nodig zijn om het totaal beschikbare volume te verdelen over deze kunstwerken. Echter, bijna altijd is de correlatie dusdanig beperkt, dat de kans dat de kunstwerken gelijktijdig niet sluiten verwaarloosbaar klein mag worden verondersteld zodat bij bepaling van het beschikbare kombergend oppervlak geen rekening gehouden hoeft te worden met andere kunstwerken.
- 3 Een kombergend volume kan worden aangesproken door meerdere kunstwerken die behoren tot verschillende dijktrajecten. Hier gelden dezelfde overwegingen als bij het vorige punt.
- 4 Tijdens hoogwater kan het voorkomen dat gemalen worden ingezet om hoogwater te lozen op het buitenwater. Hierdoor komt feitelijk meer kombergend vermogen beschikbaar. Om dit in rekening te brengen dient rekening te worden gehouden met de duur van de hoogwatergolf en de capaciteit van de afvoerende gemalen.

⁷ Bijvoorbeeld kunstwerken die (nagenoeg) identiek zijn met betrekking tot hoogwaterbelastingen, aandrijving en kerende hoogte in niet gesloten toestand.

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

Voorbeeld

Achter een keersluis is een watergang aanwezig met de dwarsdoorsnede gegeven in Figuur 9. De kritieke peilverhoging Δh_{kom} is gelijk aan $\Delta h_1 + \Delta h_2$. Er zijn drie oppervlakten in de dwarsdoorsnede bepaald, te weten A_1 , A_2 en A_3 .



Figuur 13: Schematische weergave dwarsdoorsnede voor voorbeeld

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

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

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

Waarin:

$V_{c,kw}$	Kombergend vermogen (volume) beschikbaar voor het beschouwde kunstwerk [m ³].
A_{gem}	Het voor komberging gemiddeld beschikbare oppervlak [m ²].
Δh_{kom}	Kritieke peilverhoging komberging (zie paragraaf 2.4.3) [m].
$V_{kw,i}$	Instromend volume door kunstwerk i dat aansluit op dezelfde komberging [m ³].
n	Aantal kunstwerken buiten het beschouwde kunstwerk dat op dezelfde komberging uitkomt [-].
$V_{achterland}$	Instromend volume als gevolg van aanvoer vanuit het achterland [m ³].
V_{pompen}	Volume dat gedurende een hoogwater kan worden weggepompt door inzet van bijvoorbeeld aanwezige gemalen of mobiele pompen [m ³].

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

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

De diverse parameters kunnen nu worden uitgewerkt:

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

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

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

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

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

De voor het kunstwerk beschikbare komberging is nu gelijk aan:

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

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

Het in te voeren kombergend oppervlak wordt nu:

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

3.3.3 Toegestane peilverhoging

Wat is het

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

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 7)

De toegestane peilverhoging komberging (Δh_{kom} [m]) is de peilverhoging op het kombergend oppervlak die nog net niet leidt tot significante overstromingsgevolgen in het achterland.

Verondersteld wordt dat de *toegestane peilverhoging komberging* lognormaal is verdeeld. Die verdeling wordt gekarakteriseerd door een verwachtingswaarde μ en een standaardafwijking $\sigma = 0,10$ [-]. De verwachtingswaarde moet worden opgegeven en de standaardafwijking kan worden aangepast.

Hoe te bepalen

De kritieke peilverhoging kan bepaald worden middels onderstaande formule:

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

Waarin:

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

Het kritieke peil op het binnenwater wordt in eerste instantie bepaald door de criteria die verbonden zijn aan de definitie van het kombergend vermogen. Dat betekent dat er sprake moet zijn van significante gevolgen. Een mogelijk eerste uitgangspunt binnen de *beoordeling* is bijvoorbeeld (zie ook bijlage A van de handleiding kunstwerken [38]):

- het normpeil van het regionale watersysteem wordt overschreden (indien het watersysteem van de komberging is omringd door 'zachte' kades)
- er staat 0,2 m water op straat/maaiveld, gemiddeld in een groter gebied (postcodegebied) (indien het watersysteem van de komberging is omringd door kades die niet door kunnen breken of als achter de kering geen regionaal watersysteem aanwezig is)

In een nadere analyse kan nog worden beschouwd of dit nog verder kan worden aangescherpt.

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

Het binnenpeil is het peil dat onder normale omstandigheden gehandhaafd wordt op het open binnenwater. Dit kan een ander peil zijn dan het streefpeil van het betreffende binnenwater. Het binnenpeil is afhankelijk van het gevoerde waterbeheer vlak vóór en tijdens hoogwater en optredende kwel. Indien het binnenpeil tijdens hoogwater niet bekend is, of niet gecontroleerd wordt, kan als vertrekpunt worden uitgegaan van het winterpeil. Wel moet geverifieerd worden of deze als gevolg van met name kwel⁸ niet alsnog hoger kan zijn. Het meenemen van ervaringen van recente hoogwaterperioden is gewenst bij het bepalen van het aan te houden binnenpeil.

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

Aandachtspunten

⁸ Afwatering van andere kunstwerken op het betreffende binnenwater is onder de parameter A_{kom} reeds beschouwd

De parameter heeft een sterke relatie met het kombergend oppervlak. In deze schematiseringshandleiding is ervoor gekozen om middels de parameter van het kombergend oppervlak (A_{kom} , zie paragraaf 2.4.2) overige invloeden op het kombergend vermogen te verrekenen. Hier kan uiteraard van worden afgeweken.

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

Voorbeeld

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

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

3.3.4 *Modelfactor instromend volume*

Wat is het

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

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 7)

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

Hoe te bepalen

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

Aandachtspunten

n.v.t.

Voorbeeld

n.v.t.

3.3.5 *Factor voor stormduur hoogwater*

Wat is het

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

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 7)

De factor voor stormduur hoogwater ($f_{ts|open}$ [-]) is een factor voor beperking van de stormduur (zie paragraaf 2.4.5) in relatie tot het ongewenst instromen van water. Met name bij een kunstwerk waarvan de drempel relatief hoog ligt ten opzichte van de buitenwaterstand vindt instroming na het falen van de sluiting plaats op een moment dat een deel van de hoogwatergolf reeds gepasseerd is. Het in rekening brengen van de duur van de gehele hoogwatergolf is dan niet realistisch. Middels de parameter $f_{ts|open}$ kan een deel van de duur van de hoogwatergolf worden meegenomen. Deze factor is een deterministische grootheid, de defaultwaarde van 1,0 kan door de gebruiker worden aangepast.

Hoe te bepalen

Aanbevolen wordt om in eerste instantie uit te gaan van de standaardwaarde van 1,0. Indien de uitkomst van de beoordeling negatief is, kan in geval van een hoge drempel worden overwogen om de factor aan te passen. Randvoorwaarde hierbij is dat het kombergend vermogen en niet de sterkte van de bodembescherming maatgevend is voor de faalkans.

Aandachtspunten

Het schematiseren van slechts een deel van de hoogwatergolf is ook mogelijk door voor de parameter t_s (stormduur, paragraaf 2.4.5) niet de gehele geschematiseerde stormduur in te voeren.

Voorbeeld

n.v.t.

3.3.6 Stormduur

Wat is het

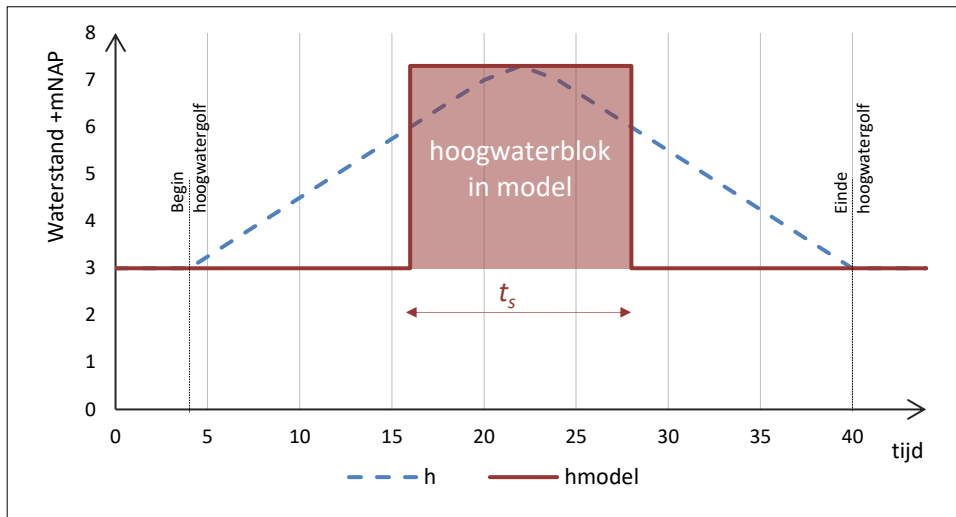
Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
t_s	[uur]	logn	6,0 ²	$V_r=0,25$ ¹	-	1	-	0

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 7)

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

Hoe te bepalen

Middels deze parameter kan een zeer globale schematisering van de periode van hoogwater (door afvoer, verhoogd meerpeil en/of stormopzet) worden bewerkstelligd. Het model voor komberging in Riskeer is alleen in staat om de afvoergolf als een blok te schematiseren, waarbij de piek van de buitenwaterstand gedurende de tijdsperiode t_s als constant wordt verondersteld. In onderstaande Figuur 14 is een voorbeeld opgenomen.



Figuur 14: Schematisering verloop hoogwatergolf in Riskeer

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

In het instroommodel wordt geen rekening gehouden met een verlopende binnenwaterstand. Het stijgen van de binnenwaterstand is in werkelijkheid direct van invloed op het instromende debiet⁹. Dit is dus een sterke vereenvoudiging van de werkelijkheid.

Ten behoeve van de schematisering wordt de volgende werkwijze voorgesteld:

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

⁹ Uitzondering hierop is een situatie waarbij water over een hoge drempel (bijvoorbeeld schutdeur) stort en er dus geen direct contact is tussen binnen- en buitenwater.

Aandachtspunten

n.v.t.

Voorbeeld

n.v.t.

3.3.7 *Instromend debiet door kunstwerk gegeven geopend kunstwerk*Wat is het

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

Overslag/overloopdebiet verticale wand (hoge drempel)¹⁰

$$Q_{in|open} = B \cdot m_{OL} \cdot 0,55 \cdot \sqrt{-g \cdot (h_{kr;NS} - h_{bu})^3} + B \cdot m_{os} \cdot \sqrt{g \cdot (H_s)^3} \quad \begin{matrix} h_{bu} > h_{kr;NS} \\ \text{Aanlandige golven}^{11} \end{matrix} \quad 27$$

Lage drempel

Onvolkomen stroming:

$$Q_{in|open} = B \cdot m_{vl} \cdot (h_{bi} - h_{dr}) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_{bu} - h_{bi})} \quad h_{bu} < \frac{3}{2} \cdot h_{bi} - \frac{1}{2} \cdot h_{dr} \quad 28$$

Volkomen stroming:

$$Q_{in|open} = B \cdot m_{vl} \cdot 0,55 \cdot \sqrt{g \cdot (h_{bu} - h_{dr})^3} \quad h_{bu} \geq \frac{3}{2} \cdot h_{bi} - \frac{1}{2} \cdot h_{dr} \quad 29$$

Stroming door verdronken koker:

$$Q_{in|open} = \mu \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_{bu} - h_{bi})} \quad 30$$

In de formule 27 is de significante golfhoogte H_s opgenomen. In de databases met hydraulische randvoorwaarden zoals gebruikt door Riskeer is als golfhoogte H_{m0} opgenomen. Zonder in details te treden kan worden gesteld dat H_{m0} nagenoeg gelijk is aan H_s .

Ten aanzien van de golfcondities wordt nog een aanpassing van de significante golfhoogte (H_s in formule 27) doorgevoerd op het moment dat er sprake is van scheve golfval. Hierbij wordt aangesloten bij hetgeen ook bij het faalmechanisme *hoogte* is ingevoerd.

De hoek van golfval \square is als volgt gedefinieerd:

¹⁰ In vergelijking met overslag/overloop is voor de verticale wand bij niet sluiten slechts één formule aanwezig. Alleen de situatie waarbij de buitenwaterstand hoger is dan de kruinhoogte in niet gesloten toestand wordt meegenomen. Een situatie met alleen overslag ($h < h_{kr;NS}$) wordt niet beschouwd. Een verticale wand in niet gesloten toestand kan alleen optreden bij een schutsluis of een coupure. In beide gevallen is sprake van situatie waarbij golven sterk gereduceerd zullen zijn door de schutkolk, dan wel het olopend talud (coupure), waardoor deze situatie als niet maatgevend wordt beschouwd.

¹¹ Met aflandige wind, verdwijnt de laatste term en blijft een situatie met overloop over.

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

31

Waarin:

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

De waarde van de golfhoogte H_s die in de modellen voor de bepaling van het overslag-/overloopdebiet wordt gehanteerd is – voor zeer scheef invallende golven – een gereduceerde waarde van de golfhoogte $H_{s,HR}$ die vanuit de hydraulische belastingen als input wordt gegenereerd:

$$H_s = \gamma_s \cdot H_{s,HR}$$

32

De invloedsfactor γ_s is geïntroduceerd om een geleidelijke overgang van aanlandige naar afluende golfrichtingen mogelijk te maken om convergentieproblemen rondom deze overgang te voorkomen. Deze invloedsfactor is als volgt gedefinieerd:

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

33

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

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

Tabel 9: Modelkeuzes instromend debiet bij diverse kunstwerken

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

Kunstwerktype	Model	Motivatie
Inlaatsluis Uitwateringssluis of duiker	Verdronken koker of lage drempel	De leiding(en) van een inlaatsluis bevindt/bevinden zich soms geheel onder water (duikerconstructie). Soms gaat het echter over doorgangen zonder begrenzing aan de bovenzijde, waarbij sprake is van direct contact tussen binnen- en buitenwater.

3.3.7.1

Oriëntatie

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

Wat is het

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

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 7)

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

Hoe te bepalen

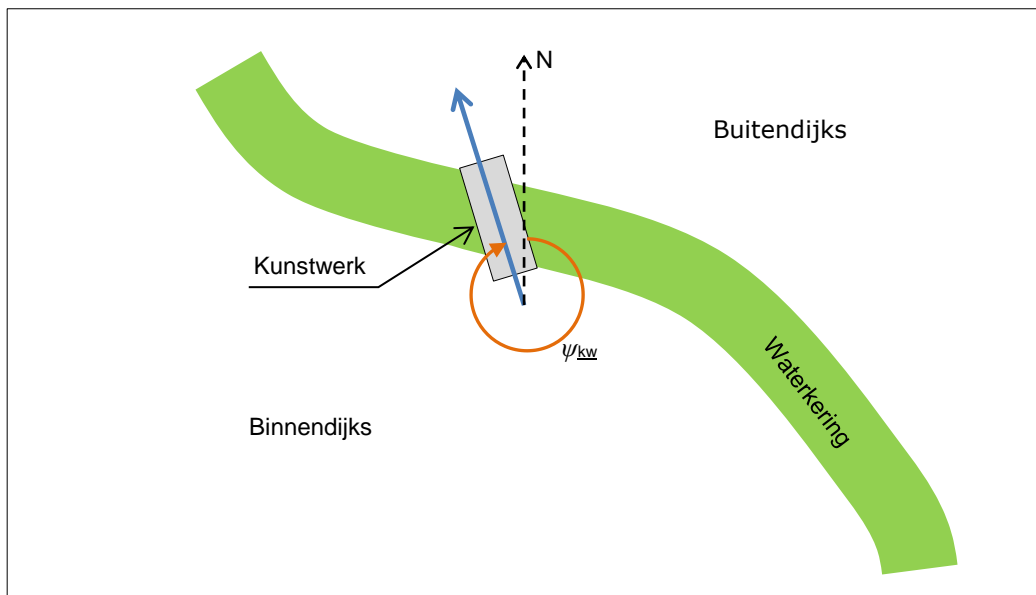
De in te voeren waarde voor deze parameter kan worden afgelezen/opgemeten uit tekeningen of met behulp van kaarten. De normaal van het kunstwerk is hierbij gedefinieerd als de lijn die loodrecht op de keermiddelen van het kunstwerk staat en buitenwaarts gericht is. Deze lijn loopt van de binnenzijde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

Aandachtspunt

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

Voorbeeld

In Figuur 15 is voor een denkbeeldige situatie de oriëntatie van een kunstwerk weergegeven. Deze bedraagt in dit geval circa 340°.



Figuur 15: Wijze van bepaling hoek kunstwerknormaal ten opzichte van Noord

3.3.7.2 Breedte doorstroomopening

Wat is het

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

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 7)

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

Hoe te bepalen

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

Indien een kunstwerk meerdere doorstroomopeningen heeft, dient te worden afgewogen of het waarschijnlijk is dat twee of meer doorstroomopeningen gelijktijdig ongewenst niet gesloten zijn. Dit is terug te voeren op de correlatie tussen de sluiting van de keermiddelen van de verschillende doorstroomopeningen. Dit houdt ook verband met de factor n (zie paragraaf 3.5.3).

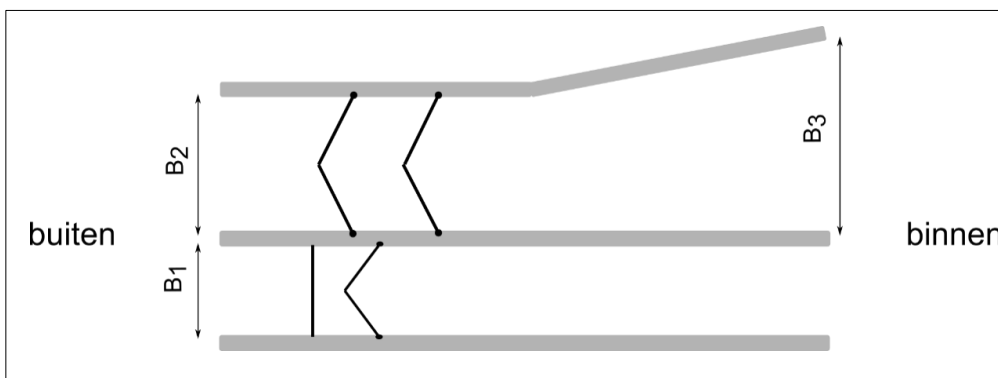
Het wordt aanbevolen om de standaardwaarde van de spreiding niet aan te passen, tenzij er geen metingen of tekeningen zijn van de breedte en men globaal de breedte heeft bepaald. Een grotere spreiding kan dan worden toegepast.

Aandachtspunten

N.v.t.

Voorbeeld

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



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

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

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

3.3.7.3 Modelfactor overloopdebiet volkomen overlaat

Wat is het

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

¹ Vaste waarde² Defaultwaarde of aanbevolen waarde³ Startwaarde⁴ Vrije waarde (zie Tabel 7)

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

Hoe te bepalen

De parameter betreft een modelparameter die hoort bij situatie waarin sprake is van volkomen stroming. Daarvan is sprake als het instromend debiet niet beïnvloed wordt door het binnenwater, zoals in het model verticale wand/hoge drempel. Bij een volkomen lange overlaat wordt de parameter ook wel toegepast, echter hier heet deze m_{vi} (zie ook paragraaf 3.3.7.6)

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

Aandachtspunten

N.v.t.

Voorbeeld

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

3.3.7.4 Modelfactor overslagdebiet

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
m_{os}	[-]	logn	0,09 ¹	$\sigma=0,06$ ¹	-	0	-	1

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 7)

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

Hoe te bepalen

De vaste standaardwaarden voor deze parameter zijn gebaseerd op literatuurstudie.

Aandachtspunten

Opgemerkt wordt dat de gegeven waarden voor μ en σ afwijken van die in de Leidraad Kunstwerken 2003 [10] zijn gegeven. De waarden die in dat document in paragraaf B.2.4.1 staan weergegeven ($\mu=0,34$ en $\sigma=0,09$) zijn niet correct.

Voorbeeld

N.v.t.

3.3.7.5 Kerende hoogte bij niet hoogwater gesloten zijn van kunstwerk

Wat is het

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

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 7)

De kerende hoogte kunstwerk bij niet hoogwater gesloten zijn van kunstwerk ($h_{kr;NS}$ [m+NAP]) is de fysiek aanwezige kerende hoogte van het kunstwerk als de hoogwaterkerende keermiddelen niet gesloten zijn. De parameter wordt gebruikt in het model van de verticale wand bij bepaling van het

instromende debiet bij een niet gesloten kering. Verondersteld wordt dat de *kerende hoogte kunstwerk* bij niet hoogwaterkerend gesloten zijn van het kunstwerk normaal is verdeeld. Om die verdeling te karakteriseren moet de verwachtingswaarde μ worden opgegeven. Voor de standaardafwijking σ is de aanbevolen waarde 0,05 m, maar die waarde kan worden aangepast.

Hoe te bepalen

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

Aandachtspunten

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

Het gebruik van tekeningen is toegestaan, maar het wordt aanbevolen om gebruik te maken van actueel ingemeten hoogtegegevens. Bij het gebruik van informatie van tekening kan het nodig zijn om de standaardafwijking wat te vergroten. Indien het zeer recent ingemeten waarden betreft, kan de standaardafwijking eventueel worden verlaagd.

Voorbeeld

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

Voor het geval dat de binnendeuren niet tot aan hun kruin de waterstand kunnen keren, kan dit ook in rekening gebracht worden door toepassing van het model 'lage drempel' (zie paragraaf 2.4.6). Hierbij dienen bepaalde parameters bewust anders gemodelleerd te worden om tot een enigszins realistische schematisering van de situatie te komen (zie paragraaf 3.3.7.7).

3.3.7.6 Modelfactor lange overlaat

Wat is het

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

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 7)

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

0,05 [-]. Zowel de verwachtingswaarde als de variatiecoëfficiënt is een vaste waarde en kan niet door de softwaregebruiker worden aangepast.

Hoe te bepalen

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

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

Aandachtspunten

Met betrekking tot deze parameter zijn geen verdere aandachtspunten.

Voorbeeld

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

3.3.7.7 Binnenwaterstand

Wat is het

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

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 7)

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

Hoe te bepalen

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

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

Indien er sprake is van relatief grote schommelingen in de binnenwaterstand, kan met eventueel aanwezige waarnemingen van deze binnenwaterstand een statistisch gemiddelde en een standaardafwijking worden afgeleid. Als deze waarnemingen niet beschikbaar zijn, dient een reële dan wel conservatieve waarde te worden genomen.

Aandachtspunten

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

Voorbeeld

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

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

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

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

3.3.7.8 Drempelhoogte

Wat is het

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

¹ Vaste waarde

² Defaultwaarde of aanbevolen waarde

³ Startwaarde

⁴ Vrije waarde (zie Tabel 7)

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

Hoe te bepalen

De parameter kan worden bepaald uit metingen in het veld of door gebruik van tekeningen. In het laatste geval verdient het aanbeveling om hetgeen op tekening vermeld staat omtrent de hoogte

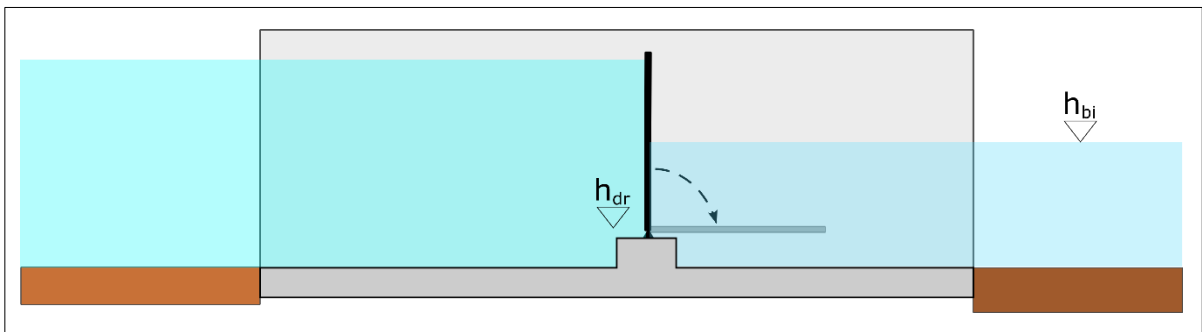
van de drempel te verifiëren middels metingen, voor zover dat in het recente verleden nog niet heeft plaatsgevonden.

Aandachtspunten

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

Voorbeeld

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



Door de constructie van de stuw is het doorstroomprofiel enigszins geknepen ter plaatse van de stuw. Wanneer de stuw gestreken is, wordt het doorstroomprofiel bepaald door de waterstand boven de stuw en de drempelhoogte van de stuw. Die bepaalt daarmee het instromende debiet. Voor h_{dr} dient in dit geval dus de hoogte van de bovenkant van de gestreken stuwconstructie te worden ingevuld.

3.3.7.9 Afvoercoëfficiënt

Wat is het

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

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 7)

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

Hoe te bepalen

De waarde van deze afvoercoëfficiënt kan worden bepaald middels het bepalen van de diverse energieverliezen van het water stromend door de koker. Deze energieverliezen bestaan bijvoorbeeld uit wrijvingsverliezen en in- en uittredeverliezen. Voor een onderbouwde bepaling van de gemiddelde waarde van μ wordt verwezen naar de vakliteratuur (bijvoorbeeld §4.15 van het boek "Toegepaste vloeistofmechanica, Nortier" [13]).

Aandachtspunten

N.v.t.

Voorbeeld

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

3.3.7.10 Doorstroomoppervlak

Wat is het

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

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 7)

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

Hoe te bepalen

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

Indien een kunstwerk meerdere doorstroomopeningen heeft, dient te worden afgewogen of het waarschijnlijk is dat twee of meer doorstroomopeningen gelijktijdig ongewenst niet gesloten zijn. Dit is terug te voeren op de correlatie tussen de sluiting van de keermiddelen van de verschillende doorstroomopeningen. Dit houdt ook verband met de factor n (zie paragraaf 3.5.3).

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

Aandachtspunten

N.v.t.

Voorbeeld

Een moeilijk bereikbare uitwateringssluis bestaat uit een tweetal parallelle buizen door de dijk met gelijke afmetingen (\varnothing 500 mm). De beide buizen komen buitendijks uit in één gezamenlijk uitstroomwerk. Het keermiddel in dit uitstroomwerk betreft een terugslagklep die het gehele

uitstroomwerk afsluit. Halverwege de leidingen in de dijk is een inspectieput aanwezig, waarin zich tevens per buis een handbediende spindelschuif bevindt. Deze spindelschuiven worden alleen gesloten tijdens de jaarlijkse testen en in geval van hoogwater. Binnendijks komen de leidingen ook in een gezamenlijk instroomwerk samen. Als belangrijkste faaloorzaak voor niet sluiten van de spindelschuiven wordt het niet bereiken van het kunstwerk aangemerkt.

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

3.4 Deelfaalmechanisme Z22: falen bodembescherming

De bodembescherming achter de constructie faalt als de kritieke stroomsnelheid van de bodembescherming wordt overschreden. Deze stroomsnelheid treedt op bij een bepaald kritiek debiet. Het debiet dat binnenstroomt onder bepaalde omstandigheden wordt bepaald met de formules beschreven in paragraaf 2.4.6. De kans dat het instromende debiet groter is dan het kritieke debiet wordt bepaald door de volgende parameters die vervolgens worden besproken:

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

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

$$Q_c = q_c \cdot B_{sv} \quad 4-34$$

De parameters q_c en B_{sv} zijn aan elkaar gekoppeld afhankelijk van de locatie die wordt bekeken. Achter een kunstwerk is vaak sprake van een bodembescherming, die uiteindelijk overgaat in een aansluiting op de natuurlijke bodem. Het ontstaan van erosiekuilen kan plaatsvinden bij de bodembescherming, maar ook bij onbeschermde bodem aansluitend op de bodembescherming. Dit laatste is alleen van belang indien dit leidt tot instabiliteit van het kunstwerk. Wanneer de bodembescherming voldoende lang is, zullen erosiekuilen achter de bodembescherming niet meer leiden tot instabiliteit van het kunstwerk. Wellicht leidt dit wel tot schade aan de bodembescherming, maar de verwachting is dan nog steeds dat dit niet binnen een hoogwaterperiode leidt tot instabiliteit van de constructie. Normaliter is de lengte van de bodembescherming hier ook op ontworpen. Welke lengte van de bodembescherming voldoende is, is afhankelijk van de specifieke situatie. Per geval dient hiervoor een afweging te worden gemaakt. Uiteindelijk bepaalt de combinatie van het kritieke debiet per strekkende meter en de stroomvoerende breedte wat het maatgevende totale kritieke debiet (Q_c) is.

Het instromende debiet is afhankelijk van de situatie en de afmetingen van het kunstwerk. Het instromende debiet wordt met behulp van de formules in paragraaf 2.4.6 bepaald door het instrumentarium.

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

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

4-35

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

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

3.4.1 Kritiek instromende debiet

Wat is het

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

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 7)

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

Hoe te bepalen

Van groot belang bij het bepalen van het kritieke debiet is de beschikbare informatie omtrent de bodembescherming en de instroomsituatie die bij een niet gesloten kunstwerk ontstaat (zie paragraaf 2.4.6). Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen de volgende twee groepen:

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

Beide situaties worden hieronder behandeld.

Verdrongen koker en overlaat

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

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

4-36

Waarin:

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

De voorgaande formule 4-36 is niet van toepassing voor coupures, waar geen watergang aan de binnenzijde aanwezig is. Als eerste conservatieve benadering wordt voor kritieke (overstort)-debieten bij coupures verwezen naar de richtgetallen uit Tabel 5 in paragraaf 2.2.1).

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

Als er geen bodembescherming aanwezig is (of deze is geërodeerd), dan is de kritieke stroomsnelheid afhankelijk van de grondsoort. Op basis van deels empirische bevindingen, [12], [13] en [15] is in Tabel 10 hiervan een overzicht samengesteld. Deze waarden kunnen worden gebruikt als eerste richtgetallen.

Tabel 10: Kritieke stroomsnelheden onbeschermde bodem

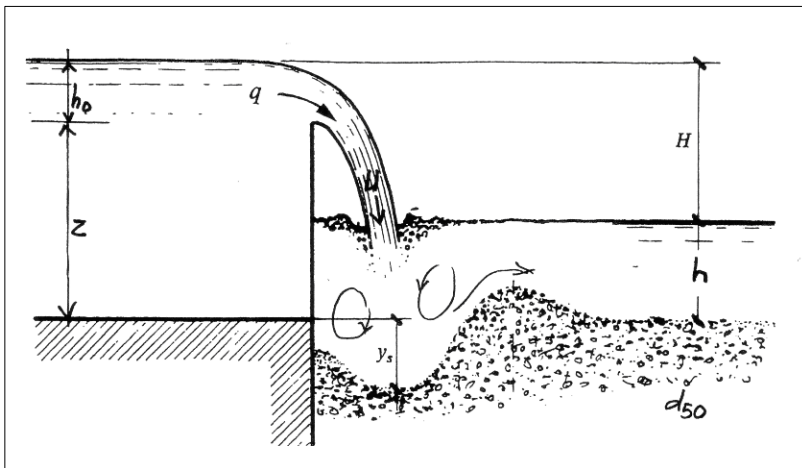
Grondsoort	u_c [m/s]
fijn zand	0,10
matig fijn zand	0,15
matig grof zand	0,20
grof zand	0,30
Veen	0,30-0,60
kleilig zand	0,40-0,50
slappe klei	0,60-0,80
redelijk vaste klei	0,80-1,00
vaste klei	1,00-1,20
Grind	1,00

Verticale wand

Bij een situatie met een verticale wand, welke zich overwegend bij schutsluizen kan voordoen in het geval van het faalmechanisme *niet sluiten*, kan er sprake zijn van een overstortende straal bij een voldoende hoge waterstand. Deze waterstraal komt aan de binnenzijde uit in de daar aanwezige waterdiepte. Indien achter de verticale wand (bijvoorbeeld binnendeur van sluis) een betonnen vloer aanwezig is, zal de energie van de overstortende straal kunnen worden opgenomen door het betonwerk. De overstortende straal zorgt in dat geval niet voor de maatgevende belasting op die bodem(bescherming). Het kritieke debiet kan dan worden gekoppeld aan de bodembescherming die aansluit op de betonnen bodem. In dat geval kan gebruik worden gemaakt van de benadering die bij verdrongen koker/overlaat wordt gehanteerd.

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

In [11] is een mogelijke methode gegeven aan de hand waarvan diepte van erosiekuilen door een overstortende straal globaal kan worden bepaald met behulp van enkele formules. Ten behoeve van deze methode zijn gegevens omtrent de bodembescherming benodigd. De schematisering kan plaatsvinden met behulp van Figuur 16.



Figuur 16: Overstortende straal met ontgrondingskuil achter de constructie **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**

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

$$q_c = 1,705 \cdot \sqrt{h_0^3} \quad 4-37$$

Waarin:

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

h_0 overstorthoogte boven de kruin [m].

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

$$y_s = 0,4 \cdot q_c^{0,6} \cdot H^{0,4} \cdot d_{50}^{-0,3} - 0,5 \cdot h \quad 4-38$$

Waarin:

y_s erosiediepte als evenwichtswaarde ≥ 0 [m].

q_c kritiek debiet per meter breedte [m^2/s].

H hoogteverschil boven- benedenstroomse waterstand [m] = $z + h_0 - h$.

z hoogte sluisdeur boven benedenstroomse bodem [m].

h waterdiepte benedenstroomse zijde [m].

h_0 overstorthoogte boven de kruin [m].

d_{50} diameter korrels of stenen [m].

Bij een bepaalde erosiediepte van een laag kan worden gesteld dat deze laag bezweken is. In het document [11] wordt voorgesteld om hier een waarde van 0,50 tot 0,60 van de oorspronkelijke laagdikte voor aan te houden.

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

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

Aandachtspunten

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

- Naast de aanwezigheid van bodembescherming is het ook van belang dat bekend is wat de conditie van deze bodembescherming is. Vaak is dit gegeven niet direct voorhanden, omdat hiervoor een inspectie moet plaatsvinden. Lodingen van de bodem kunnen een indicatie geven omtrent de aanwezigheid en volledigheid van de bodembescherming. Bij het detecteren van kuilen in de bodem kan vaak worden gesteld dat de bodembescherming niet meer intact is. Indien de conditie van de bodembescherming niet bekend is en de bodembescherming niet recent is aangelegd of hersteld (periode < 5 jaar), dienen conservatieve aannamen te worden gedaan met betrekking tot de kritieke stroomsnelheid.
- Bodembeschermingen bij kunstwerken worden vaak aangelegd vanuit een andere functie dan waterkeren. Het kan gaan om schroefstraalbelastingen of stroomsnelheden die optreden bij de lozing van water. Dit in gedachten nemende kan vanuit de functie van het kunstwerk ook een inschatting van toelaatbare stroomsnelheden worden ingeschat (of wellicht worden teruggevonden in de ontwerpdocumenten).
- Een nadere analyse van het kritieke instromende debiet kan worden gemaakt door de stroming scherper te modelleren. Dit kan door bijvoorbeeld rekening te houden met het theoretische verloop van de stroomsnelheid over de waterdiepte. Een dergelijke exercitie is alleen nuttig indien gedetailleerde gegevens van de bodembescherming bekend zijn (opbouw, actuele conditie en hoogteligging van deze bodembescherming).
- Van belang is dat het kritieke debiet per strekkende meter (q_c) altijd wordt gezien in combinatie met de stroomvoerende breedte B_{sv} (zie paragraaf 3.4.2).
- Met betrekking tot schutsluizen geldt dat de bodembescherming vaak is uitgelegd op schroefstraalbelastingen. De toelaatbare stroomsnelheden kunnen dan behoorlijk oplopen. In hoofdstuk 16 van 'Ontwerp van schutsluizen' [11] wordt het ontwerp van bodembeschermingen bij schutsluizen behandeld en zijn ook voorbeelden aanwezig.

Hieronder worden in Tabel 11 ter indicatie voorbeelden van sorteringen gegeven, niet uitputtend, voor het geval er geen gegevens zijn over de sortering van een breuksteen bodembescherming. Met behulp van de sortering kunnen kritieke stroomsnelheden worden bepaald met modellen zoals Shields, Izbash en Pilarczyk.

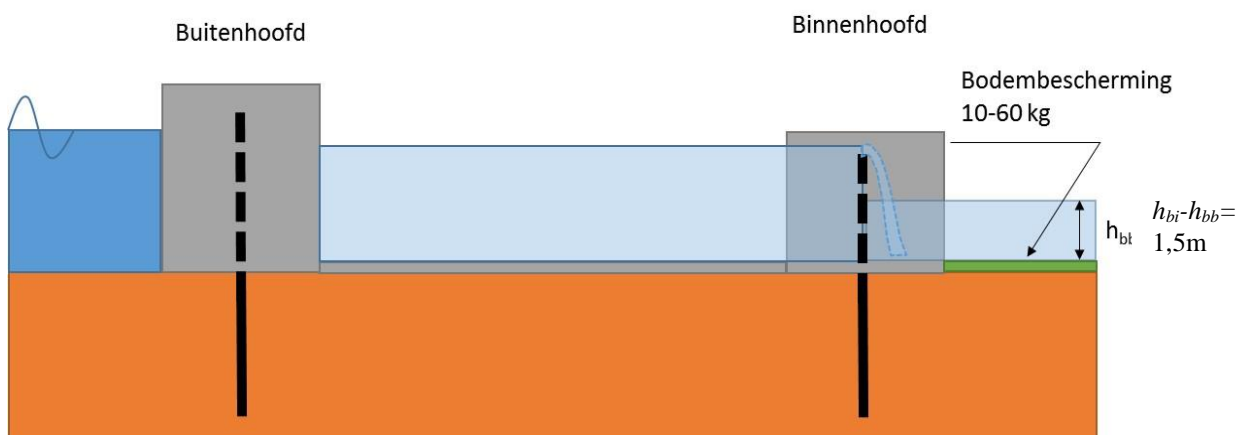
Tabel 11: Voorbeelden sorteringen steenbestortingen

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

- * Deze sortering is relatief zwaar omdat de sluis bij een instromend debiet wordt gesloten en wellicht lekstromen langs of onder de deur heeft.
- ** Vaak worden hier tegels of zuilen gebruikt, in het geval van stortsteen is dit een minimale sortering.
- *** Direct achter de stuw ligt meestal een woelbak van beton of gepenetreerd stortsteen, de aangegeven sortering ligt daar weer achter.

Voorbeeld 1

Beschouw de volgende situatie: achter een recreatiesluis is een bodembescherming aanwezig bestaande uit stortsteen met sortering 10-60 kg. Beide deuren zijn gesloten. Door het optredende overslag-/overloopdebiet is de kolk volgelopen tot aan het niveau van de binnendeuren. Hierover treedt als gevolg van het overslag-/overloopdebiet een overstortende straal op die de bodembescherming belast, zie Figuur 17.



Figuur 17: Sluis met bodembescherming belast door overtrekkende stroming

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

Van de bodembescherming is uit een recente inspectie bekend dat deze zich in goede staat bevindt. De kritieke stroomsnelheid kan nu als volgt berekend worden (zie *Achtergrondrapport bepaling kritiek overslag-/overloop-/instroomdebiet bij kunstwerken* [2] voor achtergrondinformatie bij het gebruik van de diverse formules).

Als vertrekpunt wordt de formule van Pilarczyk genomen:

$$D = \frac{\phi_{sc}}{\Delta} \frac{0,035}{\psi_{cr}} k_h k_{sl}^{-1} k_t^2 \frac{U^2}{2g} \quad 39$$

welke is te herschrijven als:

$$U = \sqrt{\frac{2g\Delta D\psi_{cr}k_{sl}}{\phi_{sc}0,035k_h k_t^2}} \quad 40$$

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

Hierin worden de volgende waarden ingevuld:

- D Karakteristieke elementafmeting [m], voor granulaire materialen geldt: $D = D_{n50}$. Bij sortering 10-60 kg hoort een D_{n50} van 0,24 m (zie bijvoorbeeld Bijlage I van CUR 197 Breuksteen in de praktijk).
- ψ_{cr} Als startwaarde voor de schuifspanningsparameter wordt uitgegaan van $\psi_{cr} = 0,035$ [-] voor granulaire materialen. Indien nodig kan dit zonder problemen worden aangescherpt naar $\psi_{cr} = 0,05$.
- ϕ_{sc} Ervan uitgaande dat de bodembescherming niet boven de drempel van het binnenhoofd uitsteekt kan worden uitgegaan van een waarde van de stabiliteitsparameter ϕ_{sc} van 0,75 [-], horende bij breuksteen in een doorgaande laag (minimale twee lagen stenen).
- Δ Relatieve dichtheid [-]: $\Delta = (\rho_s - \rho_w) / \rho_w = (2650 \text{ kg/m}^3 - 1000 \text{ kg/m}^3) / 1000 \text{ m}^3 = 1,65$.
- k_h $k_h = (1 + (h_{bi} - h_{bb})/D)^{-0,2}$ voor niet-volledig ontwikkeld snelheidsprofiel zoals hier. Invullen levert $k_h = (1 + 1,5/0,24)^{-0,2} = 0,67$ [-].
- k_{sl} Taludfactor [-]. Niet van toepassing, de bodembescherming ligt horizontaal.
- k_t Vanwege de korte afstand tussen betonwerk en begin van de bodembescherming wordt een hoge waarde voor de turbulentiefactor aangehouden van $k_t^2 = 2,0$ [-].
- u_c Dieptegemiddelde kritieke stroomsnelheid [m/s].
- g Zwaartekrachtversnelling (=9,81) [m/s²].

Invullen van formule 40 levert een kritieke stroomsnelheid op van 2,8 m/s. Vermenigvuldiging met de waterdiepte van 1,5 m levert een waarde voor het in te vullen kritiek debiet q_c op van 4,2 m³/s/m.

Voorbeeld 2

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

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

3.4.2 Stroomvoerende breedte bodembescherming

Wat is het

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

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 7)

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

Hoe te bepalen

De stroomvoerende breedte dient te worden betrokken op de bodem(bescherming) waarvoor het kritieke debiet (zie paragraaf 3.4.1) is bepaald. Samen met de kritieke stroomsnelheid behorende bij de bodem(bescherming) levert de stroomvoerende breedte het totale kritieke debiet op.

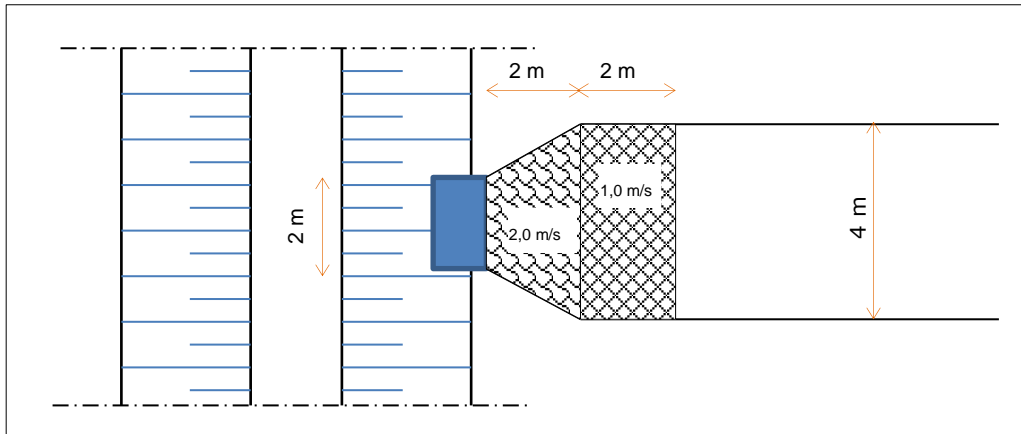
Het vaststellen van de stroomvoerende breedte kan met behulp van tekeningen of metingen in het veld. Een globale schatting is ook nog mogelijk met GIS-applicaties. Indien dit laatste wordt gehanteerd verdient het de aanbeveling om de spreiding van de parameter wat op te voeren. Bij de bepaling van de stroomvoerende breedte dient rekening te worden gehouden met eventuele neren (zie ook paragraaf 2.2.2).

Aandachtspunten

Van belang is dat de stroomvoerende breedte B_{sv} altijd wordt gezien in combinatie met het kritieke debiet per strekkende meter (q_c) (zie paragraaf 3.4.1).

Voorbeeld

Een gemaal met een maximale capaciteit van $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$ heeft binnendijks een instroomwerk met een breedte van 2,0 m. De waterdiepte aan de binnenzijde bedraagt 1,0 m. Na het instroomwerk verbreedt de watergang zich geleidelijk middels vleugelwanden tot een breedte van 4,0 m. In Figuur 18 is een en ander weergegeven in bovenaanzicht.



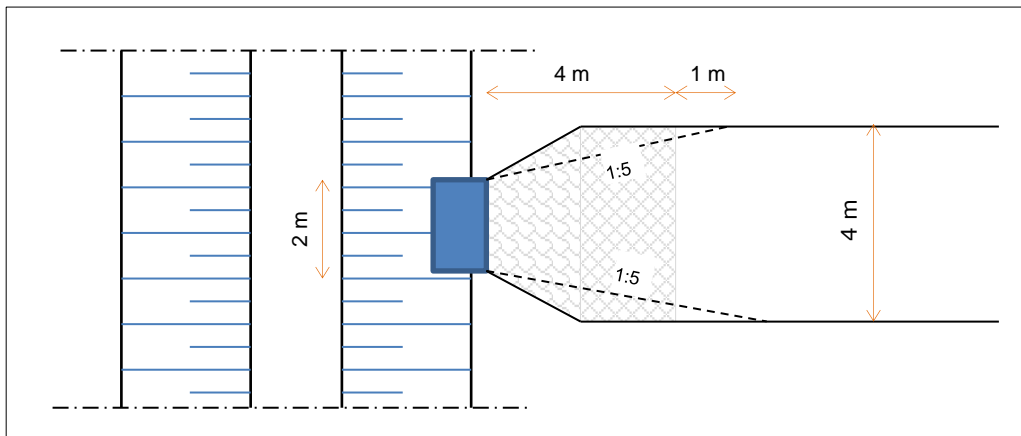
Figuur 18: Gemaal met afmetingen bodembescherming

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

Stel dat is bepaald dat de spreiding van het debiet in deze specifieke situatie in horizontale richting plaats vindt met een verhouding 1:5, zie Figuur 19.

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

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



Figuur 19: Gemaal met bodembescherming belast door overtrekkende stroming

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

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

Met betrekking tot de aansluiting tussen bodembescherming en onbeschermd bodem geldt een maximaal toelaatbaar debiet van (voor redelijk vaste klei is een kritieke stroomsnelheid van 1,0 m/s aangehouden, zie Tabel 10):

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

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

3.5 Deelfaalmechanisme Z23: falen sluitproces

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

De kans op het falen van het sluitproces van een kunstwerk wordt door Riskeer bepaald aan de hand van de volgende parameters:

- De kans dat het kunstwerk niet hoogwaterkerend gesloten is dan wel niet gesloten kan worden omdat deze in reparatie is op het moment dat een willekeurig hoogwater zich aandient (P_{open}).
- De faalkans van sluiting van een doorstroomopening per sluitvraag (P_{ns}).
- Het aantal onafhankelijke keermiddelen (n).

De laatste parameter kan voor een kunstwerk met meerdere doorstroomopeningen verder worden uitgewerkt. Bij identieke doorstroomopeningen met onafhankelijke keermiddelen kan de faalkans van sluiting van het kunstwerk worden benaderd door (zie paragraaf 3.5.2):

$$P_{ns,tot} = n \cdot P_{ns} \quad 41$$

De faalkans voor het sluitproces wordt nu:

$$P_{f,sluitproces} = P_{ns,tot} \cdot P_{open} = n \cdot P_{ns} \cdot P_{open} \quad 42$$

De faalfunctie voor het falen van het sluitproces is:

$$Z = -\Phi^{-1}(P_{f,sluitproces}) - u \quad 43$$

Waarin:

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

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

3.5.1 Kans op open staan bij naderend hoogwater

Wat is het

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

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 7)

De kans op open staan (P_{open}) is de kans dat het kunstwerk (1) niet hoogwaterkerend gesloten is dan wel (2) niet gesloten kan worden omdat deze in reparatie is op het moment dat een hoogwater zich aandient. Indien een kunstwerk open staat bij een naderend hoogwater dient de sluitprocedure te worden uitgevoerd. De invoer betreft een kans.

Hoe te bepalen

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

Er is een viertal typen kunstwerken te onderscheiden:

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

De basisformule ter bepaling van de kans op openstaan wordt gevormd door (zie Bijlage A)¹²:

$$P_{open} = N_{open} \cdot (T_{open} + T_{rep}) \quad 4-44$$

Hierin is:

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

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

¹² De term P_{open} is een wat verwarrende term omdat dit niet de kans is dat het kunstwerk open staat voorafgaand aan een waterstand hoger dan $h_{bui;toel}$. Het is eigenlijk een 'samenraapsel' van elementen uit de kans op niet-sluiten gegeven $h > h_{bui;toel}$ en de kans op de onmogelijkheid van een sluiting vanwege het in reparatie zijn van het kunstwerk gegeven $h > h_{bui;toel}$.

Ad A. Altijd hoogwatergesloten kunstwerken

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

Het is eenvoudig in te zien het faalmechanisme *niet sluiten* in dit geval geen bijdrage heeft aan de faalkans van het kunstwerk. De kans dat het kunstwerk niet hoogwaterkerend gesloten staat (P_{open}) van dit kunstwerk is immers gelijk is aan nul. Hierbij zijn wel de volgende kanttekeningen van toepassing:

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

Ad. B Te openen op aanvraag

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

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

Formule 4-44 is voornamelijk geënt op deze categorie kunstwerken. Belangrijk voor een goede beoordeling is kennis van het daadwerkelijk gebruik van het object, zoals frequentie van primaire functievervulling, duur van functievervulling en wijze waarop (bijvoorbeeld pompen) deze plaatsvindt. Aan de hand van die gegevens kunnen inschattingen worden gemaakt voor de betrokken parameters. Voor het inschatten van de reparatieperiode dient gekeken te worden naar aspecten als signalering van een gefaalde sluiting en mogelijkheden tot het nemen van maatregelen (bijvoorbeeld onderhoudscontracten, tijdelijke maatregelen).

Ad. C Te sluiten bij hoogwater

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

De kans op niet hoogwaterkerend gesloten staan kan voor deze objecten eenvoudig worden bepaald. Indien een kunstwerk gedurende het gehele jaar openstaat, is de kans gelijk aan

1. Wanneer sprake is van een vaste periode waarover een object gesloten staat, is de kans gelijk aan het deel van de tijdsperiode waarbinnen zich een relevante hoogwatersituatie kan voordoen, waarover het object openstaat.

Ad. D Te sluiten bij calamiteit

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

Feitelijk staan deze objecten altijd gesloten, omdat er geen directe verbinding met het buitenwater is. Dit contact ontstaat pas in het geval van een calamiteit. Voor een tunnel die een waterkering passeert, is vanuit het oogpunt van waterkeren sprake van openstaan als zich een substantiële lekkage in de tunnel voordoet. Hiermee wordt de kans op openstaan gelijk aan de kans op optreden van de calamiteit. Formule 43 is hier niet direct van toepassing. Tunnels die tevens onderdeel vormen van de primaire waterkering, kunnen worden beschouwd als waterkerend kunstwerk dat qua stabiliteit, sterkte en niet-sluiten moet voldoen aan de eisen. Indien daarin keermiddelen aanwezig zijn is deze handleiding daarvoor ook van toepassing.

Aandachtspunten

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

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

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

Het is niet mogelijk om voor alle aspecten richtgetallen te bepalen. Het gaat er dan ook om een onderbouwde (subjectieve) aanname omtrent de reparatietijd te doen. De ordegrrootte waaraan gedacht kan worden is vaak een halve dag tot twee dagen. Het gaat hier namelijk niet over de tijd totdat de reparatie is afgerond (dit kan lang duren), maar om de tijd van het optreden van niet-beschikbaarheid tot het verhelpen van het gebrek *of het sluiten van het kunstwerk in afwachting van reparatie*. Een duur langer dan twee dagen lijkt zelden reëel, omdat er nagenoeg altijd twee keermiddelen aanwezig zijn en reparatie van een van deze twee of een alternatieve sluiting veelal binnen twee dagen gerealiseerd kan zijn (een en ander in afstemming met de waterstandsvoorspellingen). Alleen in situaties waarbij slechts één keermiddel aanwezig is, de reparatielengte kan duren en tijdelijke (al dan niet provisorische) sluiting niet is te verwachten, zijn langere hersteltijden te verwachten.

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

Voorbeelden

Hieronder worden enkele voorbeelden gegeven.

Altijd hoogwater kerend gesloten kunstwerken

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

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

Te openen op aanvraag

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

Voorbeeld 1

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

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

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

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

Voorbeeld 2

Een gemaal in het bovenrivierengebied heeft één uitstroomkoker door de dijk. Afhankelijk van de buitenwaterstand¹³ zijn er gemiddeld 100 maalvragen per jaar met een gemiddelde maalduur van een halve dag. Het herstel van een gefaalde sluiting duurt een dag. Gedurende een hoogwater wordt er niet uitgemalen en voorafgaand aan een hoogwater dient het gemaal dus gesloten te zijn/worden. De opvoerhoogte van de pomp is dusdanig groot dat ook bij hoogwater uitgemalen zou kunnen worden. Echter, indien de pompen uit staan, kunnen de pompen niet tegen een eventuele instroming worden opgestart (in de praktijk geldt dit voor de meeste pompen). In feite zijn er gemiddeld drie momenten per jaar waarop het kunstwerk gesloten moet zijn dan wel worden. De kans dat het object niet hoogwaterkerend gesloten staat (P_{open}) kan als volgt worden bepaald:

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

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

Voorbeeld 3

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

De maximaal toelaatbare buitenwaterstand bij geopend kunstwerk wordt drie keer per jaar overschreden. De kans dat er op een willekeurige dag gemalen en dus ook gesloten wordt is $100/365 = 0,27$ per dag. Aangezien een hoogwaterperiode gemiddeld 4 dagen duurt, betekent dit dus dat er per hoogwaterperiode $4 \times 0,27 = 1,10$ sluitingen zijn. Dit is feitelijk P_{open} (in dit geval een frequentie). Een kans op herstel is niet aanwezig omdat sluiting plaatsvindt bij hoogwatercondities.

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

¹³ Het gemaal wordt niet tijdens hoogwater ingezet.

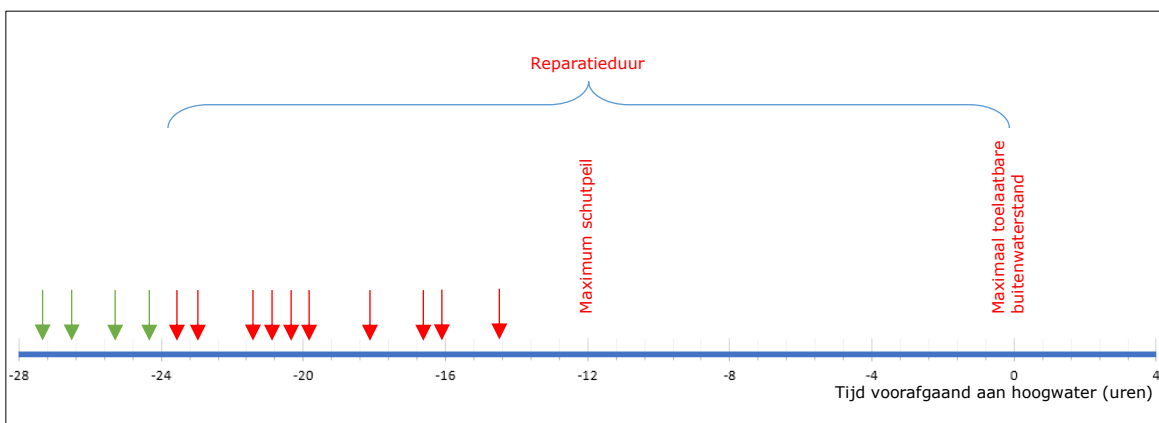
N_{open}	96 /jaar	Het gemaal wordt 96 keer per jaar buiten het hoogwater ingezet
T_{open}	0 jaar	Tijdens het uitmalen is er geen gevaar voor instroming, ook niet bij een hoogwater.
T_{rep}	1/730 jaar	De reparatietijd bij een falende sluiting bedraagt een halve dag

$$P_{open} = \frac{400}{365} + N_{open} \cdot (T_{open} + T_{rep}) = 1,10 + 96 \cdot (0 + \frac{1}{730}) = 1,22$$

Hier wordt het bijzondere karakter van P_{open} (zie Bijlage A) zichtbaar, omdat een kans nooit groter kan zijn dan 1. Vermenigvuldiging met het aantal hoogwaters (3) resulteert in het gemiddeld aantal sluitingen per jaar tijdens een hoogwater. Dit is een jaarlijkse frequentie en een frequentie kan wel groter zijn dan 1.

Voorbeeld 4

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



Figuur 20: Schuttingen die nog wel op tijd gerepareerd zijn (groen) en schuttingen die er toe leiden dat het kunstwerk faalt omdat het niet gesloten is (rood)

N_{open}	10 / T_{rep}	De periode waarin de risicovolle schuttingen plaatsvinden is de 12 uur voorafgaande aan het bereiken van het maximale schutpeil. Samen met de 12 uur tussen overschrijding van het maximale schutpeil en de maximaal toelaatbare buitenwaterstand vormt dit de 24 uur die nodig is om een
------------	----------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

T_{open}	0	T_{rep}	gefaalde sluiting te repareren. In 12 uur vinden $7.300/(2 \times 365) = 10$ schuttingen plaats Het open staan vanuit de primaire functie is niet van belang, omdat het alleen om de sluitingen binnen de reparatietijd van 24 uur gaat. De duur van de opening vanuit de primaire functie doet er niet toe.
T_{rep}	1	T_{rep}	De reparatietijd is al verwerkt in het aantal sluitingen dat binnen de kwetsbare 12 uur van één reparatieperiode valt (zie hierboven bij N_{open}).

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

In dit geval wordt de kans op openstaan een frequentie, welke middels vermenigvuldiging met P_{ns} in Z23 uiteindelijk de kans wordt dat het kunstwerk ongewenst open blijft staan en ook niet meer gesloten kan worden. In feite wordt de faalkans met betrekking tot het sluitproces (zie 42) gelijk aan:

$$P_{f,sluitproces} = n \cdot P_{ns} \cdot P_{open} = 1 \cdot P_{ns} \cdot 10 = 10 \cdot P_{ns}$$

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

Te sluiten bij hoogwater

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

Voorbeeld 1

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

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

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

Voorbeeld 2

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

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

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

In bovenstaand voorbeeld komt duidelijk naar voren dat het model op de aanname berust dat de hoogwaters gelijkelijk verdeeld zijn binnen een jaar. Indien gebruik wordt gemaakt van de aanname dat circa 10% van de hoogwaters per jaar zich buiten het stormseizoen voordoen en de overige 90% in het stormseizoen, dan kan dit gegeven in het model worden ingebracht via de kans op openstaan¹⁴. Geredeneerd vanuit de hoogwaters geldt immers dat dit kunstwerk voor 90% van het jaar een kunstwerk type "altijd hoogwater kerend gesloten" is en voor 10% is het een kunstwerk type "te sluiten bij hoogwater". Indien dit wordt toegepast kan nog steeds gebruik worden gemaakt van het model voor P_{open} , echter dient T_{open} dan gezien te worden in het licht van verdeling van het aantal hoogwaters:

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

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

Het is duidelijk dat het meenemen van een verdeling van hoogwaters over het jaar kan leiden tot een aanscherping van de getalswaarde van P_{open} .

3.5.2 Kans mislukken sluiting

Wat is het

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

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 7)

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

¹⁴ Wat een hoogwater is, wordt bepaald door die buitenwaterstand die tot substantiële gevolgen in het achterland leidt. Vanuit deze optiek kan bij een keersluis die ook wel eens in het zomerseizoen gesloten moet worden het nodig zijn om de verhouding 90-10 aan te passen.

Hoe te bepalen

Bij het bepalen van deze kans is het zinvol om onderscheid te maken tussen hoogwater kerende keermiddelen die vanuit hun dagelijks functioneren bediend worden en keermiddelen die alleen bij een hoogwater gesloten worden.

Bij de eerste groep keermiddelen is sprake van enkele tot vele sluitingen per jaar. De kans kan worden bepaald met de standaardfaalkansen voor diverse keermiddelen die opgenomen zijn in bijlage B van de Werkwijzer Ontwerpen Waterkerende Kunstwerken [16]. Indien in een nadere bepaling van de faalkans van onderdelen van de keermiddelen benodigd is kan gebruik worden gemaakt de excelsheet "RWS Faaldata voor opdrachtnemers"¹⁵ of gegevens van de producenten.

Voor de tweede groep geldt een veel kleinere sluitfrequentie; het keermiddel sluit alleen bij de jaarlijkse oefening(en) en eventuele daadwerkelijke sluitingen voor hoogwater. Hier is veel minder sprake van automatisme en ervaring met het keermiddel en het sluitproces. De kans op niet sluiten is over het algemeen dan ook groter dan bij frequent sluitende keermiddelen. De faalkans kan op verschillende wijzen worden bepaald. In eerste instantie kan gebruik worden gemaakt van de "Werkwijze bepalen kans op niet sluiten per sluitvraag met scoretabellen" [35]. Deze methode is generiek toepasbaar voor keermiddelen die alleen sluiten voor hoogwater. Wanneer een scherpere inschatting van de kans benodigd is kan een risicoanalyse op maat worden gemaakt.

Aandachtspunten

Bij het bepalen van de kans op niet sluiten (P_{ns}) is het van belang om bij meerdere doorstroomopeningen ($n > 1$) de gehele configuratie te beschouwen. In het instrumentarium kan slechts één waarde van P_{ns} worden ingevuld. Dit betekent dat er de volgende mogelijkheden zijn bij meerdere doorstroomopeningen:

- Voor P_{ns} wordt een waarde ingevuld die representatief is voor één enkele doorstroomopening. Middels de waarde voor n (zie paragraaf 3.5.3) kan vervolgens het aantal doorstroomopeningen worden verdisconteerd. Dit levert een nauwkeurig resultaat er sprake is van geheel identieke doorstroomopeningen en onafhankelijke keermiddelen die allemaal even betrouwbaar zijn.
- Voor de kans op niet sluiten wordt van het systeem van doorstroomopeningen één totale faalkans sluiting (P_{ns}) afgeleid. Dit kan praktisch zijn wanneer doorstroomopeningen een van elkaar afwijkende faalkans voor sluiting hebben of als er sprake is van een behoorlijke mate van afhankelijkheid. De waarde van n dient in dat geval 1 te zijn.

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

Bij de bepaling van de kans op niet sluiten is het van belang dat de inzet en werking van de keermiddelen helder is. Zo zijn er keermiddelen die niet op stroom ingezet kunnen worden. Dergelijke keermiddelen moeten dus tijdig gesloten worden. De inzet en werking van keermiddelen

¹⁵ Achterliggend rapport RWS faaldata, Toelichting bij Excel Werkboek "RWS Faaldatabase.xlsm", NRG, rev 0, 02-06-2015 definitief

dient aantoonbaar vastgelegd te zijn in de protocollen die voor hoogwaterkeren gelden. Hoogwatersluitingen dienen ook periodiek geoefend te worden.

Voorbeeld

Eenvoudig enkelvoudig kunstwerk

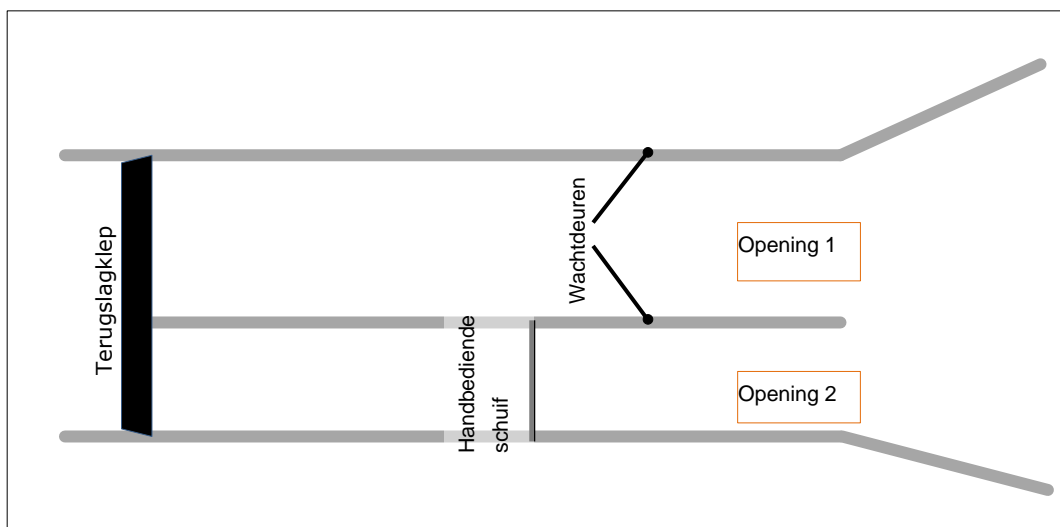
Een kunstwerk heeft een doorstroomopening door de waterkering en is voorzien van een terugslagklep die meerdere keren per dag functioneert vanuit de primaire functie van het kunstwerk en een handbediende spindelschuif. De terugslagklep sluit automatisch na elke lozing. De spindelschuif wordt alleen bediend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

Voor de terugslagklep kan gebruik worden gemaakt van de standaardfaalkansen die hiervoor beschikbaar zijn. Een faalkans van $1,0 \cdot 10^{-5}$ per vraag kan hier bijvoorbeeld voor worden gebruikt (zie bijlage B uit [16]).

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

Kunstwerk met meerdere doorstroomopeningen

In Figuur 21 is schematisch de situatie van een kunstwerk met een tweetal doorstroomopeningen weergegeven. De openingen worden afgesloten door een gezamenlijke terugslagklep en een handbediende schuif dan wel wachtdeuren. De doorstroomopeningen hebben verschillende doorstroomoppervlakken. Het vrije doorstroomoppervlak van opening 1 is twee keer zo groot als dat van opening 2.



Figuur 21: Schematische weergave van kunstwerk met verschillende typen keermiddelen

Er wordt rekening gehouden met de volgende kansen op niet-sluiten van de diverse keermiddelen (specifiek voor onderhavige situatie; niet gerelateerd aan een specifieke leidraad):

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

Gemakshalve wordt aangenomen dat alle keermiddelen onafhankelijk zijn.

Per doorstroomopening kan nu een kans op niet-sluiten worden bepaald en gekeken worden welke situatie dan ontstaat:

Opening 1 alleen niet gesloten:

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

per vraag

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

Opening 2 alleen niet gesloten:

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

per vraag

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

Opening 1 en 2 beide niet gesloten:

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

per vraag

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

In het instrumentarium dient nu uiteindelijk die situatie te worden ingevuld die beeldbepalend is voor dit kunstwerk. Dit kan betekenen dat de bovenstaande drie gevallen apart in Riskeer doorgerekend moeten worden (invoer P_{ns} , n en B), om vervolgens een keuze te maken. Omdat geen sprake is van identieke onafhankelijk doorstroomopeningen dient voor de parameter n (zie paragraaf 3.5.3) voor alle bovenstaande gevallen de waarde '1' te worden ingevuld.

3.5.3 Aantal identieke doorstroomopeningen

Wat is het

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

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 7)

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

Hoe te bepalen

De waarde voor n kan worden bepaald aan de hand van de configuratie van het kunstwerk en de daarin aanwezige keermiddelen. Zodra er sprake is van één doorstroomopening, is de waarde van n vanzelfsprekend gelijk aan 1.

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

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

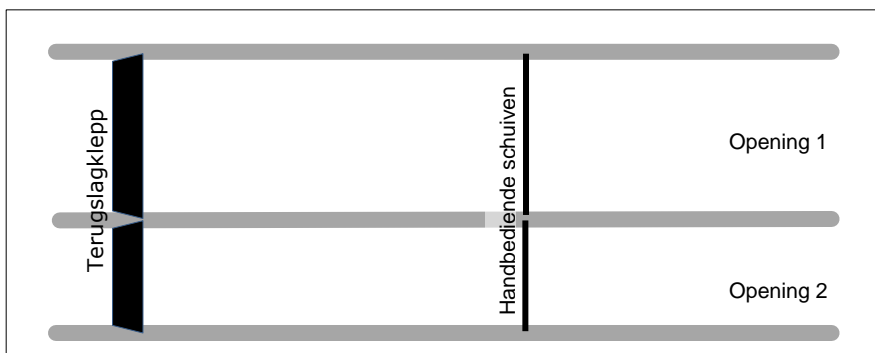
Aandachtspunten

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

Men dient erop bedacht te zijn dat n geen invloed heeft op het doorstroomoppervlak. Dus indien er twee doorstroomopeningen zijn en n is de waarde 2 toegekend, dient voor het doorstroomoppervlak het totale doorstroomoppervlak te worden ingegeven en niet slechts die van één doorstroomopening. De n -factor is wel gekoppeld aan de correlatie van sluiting van de doorstroomopeningen. Alleen als het falen van de sluiting van n doorstroomopeningen geheel ongecorrleerd is kan n ook zo worden toegepast.

Voorbeeld

Een kunstwerk met een tweetal kokers door de waterkering. De kokers zijn beide voorzien van dezelfde type keermiddelen, waarbij de belangrijkste faaloorzaken onafhankelijk zijn van elkaar. De doorstroomopeningen hebben verschillende doorstroomoppervlakten. In Figuur 22 is een schematisch overzicht gegeven.



Figuur 22: Schematische kunstwerk met twee kokers met handbediende schuiven en terugslagkleppen

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

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

Een scherper beoordeling wordt verkregen als de volgende twee situaties worden geanalyseerd en de met de beeldbepalende situatie rekening wordt gehouden. Als de keermiddelen onafhankelijk zijn, geldt:

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

3.6 Deelfaalmechanisme Z24: falen van herstel van het sluitproces

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

De faalfunctie voor het falen van het sluitproces is:

$$Z = -\Phi^{-1}(P_{f,herstel}) - u \tag{45}$$

Waarin:

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

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

3.6.1 Faalkans herstel van gefaalde situatie

Wat is het

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

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 7)

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

Er zijn verschillende mogelijkheden om de faalkans herstel van gefaalde situatie te modelleren in Riskeer. Wanneer de faalkans van de reguliere sluiting P_{ns} middels de Werkwijze bepalen kans op niet sluiten per sluitvraag met scoretabellen 0 is bepaald, is deze faalkans herstel van gefaalde

situatie reeds opgenomen in P_{ns} . In dat geval kan de parameter $P_{f,herstel}$ gelijk worden gesteld aan '1,0'.¹⁶

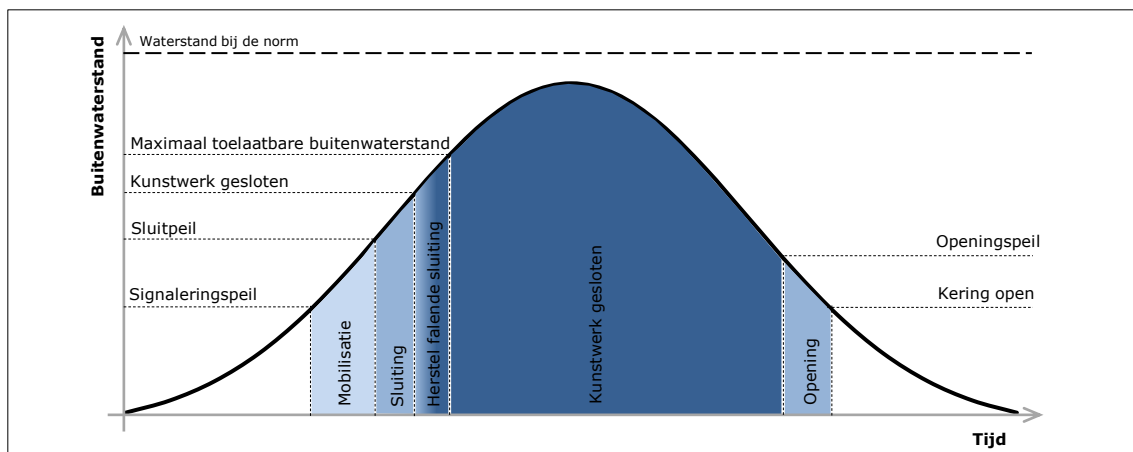
Wanneer een risicoanalyse op maat is gemaakt voor het bepalen van P_{ns} , kan het ook zijn dat de faalkans herstel van gefaalde situatie reeds is opgenomen in P_{ns} . Dit dient goed nagegaan te worden, om dubbeltellingen te voorkomen.

Hoe te bepalen

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

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

ad 1. In Figuur 23 is het tijdverloop van een sluiting schematisch weergegeven naast het tijdverloop van de buitenwaterstand.



Figuur 23: Schematisch verloop sluitingsprocedure bij een hoogwatergolf

Toelichting bij Figuur 23:

In eerste instantie wordt een komende hoogwatergolf gesignaleerd via metingen en voorspellingen. Hierop volgt een mobilisatie ten einde de kering te kunnen sluiten. Bij het bereiken van het sluitpeil dient daadwerkelijk tot sluiting overgegaan te worden. Indien er voldoende tijd is tussen het sluitpeil en het bereiken van de maximaal toelaatbare buitenwaterstand bij niet hoogwaterkerend gesloten kunstwerk, en de mogelijkheden zijn

¹⁶ Het kan voorkomen dat er voor een kunstwerk meerdere mogelijkheden tot herstel van een gefaalde sluiting zijn. Dit kan dan niet in de scoretabellen worden verwerkt en in dat geval kan middels een gedegen onderbouwing voor $P_{f,herstel}$ nog een kleinere waarde dan 1 worden gehanteerd.

aanwezig, kunnen bij een falende sluitingsprocedure nog herstelpogingen worden gedaan om alsnog te sluiten. Wanneer dit succesvol is, is de kering alsnog hoogwaterkerend gesloten. Als de buitenwaterstand nu weer daalt, wordt op een gegeven moment de kering weer geopend.

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

- ad 2. De tijdsduur van een herstelmaatregel is van belang in relatie tot de beschikbare tijd voor het herstel. Het plaatsen van een aantal bigbags kan in 2 uur plaatsvinden als materieel voorhanden is en de te sluiten opening toegankelijk is, terwijl het verwijderen van een obstakel voor een sluisdeur veel meer tijd in beslag kan nemen.
- ad 3. De bereikbaarheid van een kunstwerk, nadat de sluiting is gefaald, is ook van belang. Indien materiaal en/of materieel, dat benodigd is voor een alternatieve sluiting, het kunstwerk niet (tijdig) kan bereiken, is herstel ook niet mogelijk. Daarnaast kan het nog mogelijk zijn dat het kunstwerk wel bereikt kan worden, maar het watervoerende element alsnog niet kan worden bereikt om een alternatieve sluiting te realiseren. Gedacht kan worden aan kokers door dijklichamen, waarbij de inspectieschacht afgesloten is of onder water staat.
- ad 4. Kunstwerken met kleinere afmetingen laten zich gemakkelijker op een alternatieve wijze sluiten dan kunstwerken met grotere afmetingen.
- ad 5. Indien door het kunstwerk onder hoogwateromstandigheden een groot verval gekeerd moet worden, dient te worden beschouwd of een alternatief keermiddel in staat is dit verval te keren.
- ad 6. De oorzaak van falen van de reguliere sluiting kan van invloed zijn op de kans van herstel. Het falen van het reguliere sluitproces kan op diverse aspecten optreden. In lijn met de scoretabellen zijn dit Alarmering, Mobilisatie, Bediening en Technisch falen. Bij het in rekening brengen van $P_{f,herstel}$ is het van belang om te kijken op welk(e) aspect(en) de herstelmaatregelen van invloed zijn. In veel gevallen zullen herstelmaatregelen voornamelijk van invloed zijn op Technisch falen en/of Bediening. Wanneer deze aspecten niet dominant zijn voor de faalkans van sluiten (P_{ns}), zullen deze herstelmaatregelen niet of nauwelijks een reductie van de faalkans opleveren.

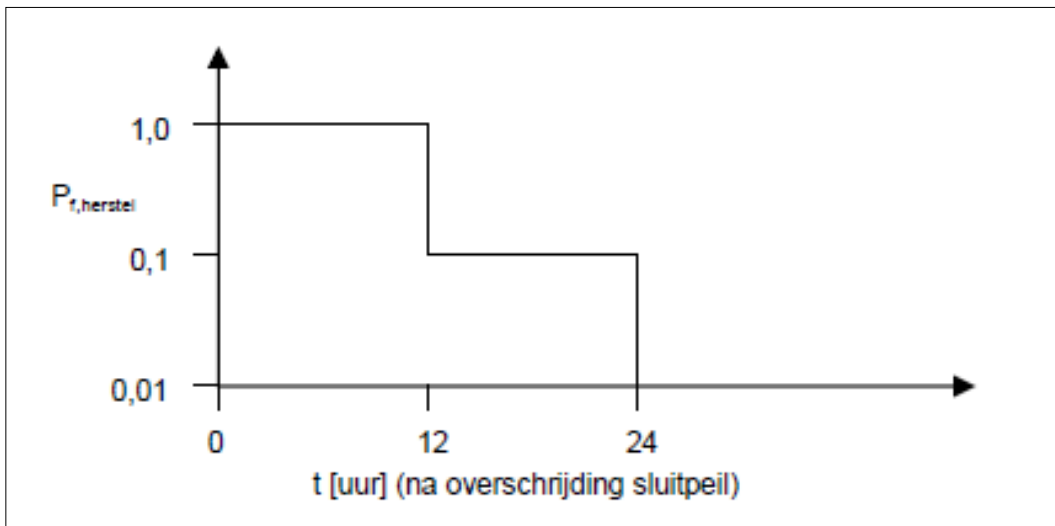
Aan de hand van de bovenstaande punten worden handreikingen gegeven voor inschatting van de faalkans van herstel. Deze handreikingen zijn met name gekoppeld aan het tijdsaspect (punt 1).

Handreiking 1

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

Handreiking 2

Binnen BOI kan ter indicatie van orde van grootte van de faalkans van herstel van een gefaalde situatie gebruik gemaakt worden van onderstaande Figuur 24. De figuur is in VNK2 gebruikt voor kunstwerken zoals coupures in het rivierengebied waar in de uren na overschrijding van het sluitpeil geen zware storm te verwachten is.



Figuur 24: Faalkans van herstel op basis van beschikbare tijd t [uur] voordat niet meer kan worden gesloten

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

Voorts wordt opgemerkt dat Figuur 24 niet meer dan een eenvoudige handreiking vormt. Omdat de sluiting van ieder kunstwerk uniek is en maatwerk vereist kan de beheerder te allen tijde hiervan afwijken. De achterliggende gedachte dat de kans op herstel toeneemt naarmate er meer tijd beschikbaar is, is natuurlijk wel generiek.

Handreiking 3

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

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

Handreiking 4

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

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

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

Aandachtspunten

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

Voorbeeld

Voor een coupure in het bovenrivierengebied geldt dat de tijd tussen het sluitpeil en de maximaal toelaatbare buitenwaterstand bij niet hoogwaterkerend gesloten kunstwerk gelijk is aan 16 uur. De

coupure is 4,0 m breed en de kerende hoogte van de aluminium schotbalken bedraagt 1,0 m. Daarmee wordt de kerende hoogte van de coupure gelijk aan die van het aangrenzende dijklichaam. Achter de coupure is direct een binnenstad aanwezig, zodat instroming door de coupure direct minimaal tot overlast leidt.

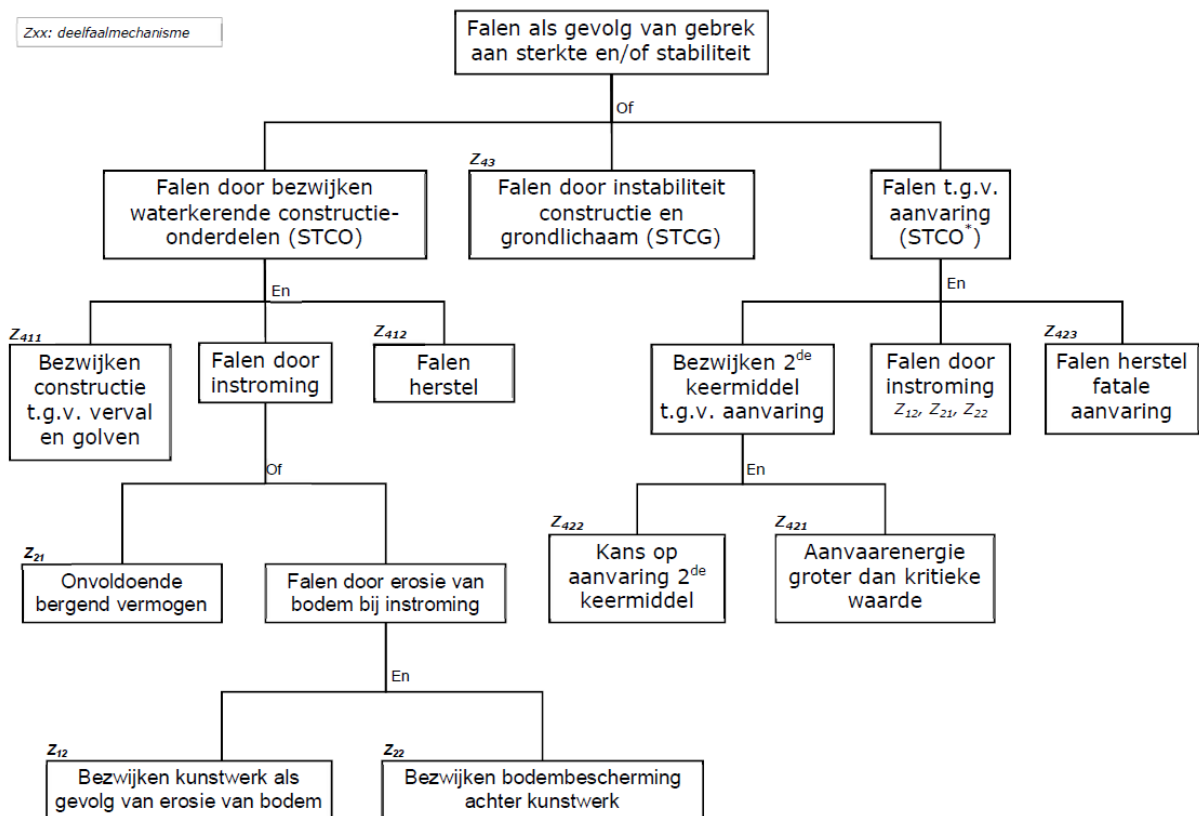
Op een gegeven moment komt er een hoogwatergolf aan. Op het moment dat het sluitpeil optreedt, tracht men de coupure te sluiten. Men komt er op dat moment achter dat de schotbalksponning aan één zijde zojuist kapot is gereden, waardoor een reguliere sluiting niet mogelijk is. De schotbalken kunnen aan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

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

4 Analyse met behulp van Riskeer – sterkte en/of stabiliteit puntconstructies

In dit hoofdstuk is de bepaling van de faalkans met behulp van Riskeer (onderdeel van het instrumentarium van BOI) voor het faalmechanisme *sterkte en/of stabiliteit puntconstructies* opgenomen. Er wordt daarbij ingegaan op het afleiden van waarden voor de diverse betrokken parameters. Per parameter wordt aangegeven wat de parameter precies inhoudt, hoe de waarde kan worden bepaald, wat aandachtspunten zijn et cetera. Daarnaast worden op diverse plaatsen voorbeelden gegeven hoe de parameterwaarde te bepalen.

Basis voor de faalkansberekening is onderstaande modellering van het faalmechanisme *niet sluiten* in Riskeer. Deze wijkt enigszins af van de foutenboom in de handleiding kunstwerken [38], waar de tak 'Falen t.g.v. aanvaring' buiten beschouwing is gelaten.



Figuur 25: Modellering faalmechanisme sterkte en/of stabiliteit puntconstructies in Riskeer

4.1 Beperkingen Riskeer

De beide faalmechanismen *STCO* en *STCG* die onder *sterkte en stabiliteit puntconstructies* vallen bevatten alle bezwijk- en instabiliteitsmechanismen die kunnen optreden met als gevolg een overstroming. Afhankelijk van de opbouw en constructiewijze van het kunstwerk zouden voor zowel *STCO* als *STCG* daartoe op maat gesneden grenstoestandfuncties moeten worden gedefinieerd, passend bij het beschouwde bezwijk- en instabiliteitsmechanisme, welke door het instrumentarium

(Riskeer) worden gebruikt¹⁷. Helaas is deze werkwijze voor de beoordeling met het instrumentarium niet mogelijk. Riskeer heeft slechts één sterk vereenvoudigde generieke grenstoestandsfunctie ter beschikking voor zowel het bezwijk- als instabiliteitsmechanisme.

- In de praktijk komt het er voor *STCO* op neer dat het mogelijk is om slechts één onderdeel van de constructie in te voeren in plaats van de gehele constructie. Om een representatieve faalkans te bepalen dient gezocht te worden naar het dominante constructieonderdeel. Wanneer een kunstwerk te complex is om een dominant constructieonderdeel te bepalen, is een analyse buiten Riskeer nog een mogelijke optie.
- Voor *STCG* is een beoordeling met behulp van Riskeer lastig/beperkt mogelijk.

Nadere toelichting:

De faalmechanismen *STCO* en *STCG* worden in Riskeer middels een sterk vereenvoudigde grenstoestandsfunctie beschreven, namelijk $Z = R - S$. Hierin stelt *S* de belasting voor en *R* de sterkte, waarbij de sterkte *R* bestaat uit één in te voeren waarde. Dit betekent dat voor elk van de faalmechanismen de totale set mogelijke faalwijzen moet worden gereduceerd tot één enkele/dominante faalwijze. Het bepalen van de dominante faalwijze voor zowel sterkte (*STCO*) als stabiliteit (*STCG*) en het vaststellen van de sterkten hiervan vindt geheel buiten het instrumentarium om plaats. De sterkte wordt hierbij uitgedrukt in een kritieke waterdruk. Andere sterktebeschrijvingen zijn in beide modellen niet voorhanden. De door de gebruiker ingevulde waarden van de sterkte en de stabiliteit komt tot stand na een proces van het selecteren van het dominante onderdeel/faalwijze en vervolgens het bepalen van de sterkte hiervan.

Voor veel waterkerende constructies in Nederland levert deze werkwijze een conservatief resultaat op. Alhoewel waterkerende constructies voor de functie waterkeren meestal seriesystemen zijn, wat mogelijk leidt tot onderschatting van de faalkans, zijn de faalkansbijdragen van andere constructieonderdelen meestal klein. Daarnaast is er binnen het waterkerende hoofdconstructieonderdeel meestal sprake van herverdeling van krachtsafdracht na bezwijken, wat niet wordt meegenomen in de beschreven werkwijze (bijvoorbeeld: de horizontale stabiliteit wordt in eerste instantie geleverd door grondwrijving, maar kan uiteindelijk ook via een aanwezig paalfundering plaatsvinden).

4.2 Overzichtstabel parameters Riskeer

Per modelparameter wordt in onderstaande Tabel 12 een aantal standaardgegevens gepresenteerd. Ook de naamgeving en verwijzing naar benamingen van invoer in Riskeer is in deze tabel opgenomen. Voor de duiding van de gegeven parameterwaarden voor het gemiddelde μ en de standaardafwijking σ / variatiecoëfficiënt V_r is de indeling gebruikt die vermeld is in Tabel 13.

¹⁷ Zie voor een toelichting hierop hoofdstuk 7 in de Werkwijzer Ontwerpen Waterkerende Kunstwerken **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**

Tabel 12: Waarden behorende bij de statistische gegevens voor de relevante parameters

Symbol	Benaming	eenheid	type	μ	V_r of σ	Groep	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t	Par.	CSV-bestand Riskeer
B_M	Bermbreedte	[m]	det	Invoer	-	4(μ)	-	-	-	-	4.3.1.1	KW_STERSTAB11
h_{kr}	Kerende hoogte	[m+NAP]	nor	Invoer	$\sigma=0,05$	4(μ) en 2(σ)	-	-	-	1	4.3.1.2	KW_STERSTAB14
Δh	Afstand onderkant wand en teen van dijk/berm	[m]	det	Invoer	-	4(μ)	-	-	-	-	4.3.1.3	KW_STERSTAB15
N	Aantal golven per stormgebeurtenis	[-]	det	5000	-	4(μ)	-	-	-	-	4.3.1.4	
λ_1	Modificatiefactor voor geometrie van constructie	[-]	det	1,0	-	1(μ)	-	-	-	-	4.3.1.5	
λ_2	Modificatiefactor voor aard van constructie	[-]	det	1,0	-	1(μ)	-	-	-	-	4.3.1.6	
θ_{kw}	Oriëntatie	[graden]	det	Invoer	-	4(μ)	-	-	-	-	4.3.1.7	KW_STERSTAB1
m_s	Modelfactor belastingeffect	[-]	nor	1,0	$\sigma=0,05$	1(μ) en 1(σ)	-	-	-	1	4.3.2.1	
h_j	Analysehoogte	[m+NAP]	det	Invoer	-	4(μ)	-	-	-	-	4.3.2.2	KW_STERSTAB13
R_{lin}	Lineaire belastingschematisering constructieve sterkte	[kN/m ²]	logn	Invoer	$V_r=0,10-0,30$	4(μ) en 4(V_r)	-	-	-	1	4.3.2.3	KW_STERSTAB9
R_{kwad}	Kwadratische belastingschematisering constructieve sterkte	[kN/m]	logn	Invoer	$V_r=0,10-0,30$	4(μ) en 4(V_r)	-	-	-	1	4.3.2.4	KW_STERSTAB10
$h_{bi,CB}$	Binnenwaterstand bij constructief falen	[m+NAP]	nor	Invoer	$\sigma=0,1$	4(μ) en 2(σ)	-	-	-	1	4.3.2.5	KW_STERSTAB12
$R_{stab\ verlies, lin}$	Lineaire belastingschematisering stabiliteit	[kN/m ²]	logn	Invoer	$V_r=0,10-0,30$	4(μ) en 4(V_r)	-	-	-	1	4.4.1	KW_STERSTAB23
$R_{stab\ verlies, kwad}$	Kwadratische belastingschematisering stabiliteit	[kN/m]	logn	Invoer	$V_r=0,10-0,30$	4(μ) en 4(V_r)	-	-	-	1	4.4.2	KW_STERSTAB24
$f_{nivellering}$	Aantal nivellerings per jaar	[1/jaar]	det	Invoer	-	4(μ)	-	-	-	-	4.5.1	KW_STERSTAB20
$P_{aanvaring; nivellering}$	Kans op aanvaring tweede keermiddel per nivellering	[1/niv.]	det	Invoer	-	4(μ)	-	-	-	-	4.5.2	KW_STERSTAB21
E_c	Bezwijkwaarde aanvaarenergie	[kNm]	logn	Invoer	$V_r=0,3$	4(μ) en 1(V_r)	-	-	-	-	4.6.1	KW_STERSTAB17
m	Massa van het schip	[ton]	nor	Invoer	$V_r=0,2$	4(μ) en 2(V_r)	-	-	-	-	4.6.2	KW_STERSTAB18
m_E	Modelfactor voor aanvaarbelasting	[-]	nor	1,0	$V_r=0,2$	1(μ) en 1(V_r)	-	-	-	-	4.6.3	
v	Aanvaarsnelheid	[m/s]	nor	Invoer	$V_r=0,55$	4(μ) en 4(V_r)	-	-	-	1	4.6.4	KW_STERSTAB19
$V_{c,sluit}$	Kritieke stroomsnelheid sluiting eerste keermiddel	[m/s]	nor	Invoer	$V_r=0,2$	4(μ) en 1(V_r)	-	-	-	1	4.7.1	KW_STERSTAB22
h_{bi}	Binnenwaterstand	[m+NAP]	nor	Invoer	$\sigma=0,1$	4(μ) en 2(σ)	-	0	12 uur	1	4.7.2 en 4.8.7.3	KW_STERSTAB5
m_{kom}	Modelfactor kombergend vermogen	[-]	logn	1,0	$\sigma=0,20$	1(μ) en 1(σ)	-	0	-	1	4.8.1	
A_{kom}	Kombergend oppervlak	[m ²]	logn	Invoer	$V_r=0,10$	4(μ) en 2(V_r)	-	0	-	1	4.8.2	KW_STERSTAB2
Δh_{kom}	Toegestane peilverhoging komberging	[m]	logn	Invoer	$\sigma=0,10$	4(μ) en 2(σ)	-	0	-	1	4.8.3	KW_STERSTAB3
m_{in}	Modelfactor instromend volume	[-]	det	1,0	-	1(μ)	-	-	-	1	4.8.4	

Symbol	Benaming	eenheid	type	μ	V _r of σ	Groep	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t	Par.	CSV-bestand Riskeer
$f_{ts open}$	Factor voor stormduur hoogwater	[-]	det	1,0	-	2(μ)	-	-	-	1	4.8.5	
t_s	Stormduur	[uur]	logn	6,0	$V_r=0,25$	2(μ) en 1(V_r)	-	1	-	0	4.8.6	
B	Breedte van doorstroomopening	[m]	nor	invoer	$\sigma=0,05$	4(μ) en 2(σ)	-	0	-	1	4.8.7.1	KW_STERSTAB4
m_{vl}	Modelfactor lange overlaat	[-]	nor	0,9	$\sigma=0,05$	1(μ) en 1(σ)	-	0	-		4.8.7.2	
h_{dr}	Drempelhoogte	[m+NAP]	nor	Invoer	$\sigma=0,10$	4(μ) en 2(σ)	-	0	-	1	4.8.7.4	KW_STERSTAB6
μ	Afvoercoëfficiënt	[-]	logn	1,0	$\sigma=0,20$	2(μ) en 2(σ)	-	0	-	1	4.8.7.5	
A	Doorstroomoppervlak	[m ²]	nor	Invoer	$\sigma=0,01$	4(μ) en 2(σ)	-	0	-	1	4.8.7.6	KW_STERSTAB25
q_c	Kritiek instromend debiet	[m ³ /s/m]	logn	Invoer	$V_r=0,15$	4(μ) en 2(V_r)	-	0	-	1	4.9.1	KW_STERSTAB7
B_{sv}	Stroomvoerende breedte bodembescherming	[m]	logn	Invoer	$\sigma=0,05$	4(μ) en 2(σ)	-	0	-	1	2.2.2	KW_STERSTAB8
$P_{f,kw erosie\ bodem}$	Faalkans gegeven erosie bodem	[-]	det	1,0	-	2(μ)	-	1	-	1	4.9.4	
$P_{f,herstel\ sluiting}$	Faalkans herstel van gefaalde situatie	[-]	det	1,0	-	2(μ)	-	-	-	-	4.10.1	KW_STERSTAB16

* ¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 13)

Tabel 13: Indeling bij duiding van de parameterwaarden

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

In Tabel 14 zijn de statistische parameters die gebruikt zijn in Tabel 11 nader toegelicht.

Tabel 14: Toelichting gegevens vermeld bij parameters in Tabel 13

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

4.3 Deelfaalmecanisme Z411 Bezwijken waterkerende constructieonderdelen t.g.v. verval en golven

Het falen van een kunstwerk als gevolg van een tekort aan sterkte wordt geïnitieerd doordat een constructieonderdeel bezwijkt. Oorzaak voor dit bezwijken is het optreden van een groot verval over het constructieonderdeel, wat op zichzelf weer wordt veroorzaakt door een hoge buitenwaterstand en eventuele golfbelastingen. De kans dat de sterkte van het constructieonderdeel kleiner is dan de optredende belasting is vastgelegd met behulp van de volgende parameters:

- Constructieve sterkte (R).
- Optredende waterbelasting (S).
- Modelfactor belastingeffect (m_s).

De modelfactor voor het belastingeffect brengt de onzekerheid in rekening waarmee belastingen (druk) uiteindelijk doorwerken op het belastingeffect (snedekrachten dan wel spanningen).

Afhankelijk van het constructieonderdeel en de sterktegegevens hiervan kan zowel de sterkte als de belasting middels een lineair dan wel kwadratisch model worden beschreven. De keuze voor welk model toe te passen moet op basis van de beschikbare gegevens en de opbouw van de constructie worden onderbouwd.

Golfbelastingen worden in Riskeer automatisch meegenomen, doordat het golfbelastingmodel van Goda-Takahashi in Riskeer is ingebouwd. Dit model bepaalt op basis van de golfbelastingen uit HydraRing de maximale golfhoogte in een stormgebeurtenis en de bijbehorende drukverdeling langs de verticaal. Met behulp van enkele invoergegevens worden vervolgens de belastingen op het beschouwde constructieonderdeel berekend. De schematisering op parameterniveau is opgeknipt in een tweetal delen, te weten de bepaling van de parameters voor het model van Goda-Takahashi (paragraaf 4.3.1) en de parameters voor de deelfaalmechanisme Z411 (paragraaf 4.3.2).

De grenstoestandfuncties voor het Falen door bezwijken van waterkerende constructieonderdelen (Z411) als gevolg van vervalbelastingen zijn:

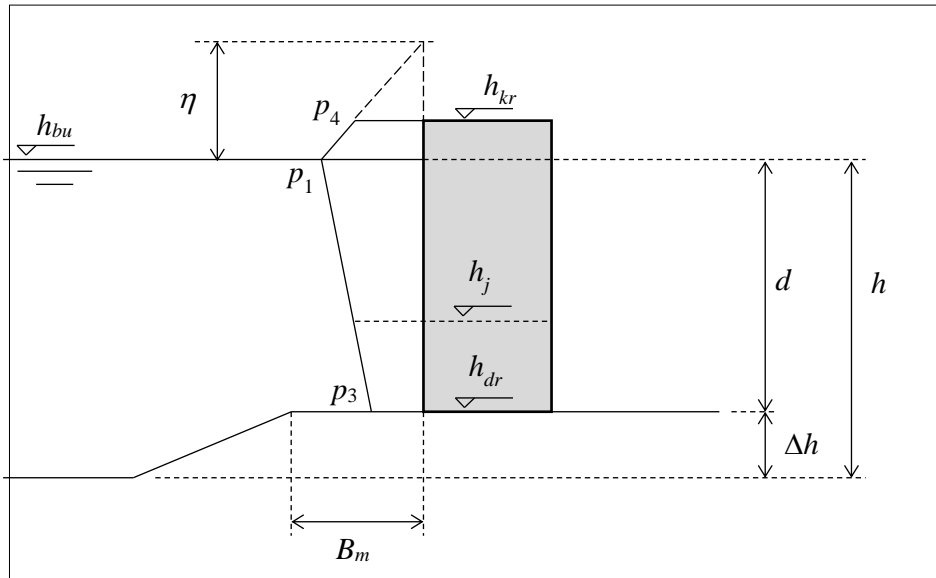
$$Z_{lin} = R_{lin} - m_s \cdot S_{lin} \quad \text{lineair model} \quad 46$$

$$Z_{kwad} = R_{kwad} - m_s \cdot S_{kwad} \quad \text{kwadratisch model} \quad 47$$

De beperkingen en mogelijkheden van deze grenstoestandfuncties zijn besproken in paragraaf 4.6.4.1 van de handleiding kunstwerken [38].

4.3.1 *Parameters voor het model van Goda-Takahashi*

Het model van Goda-Takahashi kent meerdere parameters. Middels een aantal van die parameters kan een situatie met golfbelastingen worden beschreven. Voor een aantal parameters geldt daarnaast dat dit 'hulpparameters' zijn, waarmee de uiteindelijke golfdrukken op verschillende hoogte worden berekend. In deze paragraaf wordt alleen ingegaan op de parameters die door de gebruiker kunnen worden beïnvloed en die dus de lokale situatie beschrijven.



Figuur 26: Schematische weergave situatie met golven en parameters Goda-Takahashi-model

In Figuur 26 is een schematische weergave opgenomen van een situatie waarbij de buitenwaterstand (h_{bu}) lager is dan de kerende hoogte van het constructieonderdeel, maar wel golven aanwezig zijn. De golfdrukfiguur conform Goda-Takahashi is hierbij ook weergegeven.

De parameters die kunnen worden ingevoerd en die specifiek gerelateerd zijn aan het model van Goda-Takahashi zijn:

Constructie

B_M	Bermbreedte
h_{kr}	Kerende hoogte
Δh	Afstand onderkant wand en teen van dijk/berm
h_{dr}	Drempelhoogte

Golven

N	Aantal golven per stormgebeurtenis
---	------------------------------------

Modelparameters

λ_1	Modificatiefactor geometrie constructie
λ_2	Modificatiefactor aard constructie
θ_{kw}	Oriëntatie (Hoek tussen lijn loodrecht op de constructie en het noorden)

De parameter h_j betreft de hoogte van de constructie waarop de sterkte van de constructie wordt gecontroleerd. Deze parameter is daarmee niet specifiek gerelateerd aan de golfbelasting, maar heeft ook een relatie met de statische vervalbelasting. De parameter h_{dr} wordt besproken in paragraaf 4.8.7.4.

4.3.1.1 Bermbreedte

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
B_M	[m]	det	0,0 ⁴	-	-	-	-	-

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 13)

De parameter B_M is de bermbreedte van eventueel aanwezige berm bij het kunstwerk.

Hoe te bepalen

De parameter kan bepaald worden vanaf tekening, maar ook meting in het veld is mogelijk. Voor zeer veel waterkerende kunstwerken geldt dat er geen sprake is van een berm. In dat geval wordt de standaardwaarde van 0,0 m niet aangepast.

Aandachtspunten

Indien er geen berm is en dus voor B_M de waarde 0,0 wordt ingevuld, dient voor de parameter $\square h$ (bermhoogte, zie paragraaf 4.3.1.3) ook een waarde van 0,0 te zijn ingevuld. Er is immers geen bermhoogte.

Voorbeeld

N.v.t.

4.3.1.2 Kerende hoogte

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
h_{kr}	[m NAP]	nor	invoer ⁴	$\sigma=0,05$ ²	KW	0	-	1

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 13)

De parameter h_{kr} is de hoogte van de bovenkant van het beschouwde constructieonderdeel.

Hoe te bepalen

De parameter kan bepaald worden vanaf tekening, maar ook meting in het veld is mogelijk.

De standaardafwijking kan worden aangepast door de gebruiker. Dit kan alleen plaatsvinden als dit ook voldoende kan worden onderbouwd.

Aandachtspunten

N.v.t.

Voorbeeld

N.v.t.

4.3.1.3 Afstand onderkant wand en teen van dijk/berm (Bermhoogte)

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
Δh	[m]	det	0,0 ⁴	-	-	-	-	-

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 13)

De bermhoogte Δh betreft de verticale afstand tussen onderkant constructie en teen van de dijk/berm.

Hoe te bepalen

De parameter kan bepaald worden vanaf tekening, maar ook meting in het veld is mogelijk. Voor zeer veel waterkerende kunstwerken geldt dat er geen sprake is van een berm. In dat geval wordt de standaardwaarde van 0,0 m toegepast.

Aandachtspunten

De parameter hangt samen met de breedte van de berm (B_M zie paragraaf 4.3.1.1). Indien er geen berm aanwezig is dienen beide parameters de waarde 0,0 te hebben toegewezen.

Voorbeeld

N.v.t.

4.3.1.4 Aantal golven per stormgebeurtenis

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
N	[-]	det	5000 ²	-	-	-	-	-

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 13)

Deze parameter representeert het aantal golven dat zich voordoet gedurende een stormgebeurtenis.

Hoe te bepalen

Standaard staat de waarde op 5000 golven. Deze waarde mag alleen worden aangepast door deskundige gebruikers.

Aandachtspunten

Aanpassen van standaardwaarde mag alleen plaatsvinden door deskundigen. Opgemerkt wordt dat de relatieve invloed van de parameter beperkt is.

Voorbeeld

N.v.t.

4.3.1.5 Modificatiefactor voor geometrie van constructie

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
λ_1	[-]	det	1,0 ¹	-	-	-	-	-

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 13)

Dit betreft een speciale factor van het model van Goda-Takahashi, waarmee de invloed van de geometrie van de constructie op de golfdrukken wordt verrekend.

Hoe te bepalen

De parameter heeft standaard een waarde van 1,0.

Aandachtspunten

N.v.t.

Voorbeeld

N.v.t.

4.3.1.6 Modificatiefactor voor aard van constructie

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
λ_2	[-]	det	1,0 ¹	-	-	-	-	-

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 13)

Dit betreft een speciale factor van het model van Goda-Takahashi, waarmee de invloed van de aard van de verticale constructie kan worden verrekend. Dit is name relevant bij golfbrekers bestaande uit steenblokken.

Hoe te bepalen

De parameter heeft standaard een waarde van 1,0.

Aandachtspunten

N.v.t.

Voorbeeld

N.v.t.

4.3.1.7 Oriëntatie (van de normaal van de constructie)

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
θ_{kw}	[°N]	det	invoer ⁴	-	-	-	-	-

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 13)

Oriëntatie van de normaal (de as) van de constructie ten opzichte van het noorden

Hoe te bepalen

De in te voeren waarde voor deze parameter kan worden afgelezen/opgemeten uit tekeningen of met behulp van kaarten. De normaal van de constructie is hierbij

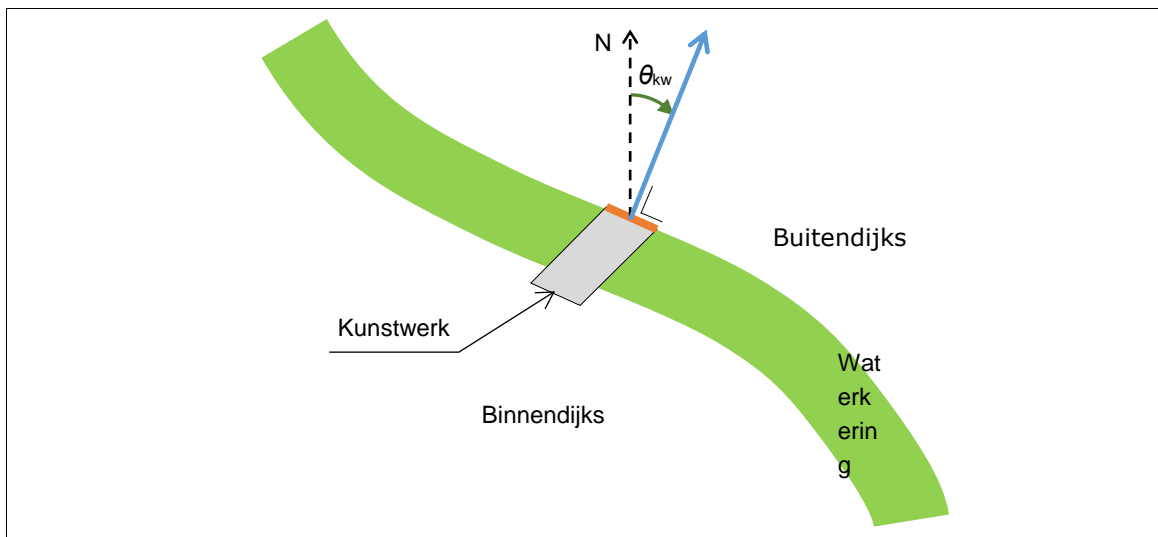
gedefinieerd als de lijn die haaks staat op de langsrichting van de waterkerende elementen. Deze lijn loopt vanaf het waterkerende element richting het buitenwater. De in te voeren hoek is gelijk aan de hoek tussen het noorden en de normaal van de constructie, waarbij met de wijzers van de klok mee gemeten wordt.

Aandachtspunten

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

Voorbeeld

In onderstaande figuur is voor een denkbeeldige situatie de oriëntatie van de constructie weergegeven. Deze bedraagt in dit geval circa 30°N .



Figuur 27: Wijze van bepaling hoek kunstwerknormaal ten opzichte van Noord

4.3.2

Parameters voor deelfaalmecanisme Z411

In paragraaf 4.3 zijn de twee mogelijke grenstoestandfuncties (Z-functies) voor Bezwijkende waterkerende constructieonderdelen door verval en golven (Z411) weergegeven (formules 46 en 47). Deze functies kennen de volgende invoerparameters:

- Lineaire belastingschematisering constructieve sterkte (lineair belastingmodel) (R_{lin}).
- Kwadratische belastingschematisering constructieve sterkte (kwadratisch belastingmodel) (R_{kwad}).
- Modelfactor belastingeffect (m_s).

De beperkingen en mogelijkheden van deze grenstoestandfuncties zijn besproken in paragraaf 4.3.

Bij aanvang van de analyse wordt beoordeeld welk belastingmodel van toepassing is, het lineaire of het kwadratische belastingmodel. Afhankelijk van het gekozen model dient een andere waarde voor de sterkte te worden ingevuld.

Daarnaast zijn de analysehoogte h_j en de binnenwaterstand met betrekking tot de sterkte van de constructie $h_{bi;CB}$ van belang. De eerste definieert de hoogte waarop

de belasting in het programma wordt bepaald (statische belasting en golfbelasting) en dit is tevens de hoogte waarop het sterkte-dominerende constructieonderdeel zich bevindt. De tweede heeft betrekking op de binnenwaterstand waarmee rekening wordt gehouden bij bepaling van de vervalbelasting.

Deze vijf parameters worden in de volgende subparagrafen behandeld.

4.3.2.1 Modelfactor belastingeffect

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
m_s	[-]	nor	1,0 ¹	$\sigma=0,05$ ¹	-	0	-	1

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 13)

De modelfactor voor het belastingeffect m_s brengt de onzekerheid in rekening waarmee de belastingen (S) uiteindelijk doorwerken op het belastingeffect (E) (waterdruk).

Hoe te bepalen

De parameter heeft standaard een waarde van 1,0 en een spreiding van 0,05. Deze waarden kunnen niet worden aangepast door de gebruiker.

Aandachtspunten

N.v.t.

Voorbeeld

N.v.t.

4.3.2.2 Analysehoogte

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
h_j	[+m NAP]	det	invoer ⁴	-	-	-	-	-

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 13)

De analysehoogte (ook wel evaluatiehoogte) h_j is een parameter die wordt gebruikt om in het geval van het lineaire belastingmodel de belasting op het gekozen dominante keermiddelonderdeel te bepalen en in het geval van het kwadratisch belastingmodel om de belasting op de totale (deel)constructie te bepalen.

Hieronder wordt afzonderlijk beschreven hoe h_j voor het lineaire en kwadratische model kan worden bepaald.

Hoe te bepalen in geval van het lineaire belastingmodel

Bij gebruik van het lineaire belastingmodel wordt gezocht naar het constructieonderdeel (element) met een dominante faalkansbijdrage. Welk constructieonderdeel dit is, is afhankelijk van (1) de constructieopbouw en (2) het verloop van de hydraulische belastingen over de constructiehoogte.

ad 1. De opbouw van de constructie bepaalt de verdeling van de sterkte over de constructie. Zo wordt bij sommige keermiddelen de hart-op-hart afstand van de dwarsdragers aan de onderzijde verkleind, omdat daar de grootste belasting optreedt. Bij een dergelijke constructieopbouw varieert de lokale

sterkte van het keermiddel over de hoogte. Hiermee moet bij de bepaling van het maatgevende onderdeel rekening worden gehouden.

ad 2. De hydraulische belastingen bepalen mede welk onderdeel het zwaarste wordt belast. De belasting bestaat uit vervalbelasting en golfbelasting. Deze twee componenten worden uiteindelijk gecombineerd en bepalen het totale belastingbeeld op de constructie.

Het onderdeel met de meest ongunstige combinatie van sterkte en belasting is dominant voor de faalkans en wordt gezocht. De hoogte van dit dominante constructieonderdeel is de analysehoogte h_j .

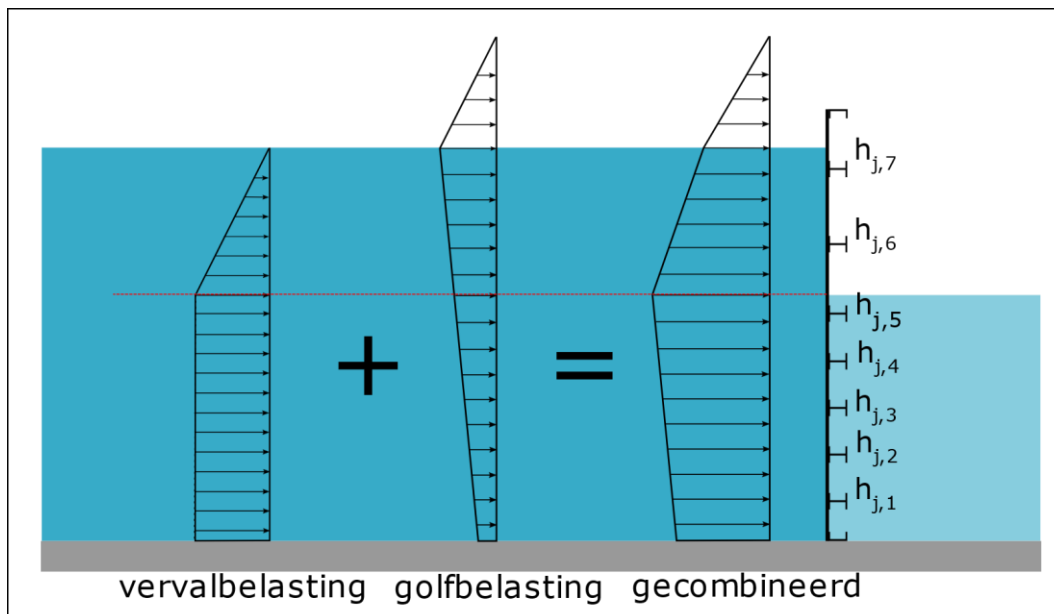
Om het maatgevende onderdeel van de constructie te bepalen kan het nodig zijn dat meerdere analyses met Riskeer worden gemaakt. De analyse leidend tot de grootste faalkans dient vervolgens als definitieve som ingevoerd te worden.

In paragraaf 4.3.2.3 en 4.3.2.4 wordt aangegeven hoe de lineaire en kwadratische sterkte term R_{lin} en R_{kwad} op de analysehoogte kunnen worden bepaald.

Voorbeeld bepalen h_j bij gebruik van het lineaire belastingmodel

In onderstaande figuur is een voorbeeld gegeven aan de hand waarvan de omgang met h_j wordt toegelicht. Het betreft een keermiddel bestaande uit een stalen plaat en horizontaal verstijfd met meerdere staalprofielen. Er is sprake van zowel vervalbelasting als golfbelasting. Er is gekozen voor het lineaire model omdat het draagsysteem globaal eenvoudig is op te splitsen in twee onderdelen: kerende plaat en dwarsdragers welke apart kunnen worden beschouwd. Vanuit het ontwerp is gekozen om te werken met identieke dwarsdragers en alleen de afstand tussen de dwarsdragers over het onderste gedeelte van de deur te verkleinen.

Om het dominante constructieonderdeel te vinden kan gebruik gemaakt worden van Figuur 28, waarin globaal het drukverloop ten gevolge van golven en waterstand is weergegeven. Zichtbaar is dat rondom het niveau van de binnenwaterstand de grootste druk optreedt en de constructie-onderdelen die zich daar bevinden worden dus vermoedelijk het zwaarste belast. Dit is in de situatie van Figuur 28 ook afhankelijk van de onderlinge afstand van de dragers.



Figuur 28: Resulterende belastingen als gevolg van verval en golven

In eerste instantie worden de kerende plaat en de dwarsdragers apart bekeken. Wanneer de dwarsdragers worden beschouwd en dus de sterkte van een dwarsdrager wordt ingevoerd als R_{lin} in paragraaf 4.3.2.3, kunnen de volgende stappen worden gemaakt om h_j te bepalen:

Bepalen maatgevende dwarsdrager

De vijfde dwarsdrager is maatgevend met betrekking tot de onderste 5 dwarsdragers. Hier bevindt zich immers de piekbelasting maar daarnaast draagt deze ook het grootste gecombineerde plaatveld van de onderste vijf dwarsdragers. De h.o.h. afstand tussen dwarsdrager 5 en 6 is immers groter dan tussen de onderste vijf dwarsdragers onderling. Van de bovenste twee dwarsdragers is dwarsdrager 6 maatgevend. Deze dekt het grootste plaatveld en wordt ook het zwaarste belast van de bovenste twee dwarsdragers.

Als analysehoogte h_j voor de onderste vijf dwarsdragers wordt de hoogte $h_{j,5}$ van dwarsdrager 5 ingevoerd.

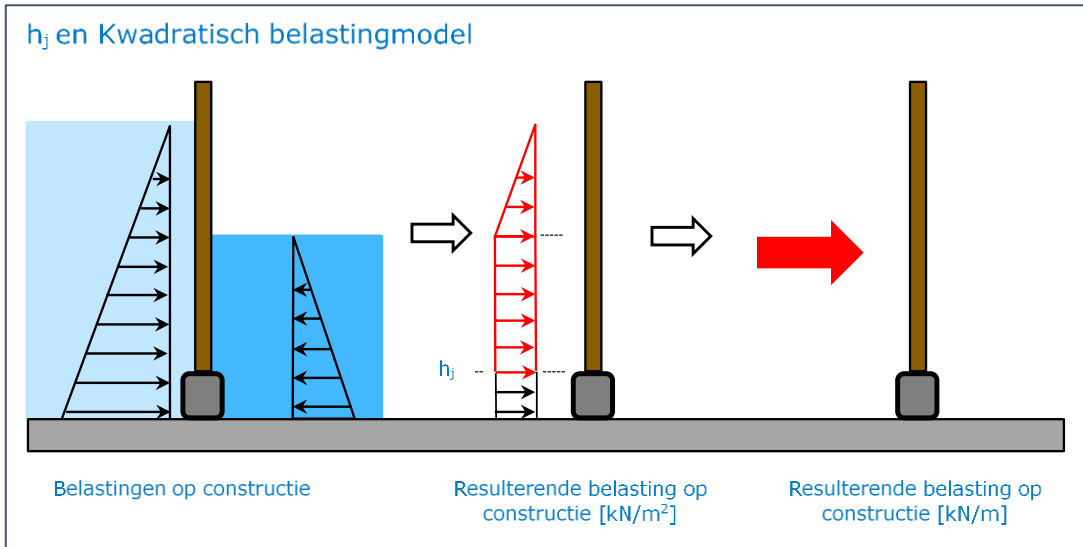
Als analysehoogte h_j voor de bovenste twee dwarsdragers wordt de hoogte van de zesde dwarsdrager ingevuld ($h_{j,6}$).

Kijkend naar de sterkte van de plaatvelden is het plaatveld tussen dwarsdrager 5 en 6 maatgevend. Na het invoeren van de sterkte van dit plaatveld kan h_j conservatief eerst op het niveau van de maximale hydraulische druk geplaatst worden. Dit kan aangescherpt worden door h_j op het daadwerkelijke niveau van het plaatveld (midden plaatveld indien moment in het midden van het plaatveld maatgevend is) te nemen. Dit laatste is afhankelijk van hoe het plaatveld geschematiseerd is (vrij opgelegd op dwarsdragers: veldmoment = $\frac{1}{8} \cdot q \cdot l^2$, ingeklemd op dwarsdragers: steunpuntsmoment = $\frac{1}{12} \cdot q \cdot l^2$).

Hoe te bepalen in geval van kwadratisch belastingmodel

Bij gebruik van dit model dient de resulterende belasting geïntegreerd over de hoogte door Hydra-Ring te worden bepaald. Daartoe dient het programma de totale

belaste hoogte van het beschouwde constructiedeel te kennen. De waterstanden en golven worden door het programma zelf bepaald, de onderzijde van het beschouwde deel van de constructie dient te worden opgegeven. Deze onderzijde van de constructie is de analysehoogte h_j . In Figuur 29 is voor het keermiddel (bruine lijn element) de evaluatiehoogte h_j bepaald.



Figuur 29: h_j en het kwadratisch belastingmodel

4.3.2.3 Lineaire belastingschematisering constructieve sterkte (lineair belastingmodel)

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
R_{lin}	[kN/m ²]	logn	invoer ⁴	$V_r=0,10-0,30^*4$	KW	0	-	1

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 13)

* Afhankelijk van materiaal:

- Beton: $V_r = 0,20$
- Staal: $V_r = 0,10$
- Aluminium: $V_r = 0,10$
- Hout (Azobé): $V_r = 0,12$
- Hout (overig tropisch hardhout): $V_r = 0,15$
- Overige houtsoorten: $V_r = 0,25$
- HDPE: $V_r = 0,10$
- Metselwerk: $V_r = 0,30$

De lineaire belastingschematisering constructieve sterkte R_{lin} representeert de (dominante) sterkte van het beschouwde constructieonderdeel, uitgedrukt in de hydrostatische belasting die het constructieonderdeel nog net kan weerstaan.

Hoe te bepalen

De sterkte van het beschouwde onderdeel moet worden uitgedrukt in toelaatbare kracht per vierkante meter. Dat betekent dat vanuit de daadwerkelijk aanwezige constructie teruggerekend moet worden wat de kritieke hydraulische belasting is

waarbij het onderdeel bezwijkt. Voor een toelichting op het lineaire model wordt verwezen naar paragraaf 4.6.4.1 van de handleiding kunstwerken [38]. Voor de invoer van de constructieve sterkte geldt dat hier een verwachtingswaarde ingevuld dient te worden.

Afhankelijk van de beschikbare gegevens kunnen verschillende wegen worden gevolgd om tot het gemiddelde van de sterkte te komen. Bij het bepalen van de constructieve sterkte kunnen zich drie situaties voordoen¹⁸:

- a. Men beschikt slechts over de ontwerpwaarde van de hydraulische belasting die bij het ontwerp is gebruikt.
- b. Men beschikt over de ontwerpwaarde van de sterkte in de vorm van sterkteberekeningen.
- c. De ontwerpwaarde van de sterkte kan afgeleid worden uit informatie over de constructie (materiaalgebruik en bijbehorende afmetingen).

Deze drie situaties worden onderstaand uitgewerkt. Uitgangspunt hierbij is dat in de ontwerpfase van het te beoordelen kunstwerk gebruik is gemaakt van de toen geldende ontwerpnormen. Wanneer bekend is welke ontwerpnormen zijn gebruikt is ook de toenmalige veiligheidsfilosofie (safety format) bekend met inbegrip van de toenmalige veiligheidsfactoren. Een toelichting op de normen met haar veiligheidsfilosofieën door de jaren heen is opgenomen in Bijlage C. Deze bijlage kan gebruikt worden om vanuit de hierboven beschreven situaties tot een gemiddelde waarde van de constructieve sterkte te komen.

Situatie 1: Hydraulische ontwerpbelasting bekend

In dit geval is de hydraulische ontwerpbelasting beschikbaar. De waterstand die net gekeerd kan worden (oftewel: de sterkte) is, althans volgens de oorspronkelijke ontwerpberoeeningen, minstens zo groot als deze ontwerpbelasting. De volgende gegevens dienen dan bekend te zijn, dan wel met redelijke zekerheid te kunnen worden aangenomen:

- Karakteristieke waarde van de buitenwaterstand in het ontwerp (voorheen MHW) of de ontwerpwaterstand.
- Karakteristieke waarde of ontwerpwaarde van de golfbelasting.
- Karakteristieke waarde of ontwerpwaarde van de waterstand binnen.
- Toegepaste veiligheidsfactoren.
- Ontwerpperiode van het kunstwerk.
- Ouderdom en conditie.

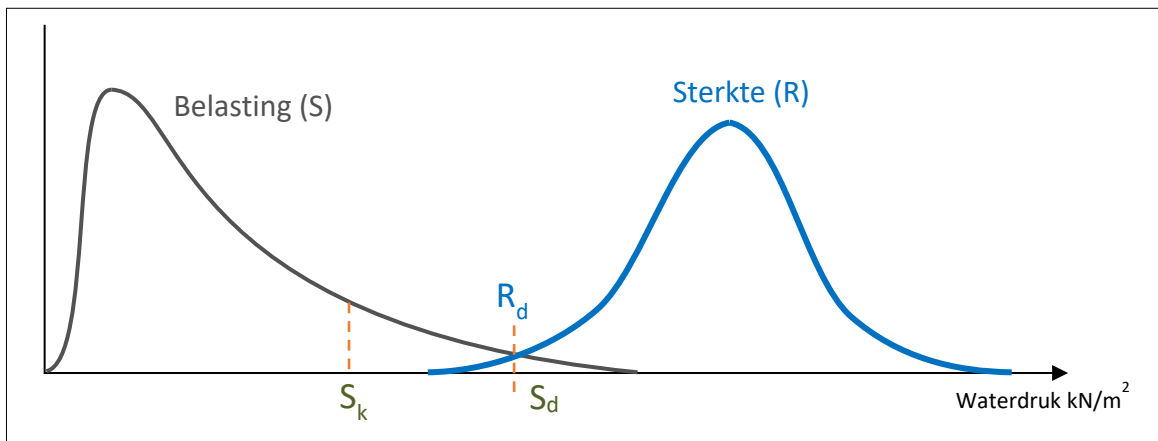
Wanneer wel bekend is in welke periode het kunstwerk is ontworpen maar niet uit de beschikbare documenten van het kunstwerk duidelijk wordt welke veiligheidsfactoren zijn gebruikt in het ontwerp, kunnen middels de toen geldende normen alsnog de veiligheidsfactoren worden bepaald. In Bijlage C wordt dit toegelicht.

Wanneer geen informatie aanwezig is over de golfbelasting in het ontwerp kan, in het geval dat slechts kleine golfhoogtes zullen optreden, de golfbelasting verwaarloosd worden bij het bepalen van R_{lin} . Dit kan geverifieerd worden aan de hand van een eerste som die gemaakt wordt en de resultaten (golfhoogte in illustratiepunt) van deze som.

¹⁸ Er wordt bij de opsomming gesproken over ontwerpwaarde. Van belang is dat men zich goed realiseert wat wel en wat niet in de ontwerpwaarde zit, omdat deze term op meerdere waarde geïnterpreteerd kan worden. Een ontwerpwaarde van de waterstand is de waterstand zelf zonder toepassing van veiligheidsfactoren.

Wanneer bovenstaande gegevens bekend zijn kan volgens het toenmalige safety format de verwachtingswaarde van de constructieve sterkte worden bepaald. De safety formats in de normen door de geschiedenis heen worden in Bijlage C toegelicht. Het safety format van de ontwerpnormen na 1990 bevat partiële factoren voor zowel de sterkte als de belasting. Daarmee is het een goede basis voor alle voorgaande normen, omdat de voorgaande normen een vereenvoudigde vorm hebben. Overigens is bij toepassing van de WOWK (sinds 2018 beschikbaar) de belastingfactor voor verval- en golfbelasting komen te vervallen en wordt direct met de rekenwaarde S_d gewerkt (zie Bijlage C).

Uitgangspunt bij de volgende werkwijze voor het bepalen van de verwachtingswaarde van de constructieve sterkte (R_m) is dat tijdens het ontwerp de constructie geheel uitgenut is. Dit houdt in dat de bekend zijnde vervalbelasting (waterstanden en golven) conform de destijds geldende rekenregels zou leiden tot het rekenkundig net voldoen van de sterkte van de constructie ($S_d=R_d$). Dit is in de regel een veilige benadering.



Werkwijze situatie 1

Conform de ontwerpnormen van na 1990 vormt de onderstaande methodiek de basis voor het bepalen van de sterkte in het geval dat slechts over vervalbelasting bij het ontwerp beschikt kan worden:

Stap 1. Uitgangspunt is de volgende relatie:

$$S_{d,oud} = R_{d,oud}$$

Stap 2. Bepaal de waarde van de karakteristieke sterkte $R_{k,oud}$ ten tijde van het ontwerp. Wanneer de karakteristieke waarde van de belasting S_k bekend is kunnen de onderstaande relaties worden gebruikt.

$$\left. \begin{aligned} S_{d,oud} &= \gamma_{S,oud} \times S_{k,oud} \\ R_{d,oud} &= \frac{R_{k,oud}}{\gamma_{m,oud}} \end{aligned} \right\} \gamma_{S,oud} \times S_{k,oud} = \frac{R_{k,oud}}{\gamma_{m,oud}} \Rightarrow R_{k,oud} = \gamma_{m,oud} \times \gamma_{S,oud} \times S_{k,oud}$$

Wanneer alleen de rekenwaarde S_d van de hydraulische belastingen bekend is kan in de bovenstaande formule de volgende relatie worden gebruikt.

$$\gamma_{S,oud} \times S_{k,oud} = S_{d,oud}$$

Indien de constructie berekend is voor 1972 is er geen aparte waarde voor de belastingfactor aanwezig en dient dus voor $\gamma_{S,oud}$ een waarde "1" te worden ingevuld. De gehele veiligheid zit dan in de materiaalfactor die dan ook hoger is dan de materiaalfactoren van na 1972.

- Stap 3. Bepaal de gemiddelde sterkte $R_{m,oud}$ ten tijde van het ontwerp. Dit betekent dat vanuit de karakteristieke waarde van de sterkte en met behulp van de variatiecoëfficiënt van het betrokken materiaal via de lognormale verdeling de gemiddelde sterkte kan worden berekend. Voor deze berekening is een spreadsheet beschikbaar (Omrekenstheet karakteristieke sterkte naar gemiddelde sterkte D1¹⁹).

De variatiecoëfficiënt die gehanteerd moet worden is gerelateerd aan het materiaal waarvan het constructieonderdeel gemaakt is (zie begin §4.3.2.3 op pagina 111).

- Stap 4. Pas eventuele reductie toe in verband met ouderdom en/of conditie. Indien hiertoe aanleiding bestaat kan een reductie op de sterkte worden toegepast. Onderbouwing kan bijvoorbeeld worden gevonden door een vergelijking tussen de huidige staaldikte en de staaldikte ten tijde van de bouw. Middels onderstaande relatie kan uiteindelijk de huidige gemiddelde waarde van de sterkte worden bepaald:

$$R_{m,nieuw} = \gamma_{\Delta R} \times R_{m,oud}$$

Hierin is $\gamma_{\Delta R}$ een constante voor de verandering in de gemiddelde sterkte volgens het ontwerp. De waarde van $\gamma_{\Delta R}$ is kleiner dan 1 als de sterkte meer is afgenomen dan destijds in de ontwerpverificatie is verondersteld. Indien echter tijdens de levensduur onderdelen zijn toegevoegd (bijvoorbeeld oplassen van materiaal) kan het zo zijn dat de waarde in theorie groter is dan 1. Aangezien er verder geen gegevens zijn van de constructie en van de berekening in onderhavige situatie, wordt aanbevolen om in een dergelijk geval de waarde van $\gamma_{\Delta R}$ in ieder geval niet groter dan 1 te kiezen.

De waarde van $R_{m,nieuw}$ heeft bij een lineair belastingmodel een eenheid van kN/m² en bij een kwadratisch belastingmodel een eenheid van kN/m.

- Stap 5. Voer de constructieve sterkte van het kunstwerk in in Riskeer. Hierbij geldt afhankelijk van het belastingmodel (lineair dan wel kwadratisch) het volgende:

¹⁹ Te downloaden van de Helpdesk
(<https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/beoordelen-wbi/producten-wbi>)

$$R_{lin} = R_{m,nieuw}$$

of

$$R_{kwad} = R_{m,nieuw}$$

In het geval van oudere normen dan 1990 worden minder partiële factoren gebruikt en vervallen sommige parameters hierboven, zie Bijlage C.

Werkwijze situatie 2: Ontwerpgegevens (sterkte en belasting) in de vorm van berekeningen bekend

Wanneer een ontwerpberekening voorhanden is, kunnen de volgende stappen doorlopen te worden:

- Stap 1. Herleid uit de berekening de karakteristieke waarde van de maatgevende belasting voor de betreffende constructie of constructieonderdeel. Dit is de waarde van $S_{k,ontwerp}$;
- Stap 2. Herleid de toegepaste waarden van de belastingfactor ($\gamma_{S,oud}$) en de materiaalfactor ($\gamma_{m,oud}$);
- Stap 3. Bepaal in hoeverre destijds de constructie uitgenut is. Indien de beschikbare berekening goed opgezet is, kan dit door de uitgerekende spanningen ten gevolge van de maatgevende vervalbelasting ($\sigma_{S,d}$) te vergelijken met de toelaatbare spanningen ($\sigma_{d,ontwerp}$). Dit leidt tot een indicatie van het overschot aan veiligheid ten tijde van het ontwerp ($\gamma_{\Delta C}$). Indien de constructie bij het ontwerp niet geheel uitgenut is, kan de bepaling van de karakteristieke waarde van de sterkte $R_{k,oud}$ als volgt plaatsvinden:

$$\gamma_{\Delta C} = \frac{\sigma_{d,ontwerp}}{\sigma_{S,d}}$$

$$\left. \begin{aligned} S_{d,oud} &= \gamma_{\Delta C} \times \gamma_{S,oud} \times S_{k,ontwerp} \\ R_{d,oud} &= \frac{R_{k,oud}}{\gamma_{m,oud}} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \gamma_{\Delta C} \times \gamma_{S,oud} \times S_{k,ontwerp} &= \frac{R_{k,oud}}{\gamma_{m,oud}} \Rightarrow \\ R_{k,oud} &= \gamma_{\Delta C} \times \gamma_{m,oud} \times \gamma_{S,oud} \times S_{k,ontwerp} \end{aligned}$$

Bovenstaande relatie voor $\gamma_{\Delta C}$ mag alleen gebruikt worden indien voldaan wordt aan de volgende criteria:

- De onderliggende berekeningen zijn dusdanig van opzet dat er een lineair verband is tussen de optredende snedekracht (bijvoorbeeld buigspanning) en de optredende vervalbelasting. In het geval er bijvoorbeeld sprake is van verende ondersteuning met een bilineair karakter is dit lineair verband niet aanwezig.
- Het voor het betreffende constructie-(onderdeel) maatgevende criterium betreft geen stabiliteitscriterium (torsiëknik en plooi). In de formules voor deze criteria spelen optredende spanningen een rol in de uiteindelijk toelaatbare spanning.

Indien niet aan voorgaande criteria wordt voldaan, dient $\gamma_{\Delta C}$ via een iteratief proces bepaald te worden.

In het geval van oudere normen dan 1990 worden minder partiële factoren gebruikt en vervallen sommige parameters hierboven, zie Bijlage C.

- Stap 4. Bepaal de gemiddelde sterkte $R_{m,oud}$ ten tijde van het ontwerp. Zie werkwijze Stap 3 van situatie 1.
- Stap 5. Pas eventuele reductie toe in verband met ouderdom en/of conditie. Deze stap is analoog aan stap 4 in situatie 1. In de onderhavige situatie kan soms middels een berekening worden aangetoond hoe groot de waarde van $\gamma_{\Delta R}$ is. Hiervoor dienen dan wel de basisgegevens die ten grondslag liggen aan de sterkteberekening van een constructieonderdeel bekend te zijn (bijvoorbeeld constructiedikte is met 2 mm afgenomen). Indien deze basisgegevens niet bekend zijn zal een inschatting moeten worden gemaakt. Middels onderstaande relatie kan uiteindelijk de huidige gemiddelde waarde van de sterkte worden bepaald:

$$R_{m,nieuw} = \gamma_{\Delta R} \times R_{m,oud}$$

- Stap 6. Voer de constructieve sterkte van het kunstwerk in Riskeer in. Hierbij geldt afhankelijk van het belastingmodel (lineair dan wel kwadratisch) het volgende:

$$R_{lin} = R_{m,nieuw}$$

of

$$R_{kwad} = R_{m,nieuw}$$

Werkwijze Situatie 3: ontwerpwaarde van de sterkte kan berekend worden uit beschikbare gegevens

In dit geval is er geen ontwerpwaarde voor de sterkte aanwezig, maar zijn er wel gegevens van de constructie beschikbaar. De volgende gegevens dienen dan bekend te zijn, dan wel met redelijke zekerheid te worden aangenomen:

- Afmetingen van het object (of onderdeel).
- Materiaal.
- Ouderdom en conditie.
- Binnenwaterstand.

Bepaling van de in te voeren sterkte kan nu plaatsvinden door het nemen van de volgende stappen:

- Stap 1. Bepaal het dominante onderdeel van het kunstwerk voor de faalkans (bijvoorbeeld puntdeur bij een sluis). Indien dit niet meteen duidelijk is, dienen onderstaande stappen voor meerdere onderdelen te worden doorlopen, zodat op een onderbouwde wijze gekozen kan worden voor het maatgevende onderdeel en daarmee voor de maatgevende vervalbelasting.
- Stap 2. Bepaal het dominante element van het onderdeel van het kunstwerk. Het kan natuurlijk ook zo zijn dat het element als geheel bekeken dient te worden. Bij een sluis kan het maatgevende onderdeel bijvoorbeeld de puntdeur zijn, waarbij het maatgevende element de onderste

dwarsdrager is.

- Stap 3. Bepaal de karakteristieke (representatieve) waarden van de sterkte van het materiaal (bijvoorbeeld σ_k en τ_k dan wel σ_{rep} en τ_{rep}). Deze waarden worden in de normen vermeld. Bij houtconstructies geldt dat de factor voor de afmetingen van het onderdeel (k_h) en de factor voor belastingduurklasse in combinatie met klimaatklasse (k_{mod}) wel moeten worden toegepast bij het bepalen van de representatieve sterkte. (Zie hiervoor de normen die van toepassing waren ten tijde van het ontwerp; zo is in TGB 1972 – Hout een toelaatbare spanning genoemd, waarin deze factoren al verwerkt zijn - zie Bijlage C).
- Stap 4. Bepaal de doorsnedegrootheden zoals oppervlakte en weerstandsmoment. Hierbij eventueel een reductie toepassen op de theoretische waarden in verband met ouderdom en conditie;
- Stap 5. Bepaal met behulp van stap 2 en stap 3 de representatieve waarden van de van belang zijnde snedekrachten zoals bijvoorbeeld dwarskracht ($D \rightarrow$ bijv. $D_{rep} = \sigma_{rep} \times b \times I/S$) en moment ($M \rightarrow$ bijv. $M_{rep} = \sigma_{rep} \times W$). Het kan natuurlijk ook zo zijn dat een combinatie van dwarskracht en moment maatgevend is.
- Stap 6. Bepaal met behulp van de snedekrachten de maximale vervalbelasting (q_{rep}) die het object of onderdeel aan kan (bijvoorbeeld $q = 8 \times M_{rep}/L^2$ en $q = 2 \times D_{rep}/L$ bij een ligger op twee steunpunten). De laagste waarde van q_{rep} wordt nu verondersteld gelijk te zijn aan de karakteristieke (representatieve) waarde van de sterkte (R_k).
- Stap 7. Bepaal de verwachtingswaarde van de sterkte (R_{lin} dan wel R_{kwad}) door de karakteristieke waarde om te rekenen naar de gemiddelde waarde met behulp van het in situatie 1 genoemde spreadsheet (Omrekenstheet karakteristieke sterkte naar gemiddelde sterkte D1²⁰).

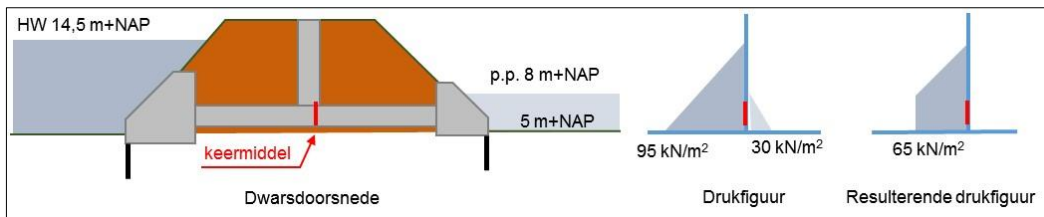
Aandachtspunten

Voor alle drie de situaties geldt dat de sterkte-term dient te worden gerelateerd aan een bepaalde hoogte, de zogenoemde analysehoogte h_j (zie paragraaf 4.3.2.2).

Voorbeeld 1: Ontwerpwaarde vervalbelasting is bekend

Een uitwateringssluis in het bovenrivierengebied bestaat uit een enkele koker door de dijk die uitstroomt in een uitstroomconstructie en is gebouwd in 1964. De sluis heeft een stalen spindelschuif in de koker als keermiddel en bij hoger water staat de hele koker onder water. De keuze voor het lineaire model ligt dan voor de hand. De uitstroomconstructie ligt beschut. Er is een tekening beschikbaar uit 1964 met daarop een buitenwaterstand van NAP +14,5 meter met de afkorting HW en een binnenwaterstand van NAP+8,0 meter. Beide worden geïnterpreteerd als ontwerpwaarde omdat in die tijd de veiligheid werd ingebracht aan de sterkte/materialenkant zodat gold $S_{k,oud} = S_{d,oud}$. Er is geen informatie over ontwerpcondities gevonden. Gezien de ligging van de uitwateringsconstructie mag worden aangenomen dat er nauwelijks golven zullen zijn. Bij de analyse van het faalmechanisme is deze aanname geverifieerd.

²⁰ Beschikbaar via de Helpdesk Water (onderdeel van het Informatiepunt Leefomgeving (IPLO))



Figuur 30: Dwarsdoorsnede, drukfiguur stationaire waterstand en resulterende drukfiguur

De ontwerpnormen uit deze periode werkten met deterministische materiaalsterktes en belastingen, waarbij veiligheid werd gecreëerd door de vloeï- of breuksterkte te reduceren met een reductiefactor γ naar een toelaatbare materiaalspanning (σ_a). Voor de (probabilistische) toets in het WBI 2017 beschouwen we, zoals toegelicht in Bijlage C, de toelaatbare materiaalspanning als een ontwerpwaarde. Voor staal geldt een reductiefactor van 1,5 (zie Bijlage C), zodat de karakteristieke waarde van de toelaatbare druk gelijk is aan:

$$S_{d,oud} = R_{d,oud}$$

$$R_{d,oud} = \frac{R_{k,oud}}{\gamma} \rightarrow R_{k,oud} = \gamma \times S_{d,oud} = 1,5 \times 65 = 98 \text{ kN/m}^2$$

Met behulp van het omrekenstheet kan hier via de lognormale verdeling en een variatiecoëfficiënt van 0,1 voor staal een gemiddelde waarde van de sterkte worden bepaald van 116 kN/m².

Op basis van de resultaten van een uitgevoerde inspectie wordt ingeschat dat er een afname in sterkte van 20% heeft plaatsgevonden.

$$R_{m,nieuw} = R_{lin} = 0,8 \times 116 = 93 \text{ kN/m}^2$$

Opgemerkt wordt dat het voor de uitkomst niet uitmaakt of de reductie van de sterkte wordt toegevoegd aan de karakteristieke waarde van de sterkte of de gemiddelde waarde van de sterkte. De uitkomst met betrekking tot $R_{m,nieuw}$ in bovenstaande som is dus gelijk wanneer eerst $R_{k,oud}$ wordt vermenigvuldigd met 0,8 en vervolgens de gemiddelde waarde wordt bepaald met behulp van de lognormale verdeling.

Voorbeeld 2: ontwerpwaarde van de sterkte is bekend

Stel: van een houten sluisdeur is de onderste regel als maatgevend constructie-element aangemerkt. De regel is te schematiseren als tweezijdig scharnierend opgelegd. Uit de sterkteberekening van de sluisdeur uit 1975 zijn onderstaande gegevens bekend:

- $q_{rep} = 20 \text{ kN/m}^2$
- $\gamma_{s,oud} = 1,2$
- $\gamma_{m,oud} = 1,2$
- $\sigma_{toelaatbaar,d} = 25 \text{ N/mm}^2$
- $\sigma_{optredend,d} = 20 \text{ N/mm}^2$ (Het betreft hier een buigspanning ten gevolge van een buigend moment)
- Op basis van een inspectie wordt ingeschat dat de afname van de sterkte 40% bedraagt

De verwachtingswaarde van de sterkte (R_{lin}) wordt nu als volgt bepaald. De constructie is niet geheel uitgenut, $\gamma_{\Delta C} = 25/20 = 1,25$. Hiermee wordt vervolgens de karakteristieke waarde van de sterkte ten tijde van het ontwerp bepaald:

$$R_{k,oud} = \gamma_{\Delta C} \times \gamma_{m,oud} \times \gamma_{S,oud} \times S_{k,ontwerp} = 1,25 \times 1,20 \times 1,20 \times 20 = 36 \text{ kN/m}^2$$

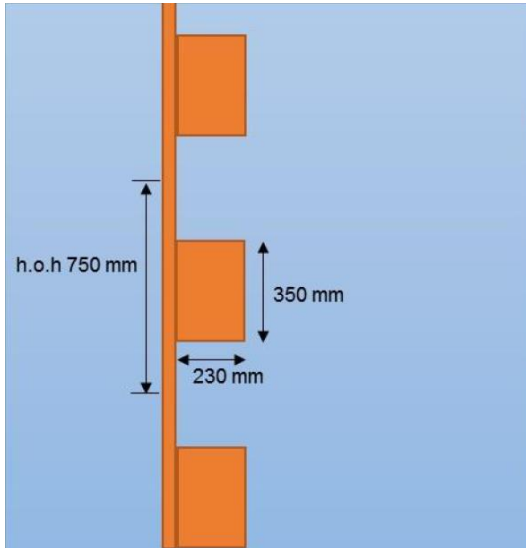
De gemiddelde waarde van de sterkte wordt dan bepaald met behulp van de lognormale verdeling en een variatiecoëfficiënt van 0,25. Dit leidt tot $R_{m,oud} = 55,6 \text{ kN/m}^2$.

Hierop wordt nog de sterktegradatie in rekening gebracht, hetgeen resulteert in de volgende waarde voor R_{lin} :

$$R_{m,nieuw} = R_{lin} = \gamma_{\Delta R} \times R_{m,oud} = 0,60 \times 55,6 = 33,4 \text{ kN/m}^2$$

Voorbeeld 3: ontwerpwaarde van de sterkte kan berekend worden

Stel dat een dwarsdrager van een Azobé puntdeur (sterkteklasse D70) het maatgevende element is. De constructie bevindt zich permanent onder water en hierdoor is deze in goede conditie. De lengte van de dwarsdrager is 3,69 m en het buigend moment vormt de maatgevende belasting. De bijdragende sterkte van de beplanking op de dwarsdrager (meewerkende breedte) wordt (conservatief) niet meegenomen.



Figuur 31: Gegevens dwarsdrager houten puntdeur

De waarde van R_{lin} kan nu als volgt bepaald worden. Omdat de maatgevende dwarsdrager zich permanent onder water bevindt, is sprake van verzadigd hout, klimaatklasse 3 en belastingduurklasse 'kort'. Hierbij hoort een modificatiefactor k_{mod} van 0,65. De representatieve waarde van de buigsterkte σ_{rep} kan nu als volgt bepaald worden:

$$\sigma_{rep} = f_{m;0;rep} \times k_{mod} \times k_h = 70 \times 0,65 \times 1,0 = 45,5 \text{ N/mm}^2$$

Omdat de conditie goed is wordt er geen reductie van de afmetingen van de dwarsdrager toegepast. Dit betekent dat:

- $A = 230 \times 350 = 80.500 \text{ mm}^2$
- $W = \frac{1}{6} \times 350 \times 230^2 = 3.085.833 \text{ mm}^3$

Het representatieve moment $M_{rep} = \sigma_{rep} \times W = 45,5 \times 3,085 \cdot 10^6 = 140,4 \text{ kNm}$. Dit is de representatieve waarde van de sterkte uitgedrukt in een buigend moment. Hiermee kan de representatieve waarde van de belasting per strekkende meter lengte worden bepaald waarbij deze sterkte precies wordt benut:

$$q_{rep} = 8 \times M_{rep} / L^2 = 8 \times 140 / 3,69^2 = 82,5 \text{ kN/m}$$

Deze representatieve waarde van de belasting per strekkende meter moet worden omgerekend naar een druk per vierkante meter door de hart-op-hart afstand te verdisconteren:

$$Q_{rep} = q_{rep} / 0,75 = 82,5 / 0,75 = 110 \text{ kN/m}^2$$

Deze waarde wordt gelijkgesteld aan de karakteristieke sterkte R_k . Hiermee kan de gemiddelde waarde van de sterkte worden berekend middels de lognormale verdeling en een variatiecoëfficiënt van 0,12 (Azobé). Dit leidt tot $R_m = 135 \text{ kN/m}^2$:

4.3.2.4 Kwadratische belastingschematisering constructieve sterkte (kwadratisch belastingmodel)

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
R_{kwad}	[kN/m]	logn	invoer ⁴	$V_r = 0,10 - 0,30^* 4$	KW	0	-	1

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 13)

* Afhankelijk van materiaal:

- Beton: $V_r = 0,20$
- Staal: $V_r = 0,10$
- Aluminium: $V_r = 0,10$
- Hout (Azobé): $V_r = 0,12$
- Hout (overig tropisch hardhout): $V_r = 0,15$
- Overige houtsoorten: $V_r = 0,25$
- HDPE: $V_r = 0,10$
- Metselwerk: $V_r = 0,30$

De kwadratische belastingschematisering constructieve sterkte R_{kwad} representeert de (dominante) sterkte van het beschouwde constructieonderdeel, uitgedrukt in de resulterende (zie hieronder) hydrostatische belasting die het constructieonderdeel nog net kan weerstaan.

Hoe te bepalen

De sterkte van het beschouwde onderdeel moet worden uitgedrukt in een resulterende hydraulische kracht over de hoogte van het onderdeel per strekkende meter breedte van het onderdeel. Voor een toelichting op het kwadratische belastingmodel wordt verwezen naar paragraaf 4.6.4.1 van de handleiding kunstwerken [38]. Voor de invoer van de constructieve sterkte geldt dat hier, net als bij R_{lin} , een verwachtingswaarde ingevuld dient worden.

De bepaling van R_{kwad} vindt op dezelfde wijze plaats als de bepaling van R_{lin} . Ook hier zijn drie situaties mogelijk, afhankelijk van de beschikbare gegevens. De

stappen om te komen tot R_{kwad} zijn dezelfde als om te komen tot R_{lin} . Volstaan wordt daarom met een verwijzing naar paragraaf 4.3.2.3.

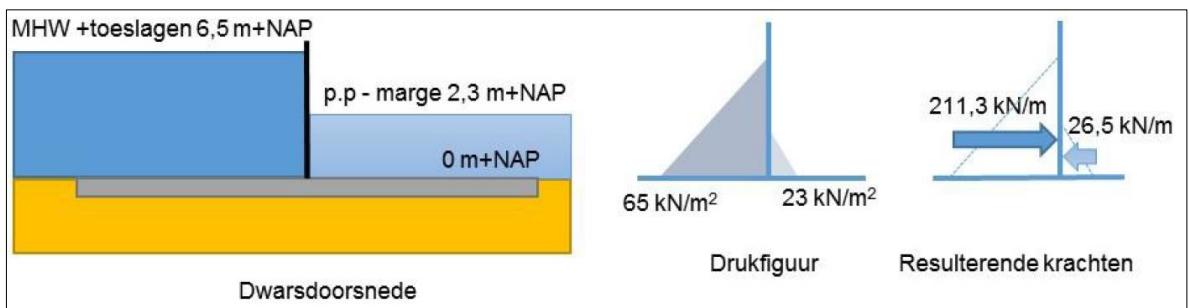
Opgemerkt wordt dat er bij situaties 2 en 3 een significante inspanning nodig kan zijn om het kwadratisch model te voeden, omdat het lastig en bewerkelijk is om van een constructietekening of beschikbare berekening middels reverse engineering de totale geïntegreerde sterkte over de hoogte van het keermiddel te bepalen. Aanbevolen wordt daarom om waar mogelijk het lineaire belastingmodel toe te passen.

Aandachtspunten

De sterkte-term R_{kwad} dient te worden gerelateerd aan een bepaalde hoogte, de zogenoemde analysehoogte h_j (zie paragraaf 4.3.2.2).

Voorbeeld: Ontwerpwaarde vervalbelasting is bekend

Een keersluis beschermt een kleine jachthaven in het benedenrivierengebied, heeft 1 set stalen puntdeuren en is gebouwd in 1955. De deuren zijn vervangen in 1983 en in de ontwerpdocumentatie is een MHW gevonden van NAP+5,5 meter en is aangegeven dat er geen rekening is gehouden met golven omdat deze zeer beperkt van hoogte zijn (0,3 m en kleiner). In de ontwerpdocumentatie is te vinden dat hierop een marge van 1,0 m is toegepast om diverse onzekerheden in de belasting gedurende de ontwerplevensduur af te dekken. MHW plus toeslagen wordt als karakteristieke waarde van de buitenwaterstand beschouwd, wat uitkomt op NAP+6,5 meter. Volgens de ontwerpdocumentatie is het sluitpeil van NAP+2,50 m – 0,2 meter het uitgangspunt voor de binnenwaterstand bij het ontwerp geweest, deze wordt ook als karakteristieke waarde behandeld. De constructietekeningen van de nieuwe deuren zijn incompleet zodat de opbouw van de deuren niet geheel valt vast te stellen, vandaar dat wordt gekozen voor het kwadratisch model. Gezien de ligging van de sluis landinwaarts wordt in eerste instantie aangenomen dat aangesloten kan worden bij hetgeen in de ontwerpdocumentatie wordt vermeld omtrent de zeer beperkte golven. Bij de analyse van het faalmechanisme is deze aanname geverifieerd en de aanname blijkt te kloppen.



Figuur 32: Dwarsdoorsnede, drukfiguur stationaire waterstand en resulterende krachten op sluisdeur

De ontwerpnormen van destijds werken met een semi-probabilistisch safety format, waarbij de veiligheid wordt gecreëerd door toepassing van een materiaalfactor, zie Bijlage C. Voor staal gold destijds een materiaalfactor van 1,5. Dit betekent dus tevens dat de karakteristieke waarde van de belasting gezien kan worden als de ontwerpbelasting destijds ($S_{d,oud} = \gamma_s \times S_{k,oud} = 1,0 \times S_{k,oud}$).

$$S_{d,oud} = R_{d,oud} = 65 \times 6,5 \times 0,5 - 23 \times 2,3 \times 0,5 = 184,8 \text{ kN/m}$$

$$R_{d,oud} = \frac{R_{k,oud}}{\gamma} \rightarrow R_{k,oud} = \gamma \times S_{d,oud} = 1,5 \times 184,8 = 277,2 \text{ kN/m}^2$$

De waarde voor de gemiddelde waarde van de sterkte $R_{m,oud}$ wordt middels de lognormale verdeling en een variatiecoëfficiënt van 0,1 (staal) gelijk aan 328 kN/m².

Gelet op levensduur en tevens het structurele onderhoud (inspectie) wordt gesteld dat er een afname in sterkte van 10% heeft plaatsgevonden.

$$R_{m,nieuw} = R_{kwad} = 0,9 \times 328 = 295 \text{ kN/m}$$

4.3.2.5 Binnenwaterstand bij constructief falen

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
$h_{bi;CB}$	[+m NAP]	nor	invoer ⁴	$\sigma=0,1$ ²	KW	0	-	1

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 13)

De parameter $h_{bi;CB}$ betreft de binnenwaterstand met betrekking tot de sterkte van een constructie (onderdeel). Deze binnenwaterstand kan afwijken van de binnenwaterstand die aanwezig is in het achterland. Dit kan dan via de parameter $h_{bi;CB}$ worden meegenomen.

Hoe te bepalen

Normaal gesproken is bij een kunstwerk de waterstand direct aan de binnenzijde van de constructie (keermiddel) gelijk aan de binnenwaterstand in het achtergelegen gebied. Dan geldt: $h_{bi;CB} = h_{bi}$. Echter: er zijn situaties denkbaar waarbij de binnenwaterstand direct achter het keermiddel afwijkt van de waterstand in de achterliggende watergang. Hierbij kan worden gedacht aan:

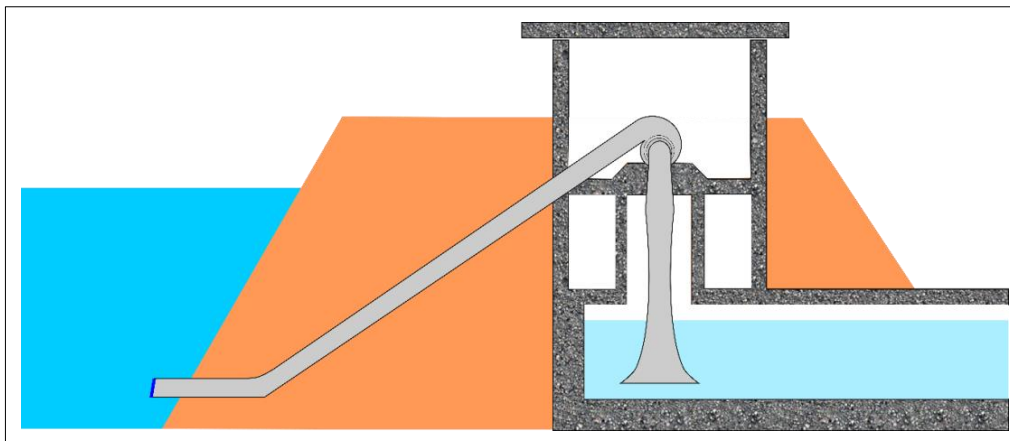
- Het opzetten van een schutkolk bij naderend hoogwater, zodat getrapt gekeerd kan worden. Voor de parameter $h_{bi;CB}$ kan dan het kolkpeil van de opgezette kolk worden ingevoerd. Hierbij dient het opzetten van de kolk wel in protocollen te zijn opgenomen en ook te worden geoefend/getest opdat dit met grote mate van zekerheid ook zo wordt uitgevoerd ten tijde van hoogwater.
- Een gemaal waarbij de waterstand in de persleiding (en dus direct achter minimaal een van de keermiddelen) afwijkt van de waterstand in de achterliggende watergang. Indien de persleiding alleen instroombaar is via de pomp kan deze situatie zich voordoen. Het is zelfs mogelijk dat de persleiding leeggelopen is zodat er bij een hoogwater alleen sprake is van waterdruk vanaf de buitenzijde.

Aandachtspunten

Toepassing van de parameter kan alleen als er voldoende onderbouwing kan worden gegeven waarom met betrekking tot sterkte er een afwijkende waarde voor de binnenwaterstand wordt aangehouden. De parameter $h_{bi;CB}$ en h_{bi} moeten niet met elkaar verward worden.

Voorbeeld

In dit voorbeeld wordt de constructieve sterkte van een terugslagklep van een gemaal beschouwd. Het gemaal ligt in een getijdegebied en is dus voorzien van een terugslagklep, welke zich bevindt in het buitendijks gelegen uitstroomwerk. Tijdens een vloedperiode heeft het gemaal uitgemaal. Vervolgens is het gemaal gestopt. In het uitstroomwerk wordt het gemaal afgesloten door de terugslagklep. In onderstaand figuur is een schematische weergave van de situatie getoond.



Figuur 33 Voorbeeld gemaal waarbij $h_{bi,CB}$ niet gelijk is aan h_{bi}

Wanneer een maalperiode wordt gevolgd door een ebperiode kan de persleiding een heel stuk leeglopen, wellicht is deze zelfs wel helemaal leeg. Als vervolgens een hoogwater optreedt, is er van een tegendruk vanuit de leiding geen sprake meer. De parameter $h_{bi,CB}$ moet dan de waarde krijgen van de onderkant van de leiding. De waarde voor h_{bi} (binnenwaterstand achterliggende gebied) is gelijk aan het polderpeil. De waarden zijn dan dus niet aan elkaar gelijk.

Opgemerkt wordt dat kijkende naar gevolgen de bovenstaande figuur geen situatie uitbeeldt waarbij het bezwijken van de keermiddelen tot grote gevolgen zal leiden. De leiding komt hoog uit, waarmee er feitelijk sprake is van een hoge drempel. In de beoordelingspraktijk zal dus nog moeten bezien of deze vorm van constructief falen geanalyseerd moet worden.

4.4 Deelfaalmechanisme Z43 Falen door instabiliteit constructie en grondlichaam (STCG)

Het deelfaalmechanisme Z₄₃ Falen door instabiliteit constructie en grondlichaam (STCG) betreft het falen van een kunstwerk als gevolg van het optreden van instabiliteit van de constructie dan wel het grondlichaam om het kunstwerk heen. Dit betreft verschuiven of kantelen van de constructie of het grondlichaam. Als gevolg hiervan treden er dusdanige vervormingen van de constructie op dat dit leidt tot verdergaande erosie en uiteindelijk het ontstaan van een bres.

Opgemerkt wordt dat voor de analyse van instabiliteit Riskeer niet het meest geëigende instrument is. Het wordt aanbevolen om direct gebruik te maken van de semi-probabilistische rekenregel uit de WOWK [16].

Onderstaande tekst is geënt op het alsnog modelleren met behulp van Riskeer.

Aangezien instabiliteit optreedt bij hoge buitenwaterstanden en er ook daadwerkelijk bresvorming optreedt, wordt reststerkte in de vorm van komberging en bodembescherming niet meer meegenomen. Dit is afwijkend van het deelfaalmechanisme Z_{411} (bezwijken waterkerende constructieonderdelen door vervalbelasting, zie paragraaf 4.3), waar na het bezwijken van een constructieonderdeel er nog niet direct sprake hoeft te zijn van een bres.

De kans dat de stabiliteit van de constructie kleiner is dan de optredende belasting is vastgelegd met behulp van de volgende parameters (zie Bijlage C):

- Stabiliteit (R).
- Optredende waterbelasting (S).
- Modelfactor belastingeffect (m_s), zie paragraaf 4.3.2.1.

De modelfactor voor het belastingeffect brengt de onzekerheid in rekening waarmee belastingen (verval) uiteindelijk doorwerken op het belastingeffect (opwaartse krachten, schuifkrachten). De modelfactor is reeds besproken in paragraaf 4.3.2.1.

Afhankelijk van de situatie en de sterktegegevens kan zowel de stabiliteit als de belasting middels een lineair dan wel kwadratisch model worden beschreven. De keuze voor welk model toe te passen moet op basis van de beschikbare gegevens en de opbouw van de constructie worden onderbouwd.

Golfbelastingen worden in Riskeer automatisch meegenomen, doordat het golfbelastingmodel van Goda-Takahashi in Riskeer is ingebouwd. Met behulp van enkele invoergegevens worden vervolgens de belastingen op het beschouwde constructieonderdeel berekend. Voor een beschrijving van de parameters voor het golfmodel wordt verwezen naar paragraaf 4.3.1.

De analysehoogte h_j is ook van belang. In paragraaf 4.3.2.2 is reeds ingegaan op de analysehoogte.

De Z-functies voor het bezwijken van waterkerende constructieonderdelen als gevolg van vervalbelastingen zijn:

$$Z_{stab\ verlies,lin} = R_{stab\ verlies,lin} - m_s \cdot S_{lin} \quad \text{lineair model} \quad \text{E-48}$$

$$Z_{stab\ verlies,kwad} = R_{stab\ verlies,kwad} - m_s \cdot S_{kwad} \quad \text{kwadratisch model} \quad \text{E-49}$$

4.4.1 Lineaire belastingschematisering stabiliteit (lineair belastingmodel)

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
$R_{stab\ verlies,lin}$	[kN/m ²]	logn	invoer ⁴	$V_r=0,10-0,30^*^4$	KW	0	-	1

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 13)

Afhankelijk van materiaal (zie paragraaf 4.3.2.3).

De sterkte-term $R_{stab\ verlies,lin}$ in het lineaire belastingmodel representeert de stabiliteit van de constructie of het als dominant beschouwde deel van de constructie, uitgedrukt in de hydrostatische belasting die de constructie nog net kan weerstaan.

Hoe te bepalen

De bepaling van de sterkte-term $R_{stab\ verlies,lin}$ in het lineaire belastingmodel wijkt in principe niet af van de bepaling van de term R_{lin} bij STCO. Volstaan wordt daarom met een verwijzing naar paragraaf 4.3.2.3.

Aandachtspunten

-

Voorbeeld

-

4.4.2 Kwadratische belastingschematisering stabiliteit (kwadratisch belastingmodel)

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
$R_{stab\ verlies, kwad}$	[kN/m]	logn	invoer ⁴	$V_r=0,10-0,30^*^4$	KW	0	-	1

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 13)

* Afhankelijk van materiaal (zie paragraaf 4.3.2.4)

De sterkte-term $R_{stab\ verlies, kwad}$ in het kwadratische belastingmodel representeert de (dominante) stabiliteit van de beschouwde constructie, uitgedrukt in de resulterende hydrostatische belasting die de constructie kan weerstaan in de uiterste grenstoestand.

Hoe te bepalen

De bepaling van de sterkte-term $R_{stab\ verlies, kwad}$ in het kwadratische belastingmodel wijkt in principe niet af van de bepaling van de term R_{kwad} bij STCO. Volstaan wordt daarom met een verwijzing naar paragraaf 4.3.2.4.

Aandachtspunten

-

Voorbeeld

-

4.5 Deelfaalmechanisme Z422 Kans op aanvaring tweede keermiddel

Aanvaren van het tweede keermiddel kan leiden tot het ontstaan van een bres in de waterkering. Het faalmodel van aanvaren kan in een aantal onderdelen worden opgesplitst. Specifiek is het model ontwikkeld voor schutsluizen, omdat hierbij het

mechanisme het meest evident is. Voor overige objecten kan het model met enkele aanpassingen ook worden toegepast. Deze aanpassingen bestaan dan uit het invullen van fictieve waarden voor bepaalde parameters.

Nadat een tweede keermiddel is aangevaren zijn nog de volgende deelfaalmechanismen van toepassing (zie Figuur 25):

- Kans op het bezwijken van keermiddelen als gevolg van aanvaren (paragraaf 4.6).
- Kans op falen van het herstel van een fatale aanvaring (paragraaf 4.7).
- Kans dat de optredende gevolgen groter zijn dan toelaatbaar. Dit wordt gemodelleerd middels de komberging en de sterkte van de bodembescherming. Zie hiervoor deelfaalmechanismen Z_{21} (paragraaf 4.8) en Z_{22} (paragraaf 4.9).

De kans op aanvaren ($P_{aanvaring}$) wordt bepaald door de volgende parameters:

- Aantal nivelleringen per jaar ($f_{nivellering}$).
- Kans op aanvaring 2^{de} keermiddel per nivellering ($P_{aanvaring;nivellering}$).

De vergelijking voor de kans op aanvaren is:

$$P_{aanvaring} = f_{nivellering} \cdot P_{aanvaring;nivellering} \quad 50$$

4.5.1 Aantal nivelleringen per jaar

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
$f_{nivellering}$	[1/jaar]	det	invoer ⁴	-	-	-	-	-

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 13)

De parameter $f_{nivellering}$ is het aantal schuttingen dat met een schutsluis wordt uitgevoerd per jaar.

Hoe te bepalen

Het aantal nivelleringen per jaar kan worden bepaald middels statistieken omtrent de scheepvaart die worden bijgehouden bij de sluis zelf of op de aanliggende vaarweg(en). Indien deze gegevens niet bekend zijn, dient een onderbouwde inschatting te worden gemaakt.

Aandachtspunten

Bij het bepalen van het aantal nivelleringen per jaar dient rekening te worden gehouden met de volgende aandachtspunten:

- Nivelleringen met schepen die niet in staat worden geacht om het gesloten keermiddel uit te varen, worden niet meegenomen.
- Nivelleringen vinden in twee richtingen plaats. In dit kader worden alleen die nivelleringen meegenomen die leiden tot overstromingsrisico's voor het achterland. Het leeglopen van een binnendijks gelegen kanaalpannd is dit bijvoorbeeld niet.
- Nivelleringen die plaatsvinden bij waterstanden lager dan het maximaal toelaatbare buitenwaterstand bij niet hoogwaterkerend gesloten kunstwerk²¹ behoeven niet te worden beschouwd indien aannemelijk gemaakt kan worden dat het herstellen van het uitvaren van het gesloten keermiddel hersteld kan

²¹ Deze buitenwaterstand werd voorheen aangeduid met Open Keerpeil (OKP). Aangezien er echter geen sprake is van één buitenwaterstand die bij geopend kunstwerk leidt tot overstromingsgevolgen, maar dit er vele zijn afhankelijk van de afvoergolf die langskomt, wordt de term OKP zo min mogelijk gehanteerd.

worden voordat de buitenwaterstand boven de genoemde maximaal toelaatbare waterstand uitkomt (reparatietijd). Dit kan een rol spelen bij sluisen in getijdegebieden.

- Het aantal passerende schepen per schutting doet niet zozeer ter zake, omdat het uitgangspunt is dat bij een nivellering alleen het voorste schip de gesloten binnendeur kan uitvaren.
- Een mogelijke reductie van het aantal risicovolle nivelleringen kan wellicht worden gevonden door onderscheid te maken tussen beladen en onbeladen schepen. Onbeladen schepen hebben onder andere als gevolg van een kleinere diepgang doorgaans een hogere invaarsnelheid dan beladen schepen. Daarentegen hebben ze ook een aanzienlijk lagere massa. Op basis van deze gegevens kan worden bekeken of onbeladen schepen wel genoeg energie genereren om het gesloten keermiddel uit te varen.

Voorbeeld

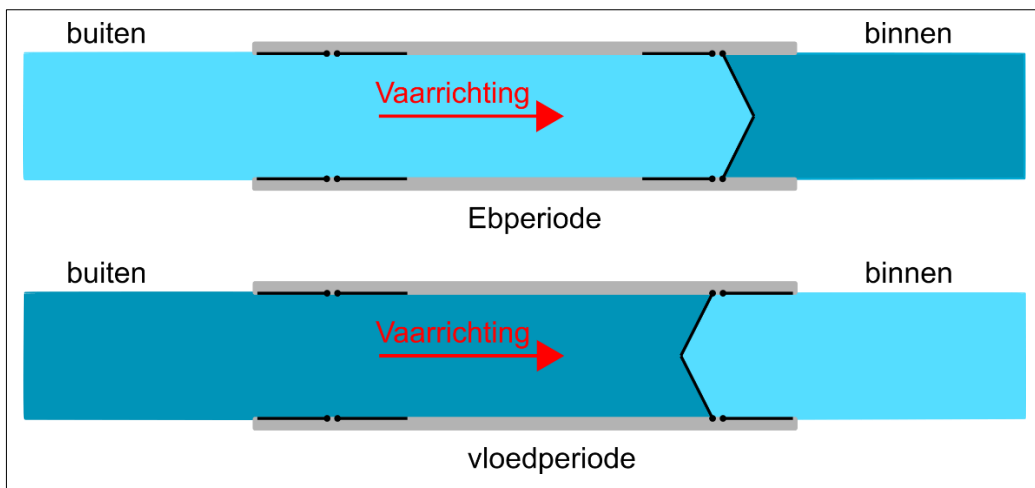
Een schutsluis (maximale scheepsafmetingen conform CEMT-klasse III) in een getijdegebied kent gemiddeld 4.000 nivelleringen per jaar. Deze nivelleringen zijn in beide richtingen gelijk verdeeld, dus 2.000 per jaar per richting. Naast beroepsvaart is er ook de nodige recreatievaart, welke zich alleen in de zomerperiode voordoet. Uit de statistieken van de sluis kan worden herleid dat in de zomer 80% van de nivelleringen plaatsvindt. De waterstand waarbij niet meer geschut wordt, ligt ruim boven de maximaal toelaatbare buitenwaterstand bij een niet hoogwaterkerend gesloten kunstwerk. Onder normale omstandigheden is gedurende eb de buitenwaterstand lager dan de binnenwaterstand. Bij vloed is dit omgekeerd. De sluis is uitgerust met puntdeuren.

Het aantal nivelleringen per jaar dat in het model wordt toegepast wordt nu als volgt bepaald:

- Uitgaande van een gelijkmatige verdeling van het aanbod van beroepsvaart gedurende het gehele jaar vindt 40% van de nivelleringen met beroepsvaart plaats. In de winter maakt namelijk alleen beroepsvaart gebruik van de sluis en dat is 20% van de nivelleringen, aangezien in de zomer 80% van de nivelleringen plaatsvinden. Dit alles betekent dat de overige 60% van de nivelleringen is gereserveerd voor pleziervaart.
- Uitgangspunt is dat elke vorm van beroepsvaart in staat is om het gesloten keermiddel uit te varen (beroepsvaart groter of gelijk aan CEMT-klasse II en kleiner of gelijk aan CEMT-klasse III). Aanvaren door pleziervaart leidt niet tot uitvaren van de keermiddelen.
- De faalkans van het alsnog sluiten van een vloeddeur wanneer uitvaren van de gesloten deur in een ebperiode plaatsvindt wordt voor deze situatie geschat op 1/100. Dit is gebaseerd op de veronderstelling dat in een dergelijke situatie op het moment van uitvaren geen sprake is van een instroming maar uitstroming van water. Dit uitstromen zal enigszins beperkt zijn, aangezien het schip tegen een deur is aangevaren die door het verval weer wordt dichtgedrukt en het schip ook tegen de stroming moet doorvaren. Dit betekent dat er vermoedelijk een soort van propvorming optreedt bij het aangevaren deurstel. Daarnaast geldt dat men bij opkomend tij kan trachten om eerst de ebdeur in het andere hoofd te sluiten om vervolgens conform normale procedure (zonder stroming) de vloeddeur in hetzelfde hoofd te sluiten. Mocht sluiting van de ebdeur falen kan men altijd nog trachten om bij gelijke waterstand de vloeddeur in één keer te sluiten.

Nivellering van buiten naar binnen

Er vinden 2.000 nivelleringen van buiten naar binnen plaats. 40% hiervan is gerelateerd aan beroepsvaart en dit zijn dus 800 nivelleringen. Van deze 800 vinden er 400 plaats in een ebperiode en 400 in een vloedperiode.



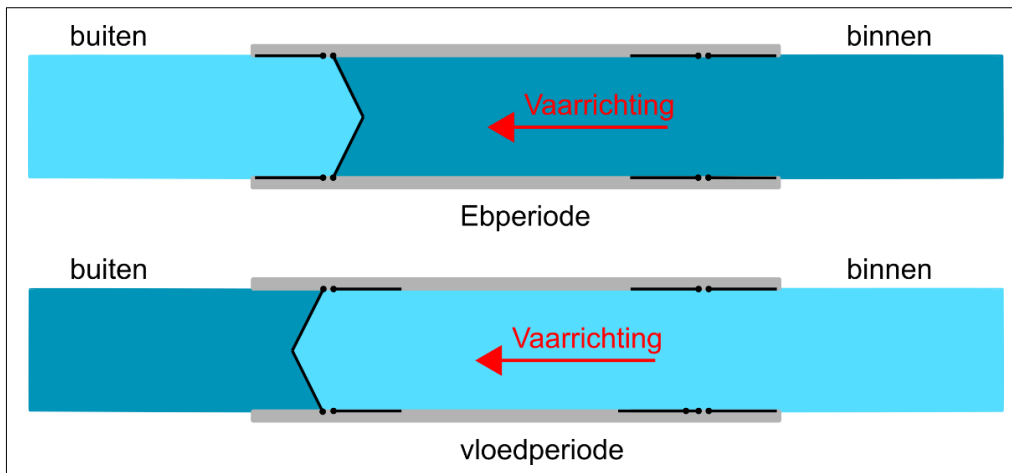
Figuur 34: Overzicht schuttingen van buiten naar binnen in eb- en vloedperiode

In geval van een ebperiode zal bij aanvaren van de binnendeur dit tegen het verval in plaatsvinden. Indien het schip doorvaart blijft het zeer waarschijnlijk klem zitten tussen de deuren die door het verval dichtgedrukt worden. Hierdoor is het uitstromende debiet enigszins beperkt. De faalkans van sluiten van een vloeddeur voordat vloed (nauwkeuriger gezegd, de waterstand hoger wordt dan de maximaal toelaatbare buitenwaterstand bij niet hoogwaterkerend gesloten kunstwerk) optreedt is geschat op een kans van 1/100. Dit betekent dat van de 400 nivelleringen per jaar er 4 worden meegeteld als risicovolle nivellering.

Voor de vloodsituatie geldt dat dit een standaard aanvaarsituatie is, waarbij het uitvaren van het keermiddel tot overstromingsgevolgen kan leiden. De 400 nivelleringen die hiertoe behoren worden dus allemaal meegeteld.

Nivellering van binnen naar buiten

Er vinden 2.000 nivelleringen van binnen naar buiten plaats. 40% hiervan is gerelateerd aan beroepsvaart en dit zijn dus 800 nivelleringen per jaar. Van deze 800 vinden er 400 plaats in een ebperiode en 400 in een vloedperiode.



Figuur 35: Overzicht schuttingen van buiten naar binnen in eb- en vloedperiode

In geval van een ebperiode geldt feitelijk hetzelfde als bij de ebperiode in omgekeerde vaarrichting. Dit leidt ertoe dat van de 400 nivelleringen per jaar er 4 worden meegenomen als mogelijk risicovolle nivelleringen.

In het geval van een vloedperiode geldt dat het schip tegen het verval in de deur uitvaart. Dit zorgt ervoor dat er een gereede kans is dat de deuren en het schip samen voor een prop zorgen waardoor instroming beperkt zal zijn. Als gevolg hiervan kan worden getracht om de vloeddeur in het binnenhoofd te sluiten. Het is daarnaast waarschijnlijk dat het schip door de stroming terug wordt gedrukt de kolk in en dat de deuren weer sluiten. Dit in gedachten nemend wordt het aantal risicovolle nivelleringen in deze situatie gehalveerd en daarmee naar 200 gebracht.

Totaal aantal risicovolle nivelleringen

Het totale aantal risicovolle nivelleringen wordt op bovenstaande wijze ingeschat op $4+400+4+200 = 608$ nivelleringen per jaar. Dus invoer is $f_{nivellering} = 608$ [1/jaar].

4.5.2 Kans op aanvaring tweede keermiddel per nivellering

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
$P_{aanvaring,nivellering}$	[1/nivellering]	det	invoer ⁴	-	-	-	-	-

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 13)

De parameter $P_{aanvaren,nivellering}$ is kans per nivellering dat het gesloten keermiddel bij binnenvaren wordt aangevaren.

Hoe te bepalen

Indien bij de sluis het aantal nivelleringen en het aantal aanvaringen wordt bijgehouden gedurende een langere periode is het mogelijk om met behulp van statistiek een kans op aanvaren af te schatten. Indien dergelijke informatie niet voorhanden is, kan gebruik worden gemaakt van hetgeen is afgeleid in [32]. Hierin wordt een aanvaarkans per nivellering aangegeven van $1/33.000$ [1/nivellering].

Aandachtspunten

-

Voorbeeld

Van een schutsluis is bekend dat er jaarlijks gemiddeld 5.000 grote binnenvaartschepen worden gesluisd met gemiddeld twee binnenvaartschepen per nivellering. Tijdens de afgelopen 10 jaar zijn er 4 aanvaringen (aantikken) van de gesloten deur opgetreden, zonder dat hierbij bezwijken van het keermiddel is opgetreden.

Per jaar vinden er $5.000/2 = 2.500$ nivelleringen plaats. Met een totaal van 4 aanvaringen per 10 jaar en $10 \times 2.500 = 25.000$ nivelleringen, komt hiermee de aanvaarkans per nivellering uit op $4/25.000 = 1/6.250$ per nivellering. Dus invoer is $P_{aanvaring;nivellering} = 1/6.250 = 1,60 \cdot 10^{-4}$ [1/nivellering].

Een mogelijke aanscherping kan nog plaatsvinden door te kijken of de oorzaken van de aanvaringen bekend zijn. Indien bijvoorbeeld in twee van de vier gevallen de botsing is veroorzaakt doordat het landvast (touw waarmee een schip wordt vastgelegd aan de wal) gebroken is of misgegooid, kan worden verondersteld (en wellicht ook vanuit de bekende gevallen worden bevestigd) dat de aanvaarsnelheid zeer laag was en niet tot bezwijken zal leiden. In dat geval is er sprake van 2 van belang zijnde aanvaringen. De aanvaarkans wordt dan $2/25.000 = 1/12.500 = 8,0 \cdot 10^{-5}$ [1/nivellering].

4.6 Deelfaalmecanisme Z421 Aanvaarenergie groter dan kritieke waarde

Voordat dit deelfaalmecanisme verder wordt besproken wordt opgemerkt dat in de ROK [30], specifiek paragraaf 5.10 hierin, nader ingaat op de wijze waarop RWS omgaat met aanvaarbeastingen.

De kans op bezwijken van keermiddelen als gevolg van aanvaren wordt bepaald door de volgende parameters die vervolgens daarna worden besproken:

- De kritieke aanvaarenergie, waarbij het keermiddel bezwijkt (E_c).
- Modelfactor voor de aanvaarbeasting (m_E).
- Massa van het schip (m).
- Aanvaarsnelheid (v).

De laatste 3 parameters bepalen de optredende aanvaarenergie (E_0) welke is gedefinieerd als:

$$E_0 = \frac{1}{2} \cdot m_E \cdot m \cdot v^2 \quad 51$$

De Z-functie voor het bezwijken als gevolg van aanvaren is nu:

$$Z = E_c - \frac{1}{2} \cdot m_E \cdot m \cdot v^2 \quad 52$$

4.6.1 *Bezwijkwaarde aanvaarenergie*

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
E_c	[kNm]	logn	invoer ⁴	$V_r = 0,3$ ¹	KW	0	-	-

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 13)

De parameter E_c is de waarde van de aanvaarenergie, waarbij het keermiddel bezwijkt.

Hoe te bepalen

De kritieke aanvaarenergie moet worden bepaald uit de opbouw van de constructie van het keermiddel en de opbouw van de constructie van het schip (met name de scheepshuid). Afhankelijk van de stijfheidsverhoudingen tussen schip en keermiddel vervormen beide constructies en absorberen beide een deel van de kinetische aanvaarenergie.

Met betrekking tot de variatiecoëfficiënt geldt dat deze niet aangepast kan worden. Deze is op basis van expert judgement tot stand gekomen. Gelet op de vele onzekerheden waarmee de bepaling van de kritieke aanvaarenergie is omgeven, is een nadere bepaling van deze variatiecoëfficiënt zonder zeer grote inspanningen niet mogelijk.

Aandachtspunten

Het bepalen van de kritieke aanvaarenergie is een lastige opgave, waarbij in eerste instantie wordt aanbevolen om een aantal conservatieve uitgangspunten te hanteren zoals:

- Alle kinetische aanvaarenergie wordt door het keermiddel geabsorbeerd. Dit betekent dat het schip als oneindig stijf ten opzichte van het keermiddel wordt verondersteld.
- Het eenvoudig schematiseren van het keermiddel door bijvoorbeeld alleen de horizontale liggers te beschouwen.
- Op basis van de vorm en afmetingen van het maatgevende schip en de waterstanden in de kolk een inschatting te maken van welke onderdelen van het keermiddel direct worden aangevaren.

Met deze uitgangspunten kan met niet al te grote inspanning een zeer conservatieve faalkans worden berekend. Hiermee kan wel worden bepaald of aanvaring een te kwantificeren risico vormt of niet. Zo ja, dient een meer realistische berekening van de kritieke aanvaarenergie te worden gemaakt, waarbij minder conservatieve aannames worden gemaakt. Uiteindelijk kan met een programma met de Eindige Elementen Methode, die ook grote vervormingen toestaat, een nauwkeurige som worden gemaakt.

Voorbeeld

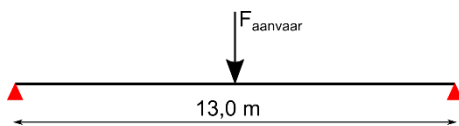
Een sluis is uitgerust met stalen hefdeuren, welke bestaan uit een plaat die middels horizontale dwarsdraggers (HEA500) is versterkt/verstijfd. De doorvaarbreedte van het buitenhoofd is 12,5 m. Hart op hart oplegging van de deur is 13 m. Het plastisch weerstandsmoment van een HEA500 profiel is $W_{pl} = 3.949 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$, het traagheidsmoment is $I = 86.975 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$ en de staalkwaliteit is S355.

De geometrie van de deur en het maatgevende schip hebben aangetoond dat bij een botsing 3 dwarsdraggers door het schip worden aangevaren. Doordat de breedte van het schip beperkt kleiner is dan de breedte van het sluishoofd, wordt aangenomen dat de deur in het midden van de overspanning loodrecht wordt

aangevaren. Het schip heeft een puntvormige boeg, waardoor er in eerste instantie drie contactvlakken (één per dwarsdrager) zijn tussen schip en deur.

Uitgangspunt is dat de drie aangevaren dwarsdragers zich net onder en boven de waterlijn bevinden. De belastingen op deze dwarsdragers als gevolg van het verval wordt in dit voorbeeld daarom verwaarloosd. Of dit valide is zal in per situatie moeten worden bekeken

Wanneer alleen de sterkte van de dwarsdragers in ogenschouw wordt genomen, kan het geheel worden geschematiseerd tot een drietal liggers die scharnierend zijn opgelegd in de deurkassen en die worden belast met een puntlast in het midden van de overspanning. Het plastisch moment zal dan ook in het midden ontstaan. Voor één HEA-ligger geldt dat het plastische moment (M_p) gelijk is aan $W_{pl} \times \sigma_e = 3.949 \cdot 10^3 \times 355 = 1,4 \text{ MNm}$. De totale bezwijkkracht van de deur wordt in dit geval gelijk aan $3 \times 1,4 \text{ MNm} = 4,2 \text{ MNm}$.



In bovenstaand schema is het moment in het midden gelijk aan $\frac{1}{4} \times F_{aanvaar} \times \ell$. Hieruit kan de kracht worden berekend die leidt tot het optreden van het plastisch moment. Per dwarsdrager is dit: $F_p = 4 \times M_p / \ell = 4 \times 1,4 / 13 = 431,35 \text{ kN}$. De totale botskracht kan dus $3 \times 431,35 = 1,29 \text{ MN}$ bedragen.

Bij het optreden van het plastische moment kan de verplaatsing in eerste instantie benaderd worden door (vergeet-mij-nietje):

$$\delta = \frac{F \ell^3}{48EI} = \frac{431,35 \times 13^3}{48 \times 2,1 \cdot 10^8 \times 86,975 \cdot 10^{-5}} = 108 \text{ mm}$$

De totaal opneembare energie van de deur wordt met deze grove benadering dus gelijk aan $E_c = \frac{1}{2} \times F_{p,totaal} \times \delta = \frac{1}{2} \times 1,29 \times 0,108 = 0,07 \text{ MNm} = 70 \text{ kNm}$.

Opgemerkt wordt dat er nog geen rekening is gehouden met een eventuele dynamische vergrotingsfactor, aangezien de belasting nu als statisch is beschouwd. Een indicatieve waarde voor deze factor is circa 1,3. Gelet op de standaardwaarde van de variatiecoëfficiënt en de conservatieve benadering die hier is gevolgd (alleen de dwarsdragers in rekening gebracht en niet het samengestelde profiel van dwarsdragers en beplating), kan het toepassen van deze factor in dit voorbeeld achterwege worden gelaten.

Overigens laat dit onverlet dat bovenstaande benadering een globale eerste benadering is op basis van conservatieve uitgangspunten. Verfijning van deze eerste benadering is mogelijk, bijvoorbeeld door ook met vervormingen van het schip te rekenen of in een EEM-model het gehele keermiddel door te rekenen.

4.6.2 Massa van het schip

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r / σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
------------	---------	------	-------	----------------	------------	----------	------------	----------

m	[ton]*	nor	invoer ₄	$V_r = 0,2$ ₂	KW	0	-	-
-----	--------	-----	---------------------	--------------------------	----	---	---	---

* 1 ton = 1.000 kg.

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 13)

De parameter m is de totale massa waarmee het maatgevende schip tegen het keermiddel botst.

Hoe te bepalen

De massa van het maatgevende schip kan worden bepaald uit statistieken die ter plaatse van de sluis worden bijgehouden. Indien deze niet voorhanden zijn, kan gebruik worden gemaakt van de standaardwaarden die voor de diverse scheepvaartklassen worden gebruikt conform Richtlijnen vaarwegen 2020 [31]. Als maatgevend schip kan in eerste instantie gekozen worden voor het schip met de grootste kinetische energie in de kolk. Deze wordt vervolgens representatief gesteld voor alle schepen, waarvan verwacht wordt dat ze in staat zijn het keermiddel uit te varen. De schepen waarvan dit niet worden verwacht doen dus niet mee. Zie hiervoor ook de aandachtspunten bij de parameter 'aantal nivellerings per jaar': $f_{nivellering}$ (paragraaf 4.5.1).

Naast de massa van het schip (scheepsconstructie, lading en brandstof) moet ook rekening worden gehouden met de met het schip meebewegende watermassa (hydrodynamische massa). Conform uitgevoerde studies²² is dit gelijk aan een factor van 1% tot 10% van de massa van het schip.

Het bepalen van de spreiding (variatiecoëfficiënt) is mogelijk, indien beschikt kan worden over een nauwkeurige registratie van schepen en tonnages. Aanbevolen wordt om in eerste instantie de standaardwaarde te hanteren, welke op basis van expert judgement tot stand is gekomen.

Aandachtspunten

Zowel de massa van beladen als onbeladen schepen kan van belang zijn. Onbeladen schepen zullen in het algemeen een hogere vaarsnelheid hebben bij nadering van de kolk en ook in de kolk. Dit mede als gevolg van de relatieve geringe diepgang van het schip.

Voor wat betreft massa's van binnenvaartschepen kan gebruik worden gemaakt van tabel 8 op pagina 26 uit de Richtlijn Vaarwegen 2020 [31].

Voor gegevens omtrent tonnage van zeeschepen dient specifiek naar de gegevens voor de betreffende sluis te worden gekeken. Hierbij wordt verwezen naar de EAU [33]. Ook in de ROK [30] wordt hiernaar verwezen.

Met betrekking tot de duwvaart wordt nog opgemerkt dat een reductie van de massa met een factor 2 valt te overwegen conform [30]. Dat is gestoeld op de volgende gedachte: bij een frontale botsing door een duwkonvooi zullen veelal de verbindingen tussen de bakken onderling breken en zullen de bakken elk hun eigen richting gaan. De botsingsenergie die dan op één plaats moet worden opgenomen, is minimaal de energie van één bak en nooit meer dan maximaal de energie van het halve konvooi.

Voorbeeld

²² Zie onder andere afstudeerrapport "Aanvaarbelastingen door schepen op starre constructies", TUDelft, mei 1993.

Van een binnenvaartsluis is bekend dat er zowel beroepsvaart als recreatievaart plaatsvindt. Er is geen statistiek bijgehouden over de schepen die worden geschut. Bekend is dat de sluis in een vaarweg ligt die geschikt is voor klasse III schepen. Tevens bekend is dat ook daadwerkelijk schepen van klasse III (RWS-klasse M4) van de sluis gebruik maken.

De inschatting van de massa kan aan de hand van tabel 8 op pagina 26 uit de Richtlijn Vaarwegen 2020 [31] plaatsvinden. In eerste instantie wordt uitgegaan van een massa 'm' van 825 ton. Dit is het gemiddelde van CEMT-klasse III (M4). Rekening houdend met de standaard variatiecoëfficiënt van 0,2 ($\sigma=0,2 \times 825 = 165$ ton) betekent dit dat een waarde van de massa 'm' van 1.097 ton (= $825 + 1,65^{23} \times 165$) een overschrijdingskans van 5% heeft. Dit lijkt wat aan de conservatieve kant gelet op de gegevens uit de Richtlijn Vaarwegen 2020 [31]. Er wordt vanuit gegaan dat er naast de massa van het schip nog 10% meebewegende watermassa is, zodat de in te voeren parameter 'm' gelijk is aan $1,1 \times 825 = 908$ ton.

4.6.3 Modelfactor voor aanvaarbeasting

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
m_E	[-]*	nor	1,0 ¹	$V_r = 0,2$ ¹	KW	0	-	-

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 13)

De parameter m_E is de modelfactor ten behoeve van onzekerheden in het model.

Hoe te bepalen

In het instrumentarium is reeds een standaardwaarde aanwezig. Zowel het gemiddelde als de variatiecoëfficiënt kunnen niet worden aangepast.

Aandachtspunten

n.v.t.

Voorbeeld

n.v.t.

4.6.4 Aanvaarsnelheid

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
v	[m/s]*	nor	invoer ⁴	$V_r = 0,55$ ⁴	KW	0	-	1

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 13)

De parameter v is de snelheid waarmee het schip het gesloten keermiddel raakt.

Hoe te bepalen

Het gaat om de snelheid van het schip op het moment van aanvaren. Deze kan worden afgeleid uit de vaarsnelheden die in de kolk van een sluis voorkomen. Deze informatie is echter niet of nauwelijks beschikbaar. In die gevallen dat er geen data beschikbaar is, kan voor nu gebruik worden gemaakt van de data die beschikbaar is in het rapport [32]. Hierin zijn voor een aantal sluizen met verschillende

²³ De waarde van 1,65 is afkomstig uit de tabellen met waarden voor de standaardnormale verdeling

vaarwegklasse (CEMT-klasse) vaarsnelheden in kolk gemeten en berekend. Uit deze rapportage is onderstaande tabel afgeleid:

Tabel 15: Aanvaarsnelheden voor diverse vaarwegklasse en scheepsklasse

Vaarwegklasse	klasse schip	lading	Waterdiepte [m]	V _{gem} [m/s]
IV	IV	ongeladen	3,65	1,15
			6,00	1,45
			10,00	1,50
		geladen	3,65	0,40
			6,00	0,65
			10,00	0,95
Va	IV	ongeladen	3,85	1,20
			6,00	1,40
			10,00	1,50
		geladen	3,85	0,50
			6,00	0,75
			10,00	1,00
	Va	ongeladen	3,85	1,15
			6,00	1,40
			10,00	1,50
		geladen	3,85	0,45
			6,00	0,75
			10,00	0,95
Vb	IV	ongeladen	3,90	1,20
			6,00	1,35
			10,00	1,45
		geladen	3,90	0,45
			6,00	0,70
			10,00	0,90
	Va	ongeladen	3,90	1,10
			6,00	1,35
			10,00	1,45
		geladen	3,90	0,40
			6,00	0,70
			10,00	0,90
	Vb	ongeladen	3,90	1,55
			6,00	1,55
			10,00	1,60
		geladen	3,90	0,55
			6,00	0,90
			10,00	1,15

De volgende opmerkingen kunnen worden geplaatst bij toepassing van Tabel 15:

- In de vierde kolom is de waterdiepte in de kolk weergegeven. Hiermee wordt de invloed van de relatieve blokkade van een schip in de kolk zichtbaar gemaakt. Hoe groter deze blokkade, des te sterker wordt het schip in de kolk afgeremd. Parameters die de relatieve blokkade beïnvloeden zijn diepgang (afhankelijk van scheepsklasse en beladingsgraad) versus waterdiepte (afhankelijk van verval

- over de sluis en van de vraag of het opvaart of afvaart betreft) en scheepsbreedte versus kolkbreedte.
- Bij afwijkende waterdiepte kan lineair worden geïnterpoleerd. Het effect van de waterdiepte is weliswaar niet geheel lineair, maar voor de hier gekozen benadering voldoende.
 - Opvallend is dat de aanvaarsnelheden van klasse IV en Va schepen kleiner worden in een kolk die geschikt is voor klasse Vb ten opzichte van de aanvaarsnelheden in een kolk geschikt voor klasse Va. Dit wordt veroorzaakt doordat een klasse Vb kolk dezelfde breedte heeft als een klasse Va kolk, maar daarentegen wel langer is. Daarmee is er een langere lengte beschikbaar waarover een schip kan worden afgeremd.
 - Klasse Vb schepen (2 baks-duwvaart) hebben een hogere aanvaarsnelheid dan klasse Va en IV schepen. Dit komt doordat deze schepen uitgerust zijn met een groter vermogen en de vormgeving is ongunstiger met betrekking tot de weerstandskrachten in de kolk. Klasse Vb bestaande uit 2-baks duwvaart wordt hierdoor minder afgeremd in de kolk.
 - Bij de aanvaarsnelheden in de tabel geldt een variatiecoëfficiënt V_r van 0,45 voor alle situaties, met uitzondering van alle beladen schepen in ondiep water (in de tabel een waterdiepte kleiner of gelijk aan 3,90 m). Voor deze categorie geldt een variatiecoëfficiënt van 0,55.

Indien in het geheel geen gegevens van de schepen bekend zijn kan een eerste inschatting van de aanvaarenergie worden gemaakt door uit te gaan van een aanvaarsnelheid van 1,5 m/s met een variatiecoëfficiënt V_r van 0,5.

Aandachtspunten

Om een goede inschatting te maken van de aanvaarsnelheden, is het altijd noodzakelijk ter plaatse de situatie te aanschouwen en met de sluismeester(s) het gesprek aan te gaan. Gelet op alle onzekerheden in het model van aanvaren, moet hierbij bedacht worden dat het niet om de laatste cijfers achter de komma gaat.

In Tabel 15 zijn niet alle klassen sluisen opgenomen. Indien er sprake is van een afwijkende klasse, kan met behulp van de tabel en met vergelijking van relatieve afmetingen van kolk en schepen een onderbouwde inschatting worden gemaakt.

Met betrekking tot de maatgevende aanvaarenergie dienen altijd de snelheden in combinatie met de totale massa van de schepen die de sluis passeren te worden beschouwd.

Voorbeeld

Een sluis in een klasse Vb vaarweg. De kolkdiepte bedraagt 7,0 m. Middels een inventarisatie is reeds het aantal risicovolle nivelleringen (en daarmee scheepspassages) bepaald. Dit aantal bedraagt 200 per jaar. In onderstaande tabel zijn nadere gegevens opgenomen en is het voorbeeld verder uitgewerkt. Hierbij zijn ook indicatieve kinetische energieën bepaald.

klasse schip	Status	aantal	V_{gem} [m/s]	massa [ton]	E_{kin} [kNm]
IV	geladen	20	0,75	1650	510
	ongeladen	60	1,38	700	728
Va	geladen	40	0,75	3200	990
	ongeladen	40	1,38	1500	1560
Vb	geladen	30	0,96	6000	3057
	ongeladen	10	1,56	2000	2686
	totaal	200			

De aanvaarsnelheid is met behulp van Tabel 15 bepaald. Bij een diepte van 7,0 m is er rechtlijnig geïnterpoleerd tussen de waarde voor een waterdiepte van 6,0 m en voor een waterdiepte van 10,0 m. Opgemerkt wordt dat bij bepaling van de energie nog rekening is gehouden met 10% massa toeslag als gevolg van meebewegende watermassa.

4.7 Deelfaalmecanisme Z423 Kans op falen van het herstel van een fatale aanvaring

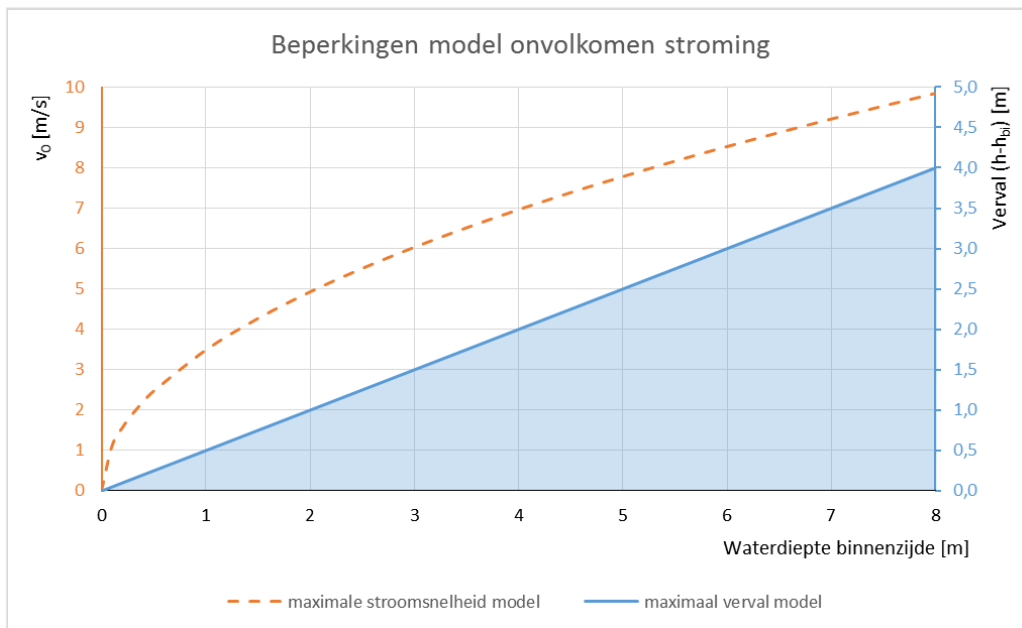
De kans op falen van het herstel van een fatale aanvaring, zijnde het alsnog sluiten van het geopende keermiddel na het uitvaren van het gesloten keermiddel, wordt bepaald door de volgende parameters:

- De kritieke stroomsnelheid waarbij keermiddel nog net gesloten kan worden ($v_{c,sluit}$).
- De buitenwaterstand (h). Deze wordt bepaald door het instrumentarium.
- De binnenwaterstand (h_{bi}).
- Modelfactor voor lange overlaten (m_{vl} , zie paragraaf 4.8.7.2).
- Zwaartekrachtversnelling (g).

De laatste 4 parameters bepalen de optredende stroomsnelheid in de sluis (v_0) met behulp van het model voor volkomen stroming (zie ook paragraaf 4.8.7):

$$v_0 = m_{vl} \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot g \cdot (h - h_{bi})}}{0,9} \quad \text{Randvoorwaarde: } h \leq \frac{3}{2} \cdot h_{bi} - \frac{1}{2} \cdot h_{dr} \quad 53$$

De bodembescherming faalt als de optredende stroomsnelheid groter is dan de kritieke stroomsnelheid. Indien niet aan de randvoorwaarde van de formule wordt voldaan, wordt door het instrumentarium $v_0=0$ gehanteerd. Ter indicatie zijn in onderstaande grafiek de beperkingen van het model voor de stroomsnelheid weergegeven. Het geldigheidsgebied is het gebied onder de blauwe doorgetrokken lijn. De gestippelde oranje lijn geeft de *maximale* stroomsnelheid die bij een bepaalde waterdiepte aan de binnenzijde ($=h_{bi}-h_{dr}$) berekend kan worden in het geldigheidsgebied van de formule.



Figuur 36: Geldigheidsgebied verval en stroomsnelheid bij maximaal verval in het model voor een onvolkomen overlaat

Voorbeeld:

Bij een waterdiepte aan de binnenzijde van 4 m, is het model van onvolkomen stroming valide tot een verval van 2 m. Bij een verval van 2 m hoort een stroomsnelheid van 7 m/s. Bij lagere vervallen is de stroomsnelheid kleiner.

De Z-functie voor falen van het herstel door het sluiten van het niet gesloten keermiddel is nu:

$$Z = v_{c,sluit} - m_{vl} \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot g \cdot (h - h_{bi})}}{0,9} \quad 54$$

4.7.1 Kritieke stroomsnelheid sluiting eerste keermiddel

Wat is het

Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
$V_{c,sluit}$	[m/s]	nor	Invoer ⁴	$V_r = 0,2$ ¹	KW	0	-	1

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 13)

Kritieke stroomsnelheid van het water ter plaatse van het als herstel te sluiten eerste keermiddel waarbij dit keermiddel nog net gesloten kan worden.

Hoe te bepalen

Hiervoor wordt verwezen naar paragraaf 4.6.4.2 van de handleiding kunstwerken [38]. De in deze paragraaf genoemde kritieke stroomsnelheden zijn tot stand gekomen op basis van expert judgement. Via nadere analyses zijn mogelijk andere waarden te bepalen.

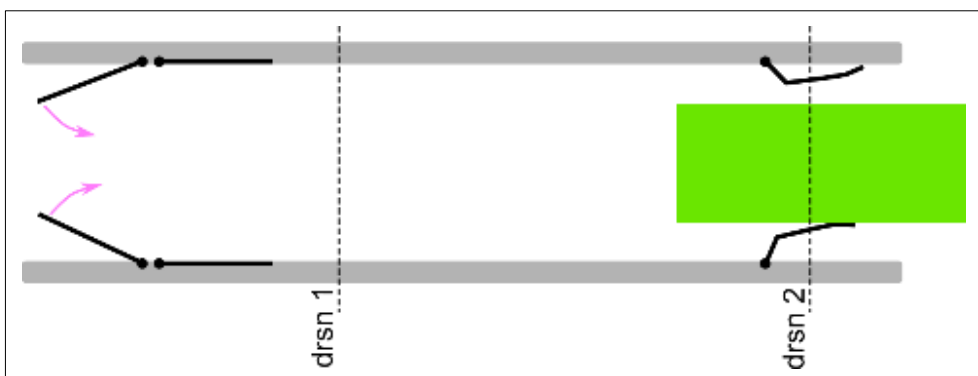
De waarde van de variatiecoëfficiënt kan niet aangepast worden.

Aandachtspunten

Indien na uitvaren van de keermiddelen de sluis deels geblokkeerd wordt door het schip en/of de uitgevaren keermiddelen, kan hiermee op provisorische wijze rekening worden gehouden door manipulatie van de parameter $v_{c;sluit}$. Een blokkade in de doorstroomopening leidt immers tot een lagere stroomsnelheid ter plaatse van de eerste keermiddelen.

Voorbeeld

Stel een sluis die voorzien is van puntdeuren als keermiddelen. Stel dat de binnenste deuren tijdens het invaren worden uitgevaren, maar dat het schip blijft steken ter plaatse van de uitgevaren deuren (zie onderstaand figuur).



Figuur 37: Voorbeeld van situatie met uitgevaren binnendeur

De breedte van de sluis bedraagt 15 m. De kritieke stroomsnelheid met betrekking tot het sluiten van de buitendeuren bedraagt 1,0 m/s. De binnenwaterstand bedraagt NAP +4,00 m. De bodem van de kolk ligt gelijk aan de bodem van de aansluitende watergangen en heeft een hoogte van NAP +0,00 m. De breedte van het schip is 12 m en de diepgang is 2,50 m

De in te voeren waarde voor $v_{c;sluit}$ kan nu als volgt worden bepaald: Getracht wordt de stroomsnelheid te bepalen die bij drsn 2 moet optreden, opdat ter plaatse van de buitendeuren de kritieke stroomsnelheid van 1,0 m/s optreedt. Middels het oplossen van de volgende relatie kan de buitenwaterstand worden bepaald waarbij de kritieke stroomsnelheid ter plaatse van de buitendeuren optreedt:

$$v_{c;sluit} \times A_1 = v_2 \times A_2 = 1 \times B \times (h - h_{ok}) = m_{vl} \times \frac{\sqrt{2 \times 9,81 \times (h - h_{bi})}}{0,9} \times (B \times (h - h_{ok}) - B_s \times d_s)$$

$$1 \times 15 \times (h - 0,00) - m_{vl} \times \frac{\sqrt{2 \times 9,81 \times (h - 4)}}{0,9} \times (15 \times (h - 0,00) - 12 \times 2,5) = 0$$

Oplossen van bovenstaande vergelijking waarbij voor m_{vl} een waarde van 0,9 is toegepast, geeft een buitenwaterstand van NAP + 4,20 m. Hierbij hoort een verval van 0,20 m en dat leidt middels de formule 53 tot een stroomsnelheid van 1,88 m/s. Dit betekent dat $v_{c;sluit} = 1,88$ m/s.

4.7.2 Binnenwaterstand

Wat is het

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

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 13)

De parameter h_{bi} is het waterpeil aan de binnendijkse zijde van het kunstwerk en in het model van aanvaren van toepassing op de bepaling van de optredende stroomsnelheid na het uitvaren van het tweede keermiddel.

Hoe te bepalen

De parameter kan worden bepaald in overleg met de beheerder. Aangezien aanvaren niet direct gerelateerd hoeft te zijn aan hoogwater kan meestal worden uitgegaan van het aanwezige streefpeil aan de binnenzijde.

Indien er sprake is van relatief grote schommelingen in de binnenwaterstand, kan met eventueel aanwezige waarnemingen van deze binnenwaterstand een statistisch gemiddelde en standaardafwijking worden afgeleid. Als deze waarnemingen niet beschikbaar zijn, dient een conservatieve waarde te worden genomen.

Aandachtspunten

De betreffende parameter speelt niet alleen bij het deelfaalmecanisme van bezwijken door aanvaring een rol. Ook bij bezwijken als gevolg van een instromend debiet (komberging, bodembescherming) is de parameter van belang (zie paragraaf 4.8.7.3). De waarde van de parameter is voor zowel het model van instromend debiet (komberging, bodembescherming) als voor aanvaren hetzelfde en resulteert dus niet in conflicterende beschouwingen.

Binnen het faalmecanisme *Falen door bezwijken waterkerende constructieonderdelen* is een aparte parameter beschikbaar waarmee een afwijkende binnenwaterstand kan worden gemodelleerd die betrekking heeft op de sterkte (bijvoorbeeld bij het opzetten van een schutkolk bij hoogwater). Dit betreft de parameter $h_{bi;CB}$ (zie paragraaf 4.3.2.5). Verwisseling van de parameters dient uiteraard voorkomen te worden.

Voorbeeld

Niet van toepassing.

4.8 Deelfaalmecanisme Z21 Onvoldoende bergend vermogen

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

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

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

$$V_c = m_{kom} \cdot A_{kom} \cdot \Delta h_{kom} \quad 55$$

De parameters betreffen de 'belasting' van het systeem en worden ook aangeduid als Instromend volume achterland ($V_{instroom}$) welke is gedefinieerd als:

$$V_{instroom} = m_{in} \cdot f_{ts|open} \cdot t_s \cdot Q_{in|open} \quad 56$$

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

$$Z = V_c - V_{instroom} = m_{kom} \cdot A_{kom} \cdot \Delta h_{kom} - m_{in} \cdot f_{ts|open} \cdot t_s \cdot Q_{in|open} \quad 57$$

In het achtergrondrapport [29] wordt dieper op de achtergronden van komberging ingegaan.

Belangrijk aandachtspunt is dat het kombergingsmodel niet toegepast hoeft te worden als op voorhand duidelijk is dat het bezwijken van de constructie of een waterkerend constructieonderdeel plaatsvindt bij een dusdanig groot verval dat de dan optredende stroomsnelheden direct tot bezwijken van de bodembescherming leidt. De bodembescherming is dan maatgevend.

Het kombergingsmodel kan in het bovenstaande geval worden gevuld met dusdanig grote waarden, dat de faalkansbijdrage van dit deelfaalmechanisme in Riskeer verwaarloosbaar klein wordt.

4.8.1 Modelfactor kombergend vermogen

Wat is het

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

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 13)

De parameter m_{kom} is de modelfactor ten behoeve van onzekerheden in het model voor de beschikbare komberging.

Hoe te bepalen

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

Aandachtspunten

n.v.t.

Voorbeeld

n.v.t.

4.8.2 Kombergend oppervlak

Wat is het

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

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 13)

De parameter A_{kom} is het oppervlak dat beschikbaar is voor komberging. Meestal is dit het oppervlak van het achter het kunstwerk liggende watersysteem, maar het kan ook een oppervlak van een gebied zijn.

Hoe te bepalen

Afhankelijk van de vormgeving van de beschikbare komberging kan de bepaling zeer eenvoudig zijn, maar ook zeer complex. Het kombergend oppervlak onderhoudt een sterke relatie met de voor komberging beschikbare peilverhoging op het binnenwater Δh_{kom} (zie paragraaf 4.8.3).

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

Met betrekking tot de variatiecoëfficiënt wordt aanbevolen deze alleen aan te passen als dit met behulp van een kwantitatieve berekening kan worden onderbouwd.

Aandachtspunten

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

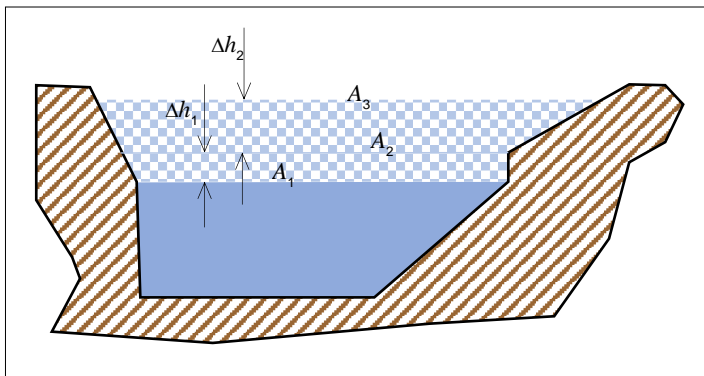
- 1 Toestroming van water vanuit het binnenland kan niet specifiek gemodelleerd worden, maar wel globaal worden meegenomen in de sommen. Deze toestroming kan plaatsvinden onder normaal verval, maar ook via poldergemalen die hun water lozen op de boezem.
- 2 Een kombergend volume kan worden benut door meerdere kunstwerken (en dijkstekkingen) in een dijktraject. Indien de correlatie met betrekking tot *Falen door bezwijken waterkerende constructieonderdelen* of *Falen door instabiliteit constructie en grondlichaam* groot is tussen deze kunstwerken²⁴, kan het nodig zijn om het totaal beschikbare volume te verdelen over deze kunstwerken. Indien de correlatie beperkt is, dan mag de kans dat de kunstwerken gelijktijdig bezwijken op sterkte verwaarloosbaar klein worden geacht.
- 3 Een kombergend volume kan worden aangesproken door meerdere kunstwerken (en dijkstrekkingen) die behoren tot verschillende dijktrajecten. Hier gelden dezelfde overwegingen als bij het vorige punt.
- 4 Tijdens hoogwater kan het voorkomen dat gemalen worden ingezet om hoogwater te lozen op het buitenwater. Hierdoor komt feitelijk meer kombergend vermogen beschikbaar. Om dit in rekening te brengen dient rekening te worden gehouden met de duur van de hoogwatergolf en de capaciteit van de afvoerende gemalen.
- 5 In het geval falen van een kunstwerk als gevolg van een tekort aan sterkte van een constructieonderdeel, is altijd sprake van een substantieel verval over het

²⁴ Bijvoorbeeld kunstwerken die (nagenoeg) identiek zijn met betrekking tot vervalbelastingen en kerende hoogte in gesloten toestand, welke in dezelfde periode zijn ontworpen en gebouwd.

kunstwerk. Dit impliceert ook een relatief hoge buitenwaterstand. In relatie tot het verloop van de hoogwatergolf betekent dit dat deze reeds al een tijdje aan het opbouwen is. Instroming door het kunstwerk tijdens een hoogwatergolf als gevolg van het bezwijken van een constructieonderdeel zal dan ook altijd over kortere periode aanhouden dan de tijdsduur van de hoogwatergolf zelf. Afhankelijk van het dagelijkse verval over het kunstwerk kan er dan alsnog sprake zijn van instroming na het passeren van de hoogwatergolf en onder voorwaarde dat de instroming inmiddels nog niet is verholpen.

Voorbeeld

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



Figuur 38: Watergang waarbij natte oppervlak niet recht evenredig toeneemt met waterdiepte

In het dijktraject bevinden zich nog drie kunstwerken die uitkomen op dezelfde watergang. Dit betreft een gemaal dat gedurende hoogwater water uitmaalt (Q_{pomp} m³/s), een schutsluis en nog een gelijkwaardige keersluis daterend uit hetzelfde jaartal als de beschouwde keersluis en daarnaast ontworpen op dezelfde waterstanden. Beide keersluizen hebben een stalen hefschuif als keermiddel en dateren van 50 jaar geleden. De schutsluis beschikt over schutdeuren in binnen- en buitenhoofd met een kerende hoogte die ruim groter is dan het kritieke binnenpeil. Tevens is er een stormvloeddeur aanwezig met een kerende hoogte gelijk aan de kruin van de aansluitende dijk Deze stormvloeddeuren zijn recent aangelegd en ontworpen op de vervalbelastingen over 50 jaar. De sterkte van de stormvloeddeuren is daardoor aanmerkelijk groter dan die van de stalen hefschuiven van de keersluizen. Het beschikbare kombergend volume wordt gedurende een hoogwater ook benut door toestromend water vanuit het achterland met een gemiddelde toevoer van $Q_{achterland}$ m³/s.

Op het moment dat een waterkerend constructieonderdeel bezwijkt en er sprake is van instroming door het kunstwerk is het volgende kombergende volume beschikbaar voor het kunstwerk:

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

Waarin:

$V_{C,kw}$ Kombergend vermogen beschikbaar voor het beschouwde kunstwerk [m³].

A_{gem}	Het vanuit komberging gemiddeld beschikbare oppervlak [m ²].
Δh_{kom}	Toelaatbare peilverhoging op het binnenwater (zie §4.8.3) [m].
$V_{achterland}$	Ingestroomd volume als gevolg van aanvoer vanuit het achterland op het moment dat bezwijken van het constructieonderdeel plaatsvindt [m ³].
V_{pompen}	Uitgeslagen volume als gevolg van pompen op het moment dat bezwijken van het constructieonderdeel plaatsvindt [m ³].
n	Aantal kunstwerken buiten het beschouwde kunstwerk dat op dezelfde komberging uitkomt en een vergelijkbare bezwijkwaterstand kennen [-].
$V_{kw,i}$	Instromend volume door kunstwerk 'i' dat aansluit op hetzelfde kombergende vermogen en een gecorreleerde bezwijkkans heeft [m ³].

Rekening houdend met het verloop van het ter plaatse van toepassing zijnde verloop van de hoogwatergolf en het tijdstip van bezwijken binnen deze hoogwatergolf ($f_{ts|open} \times t_s$) kan de formule worden omschreven naar:

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

De diverse parameters kunnen nu worden uitgewerkt:

A_{gem} : Het gemiddelde beschikbare kombergend oppervlak is in dit geval gelijk aan (zie figuur vorige pagina):

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

Δh_{kom}	Dit is de waarde van de gegeven toelaatbare peilverhoging.
n	In dit geval gelijk aan 1. Er is namelijk nog één andere keersluis die een vergelijkbare bezwijkwaterstand voor <i>Falen door bezwijken waterkerende constructieonderdelen</i> heeft. De keermiddelen van de schutsluis hebben een aanmerkelijk grotere sterkte. In het voorbeeld wordt verondersteld dat overslag over dijkstrekkingen (zonder bresvorming) nauwelijks aan de orde is bij de condities die relevant zijn voor constructief falen.
$V_{kw,i}$	Het volume dat door de andere keersluis stroomt, zal verhoudingsgewijs net zo groot zijn als het volume door het beschouwde kunstwerk. Het verval over beide objecten is gelijk, waardoor de stroomsnelheid ook gelijk is. $V_{kw,i}$ is hier daarom gelijk aan $V_{c,kw}$.
$f_{ts open}$	Hier is 0,6 gekozen. Dit op basis van het feit dat de keermiddelen niet recent zijn aangelegd, maar gelet op hun levensduur al een en ander aan verval hebben gekeerd. Ingeschat is dat bij een waterstand net onder de toetswaterstand er sprake is van bezwijken, met als gevolg dat de hoogwatergolf nog niet voor de helft gepasseerd is.

De voor het kunstwerk beschikbare komberging is nu gelijk aan:

$$V_{c,kw} = A_{gem} \cdot \Delta h_{kom} + (Q_{pompen} - Q_{achterland}) \cdot f_{ts|open} \cdot t_s - V_{c,kw}$$

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

Het in te voeren kombergend oppervlak wordt nu:

$$A_{gem} = \frac{V_{c,kw}}{\Delta h_{kom}} = \frac{1}{2} \cdot A_{gem} + \frac{(Q_{pompen} - Q_{achterland}) \cdot 0,60 \cdot t_s}{2 \cdot \Delta h_{kom}}$$

4.8.3 Toegestane peilverhoging komberging

Wat is het

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

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 13)

De parameter Δh_{kom} is de peilverhoging op het kombergend oppervlak dat nog net niet leidt tot overstromingsgevolgen in het achterland.

Hoe te bepalen

De kritieke peilverhoging kan bepaald worden middels onderstaande formule:

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

Waarin:

Δh_{kom} Toegestane peilverhoging komberging [m].

$h_{bi;toel}$ Maximaal toelaatbare (kritieke) peil op het binnenwater [mNAP].

$h_{bi;streef}$ Streeppeil of gemiddeld peil op het binnenwater [mNAP].

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

- Het normpeil van het regionale watersysteem wordt overschreden (indien het watersysteem van de komberging is omringd door 'zachte' kades).
- Er staat 0,20 m water op straat/maaiveld, gemiddeld in een groter gebied (postcodegebied) (indien het watersysteem van de komberging is omringd door kades die niet door kunnen breken of als achter de kering geen regionaal watersysteem aanwezig is).

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

Voor het kritieke binnenpeil wordt dus in principe die waterstand aangehouden die past bij de normering van de achterliggende kades. Indien de achterliggende kades niet zijn genormeerd, dient een onderbouwde inschatting van de sterkte van deze kades plaats te vinden. Het binnenpeil is het peil dat onder hoogwateromstandigheden gehandhaafd wordt op het open binnenwater. Dit kan een ander peil zijn dan het streeppeil van het betreffende binnenwater. Het binnenpeil is afhankelijk van het gevoerde waterbeheer vlak vóór en tijdens hoogwater en optredende kwel. Indien het binnenpeil tijdens hoogwater niet bekend is, of niet gecontroleerd wordt, kan als vertrekpunt worden uitgegaan van het winterpeil. Wel moet geverifieerd worden of deze als gevolg van met name kwel²⁵

²⁵ Afwatering van andere kunstwerken op het betreffende binnenwater is onder de parameter A_{kom} reeds beschouwd

niet alsnog hoger kan zijn. Het meenemen van ervaringen van recente hoogwaterperiodes is gewenst bij het bepalen van het aan te houden binnenpeil.

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

Aandachtspunten

De parameter heeft een sterke relatie met het kombergend oppervlak. In de schematisering is ervoor gekozen om middels de parameter van het kombergend oppervlak (A_{kom} , zie paragraaf 4.8.2) overige invloeden op het kombergend vermogen te verrekenen.

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

Voorbeeld

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

De toelaatbare peilverhoging gedurende hoogwater bedraagt nu $\Delta h_{kom} = \text{NAP } +2,80 \text{ m} - \text{NAP } +1,60 \text{ m} = 1,20 \text{ m}$.

4.8.4 *Modelfactor instromend volume*

Wat is het

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

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 13)

De parameter m_{in} is de modelfactor ten behoeve van onzekerheden in het model voor het instromende volume.

Hoe te bepalen

In het instrumentarium is reeds een standaardwaarde aanwezig welke niet kan worden aangepast.

Aandachtspunten

n.v.t.

Voorbeeld

n.v.t.

4.8.5 *Factor voor stormduur hoogwater*

Wat is het

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

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 13)

De parameter $f_{ts|open}$ is de factor voor beperking van de stormduur in relatie tot het ongewenst instromen van water. Bezijken van een constructieonderdeel vindt plaats op het moment dat gedurende een hoogwatergolf de buitenwaterstand dusdanig hoog komt dat het dan optredende verval leidt tot overschrijding van de sterkte. Een bepaald gedeelte van de hoogwatergolf is dan reeds gepasseerd, zodat voor instroming van het water niet de gehele hoogwatergolf nog van toepassing is.

Hoe te bepalen

Aanbevolen wordt om in eerste instantie uit te gaan van de standaardwaarde van 1,0. Indien de uitkomst van de beoordeling aangeeft dat niet aan de eisen conform de ondergrens wordt voldaan, kan in geval van een hoge drempel worden overwogen om de factor aan te passen. Randvoorwaarde hierbij is dat de faalkans voor het deelfaalmechanisme onvoldoende kombergend vermogen ten opzichte van de sterkte van de bodembescherming de faalkans domineert.

Aandachtspunten

Het schematiseren van slechts een deel van de hoogwatergolf is ook mogelijk door voor de parameter t_s (stormduur, paragraaf 4.8.6) niet de gehele geschematiseerde stormduur in te voeren.

Voorbeeld

n.v.t.

4.8.6 Stormduur

Wat is het

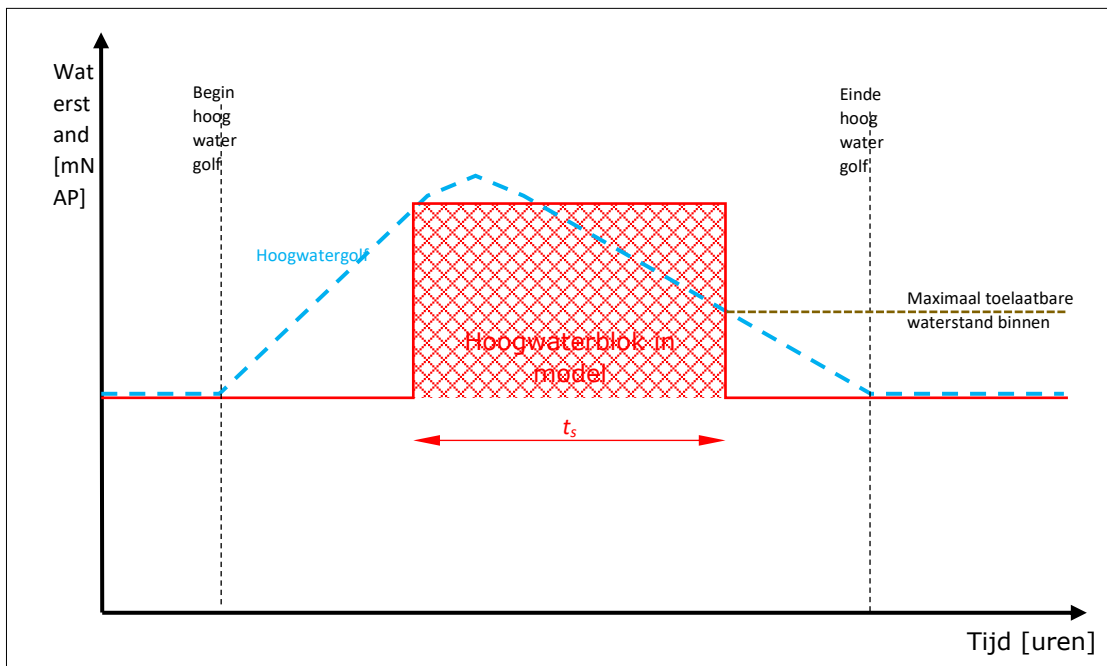
Aanduiding	eenheid	type	μ	V_r/σ	Δ_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
t_s	[uur]	logn	6,0 ²	$V_r=0,25$ ₁	KW	1	-	0

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 13)

De *stormduur* (t_s [uur]) is de duur van de storm waarmee het inkomende volume van buitenwater kan worden bepaald. In geval van *Falen door bezwijken waterkerende constructieonderdelen* dus feitelijk de periode tussen bezwijken en het moment dat de buitenwaterstand gelijk is aan het maximaal toelaatbare waterniveau binnen. Aangezien het bezwijkmoment geen determinist is, dient een inschatting gemaakt te worden, bijvoorbeeld ten tijde van de piek van de storm. Verondersteld wordt dat de stormduur lognormaal is verdeeld. Om die verdeling te karakteriseren moet de verwachtingswaarde μ worden opgegeven. Voor de variatiecoëfficiënt V_r is er een standaardwaarde 0,25 [-] die niet kan worden aangepast.

Hoe te bepalen

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



Figuur 39: Schematisering verloop hoogwatergolf in Riskeer

In Riskeer wordt de verwachtingswaarde voor de stormduur door de gebruiker opgegeven. Aanbevolen wordt om voor windgedomineerde belastingsystemen in eerste instantie te rekenen met een verwachtingswaarde van 6 uur. Bij afvoergedomineerde belastingsystemen wordt aanbevolen om gebruik te maken van de Waterstandsverlooptool om een betere inschatting van het instromende volume te bepalen. Het is mogelijk om de verwachtingswaarde van de tijdsduur aan te passen. Hiermee is het model voor komberging per kunstwerk specifiek te maken. Vanwege de vele onzekerheden omtrent de werkelijke stormduur is de relatief grote variatiecoëfficiënt niet aanpasbaar.

In het model wordt geen rekening gehouden met een verlopende binnenwaterstand. Het stijgen van de binnenwaterstand is direct van invloed op het instromende debiet. Dit is dus een sterke vereenvoudiging van de werkelijkheid.

4.8.7 Instromend debiet door kunstwerk gegeven geopend kunstwerk

Wat is het

Dit betreft een parameter ($Q_{in|open}$) die bepaald wordt door het gekozen model voor instroming bij een bezwaken constructieonderdeel. Er is een tweetal modellen beschikbaar. Hieronder zijn per model de formules gegeven. Sommige parameters komen in meerdere formules voor. Na de formules worden de diverse parameters stuk voor stuk besproken in onderstaande sub paragrafen.

Lage drempel

Volkomen stroming:

$$Q_{in|open} = B \cdot m_{vl} \cdot (h_{bi} - h_{dr}) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h - h_{bi})} \quad h < \frac{3}{2} \cdot h_{bi} - \frac{1}{2} \cdot h_{dr} \quad 58$$

Onvolkomen stroming:

$$Q_{in|open} = B \cdot m_{vf} \cdot 0,55 \cdot \sqrt{g \cdot (h - h_{dr})^3} \quad h \geq \frac{3}{2} \cdot h_{bi} - \frac{1}{2} \cdot h_{dr} \quad 59$$

Stroming door verdronken koker

$$Q_{in|open} = \mu \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h - h_{bi})} \quad 60$$

De keuze voor het toe te passen model dient in Riskeer te worden gemaakt. Hierbij geldt dat in het geval van het model 'lage drempel' het programma zelf bepaald welke formule van toepassing is (onvolkomen/volkomen). Over het algemeen geldt dat afhankelijk van het type kunstwerk de volgende keuze van het model gemaakt kan worden:

Kunstwerktype	Model
Coupure	Lage drempel, waarbij door de invoer van parameters het programma automatisch zal uitkomen bij de formules voor onvolkomen stroming
Schutsluis	Lage drempel. Er is sprake van direct contact tussen binnen- en buitenwater na bezwijken van het constructieonderdeel en de doorstroomopening is niet begrensd aan de bovenzijde (geen kokerconstructie).
Keersluis	Lage drempel. Er is sprake van direct contact tussen binnen- en buitenwater en de doorstroomopening is meestal niet begrensd aan de bovenzijde (geen kokerconstructie).
Gemaal	Verdronken koker. De persleiding(en) van een gemaal bevindt/bevinden zich meestal geheel onder water.
Inlaatsluis uitwateringssluis	Verdronken koker. De leiding(en) van een inlaatsluis bevindt/bevinden zich soms geheel onder water (duikerconstructie). Lage drempel. Soms zijn het doorgangen met geen begrenzing aan de bovenzijde. Er is wel direct contact tussen binnen- en buitenwater

4.8.7.1 Breedte van doorstroomopening

Wat is het

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

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 13)

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

Hoe te bepalen

De doorstroombreedte van de opening(en) waardoor het water stroomt als een constructieonderdeel bezweken is, moet hier worden ingevoerd. Het gaat hierbij om de kleinste breedte van het dan ontstane instroomkanaal, omdat dit uiteindelijk

bepaald welk debiet er kan doorstromen. De breedte kan van tekening worden afgelezen of in het veld worden opgemeten.

Indien het kunstwerk over meerdere doorstroomopeningen beschikt en deze zijn uitgerust met identieke keermiddelen die ook globaal dezelfde conditie hebben, dienen de breedten van de afzonderlijke doorstroomopeningen bij elkaar te worden opgeteld.

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

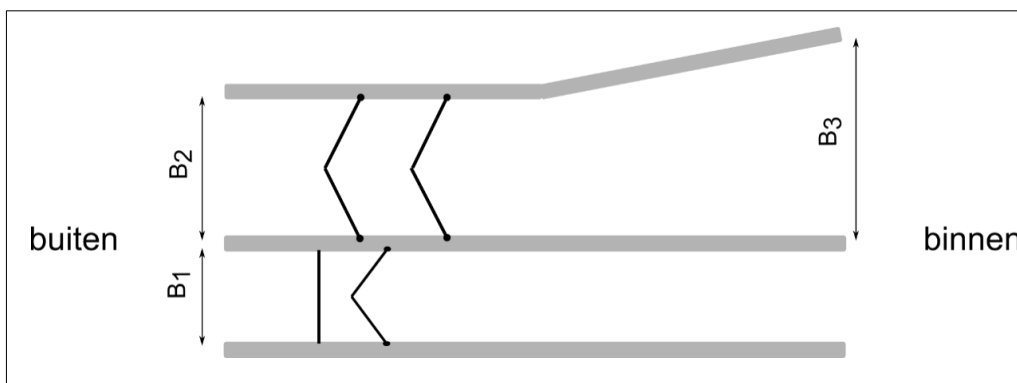
Aandachtspunten

Met betrekking tot deze parameter zijn geen verdere aandachtspunten.

Voorbeeld

Een uitwateringssluis met twee van elkaar gescheiden doorstroomopeningen. De ene opening is voorzien van twee stel puntdeuren. De andere opening is voorzien van een stel puntdeuren en een hefschuif. De breedte van beide doorstroomopeningen is niet gelijk en verloopt ook nog (zie onderstaande schets).

De puntdeuren dateren allen uit hetzelfde jaar en zijn ontworpen met dezelfde randvoorwaarden. De hefschuif is later aangebracht en is ontworpen op toekomstige waterstanden. Uit analyses blijkt de sterkte van de hefschuif aanmerkelijk groter te zijn dan die van de houten puntdeuren.



Figuur 40: Voorbeeld uitwateringssluis

Uit een analyse blijkt dat de doorstroomopening met de twee stel puntdeuren het eerste watervoerend zal zijn als gevolg van bezwijken van de keermiddelen. Dit heeft ermee te maken dat als het eerste stel puntdeuren bezwijkt ook het tweede zal bezwijken omdat de sterkte van deze twee stellen puntdeuren gelijk is.

De breedte die nu ingevuld dient te worden is gelijk aan $B = B_2$. Immers de kleinste doorstroomopening bepaalt het instromende debiet.

Indien uit analyses blijkt dat de hefschuif nagenoeg net zo sterk is als de puntdeuren, kan in eerste instantie gekozen worden om voor B de waarde van $B_1 + B_2$ in te voeren (bovengrensbenadering).

4.8.7.2 Modelfactor voor lange overlaat

Wat is het

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

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 13)

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

Hoe te bepalen

De parameter betreft een modelparameter die behoort bij situatie waarin sprake is van (lange) overlaat. Voorheen werd er ten aanzien van de modelonzekerheid onderscheid gemaakt tussen volkomen stroming (m_{OL}) en onvolkomen stroming (m_{onv}). Uit berekeningen is echter gebleken dat dit leidde tot een discontinuïteit in de berekeningen wanneer een bepaalde situatie zich rond het omslagpunt volkomen/onvolkomen stroming bevond. Middels een nadere analyse is er daarom voor gekozen om in Riskeer uit te gaan van één parameter voor beide situaties. De eventuele fout die hiermee gemaakt wordt is zeer beperkt.

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

Aandachtspunten

Met betrekking tot deze parameter zijn geen verdere aandachtspunten.

Voorbeeld

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

4.8.7.3 Binnenwaterstand

Wat is het

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

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 13)

De binnenwaterstand (h_{bi} [m+NAP]) is de waterstand aan de binnendijkse zijde van het kunstwerk tijdens maatgevende omstandigheden. Het is van toepassing bij de modellen 'lage drempel' en 'verdrongen koker' voor de bepaling van het instromende debiet na het bezwijken van constructieonderdelen. De parameter heeft daarmee betrekking op de gevolgen na falen. De parameter wordt gebruikt om het instromende debiet te bepalen met betrekking tot bodembescherming en komberging en om de optredende stroomsnelheden te bepalen nadat de keermiddelen zijn uitgevaren (zie paragraaf 4.7.2).

Hoe te bepalen

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

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

Indien er sprake is van relatief grote schommelingen in de binnenwaterstand, kan met eventueel aanwezige waarnemingen van deze binnenwaterstand een statistisch gemiddelde en een standaardafwijking worden afgeleid. Als deze waarnemingen niet beschikbaar zijn, dient een reële dan wel conservatieve waarde te worden genomen.

De standaardafwijking kan worden aangepast indien dit kan worden onderbouwd.

Aandachtspunten

Binnen het faalmechanisme *Falen door bezwijken waterkerende constructieonderdelen* is een aparte parameter beschikbaar waarmee een afwijkende binnenwaterstand kan worden gemodelleerd die betrekking heeft op de sterkte (bijvoorbeeld bij het opzetten van een schutkolk bij hoogwater). Dit betreft de parameter $h_{bi;CB}$ (zie paragraaf 4.3.2.5). Verwisseling van de parameters dient uiteraard voorkomen te worden.

In geval van een coupure is er geen sprake van een binnenwaterstand. In dat geval kan de binnenwaterstand dezelfde waarde krijgen als de drempelhoogte van de coupure.

In het geval van een schutsluis speelt h_{bi} ook nog een rol indien aanvaren van het tweede keermiddel van belang is (zie paragraaf 4.7.2). Met de parameter wordt in dat geval ook nog de optredende stroomsnelheid bepaald na het uitvaren van de keermiddelen ten einde te bepalen of de eerste (niet uitgevaren) keermiddelen nog gesloten kunnen worden. De waarde van de parameter is voor zowel het model van instromend debiet (komberging, bodembescherming) als voor aanvaren hetzelfde en resulteert dus niet in conflicterende beschouwingen.

Voorbeeld

Niet van toepassing.

4.8.7.4 Drempelhoogte

Wat is het

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

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 13)

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

Hoe te bepalen

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

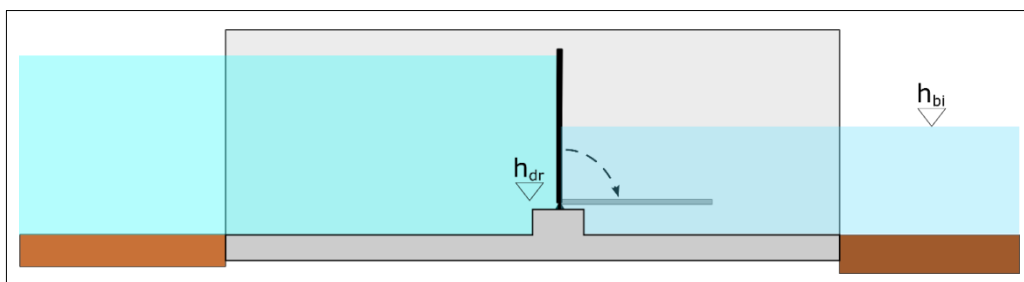
De standaardafwijking kan worden aangepast indien dit kan worden onderbouwd.

Aandachtspunten

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

Voorbeeld

Onderstaand voorbeeld geeft een doorsnede over een kunstwerk waarin een stuw aanwezig is.



Figuur 41: Voorbeeld stuw

Wanneer de stuwklep bezweken is, blijkt dat ter plaatse van de stuw het doorstroomprofiel nog steeds enigszins geknepen wordt. Voor h_{dr} dient in dit geval dus de hoogte van de bovenkant van de gestreken stuwconstructie te worden ingevuld.

4.8.7.5 Afvoercoëfficiënt

Wat is het

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

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 13)

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

Hoe te bepalen

De parameter betreft de afvoercoëfficiënt van een koker die geheel gevuld is met water. De waarde van deze afvoercoëfficiënt kan worden bepaald middels het bepalen van de diverse energieverliezen van het water wanneer het door de koker stroomt. Deze energieverliezen bestaan bijvoorbeeld uit wrijvingsverliezen en in- en uittredeverliezen. Voor een onderbouwde bepaling van de gemiddelde waarde van μ wordt verwezen naar de vakliteratuur (bijvoorbeeld [13]).

De standaardwaarde voor het gemiddelde van μ is voor veruit de meeste situaties een conservatieve waarde. Deze waarde mag gemotiveerd worden bijgesteld.

De standaardafwijking kan niet worden aangepast door de gebruiker.

Aandachtspunten

Met betrekking tot deze parameter zijn geen verdere aandachtspunten.

Voorbeeld

Voor voorbeelden voor aanpassing van de parameter wordt verwezen naar de diverse vakliteratuur (bijvoorbeeld [13]).

4.8.7.6 Doorstroomoppervlak

Wat is het

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

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 13)

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

Hoe te bepalen

De doorstroomoppervlakte van de opening(en) waardoor het water stroomt als de keermiddelen bezweken zijn, moet hier worden ingevoerd. Het gaat hierbij om de kleinste oppervlakte, omdat dit uiteindelijk bepaald welk debiet er kan doorstromen. De oppervlakte kan vanaf tekening worden bepaald, of middels een inmeting worden vastgesteld.

Indien het kunstwerk over meerdere doorstroomopeningen beschikt en deze zijn uitgerust met identieke keermiddelen die ook globaal dezelfde conditie hebben, dienen de breedten van de afzonderlijke doorstroomopeningen bij elkaar te worden opgeteld.

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

Aandachtspunten

Met betrekking tot deze parameter zijn geen verdere aandachtspunten.

Voorbeeld

De parameter spreekt voor zich, er is geen voorbeeld toegevoegd.

4.9 Deelfaalmecanisme Z22 Falen bodembescherming achter constructie

De bodembescherming achter de constructie faalt als de kritieke stroomsnelheid van de bodembescherming wordt overschreden. Deze stroomsnelheid treedt op bij een bepaald kritiek debiet. Het debiet dat binnenstroomt onder bepaalde omstandigheden wordt bepaald met de formules beschreven in paragraaf 4.8.7. De kans dat het instromende debiet groter is dan het kritieke debiet wordt bepaald door de volgende parameters die vervolgens worden besproken:

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

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

$$Q_c = q_c \cdot B_{sv}$$

61

De parameters q_c en B_{sv} zijn aan elkaar gekoppeld afhankelijk van de locatie die wordt bekeken. Achter een kunstwerk is vaak sprake van een bodembescherming, die uiteindelijk overgaat in een aansluiting op de natuurlijke bodem. Het ontstaan van erosiekuilen kan plaatsvinden bij de bodembescherming, maar ook bij onbeschermde bodem aansluitend op de bodembescherming. Dit laatste is alleen van belang indien dit leidt tot instabiliteit van het kunstwerk. Wanneer de bodembescherming voldoende lang is, zullen erosiekuilen achter de bodembescherming niet meer leiden tot instabiliteit van het kunstwerk. Wellicht leidt dit wel tot schade aan de bodembescherming, maar de verwachting is dan nog

steeds dat dit niet binnen een hoogwaterperiode leidt tot instabiliteit van de constructie. Normaliter is de lengte van de bodembescherming hier ook op ontworpen. Welke lengte van de bodembescherming voldoende is, is afhankelijk van de specifieke situatie. Per geval dient hiervoor een afweging te worden gemaakt. Uiteindelijk bepaalt de combinatie van het kritieke debiet per strekkende meter en de stroomvoerende breedte wat het maatgevende totale kritieke debiet (Q_c) is.

Het instromende debiet is afhankelijk van de situatie en de afmetingen van het kunstwerk. Het instromende debiet wordt met behulp van de formules in paragraaf 4.8.7 bepaald door het instrumentarium.

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

$$Z = Q_c - Q_{\text{in|open}} = q_c \cdot B_{sv} - Q_{\text{in|open}} \quad 62$$

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

4.9.1

Kritiek instromend debiet

Wat is het

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

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 13)

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

Hoe te bepalen

Van groot belang bij het bepalen van het kritieke debiet is de beschikbare informatie omtrent de bodembescherming.

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

$$q_c = u_c \cdot (h_{bi} - h_{dr}) \quad 63$$

Waarin:

- u_c Gemiddelde kritieke stroomsnelheid met betrekking tot de bodembescherming [m/s].
- h_{bi} Binnenwaterstand [mNAP].

h_{dr} Hoogte bovenkant bodembescherming (vaak is dit gelijk aan hoogte drempel) [mNAP].

De kritieke stroomsnelheid met betrekking tot de bodembescherming kan worden bepaald met de beschikbare formules van bijvoorbeeld Izbash, Shields en Pilarczyk. Handvatten voor het gebruik van deze formules worden gegeven in het achtergrondrapport hoogte kunstwerk II [2]. De waterdiepte boven de bodembescherming kan met de beschikbare gegevens van de binnenwaterstand en ligging bodembescherming worden bepaald.

In het geval dat er geen bodembescherming aanwezig is (of deze is geërodeerd), is de kritieke stroomsnelheid afhankelijk van de grondsoort. Op basis van deels empirische bevindingen [13] en [12] is in onderstaande tabel hiervan een overzicht samengesteld. Deze waarden kunnen worden gebruikt als eerste richtgetallen.

Tabel 16: Kritieke stroomsnelheden onbeschermde bodem

Grondsoort	u_c [m/s]
fijn zand	0,10
matig fijn zand	0,15
matig grof zand	0,20
grof zand	0,30
veen	0,30-0,60
kleilig zand	0,40-0,50
Slappe klei	0,60-0,80
Redelijk vaste klei	0,80-1,00
Vaste klei	1,00-1,20
grind	1,00

Aandachtspunten

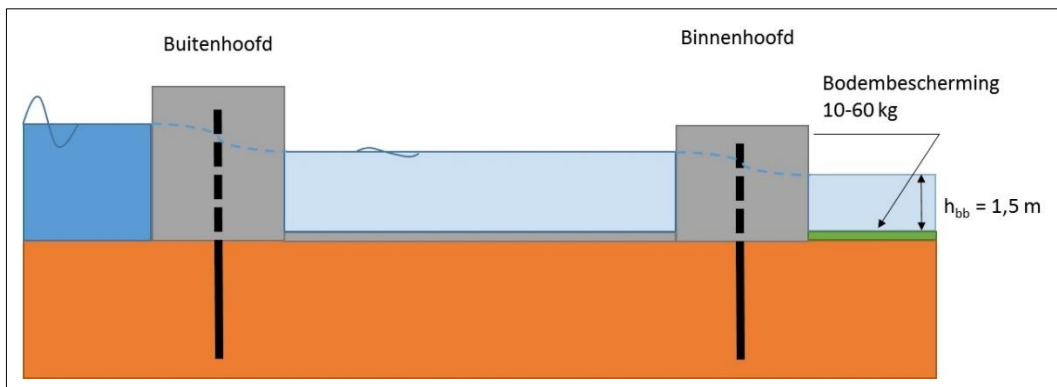
Met betrekking tot de kritieke stroomsnelheid voor de bodembescherming en daarmee het kritieke debiet kunnen de volgende aandachtspunten worden vermeld:

- Bij het falen op sterkte van een constructieonderdeel is altijd sprake van een substantieel verval over het kunstwerk. Als gevolg hiervan zijn de stroomsnelheden op dat moment ook fors wat direct tot erosie van een bodembescherming kan leiden. De reststerkte die bij *Falen door bezwijken waterkerende constructieonderdelen* wordt geleverd door de bodembescherming is dan ook vaak verwaarloosbaar klein.
- Naast de aanwezigheid van bodembescherming is het ook van belang dat bekend is wat de conditie van deze bodembescherming is. Vaak is dit gegeven niet direct voorhanden, omdat hiervoor een inspectie moet plaatsvinden. Lodingen van de bodem kunnen een indicatie geven omtrent de aanwezigheid en volledigheid van de bodembescherming. Bij het detecteren van kuilen in de bodem kan vaak worden gesteld dat de bodembescherming niet meer intact is. Indien de conditie van de bodembescherming niet bekend is en de bodembescherming is niet recent aangelegd of hersteld (periode < 5 jaar), dienen conservatieve aannamen te worden gedaan met betrekking tot de conditie van de bodembescherming bij de bepaling van de kritieke stroomsnelheid.
- Bodembescherming bij kunstwerken wordt vaak aangelegd vanuit een andere functie dan waterkeren. Het kan gaan om schroefstraalbelastingen of stroomsnelheden die optreden bij lozing van water. Dit in gedachten nemende kan vanuit de functie van het kunstwerk ook een inschatting van toelaatbare stroomsnelheden worden ingeschat (of wellicht worden teruggevonden in de ontwerpdocumenten).

- Een nadere analyse van het kritieke instromende debiet kan worden gemaakt door de stroming scherper te modelleren. Dit kan door bijvoorbeeld rekening te houden met het verloop van de stroomsnelheid over de waterdiepte. Een dergelijke exercitie is alleen nuttig indien ook goed rekening wordt gehouden met de actuele conditie van de bodembescherming en de hoogteligging van deze bodembescherming.
- Van belang is dat het kritieke debiet per strekkende meter (q_c) altijd wordt gezien in combinatie met de stroomvoerende breedte B_{sv} (zie paragraaf 4.9.2).
- Met betrekking tot schutsluizen geldt dat de bodembescherming vaak is uitgelegd op schroefstraalbelastingen. De toelaatbare stroomsnelheden kunnen dan behoorlijk oplopen. In hoofdstuk 16 van 'Ontwerp van schutsluizen [11] wordt het ontwerp van bodembeschermingen bij schutsluizen behandeld en zijn ook voorbeelden aanwezig.

Voorbeeld 1

Beschouw de volgende situatie: achter een recreatiesluis is een bodembescherming aanwezig bestaande uit stortsteen met sortering 10-60 kg. Beide deuren zijn even sterk en bezweken onder de hoogwaterbelasting. Door het instromende debiet treedt een overtrekkende stroming op die de bodembescherming belast.



Figuur 42: Sluis met bodembescherming belast door overtrekkende stroming

Van de bodembescherming is uit een recente inspectie bekend dat deze zich in goede staat bevindt. De kritieke stroomsnelheid kan nu als volgt berekend worden (zie *Achtergrondrapport bepaling kritiek overslag-/overloop-/instroomdebiet bij kunstwerken* [2] voor achtergrondinformatie bij het gebruik van de diverse formules).

Als vertrekpunt wordt de formule van Pilarczyk genomen:

$$D = \frac{\varphi_{sc}}{\Delta} \frac{0,035}{\psi_{cr}} k_h k_{sl}^{-1} k_t^2 \frac{U^2}{2g} \tag{E-64}$$

welke is te herschrijven als:

$$U = \sqrt{\frac{2g\Delta D \psi_{cr} k_{sl}}{\varphi_{sc} 0,035 k_h k_t^2}} \tag{E-65}$$

Hierin worden de volgende waarden ingevuld:

- D Karakteristieke elementafmeting , voor granulaire materialen geldt: $D = D_{n50}$ [m].
Bij sortering 10-60 kg hoort een D_{n50} van 0,24 m (zie bijvoorbeeld Bijlage I van CUR 197 Breuksteen in de praktijk).
- φ_{sc} Ervan uitgaande dat de bodembescherming niet boven de drempel van het binnenhoofd uitsteekt kan worden uitgegaan van een waarde van de stabiliteitsparameter φ_{sc} van 0,75, horende bij breuksteen in een doorgaande laag (minimale twee lagen stenen) [-].
- Δ Relatieve dichtheid: $\Delta = (\rho_s - \rho_{water}) / \rho_{water} = (2650 \text{ kg/m}^3 - 1000 \text{ kg/m}^3) / 1000 \text{ m}^3 = 1,65$ [-].
- ψ_{cr} Als startwaarde voor de schuifspanningsparameter wordt uitgegaan van $\psi_{cr} = 0,035$ voor granulaire materialen. Indien nodig kan dit zonder problemen worden aangescherpt naar $\psi_{cr} = 0,05$ [-].
- k_h $k_h = (1+h/D)^{-0,2}$ voor niet-volledig ontwikkeld snelheidsprofiel zoals hier [-].
Invullen levert $K_h = (1+1,5/0,24)^{-0,2} = 0,67$.
- k_{sl} Taludfactor. Niet van toepassing, de bodembescherming ligt horizontaal ($k_{sl}=1$) [-].
- k_t Vanwege de korte afstand tussen betonwerk en begin van de bodembescherming wordt een hoge waarde voor de turbulentiefactor aangehouden van $k_t^2 = 2,0$ [-].
- U Gemiddelde stroomsnelheid [m/s].
- g Gravitatieversnelling ($g=9,81$)[m/s²].

Invullen van formule E-65 levert een kritieke stroomsnelheid op van 2,8 m/s. Vermenigvuldiging met de waterdiepte van 1,5 m levert een waarde voor het in te vullen kritiek debiet q_c op van 4,2 m³/s/m.

Voorbeeld 2

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

Met behulp van de stroomvoerende breedte kan nu voor de waarde van het kritieke debiet per strekkende meter een waarde worden ingevoerd. Stel dat de stroomvoerende breedte (zie paragraaf 4.9.2) 2,0 m bedraagt, dan is een inschatting van de waarde van q_c gelijk aan $1,0/2,0 = 0,5$ m³/s/m.

4.9.2 *Stroomvoerende breedte bodembescherming*

Wat is het

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

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 13)

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

Hoe te bepalen

De stroomvoerende breedte dient te worden betrokken op de bodem waarvoor het kritieke debiet (zie paragraaf 4.9.1) is bepaald. Samen met de kritieke stroomsnelheid behorende bij de bodem(bescherming) levert de stroomvoerende breedte het totale kritieke debiet op.

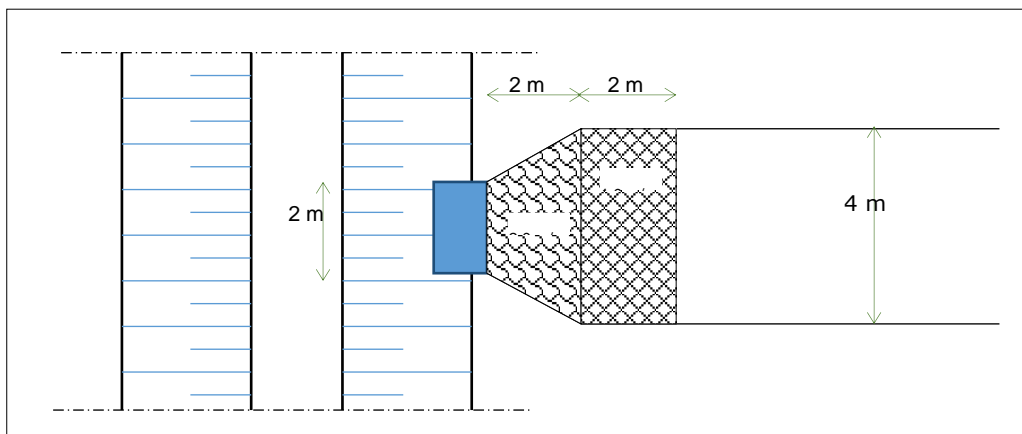
Het vaststellen van de stroomvoerende breedte kan met behulp van tekeningen of metingen in het veld. Een globale schatting is ook nog mogelijk met GIS-applicaties. Indien dit laatste wordt gehanteerd, verdient het de aanbeveling om de spreiding van de parameter enigszins op te voeren. Bij de bepaling van de stroomvoerende breedte dient rekening te worden gehouden met het ontstaan van met eventuele neren.

Aandachtspunten

Van belang is dat stroomvoerende breedte B_{sv} altijd wordt gezien in combinatie met het kritieke debiet per strekkende meter (q_c) zie paragraaf 4.9.1).

Voorbeeld

Een gemaal met een maximale capaciteit van 1,0 m³/s komt binnendijks uit in een uitstroomwerk met een breedte van 2,0 m. De waterdiepte aan de binnenzijde bedraagt 1,0 m. Na het instroomwerk verbreedt de watergang zich geleidelijk middels vleugelwanden tot een breedte van 4,0 m. In onderstaande figuur is een en ander weergegeven in bovenaanzicht.



Figuur 43: Situatie bodembescherming achter gemaal

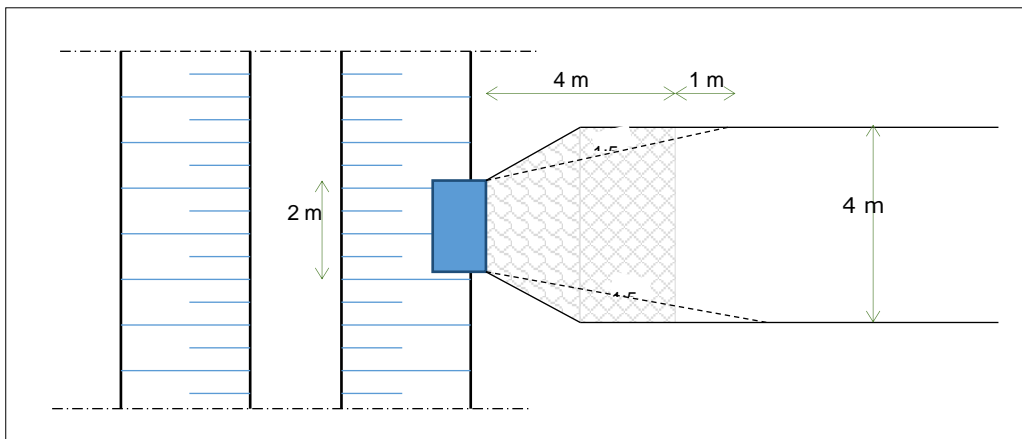
Voor de bodembescherming over de eerste twee meter geldt een kritieke stroomsnelheid van 2,0 m/s, voor de volgende twee meter een kritieke

stroomsnelheid van 1,0 m/s en voor de bodem achter de bodembescherming geldt dat deze bestaat uit redelijke vaste klei.

De spreiding van het debiet vindt in horizontale richting plaats onder een helling van 1:5 (aanname)

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

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



Figuur 44: Illustratie berekening kritiek debiet bodembescherming achteremaal

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

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

Met betrekking tot de aansluiting tussen bodembescherming en onbeschermde bodem geldt een maximaal toelaatbaar debiet van (voor redelijk vaste klei is een kritieke stroomsnelheid van 1,0 aangehouden zie Tabel 16):

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

Uit bovenstaande blijkt dat het kritieke debiet gedictieerd wordt door het tweede deel van de bodembescherming. Gelet op de (te) beperkte lengte van de bodembescherming (mede ook in relatie tot de vleugelwanden) wordt een kritieke stroomsnelheid van 1,0 m/s en een stroomvoerende breedte van 2,80 m ingevuld in het model.

4.9.3

Deelfaalmechanisme Z12 Bezwijken kunstwerk a.g.v. erosie bodem

De kans op bezwijken van het kunstwerk als gevolg van het eroderen van de bodem wordt geschematiseerd middels de parameter Faalkans kunstwerk gegeven bezwijken bodembescherming en optreden van erosie bodem ($P_{f,kw|erosie\ bodem}$). Voordat dit deelfaalmechanisme op kan treden, moet het deelfaalmechanisme Z22 *Falen bodembescherming achter constructie* zijn opgetreden. Dit deelfaalmechanisme wordt in paragraaf 4.9 besproken.

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

$$Z = -\Phi^{-1} \left(P_{f,kw|erosie\ bodem} \right) - U \quad \square^{-1}: \text{inverse van de normale verdeling} \quad 66$$

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

4.9.4 Faalkans gegeven erosie bodem

Wat is het

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

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 13)

De faalkans gegeven erosie bodem ($P_{f,kw|erosie\ bodem}$ [-]) is de kans op het bezwijken van het kunstwerk als gevolg van het eroderen van de bodem nadat de bodembescherming is bezwaken. Deze faalkans is voor het faalmechanisme *sterkte en stabiliteit* een deterministische variabele.

Hoe te bepalen

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

Aanbevolen wordt om in de beoordeling in eerste instantie de standaardwaarde van '1,0' te hanteren (*gedetailleerde toets*, probabilistisch op vakniveau). Dit past binnen de werkwijze om van grof naar fijn. Een waarde van '1,0' is een conservatieve benadering en impliceert dat er geen reststerkte is.

Indien aanscherping van de waarde gewenst is, bijvoorbeeld omdat het faalmechanisme *Falen door bezwijken waterkerende constructieonderdelen* substantieel bijdraagt aan de faalkans van het kunstwerk of het dijktraject en dit veroorzaakt wordt door het aspect van erosie van de bodem(bescherming), worden hieronder enkele aandachtspunten gegeven. Opgemerkt wordt dat niet voor elk deelproces ook modellen beschikbaar zijn die een kwantitatieve waarde opleveren. Er kan dus ook sprake zijn van een kwalitatieve onderbouwing op basis van expert judgement. De hieronder gegeven aandachtspunten zijn niet uitputtend:

- Indien de fundatie van het kunstwerk aan de binnenzijde van de waterkering geheel met damwanden is omgeven (bijvoorbeeld als gevolg van bouwen in gesloten bouwkuip op onderwaterbetonvloer) is het instabiel worden van het kunstwerk als gevolg van ontgrondingskuilen niet direct te verwachten. Een waarde van 0,05 voor $P_{f,kw|erosie\ bodem}$ is dan verdedigbaar en kan ook in de *gedetailleerde toets* probabilistisch op vakniveau al worden toegepast.
- Bepalen van locatie en afmetingen (breedte en diepte) van de ontgrondingskuilen. Deze stap vereist dat bekend is welke grondsoort er aanwezig is. Indien dit niet bekend is, kan een conservatieve schatting worden gemaakt. Bepaling van afmetingen van ontgrondingskuilen kan bijvoorbeeld aan de hand van de modellen in het handboek 'Ontwerp van schutsluizen' [11] plaats vinden. Indien

de afmetingen zeer beperkt zijn, is de invloed op de stabiliteit van het kunstwerk vermoedelijk ook klein. Een waarde tussen 1,0 en 0,01 voor $P_{f,kw|erosie\ bodem}$ is dan wellicht verdedigbaar. De keuze hangt af van de diepte van de berekende ontgrondingskuil, de afstand uit het kunstwerk en de opbouw van (met name) de fundatie van het kunstwerk.

- Bepalen van de opbouw van de constructie. Het gaat hierbij vooral om de fundatiewijze van het kunstwerk en de aanwezigheid van damwandschermen ter plaatse van de overgang van betonwerk naar bodembescherming. Bij de aanwezigheid van een in relatie tot de diepte van een mogelijke ontgrondingskuil relatief lang damwandscherm welke niet als draagkrachtig fundatie-element fungeert, kan de invloed van eventuele ontgrondingskuilen zeer beperkt zijn. De horizontale stabiliteit is in de meeste gevallen niet direct afhankelijk van het grondlichaam voor de onderkant van de constructie, maar meer van bodem- en wandwrijvingen en specifieke funderingselementen. Een damwandscherm kan voorkomen dat erosie onder de vloerconstructie van het kunstwerk ontstaat, wat in eerste instantie de verticale draagkracht kan beïnvloeden. Bij de aanwezigheid van lange schermen, mede relatief tot afmetingen van optredende ontgrondingskuilen, is een waarde voor $P_{f,kw|erosie\ bodem}$ van 1,0 tot 0,01 haalbaar. Deze waarde kan moeilijk kwantitatief worden onderbouwd. De onderbouwing zal dus overwegend moeten plaatsvinden aan de hand van een beschrijving van het bezwijkproces.
- Indien het kunstwerk uit meerdere delen bestaat (bijvoorbeeld instroomwerk, leiding, uitstroomwerk) kan worden bekeken of het bezwijken van bijvoorbeeld het binnendijs gelegen in- of uitstroomwerk, leidt tot het bezwijken van het gehele kunstwerk dan wel de waterkering en daarmee tot het ontstaan van een bres. Indien bijvoorbeeld alleen het instroomwerk bezwijkt (onderuit gaat), maar verdere aantasting van het kunstwerk dan wel de waterkering niet tot bresvorming leidt, is een waarde voor $P_{f,kw|erosie\ bodem}$ kleiner dan 1,0 verdedigbaar. Ook hier zal onderbouwing dus overwegend moeten plaatsvinden op basis van een 'educated guess' aan de hand van een beschrijving van het bezwijkproces.

Aandachtspunten

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

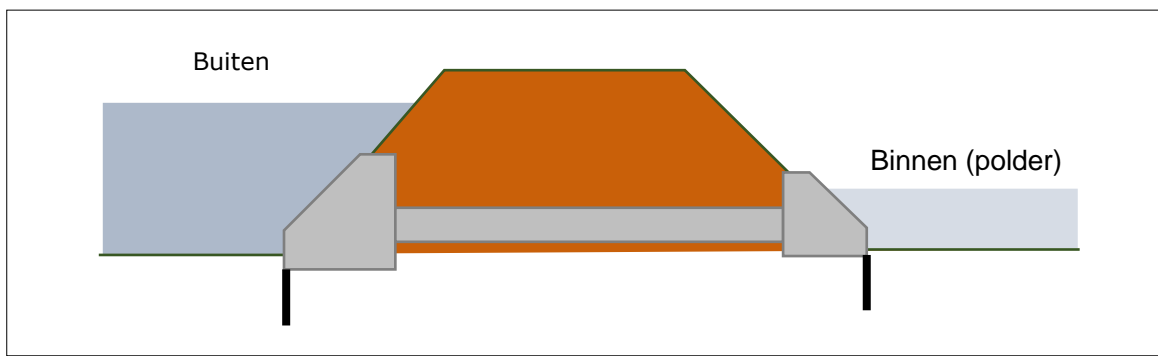
- Het optreden van ontgrondingskuilen kan niet alleen direct van invloed zijn op de stabiliteit van een (onderdeel van een) kunstwerk, maar ook de onderloopsheid vergroten. Immers kan een kuil invloed hebben op de aanwezige kwelweglengte. Dit speelt vooral in die situaties dat na het aanvankelijk bezwijken van een constructieonderdeel van een kunstwerk (waardoor erosie bodembescherming en ontstaan ontgrondingskuilen), het kunstwerk alsnog alternatief kan worden dichtgezet. Met een gecombineerde erosie van instromende water en onderloopsheid hoeft in de beoordeling geen rekening te worden gehouden. Na het bezwijken van een onderdeel van een kunstwerk dient de beheerder wel een onderzoek naar de schade in te stellen, zodat eventuele aanvullende risico's ten aanzien van onder andere onderloopsheid kunnen worden verholpen.
- Het ontstaan van erosiekuilen is afhankelijk van de optredende stroomsnelheid. Gedurende een hoogwatergolf kan de stroomsnelheid in de tijd variëren, omdat door een stijgende buitenwaterstand het verval tussen binnen en buiten toeneemt. Met deze tijdsafhankelijkheid kan in de berekeningen van de ontgrondingskuilen rekening worden gehouden, maar een eerste grove benadering kan worden gevolgd door aan de buitenzijde uit te gaan van het waterpeil waarbij het constructieonderdeel bezwijkt. Als aanscherping kan het

werkelijke verloop van de hoogwatergolf op het overslag-/overloopdebiat in rekening gebracht worden. Hierbij wordt de hoogwatergolf opgedeeld in tijdsperioden en kan de groei van de ontgrondingskuil bij de diverse tijdsperioden bepaald worden.

- Niet alle aspecten van de onderbouwing van een waarde voor $P_{f,kw|erosie\ bodem}$ kunnen kwantitatief worden onderbouwd. Kwalitatieve onderbouwing speelt ook een rol. Hierbij is inzicht in constructies en (faal)mechanismen vereist.

Voorbeeld

Bij een uitwateringssluis bestaande uit een instroomwerk, een leiding en een uitstroomwerk is het enige keermiddel bezweken. Als gevolg hiervan stroomt er ongewenst water de polder in.



Figuur 45: Globale schets situatie niet gesloten kunstwerk

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

Voor dit specifieke voorbeeld zijn de volgende gegevens nog voorhanden (geldigheid van de aangehouden waarden is afhankelijk van de specifieke situatie):

- Bij een buitenwaterstand met een overschrijdingskans gelijk aan de overstromingskans-norm treedt een verval op van 2 m.
- De stroomsnelheid ter plaatse van de bodem als gevolg van dit verval bedraagt 2,0 m/s.
- De bodem bestaat uit zand met een kritische snelheid van 0,5 m/s.
- De waterdiepte boven de bodem aan de binnenzijde is 2 m (h_{bin}).
- De relatieve dichtheid van het zand (Δ) = $(\rho_{zand} - \rho_{water}) / \rho_{water} = (2650 - 1000) / 1000 = 1,65$.
- Coëfficiënt voor invloed turbulentie (α) = 2.

Uit een constructieve analyse is gebleken dat de kans dat het scherm onderuit gaat of grote krachten op het instroomwerk gaat uitoefenen groot is bij een ontgronding van 1,5 meter of meer. Dit leidt tot een grote kans op ernstige ondermijning van het instroomwerk, wat vervolgens weer kan leiden tot bresvorming.

Met behulp van de volgende formules²⁶ (zie [11], formule 16.31 a en 16.31b) kan worden benaderd wanneer de ontgrondingskuil even diep is als de binnenwaterstand (1,5 m):

²⁶ Bij het toepassen van formules omtrent ontgrondingskuilen is het van belang dat aandacht geschonken wordt aan het geldigheidsgebied van deze formules. Dit om onrealistische waarden te voorkomen.

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

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

Waarin:

- y_{\max} maximum-kuildiepte na tijd t [m].
- h_{bin} waterdiepte boven initiële bodemligging [m].
- t_1 tijd waarop maximum-kuildiepte gelijk is aan waterdiepte ($y_{\max} = h$) [uur].
- u over de verticaal gemiddelde stroomsnelheid [m/s].
- a coëfficiënt voor invloed turbulentie [-]
- r Δ relatieve dichtheid [-] = $(\rho_s - \rho_{water})/\rho_{water} = (2650 \text{ kg/m}^3 - 1000 \text{ kg/m}^3)/1000 \text{ m}^3 = 1,65$.
- u_{kr} kritieke stroomsnelheid bodemmateriaal [m/s].

Invullen levert:

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

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

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

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

4.10 Deelfaalmecanisme Z412 Falen herstel sluiting na bezwijken keermiddel (STCO)

De kans dat na het bezwijken van een constructieonderdeel het nog mogelijk is om het kunstwerk toch nog gesloten te krijgen (geen instroming van water) wordt ingebracht middels de parameter Faalkans herstel gefaalde situatie ($P_{f,herstel\ sluiting}$).

De faalfunctie voor falen van herstel van de waterkering na bezwijken van een constructieonderdeel wordt beschreven met:

$$Z = -\Phi^{-1} \left(P_{f,herstel\ sluiting} \right) - U$$

67

Waarin:

- Φ^{-1} inverse van de normale verdeling [-].

u is een standaardnormaal verdeelde hulpvariabele

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

4.10.1 Faalkans herstel van gefaalde situatie

Wat is het

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

¹ Vaste waarde ² Defaultwaarde of aanbevolen waarde ³ Startwaarde ⁴ Vrije waarde (zie Tabel 13)

De parameter $P_{f,herstel\ sluiting}$ is de kans dat het herstellen van de waterkering faalt nadat een constructieonderdeel bezweken is.

Hoe te bepalen

De standaardwaarde voor de parameter is '1,0'. Dit impliceert dat een situatie na het bezwijken van een waterkerend constructieonderdeel, waardoor water door het kunstwerk naar binnenstroomt, niet meer kan worden hersteld. Voor de grotere objecten is dit nagenoeg altijd een reële inschatting. Bedacht moet worden dat er bij constructief falen door een hoogwaterbelasting vrijwel zeker sprake zal zijn van extreme omstandigheden (zeer hoge waterstand en/of golven met mogelijk zeer hoge windsnelheden). Onder dergelijke omstandigheden zijn objecten naar verwachting vaak moeilijk bereikbaar, zijn herstelacties moeilijk uitvoerbaar en/of zijn calamiteitenorganisaties al zwaar belast.

Met name voor kokerconstructies kan het nog mogelijk zijn om instroming te beperken dan wel te stoppen door bijvoorbeeld zandzakken of bigbags in het watervoerend element te storten of op een andere wijze een prop te vormen. Specifieke waarden zijn niet te geven, maar de volgende factoren zijn van invloed op de parameter:

- Afmetingen van watervoerend element.
Hoe groter de afmetingen, des te lastiger is het om het watervoerend element van een prop te voorzien of op een andere wijze te dichten.
- Bereikbaarheid.
Om een watervoerend element te dichten, dient het wel bereikbaar te zijn onder hoogwatersituaties. Dat gaat niet alleen om de locatie, maar ook om de toegang tot het waterkerend element (bijvoorbeeld locatie schuivenschacht).
- Instroomsnelheid.
Hoe groter de optredende stroomsnelheden, des te lastiger kan het zijn om een watervoerend element te dichten. Het aanbrengen van een noodshot in snelstromend water kan bijvoorbeeld al heel lastig zijn.
- De beschikbaarheid van alternatieve keermiddelen en eventueel benodigd materieel.
Indien een watervoerend element op alternatieve wijze gedicht gaat worden, moet men wel over de benodigde materialen en materieel beschikken. Zo kan voor een schot de inzet van een kraan benodigd zijn, terwijl voor het gebruik van zandzakken zakken, zand en schepmaterieel benodigd is. Bekeken dient te worden of deze voorhanden zijn.
- De beschikbare tijd.
Indien er water instroomt maar dit leidt niet direct tot overstromingsgevolgen is er wellicht nog voldoende tijd beschikbaar om op tijd de instroming te stoppen.

Dit betekent dat bij een grote komberging en een sterke bodembescherming er wellicht nog mogelijkheden voor herstel van de gefaalde situatie zijn.

Aanpassing van de parameter kan alleen plaatsvinden als dit kwantitatief dan wel kwalitatief aannemelijk wordt gemaakt. Een waarde kleiner dan 0,01 wordt niet reëel geacht. Kijkend naar de kunstwerken kan voor de diverse typen uitgegaan worden van het volgende:

Type kunstwerk	Handreikingen herstel gefaalde situatie
Coupure	Geen kans op herstel gefaalde situatie ($P_{f,herstel\ sluiting} = 1,0$), omdat bezwijken optreedt bij een waterstand waarbij direct water over de drempel stroomt en de bereikbaarheid van de coupure daardoor ernstig wordt belemmerd.
Gemaal	Kans op herstel gefaalde situatie goed mogelijk. Probleem zal zich echter zelden voordoen bij gemalen. Keermiddelen hiervan zijn vaak overgedimensioneerd. Indien bezwijken toch optreedt is onder de juiste omstandigheden een $P_{f,herstel\ sluiting} = 0,01$ mogelijk.
Schutsluis	Geen kans op herstel gefaalde situatie ($P_{f,herstel\ sluiting} = 1,0$), omdat afmetingen van doorstroomopening(en) vaak groot is en optredende stroomsnelheden hoog zullen zijn.
Keersluis	Geen kans op herstel gefaalde situatie ($P_{f,herstel\ sluiting} = 1,0$), omdat afmetingen van doorstroomopening(en) vaak groot is en optredende stroomsnelheden hoog zullen zijn.
Duikers	Veel in- en uitwateringssluizen bestaan uit duikerconstructies. Bij afmetingen van het watervoerende element van circa 1,0×1,0 m (diameter 1,0 m) is afhankelijk van de omstandigheden een waarde voor $P_{f,herstel\ sluiting} = 0,01$ mogelijk. Bij grotere afmetingen is maximaal 0,1 haalbaar. Men moet bedacht zijn op de situatie met meerdere doorstroomopeningen. Vaak zijn deze uitgerust met vergelijkbare keermiddelen, zodat bezwijken bij meerdere doorstroomopeningen nagenoeg gelijk kan optreden.

Aandachtspunten

Voor het kunnen toepassen van een andere waarde dan de standaardwaarde van 1,0 dient een goede onderbouwing plaats te vinden.

Voorbeeld

-

5 Parameterbepaling faalmechanisme piping bij kunstwerk

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op het afleiden van waarden voor de relevante parameters. Per parameter wordt aangegeven wat de parameter precies inhoudt, hoe de waarde kan worden bepaald, wat aandachtspunten zijn et cetera. Daarnaast worden op diverse plaatsen voorbeelden gegeven hoe de parameterwaarde te bepalen.

Voor het BOI is voor de beoordeling van piping bij kunstwerken geen probabilistisch model ontwikkeld. Zaken die in een probabilistisch model een rol spelen zoals wel/geen stochastische variabele, verdeling continue/discreet, type verdeling en basiswaarden voor verwachtingswaarde, standaardafwijking/ variatiecoëfficiënt en correlatielengte spelen dus geen rol bij de bepaling van de benodigde parameters. Uiteraard dient de onzekerheid wel in de schematisering en de keuze van parameterwaarden verdisconteerd te worden.

5.1 Parameters model van Lane

Het model van Lane ziet er als volgt uit:

$$\Delta H \leq \Delta H_c = \frac{\left(\frac{1}{3}L_h + L_v\right)}{C_{w,creep}} \quad 68$$

Hierin zijn de volgende parameters opgenomen, die in de volgende subparagrafen besproken worden:

- Horizontale kwelweglengte L_h .
- Verticale kwelweglengte L_v .
- Creep-factor behorend bij model van Lane $C_{w,creep}$.
- Verval over het kunstwerk $\Delta H = h_{bu} - h_{bi}$.
- Buitenwaterstand h_{bu} .
- Binnenwaterstand h_{bi} .

5.1.1 Horizontale kwelweglengte

Wat is het?

Lengte [m]

De weerstand tegen piping is, naast de eigenschappen van de zandlaag, afhankelijk van de kwelweglengte. Dit is de afstand tussen het intreepunt en het uitreepunt van de kwelstroming door de zandlagen onder en naast het kunstwerk. Deze afstand tussen intreepunt en uitreepunt wordt overbrugd door een samenspel van horizontale en verticale kwelwegdelen, welke volgen uit een 3D-analyse. De horizontale kwelweglengte is de som van alle delen van de kwelweg die onder een hoek van 45° of kleiner met de horizontaal lopen.

Hoe te bepalen

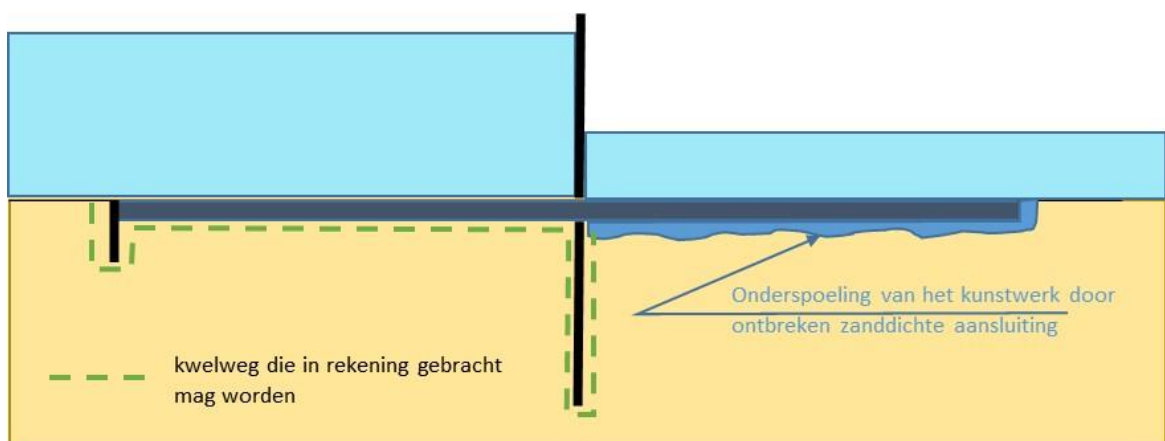
Bij kunstwerken liggen in- en uitreepunt vaak vrij vast ten opzichte van de situatie bij dijken. Zo zal het intreepunt doorgaans gelegen zijn op de bodem of in het talud

van de buitendijkse watergang en het uittreepunt op de bodem of in het talud van de binnendijkse watergang. De wijze waarop de afstand tussen in- en uittreepunt wordt overbrugd kan vaak op meerdere manieren gebeuren. Een driedimensionale kwelweganalyse moet dit uitwijzen. Hierin zijn sowieso horizontale kwelwegdelen aanwezig en meestal ook verticale.

Het in rekening brengen van de horizontale kwelweglengte kan alleen wanneer een goede aansluiting tussen de onderkant van de constructie en de ondergrond aanwezig is. Dit zal bij op staal gefundeerde en opgebouwde kunstwerken in het algemeen het geval zijn, alsmede bij kwelwegen onder een cohesieve laag naast het kunstwerk. In het model van Lane wordt de horizontale kwelweglengte in dat geval met een factor 1/3 vermenigvuldigd bij de bepaling van de totale kwelweglengte.

Bij op palen gefundeerde kunstwerken moet altijd rekening gehouden worden met zettingen van de ondergrond, waardoor ruimte kan ontstaan tussen constructie en grond. Daarom moet in dat geval de horizontale kwelweglengte op nul worden gesteld. Bij constructies op trekpalen kan ook niet op een goede aansluiting gerekend worden; ook daarbij moet de horizontale kwelweg op nul gesteld worden. Bij op zand afgezonken constructies, bijvoorbeeld tunnelelementen die onder de waterkering door gaan mag ook niet gerekend worden op (overal) een goede aansluiting. Ook hierbij wordt in eerste instantie de horizontale kwelweg niet meegerekend (*Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen* [23] paragraaf 5.3.4).²⁷

Voor horizontale kwelwegen onder kunstwerken die op staal zijn gefundeerd geldt tevens de voorwaarde dat er aan de benedenstroomse zijde voorzieningen aanwezig moeten zijn om uitspoeling van zand te voorkomen. Dit kan een kwelscherm zijn om onderspoeling tegen te gaan (wordt over het algemeen toegepast voor de opsluiting van starre constructies) of een min of meer flexibele bodembescherming die zanddicht op het kunstwerk is aangesloten (zoals de meeste matconstructies en breuksteen op geotextiel). Indien er alleen bovenstrooms een onderloopsheidscherm aanwezig is, mag de horizontale lengte onder de constructie van het scherm tot aan het uittreepunt niet worden meegenomen als een zanddicht aangesloten bodembescherming ontbreekt.



Figuur 46: Voorbeeld van kunstwerk zonder zanddichte aansluiting benedenstrooms

²⁷ Opgemerkt wordt dat dit niet aan de oorspronkelijke publicatie van Lane valt te ontleen, maar inmiddels wel de gangbare ontwerp- en beoordelingspraktijk is geworden in Nederland

Uiteindelijk worden de maatgevende kwelwegen voor twee situaties bepaald en berekend:

1. Maatgevende kwelweg die (ook) verticale kwelwegdelen bevat.
2. Maatgevende kwelweg die alleen horizontale kwelwegdelen bevat.

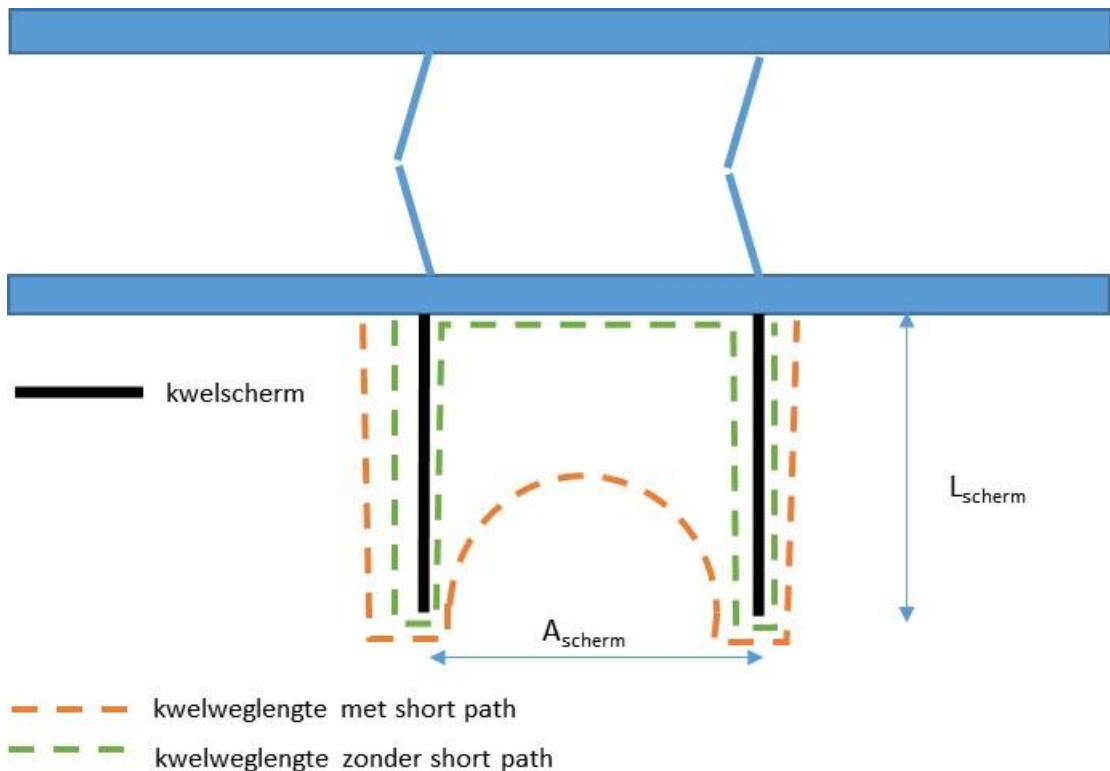
Het kritieke verval behorend bij de maatgevende kwelweg die (ook) verticale kwelwegdelen bevat wordt vervolgens berekend met het model van Lane.

Aandachtspunten

Tussen schermen of constructieonderdelen kan een kortgesloten kwelweg ontstaan, een zogeheten 'short path' (zie de kwelweg aangeduid met 3 in Figuur 48). Bij gebrek aan gevalideerde rekenregels voor een short path bij horizontale kwelwegen wordt voorgesteld uit te gaan van de volgende werkwijze, geïnspireerd op de werkwijze bij een short path bij verticale kwelwegen volgens Lane (zie ook paragraaf 5.1.2):

Als de kortste afstand tussen de buitenzijde van twee kwelschermen kleiner is dan de helft van de kwelweglengte langs de kwelschermen en de constructie tussen beide punten, moet ervan uit worden gegaan dat stroming door de grond maatgevend wordt in plaats van de kwelweg langs de kwelschermen.

Onderstaand wordt aangegeven welke kwelweglengte in geval van een 'short path' kan worden meegenomen. Hierin is L_{scherm} de lengte van het schermen uit de constructie en A_{scherm} de afstand tussen de schermen, zie ook Figuur 47.



Figuur 47: Kwelweglengte met en zonder short path (bovenaanzicht)

Indien er geen sprake is van een short path, dan is de kwelweglengte om de twee kwelschermen in Figuur 47 gelijk aan $2 \cdot L_{\text{scherm}} + A_{\text{scherm}} + 2 \cdot L_{\text{scherm}}$. Indien er wel

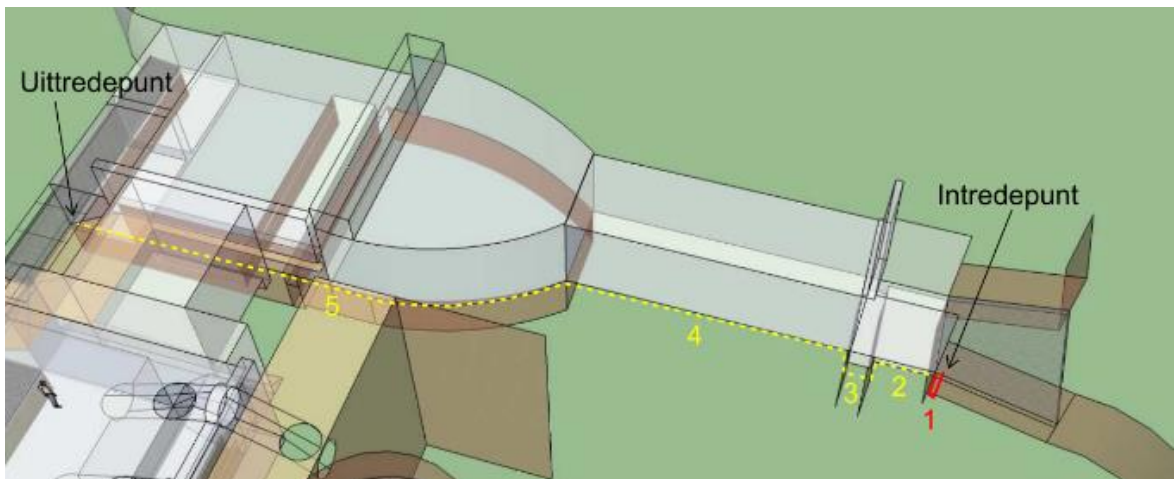
sprake is van een short path dan is de kwelweglengte bij gelijke scherm lengte gelijk aan $2 \cdot L_{\text{scherm}} + 2 \cdot A_{\text{scherm}}$ (voor afleiding zie bijlage D). Voor schermen van gelijke lengte betekent dit dat er sprake is van een short path als de kortste afstand tussen de buitenzijde van twee kwelschermen kleiner is dan de scherm lengte.

Samengevat kan de horizontale kwelweglengte als gevolg van de kwelschermen in bovenstaande situatie bepaald worden met de volgende formule:

$$L_h = 2 \cdot L_{\text{scherm}} + A_{\text{scherm}} + \min\{A_{\text{scherm}}; 2 \cdot L_{\text{scherm}}\} \quad 69$$

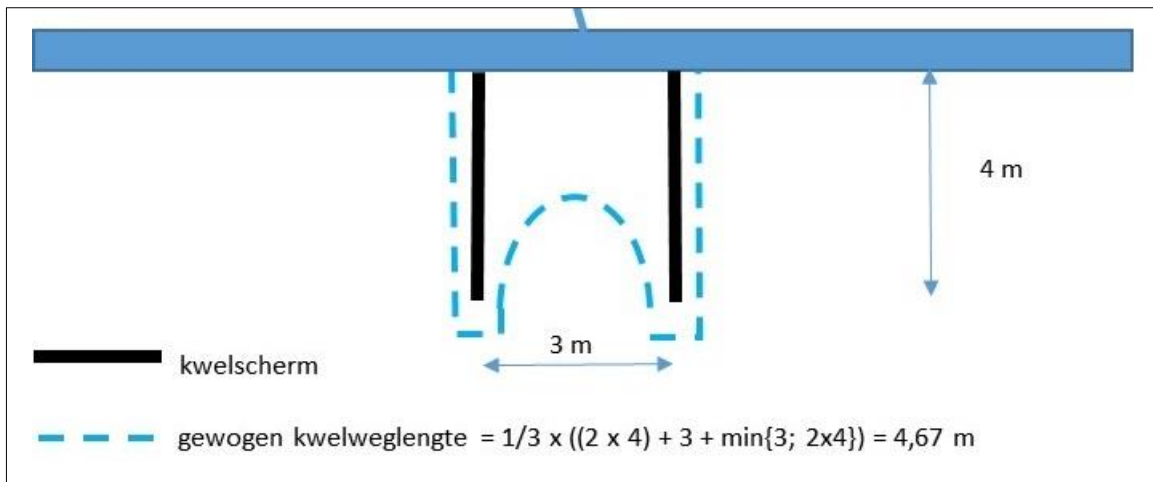
Voorbeeld

In Figuur 48 is met de gele stippellijn de horizontale kwelweg weergegeven op het grensvlak zand-klei van een complex kunstwerk. De kleidijk is omwille van de zichtbaarheid van de kwelwegen niet getekend. In het algemeen is bij achterloopsheid sprake van een nagenoeg geheel horizontale kwelweg.



Figuur 48: Horizontale kwelweg (geel) langs kunstwerk (verticale kwelweg is rood)

Hoe om te gaan met kwelweg 3 in Figuur 48? Stel dat de beide kwelschermen 4 meter uitsteken uit de zijkant van het kunstwerk, en de afstand tussen de beide uiteinden van het kwelscherm is 3 meter (zie Figuur 49). De kwelweglengte tussen beide punten is dan $(4 + 3 + 4) = 11$ meter. De afstand tussen de beide uiteinden is met 3 meter kleiner dan de helft van de kwelweglengte ($11 \times \frac{1}{2} = 5,5$ m). Er is dus sprake van een short path. De horizontale kwelweglengte die als gevolg van de schermen in het model van Lane in rekening mag worden gebracht is $L_h = 2 \times L_{\text{scherm}} + A_{\text{scherm}} + \min\{A_{\text{scherm}}; 2 \times L_{\text{scherm}}\} = 2 \times 4 + 3 + \min\{3; 2 \times 4\} = 8 + 3 + 3 = 14$ m. Deze kwelweglengte wordt in het model van Lane nog vermenigvuldigd met een factor $\frac{1}{3}$, dus de 'gewogen' kwelweglengte in het model van Lane bedraagt $\frac{1}{3} \times 14 = 4,67$ m.



Figuur 49: Bepaling horizontale kwelweglengte (in dit voorbeeld met short path)

5.1.2 Verticale kwelweglengte

Wat is het?

Lengte [m]

De weerstand tegen piping is, naast de eigenschappen van de zandlaag, afhankelijk van de kwelweglengte. Dit is de afstand tussen het intreepunt van de kwelstroming door de zandlagen onder en naast het kunstwerk en het uittreepunt. Deze afstand tussen intreepunt en uittreepunt wordt overbrugd door een samenspel van horizontale en verticale kwelwegdelen, welke volgen uit een 3D-analyse. De verticale kwelweglengte is de som van alle delen van de kwelweg langs de constructie die onder een hoek van 45° of groter met de horizontaal lopen.

Hoe te bepalen

Bij kunstwerken liggen in- en uittreepunt vaak vrij vast. Zo zal het intreepunt doorgaans gelegen zijn op de bodem of in het talud van de buitendijkse watergang en het uittreepunt op de bodem of in het talud van de binnendijkse watergang. De wijze waarop de afstand tussen in- en uittreepunt wordt overbrugd kan vaak op meerdere manieren gebeuren. Een driedimensionale kwelweganalyse moet dit uitwijzen. Hierin zijn sowieso horizontale kwelwegdelen aanwezig en meestal ook verticale.

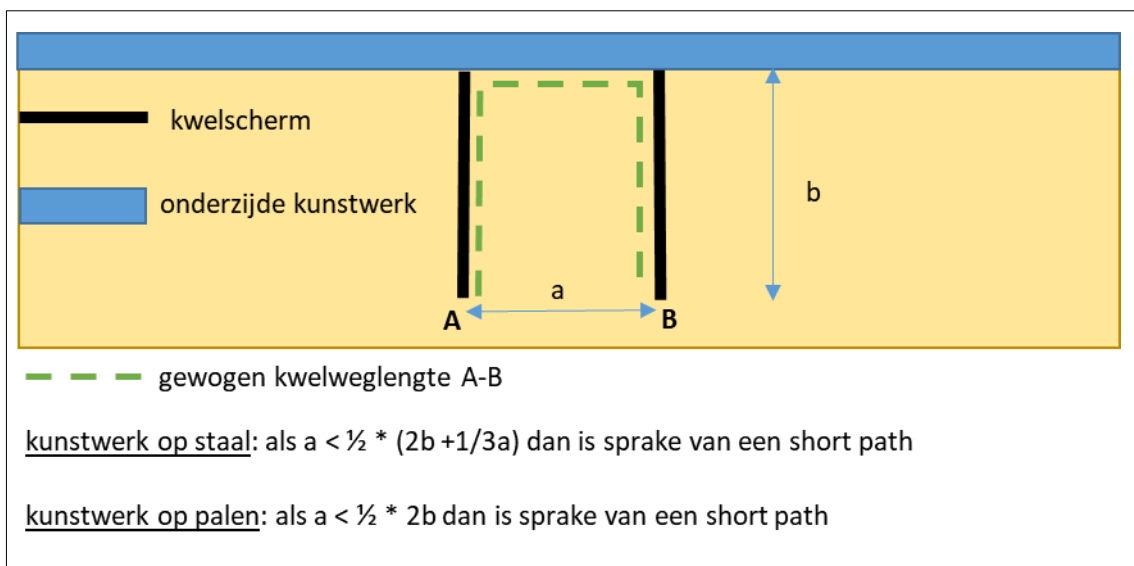
Het in rekening brengen van de verticale kwelweglengte is alleen toegestaan wanneer een goede aansluiting tussen het kwelscherm en de constructie aanwezig is. Met name bij kunstwerken waarop negatieve kleef werkt en die niet goed op stuit in de draagkrachtige zandondergrond staan, is de aansluiting van kwelschermen een aandachtspunt. Daarnaast kan veroudering van kwelschermen en hun aansluitingsconstructies ervoor zorgen dat het kwelscherm niet goed functioneert. In de praktijk is het functioneren van de kwelschermen echter lastig aan te tonen. In paragraaf 6.3.3.3 van *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen* [23] worden voor houten, stalen en betonnen kwelschermen diverse factoren genoemd die de levensduur beïnvloeden, zowel in positieve als negatieve zin. Geconcludeerd kan worden dat het niet mogelijk is op basis van leeftijd en materiaalsoort een uitspraak te doen over de mate waarin de aansluiting nog goed is. Ten behoeve van de beoordeling wordt daarom aanbevolen uit te gaan van een goede aansluiting, tenzij

er uit de praktijk aanwijzingen zijn (lekkages, zanduitspoeling) dat dit niet het geval is. Indien wordt getwijfeld aan de aansluiting van een kwelscherm op de constructie kunnen peilbuizen worden geplaatst aan voor- en achterzijde van het kwelscherm om de effectiviteit van het kwelscherm in beeld te brengen.

In tegenstelling tot de horizontale kwelweglengte (reductiefactor 1/3 voor kwelwegdelen onder de constructie) wordt de verticale kwelweglengte in het model van Lane niet gereduceerd bij de bepaling van de totale kwelweglengte.

Aandachtspunten

Tussen schermen of constructieonderdelen kan een zogeheten 'short path', een kortgesloten kwelweg ontstaan (zie voorbeeld op volgende pagina). Als de kortste afstand tussen de onderzijde van twee kwelschermen kleiner is dan de helft van de gewogen kwelweglengte tussen beide punten, moet ervan uit worden gegaan dat stroming door de grond onder het kunstwerk maatgevend wordt in plaats van de kwelweg langs de constructie, zie Figuur 50.



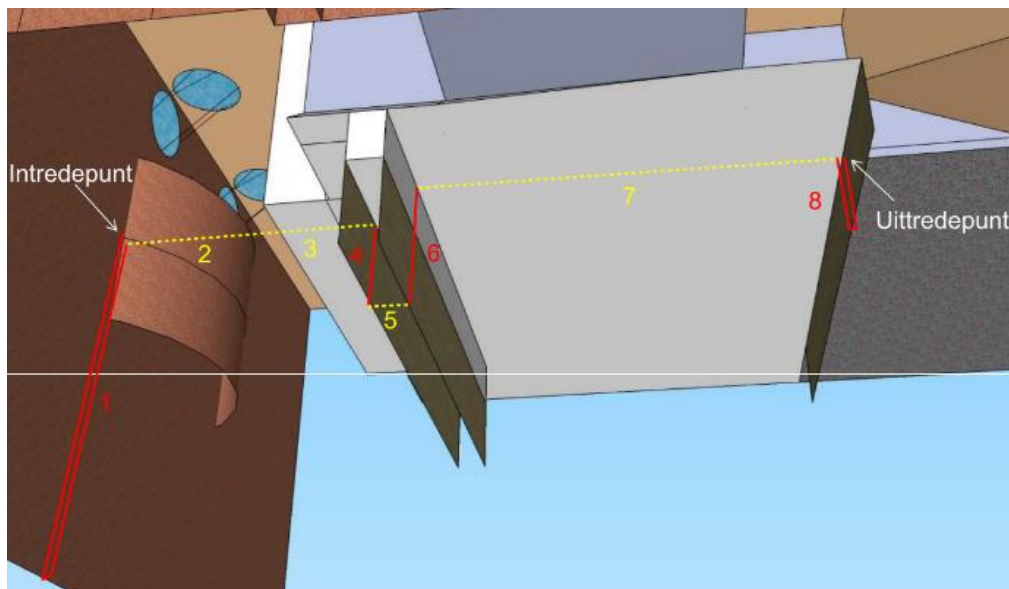
Figuur 50: Toelichtende figuur criteria short path

Voor de bepaling van de gewogen kwelweglengte mag de lengte van het "short path" verdubbeld worden. Hierbij geldt de restrictie dat de totale kwelweglengte via het 'short path' dan niet groter mag zijn dan 80% van de 'normale' gewogen kwelweglengte.

Opgemerkt wordt dat dit afwijkt van paragraaf 5.3.4 van *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen* [23]). Hierin staat dat als een gewogen kwelweg met daarin een "short path" maatgevend is $C_{w,creep}$ mag worden gereduceerd met een factor 1,25. Dit valt echter niet aan de publicatie van Lane te ontleenen.

Voorbeeld

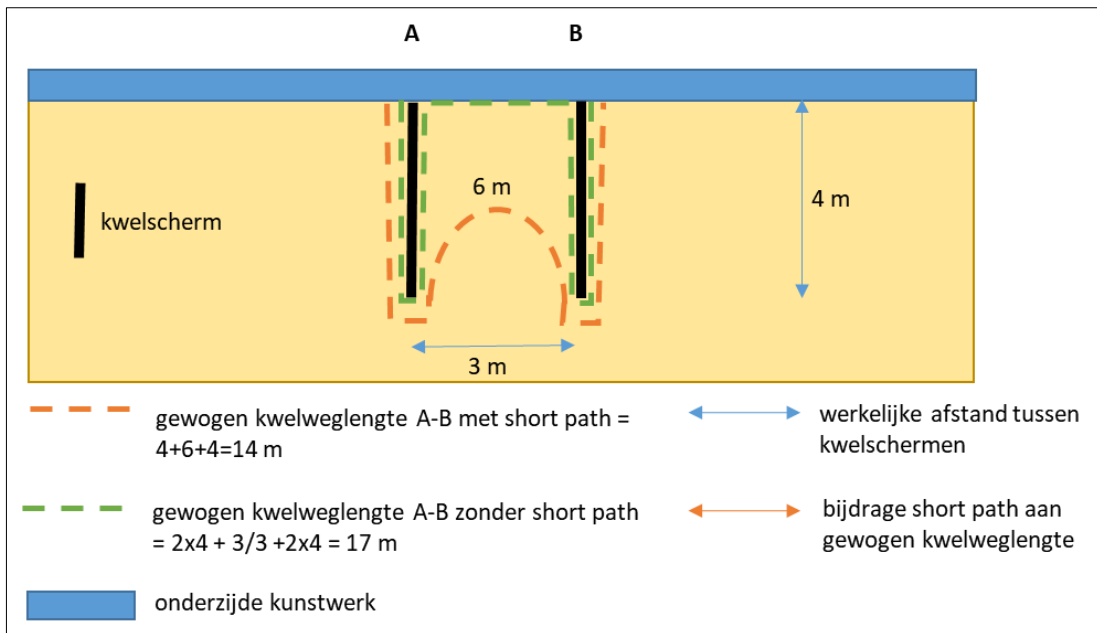
In Figuur 51 zijn met de rode lijnen de verticale kwelwegen langs de kwelschermen van een complex kunstwerk ingetekend. De zandondergrond is omwille van de zichtbaarheid van de kwelwegen niet getekend.



Figuur 51: Combinatie van horizontale en verticale kwelwegen onder kunstwerk

Ook in dit voorbeeld is mogelijk een short path aanwezig (kwelweg 5 in Figuur 52). Stel dat de beide kwelschermen 4 meter uitsteken onder de vloer van het kunstwerk, en de afstand tussen de beide uiteinden van het kwelscherm is 3 meter. De gewogen kwelweglengte tussen beide punten is dan $(4 + 3/3 + 4) = 9$ meter. De afstand tussen de beide uiteinden A en B is met 3 meter kleiner dan de helft van de kwelweglengte (4,5 m). Er is dus sprake van een short path.

De kwelweglengte van het short path die in rekening gebracht mag worden is het dubbele van de werkelijk aanwezige kwelweglengte, in dit geval dus 6 m. De totale gewogen kwelweglengte over de beide damwandschermen bedraagt dan $4 + 6 + 4 = 14$ m. Dit is meer dan 80% van de kwelweglengte zonder short path, welke $2 \times 4 + 1/3 \times 3 + 2 \times 4 = 17$ m bedraagt. Voor de gewogen kwelweglengte in dit voorbeeld moet dus $0,8 \times 17 = 13,6$ m worden aangehouden.



Figuur 52: Langsdoorsnede over kunstwerk met kwelweg inclusief short path

5.1.3 Creep-factor behorend bij model van Lane

Wat is het?

Parameter [-]

De creep-factor $C_{w,creep}$ is een empirisch bepaalde materiaalconstante van de ondergrond en geeft in feite de weerstand van de ondergrond tegen uitspoeling weer. Hierbij geldt: hoe kleiner de creep-factor, des te groter de weerstand tegen uitspoeling. De creep-factor $C_{w,creep}$ is gebaseerd op wat destijds werd gezien als een veilige benadering (bovengrens), wat impliceert dat bij gebruik van de regel van Lane voor de veiligheidsfactor $\gamma = 1,0$ gehanteerd kan worden. Tot op heden is dit altijd onverkort overgenomen. In Tabel 17 zijn de door Lane aangegeven waarden voor verschillende typen materiaal in de grondlaag weergegeven.

De empirische rekenregel van Lane is in beginsel bedoeld voor controle op piping (horizontale erosie). In de Nederlandse praktijk wordt gesteld dat heave (verticaal uittreeverhang) impliciet ook beoordeeld 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 deelfaalmecanismen wel separaat beschouwd.

Tabel 17: Creep-factoren voor de regels van Lane

Grondsoort	Mediane korreldiameter [μm] ¹	$C_{w,creep}$ (Lane) met $\gamma = 1,0$
Uiterst fijn zand, silt	< 105	8,5
Zeer fijn zand (mica)	105 – 150	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

Grondsoort	Mediane korreldiameter [µm] ¹	Cw,creep (Lane) met $\gamma = 1,0$
Matig grof grind	5600 - 16000	3,5
Zeer grof grind	> 16000	3

¹ Indicaties conform NEN 5104 (September 1989)

Hoe te bepalen

De creepfactor is afhankelijk van de materiaaltyping in de watervoerende laag; een schatting van de grofheid van het zand is voldoende. In Tabel 17 zijn de door Lane aangegeven indicaties van deze factor gegeven. De creepfactor wordt bepaald aan de hand van de geschatte korreldiameter van het zand in de watervoerende zandlaag. Bij voorkeur gebeurt dit aan de hand van een statistische beschouwing op basis van een voldoende groot aantal uitgevoerde zevingen. In de praktijk echter is meestal sprake van een classificatie door de boormeester van één of enkele boringen. Overigens is dit in lijn met de oorspronkelijke studie van Lane, waarin classificatie van de grondsoort ook gebaseerd zal zijn geweest op een inschatting van een boormeester.

In tabel 4.1 van het *Technisch Rapport Zandmeevoerende wellen* [26] wordt gesteld dat eventueel tussen de klassemiddens van de mediane korreldiameters geïnterpoleerd kan worden. Een rechtvaardiging van deze verfijning van de rekenregel is echter niet expliciet aan de onderbouwing en filosofie van de methode van Lane, zoals neergelegd in diens oorspronkelijke publicatie, te ontleen. In *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen* [23] tabel 3.1 is deze toevoeging achterwege gelaten. Aanbevolen wordt interpolatie tussen de klassemiddens van de mediane korreldiameters dan ook niet toe te passen.

Aandachtspunten

Het komt voor dat de kwelweg door verschillende grondlagen loopt met een andere creep-factor. Er zijn verschillende manieren om hiermee om te gaan:

- Kies de creep-factor die hoort bij de laag waarin het uittreepunt zich bevindt.
- Houd de grootste creep-factor (dus de creep-factor voor de grondlaag met het fijnste zand) aan als creep-factor.
- Bereken per grondlaag de bijdrage aan het kritieke verval door per grondlaag de kwelweglengte en creep-factor vast te stellen en deze bijdragen te sommeren.

Hoewel aanwijzingen hieromtrent niet zijn te ontleen aan de oorspronkelijke publicatie van Lane is de laatste optie het meest plausibel. In het voorbeeld wordt hier nader op ingegaan.

In *NEN 3651: 2003 Aanvullende eisen voor leidingen in kruisingen met belangrijke waterstaatswerken* [20] en *Ondergrondse pijpleidingen - Grondslagen voor de sterkteberekening* [22] worden richtlijnen gegeven voor pipingcontrole bij kruisingen van waterkeringen met pijpleidingen, met name ook bij gelaagde grond. Hierin wordt de volgende werkwijze aangereikt:

- Wanneer de kwelweg door verschillende grondlagen loopt, dient voor de gewogen creepfactor van Lane die waarde te worden gekozen die hoort bij de grondlaag waarin zich het uittreepunt bevindt.
- Tevens wordt gesteld dat wanneer delen van de kwelweg lopen door grondlagen met andere doorlatendheden dan van de 'maatgevende' grondlaag, de (fictieve) bijdrage van deze delen aan de (horizontale of

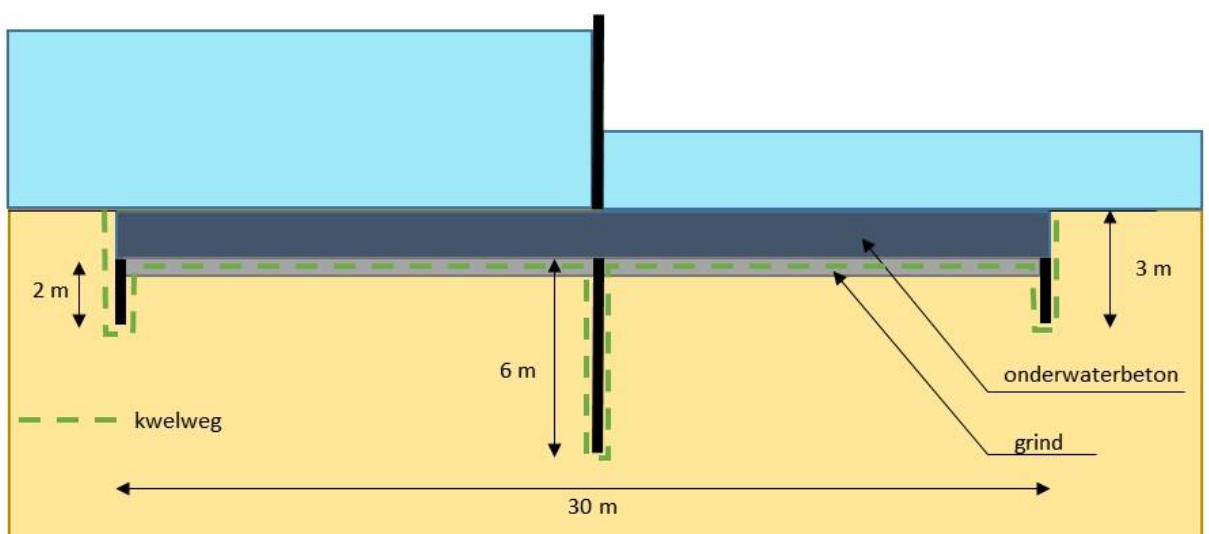
verticale) kwelweglengte berekend kan worden door verschalen van deze delen met de verhouding van de doorlatendheden.

Een rechtvaardiging van deze verfijningen van de rekenregel is echter niet expliciet te ontlenen aan de onderbouwing en filosofie van de methode van Lane, zoals neergelegd in diens oorspronkelijke publicatie (*Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen* [23] paragraaf 5.3.4). Daarnaast is het verschalen met de verhouding van de doorlatendheden erg lastig toe te passen, omdat de doorlatendheden van de diverse grondlagen vaak niet bekend zijn en lastig zijn in te schatten. Aanbevolen wordt daarom deze werkwijze uit [20] en [22] niet toe te passen.

Voorbeeld

In onderstaand voorbeeld is sprake van een kunstwerk op een vloer van onderwaterbeton zonder trekpalen. Onder deze onderwaterbetonvloer is om uitvoeringstechnische redenen een laag grind (creep-factor 3,5) van 0,50 m dikte aangebracht. Rondom het kunstwerk is sprake van fijn zand met een creep-factor van 7. Het kritieke verval wordt nu als volgt bepaald (zie Figuur 53):

- De gewogen kwelweg door het zand bedraagt $3+1,5+2 \times 5,5+1,5+3 = 20$ m. Dit levert een bijdrage aan het kritieke verval van $20/7 = 2,9$ m.
- De gewogen kwelweg door het grind bedraagt $0,5+15/3+0,5+0,5+15/3+0,5 = 12$ m. Dit levert een bijdrage aan het kritieke verval van $12/3,5 = 3,4$ m.
- Het totale kritieke verval komt hiermee op 6,3 m. Ter vergelijking: had het grind ontbroken, dan was het kritieke verval $(3+2+30/3+6+6+2+3)/7 = 4,6$ m geweest.



Figuur 53: Voorbeeld kunstwerk met kwelweg door meerdere grondlagen

5.1.4 Buitenwaterstand

Wat is het?

Peil [m+NAP]

De bij de beoordeling met de rekenmodellen van Bligh en Lane te hanteren buitenwaterstand is de waterstand bij de norm. Het verval is gelijk aan het verschil tussen de buitenwaterstand en de binnenwaterstand.

Hoe te bepalen

Met behulp van Hydra-NL of Riskeer is de buitenwaterstand te bepalen met een overschrijdingskans die getalsmatig gelijk is aan de overstromingskansnorm van het dijktraject.

Aandachtspunten

Bij piping is tijdsafhankelijkheid een belangrijk gegeven. In voorkomende gevallen moet hiervoor afdoende worden gecorrigeerd (niet onterecht 'afkeuren'), zie ook paragraaf 4.3.5 van de handleiding kunstwerken [38] over de te hanteren waterstandsverlopen. Peilbuismetingen ter plaatse van het kunstwerk kunnen een goede indicatie geven van de respons van de waterspanningen in de watervoerende zandlaag op de buitenwaterstand.

Voorbeeld

-

5.1.5 *Binnenwaterstand*

Wat is het?

Peil [m+NAP]

De binnenwaterstand is de waterstand in het water aan de binnenzijde van het kunstwerk tijdens maatgevende omstandigheden. Het verval is gelijk aan het verschil tussen de buitenwaterstand en de binnenwaterstand.

Hoe te bepalen

De binnenwaterstand is afhankelijk van het gevoerde waterbeheer vlak vóór en tijdens hoogwater en de oriëntatie van het binnenwater. Indien de binnendijkse waterstand tijdens hoogwater niet bekend is, of niet gecontroleerd wordt, kan als vertrekpunt de gemiddelde waterstand worden genomen omdat de waterstand in het watersysteem tijdens een hoogwater vanwege kwel en eventuele afname van lozingscapaciteit vrijwel altijd hoger zal zijn (*Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen* [23] paragraaf 6.2.1.2). Indien sprake is van een zomer- en winterpeil kan worden uitgegaan van het winterpeil. Wel moet geverifieerd worden of als gevolg van afwaaiing en afmaling de waterstand bij het kunstwerk niet alsnog gedurende langere tijd lager kan zijn. Afstemming met de beheerder omtrent zijn ervaringen van recente hoogwaterperioden is gewenst bij het bepalen van de maatgevende binnenwaterstand.

Aandachtspunten

De waterbeheerstrategie tijdens hoge rivierafvoeren kan van invloed zijn op het polderpeil (denk aan pompcapaciteit van de gemalen of maalstops). Afstemming met de beheerder hieromtrent is nodig.

Voorbeeld

[-]

5.2 **Parameters heave-model**

Het heave-model ziet er als volgt uit:

$$i_c \geq \frac{\varphi_o - h_p}{d}$$

F-
70

Hierin is i_c het kritieke verhang waaraan beoordeeld wordt. Hiervoor wordt een waarde van 0,5 aangehouden.

Het model kent de volgende parameters, die in de volgende subparagrafen besproken worden:

- Stijghoogte op niveau onderzijde benedenstrooms kwelscherf φ_o .
- Freatisch niveau ter plaatse van uittreepunt h_p .
- Lengte benedenstrooms kwelscherf d .

5.2.1 *Stijghoogte op niveau onderzijde benedenstrooms kwelscherf*

Wat is het?

Stijghoogte [m+NAP]

De stijghoogte aan de onderzijde van het benedenstroomse kwelscherf bepaalt samen met het freatisch niveau ter plaatse van het uittreepunt het verhang over het benedenstroomse kwelscherf.

Hoe te bepalen

De stijghoogte aan de onderzijde van het benedenstroomse kwelscherf is afhankelijk van het totale verval over de kering en de grondwaterstroming in de zandlaag. Hiermee is de stijghoogte aan de onderzijde van het benedenstroomse kwelscherf afhankelijk van de geohydrologische configuratie van de zandlaag en de plaats en diepte van de kwelscherf. Voor de bepaling van het optredende verhang over het benedenstroomse kwelscherf is een grondwaterstromingsanalyse nodig. In beginsel kan dit met elk daartoe geschikt rekenmodel.

In paragraaf 5.4.2 van *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen* [23] worden de volgende modellen onderscheiden om het optredende verhang over het benedenstroomse kwelscherf te bepalen:

- Berekening met behulp van een ('multi-purpose') computerprogramma voor numerieke grondwaterstromingsanalyse, gebaseerd op een eindige elementen of eindige differentie methode (EEM of EDM).
- Berekening met een semi-analytisch rekenmodel (fragmentenmethode). Deze methodiek is in TAW-verband (thans ENW) ontwikkeld, specifiek voor heavecontroles bij dijken of waterkerende kunstwerken met verticale kwelscherf.
- Analytische berekening met een vierkantennet (vindt in de praktijk niet of nauwelijks meer plaats en wordt daarom ook niet verder beschouwd).

Het principe van de fragmentenmethode wordt beschreven in Bijlage A3 van *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen* [23]. Berekeningen kunnen worden uitgevoerd met een spreadsheetprogramma dat verkrijgbaar is via de Helpdesk Water. Voor eenvoudige situaties kunnen afleesgrafieken gebruikt worden.

Ten opzichte van de fragmentenmethode bieden de meeste numerieke modellen meer vrijheid in keuze van geometrie (aantal en vorm van kwelchermen) of grondeigenschappen (grondlagen en doorlatendheden). Toch maakt de eenvoud van de fragmentenmethode en het feit dat dit beschikbaar is in een veelgebruikt programma als Excel dat de fragmentenmethode in de praktijk voor veel situaties een snellere methode is. Daarom wordt in paragraaf 5.2.4 nader ingegaan op het schematiseren met gebruik van de fragmentenmethode. Overigens is de invoer die nodig is bij gebruik van de fragmentenmethode ook nodig bij gebruik van numerieke berekeningsmodellen. Rekeninstellingen kunnen dus worden overgenomen.

Daarnaast kan de stijghoogte aan de onderzijde van het benedenstroomse kwel scherm natuurlijk gemeten worden met behulp van peilbuizen. Hier wordt in paragraaf 5.5 (Nadere analyse) van de handleiding kunstwerken [38] verder op ingegaan.

Aandachtspunten en voorbeeld

Hiervoor wordt verwezen naar paragraaf 5.2.4.

5.2.2 *Freatisch niveau ter plaatse van uittreepunt*

Wat is het?

Peil [m+NAP]

Het freatisch niveau ter plaatse van het uittreepunt is de waterstand aan de binnenzijde van het kunstwerk tijdens hoogwateromstandigheden.

Hoe te bepalen

De bepaling hiervan is analoog aan de bepaling van de binnenwaterstand in het model van Lane (zie paragraaf 5.1.5).

5.2.3 *Lengte benedenstrooms kwel scherm*

Wat is het?

Lengte [m]

De lengte van het benedenstroomse kwel scherm is de afstand tussen de teen van het kwel scherm en de bovenzijde van de grondlaag aansluitend aan het kunstwerk.

Hoe te bepalen

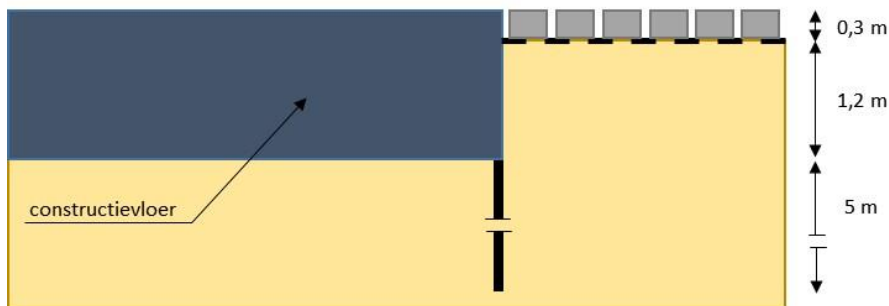
De teen van de damwand kan doorgaans worden afgelezen van tekening. De bovenzijde van de grondlaag aansluitend aan het kunstwerk is doorgaans het niveau van de bovenzijde van de vloer. Indien een aansluitende bodembescherming aanwezig is, mag deze dikte ook worden meegenomen vanuit de gedachte dat de open ruimte in deze bodembescherming vol zal lopen met zand en zodoende ook weerstand tegen uitspoeling zal bieden.

Aandachtspunten

De effectiviteit van zeer korte kwelchermen is twijfelachtig. Als de scherm lengte (bij het uittreepunt) kleiner is dan circa 1 m moet daarom worden uitgegaan van afwezigheid van het scherm.

Voorbeeld

In onderstaand voorbeeld (Figuur 54) is de lengte van het benedenstroomse kwelscherm waarover het optredende verhang wordt bepaald niet 5 m maar 6,5 m ($5\text{ m} + 1,2\text{ m} + 0,3\text{ m}$).

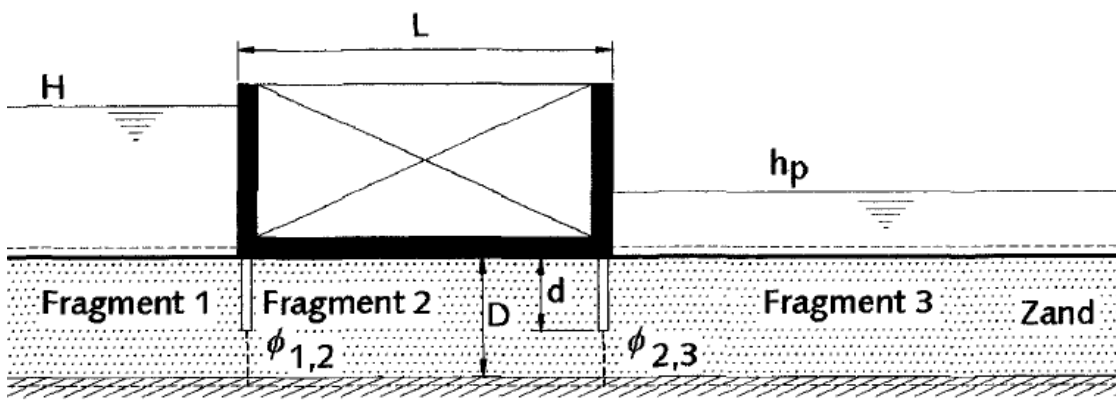


Figuur 54: Voorbeeld bepaling lengte benedenstroomse kwelscherm

5.2.4

Een hulpmiddel om de heave-toets uit te voeren: de fragmentenmethode

De fragmentenmethode is in de 80-er en 90-er jaren van de vorige eeuw ontwikkeld. De fragmentenmethode is een rekentechniek gebaseerd op grondwaterstromingsberekeningen die speciaal is bedoeld voor het analyseren van de grondwaterstroming onder dijken of kunstwerken met kwelschermen. Het is een semi-analytische techniek die als voordeel boven een numerieke grondwaterstromingsanalyse heeft dat zeer snel berekeningen kunnen worden uitgevoerd. De fragmentenmethode is uitgebreid beschreven in bijlage A3 van *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen* [23]. In Figuur 55 is een voorbeeld van een constructie met kwelschermen gegeven en een opdeling in fragmenten.



Figuur 55: Schematisch weergegeven kunstwerk met twee kwelschermen in een doorlatende zandlaag

Standaard fragmenten zijn het kop-, tussen- en staartfragment. Daarnaast zijn extra fragmenten ontwikkeld: een "zettingsfragment", waarbij een zettingspleet tussen de onderkant van het kunstwerk en de zandlaag aanwezig is, een "gatfragment" voor simulatie van geconcentreerde lek door een kwelscherm en een "lekfragment", waarmee gelijkmatig verdeelde lek door het kwelscherm gesimuleerd kan worden. Voor de adviespraktijk is echter nog geen toegankelijke implementatie van deze fragmenten beschikbaar. Alleen de invloed van een zettingspleet kan

worden verdisconteerd in de handmatige berekeningen aan de hand van de in bijlage A3.2 van *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen* [23] gegeven tabellen. De invloed van de zettingsspleet kan worden meegenomen door de weerstandsfactoren van de fragmenten waar een zettingsspleet aanwezig is, of kan zijn, te reduceren. Als veilige stelregel moeten de weerstandsfactoren van die fragmenten worden gehalveerd. Afhankelijk van de verhouding tussen de dikte van het zandpakket en de lengte van het fragment kan minder gereduceerd worden. In de heavegrafieken in bijlage A3.2 van *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen* [23] en in de spreadsheetberekening (zie onder) kan deze invloed niet worden verdisconteerd.

Met de fragmentenmethode wordt het optredend verhang bepaald. Voor het mechanisme heave is het optredende verticale verhang over het kwelscherm in fragment 3 in Figuur 55 van belang.

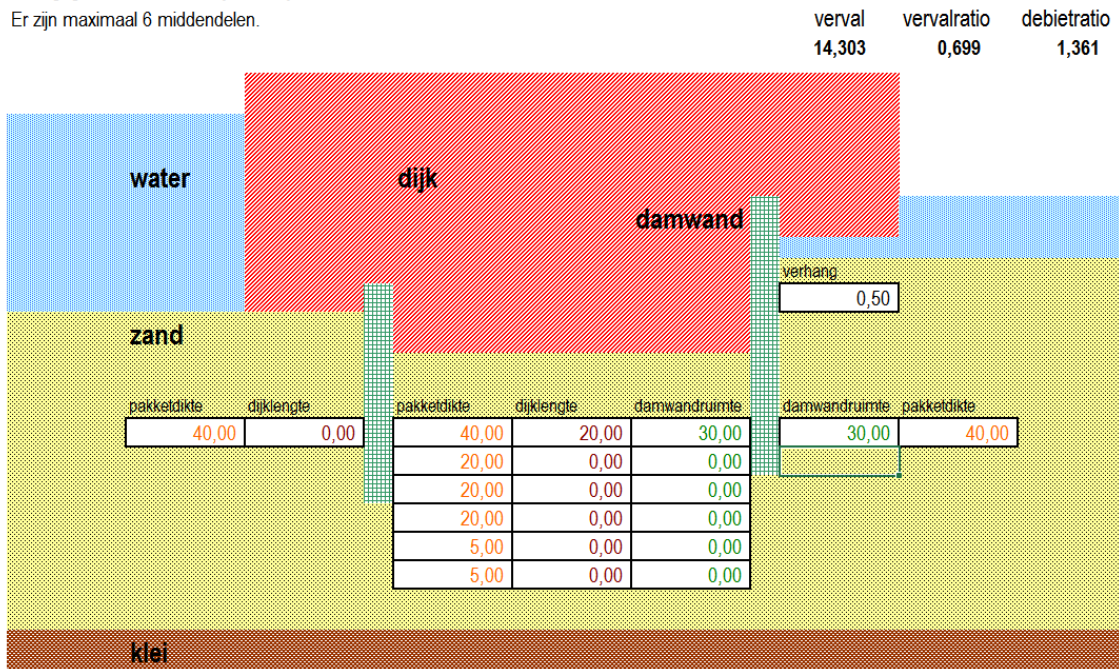
$$i_{optr} = \frac{\phi_{2,3} - h_p}{d}$$

Berekeningen kunnen worden uitgevoerd met een spreadsheetprogramma. Voor eenvoudige situaties kunnen afleesgrafieken en tabellen gebruikt worden welke zijn opgenomen in bijlage A3 van *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen* [23].

Heave bij kunstwerken

Voer gegevens in in de omliggende hokjes;
Er zijn maximaal 6 middendelen.

password:



Figuur 56: Spreadsheet fragmentenmethode

Figuur 56 geeft het invoerscherm en de uitkomsten. De invoer staat in de rechthoekjes. De uitvoer staat aangegeven als vet gedrukte getallen bovenin. In de Excel sheet is een beschrijving van het programma met invoer, uitvoer en beperkingen opgenomen.

In bovenstaand voorbeeld is het volgende te zien:

Invoer

- Als criterium voor het kritiek uitstroomverhang wordt een gemiddeld verhang opgelegd van 0,5 over de hoogte van het benedenstrooms geplaatste kwelscherm.
- Er zijn in dit voorbeeld twee damwanden.
- De pakketdikte van de doorlatende laag (zand) is in dit voorbeeld 40 meter; op de bepaling van deze dikte wordt onder het kopje 'Aandachtspunten' nader ingegaan.
- Het kunstwerk (aangeduid als dijk²⁸) is in rood getekend.
- Naast de linkerdamwand is de term 'dijk lengte' nul; dit wil zeggen dat de linkerdamwand aan het linkeruiteinde van het kunstwerk staat.
- De rechterdamwand staat altijd aan het rechteruiteinde van het kunstwerk, hier hoeft per definitie geen 'dijk lengte' te worden ingevoerd omdat wordt uitgegaan van uitspoeling van bodemmateriaal onder het kunstwerk tussen het uiteinde van het kunstwerk en het meest benedenstrooms geplaatste kwelscherm.
- Tussen de linker- en rechterdamwand kunnen maximaal 6 fragmenten worden opgegeven. In dit voorbeeld is 1 fragment gedefinieerd met een lengte van 20 meter. Als er meer kwelschermen tussen de twee damwanden aanwezig zijn moeten meer fragmenten worden opgegeven. Bijvoorbeeld bij één extra kwelscherm zijn er twee tussenfragmenten.
- De damwandruimte geeft de verticale afstand tussen teen van de damwand en ondoorlatende basis (kleilaag) aan. Deze ruimte wordt dus bepaald door de lengte van het kwelscherm en de dikte van het zandpakket. Voor beide damwanden is in dit voorbeeld 30 meter gekozen (de damwandlengte is dus 10 m).

Uitvoer

- De uitkomst is een kritiek verval van 14,3 m. Dit kan worden vergeleken met het werkelijke verval over het kunstwerk. Als het kritieke verval groter is dan het werkelijke verval dan wordt aan de toets op heave voldaan.
- De debietratio is niet nodig om de toets te doen.

De spreadsheet is handig om snel een toets op heave uit te voeren. De sheet bevat de volgende beperkingen:

- Geometrie/bodemopbouw: kunstwerken waarbij de grondwaterstroming essentieel 3-dimensionaal is vanwege een ingewikkelde geometrie en/of grondlagenopbouw kunnen beter niet met de fragmentenmethode worden beschouwd; numerieke grondwaterstromingsberekeningen geven hier een betrouwbaarder beeld van het uittreeverhang²⁹.
- Geometrie: maximaal 6 fragmenten mogelijk.
- Grondslag: In de fragmentenanalyses wordt in beginsel uitgegaan van isotrope doorlatendheid van de zandlaag. De horizontale en verticale doorlatendheden kunnen echter verschillend zijn, bijvoorbeeld door aanwezigheid van horizontale stoorlaagjes of lensjes. In de meeste gevallen kan dit verdisconteerd worden door de fragmenten (verticaal of horizontaal)

²⁸ Dit is enigszins verwarrend; daar waar 'dijk' en 'dijk lengte' staat kan echter gewoon 'kunstwerk' en 'kunstwerk lengte' gelezen worden.

²⁹ In dat geval kan overigens ook de methode van Lane gebruikt worden

te verschalen. Aanbevolen wordt om hierbij een deskundige te raadplegen. Ook kan een numerieke grondwaterstromingsberekening gemaakt worden.

- Toepassingsgebied: Voor damwandlengten kleiner dan 0,1 maal de dikte van de zandlaag D zijn de berekeningen met de fragmentenmethode onnauwkeurig. Sowieso kan aan de werking van zeer korte kwelschermen (kleiner dan 1 m) getwijfeld worden. Als de scherm lengte (bij het uittredepunt) kleiner is dan 1 m, moet daarom worden uitgegaan van afwezigheid van het scherm. Als de scherm lengte groter is dan 1 m, maar kleiner dan 0,1D dan is de fragmentenmethode onnauwkeurig ten opzichte van een numeriek grondwaterstromingsmodel. De fragmentenmethode geeft in dat geval conservatieve resultaten (zie ook bijlage A figuur A.4 van *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen* [23]). Indien nadere aanscherping gewenst is kan in dat geval een numeriek grondwaterstromingsmodel gebruikt worden voor de berekening van de grondwaterstroming in de watervoerende zandlaag.

Aandachtspunten

Dikte zandlaag

De ondergrens van zandpakketten is vaak niet rechtstreeks uit de metingen af te leiden omdat deze metingen vaak al eindigen op een diepte waar nog zand aanwezig is. Voor de bepaling van de dikte van de zandlaag kunnen laagscheidingen uit de SOS of vanuit VNK-gegevens overgenomen worden. Deze zullen veelal beschikbaar zijn uit het dijken spoor. Wanneer hieruit de dikte van het zandpakket niet kan worden bepaald kan als veilige waarde 40 m worden gehanteerd. Voor gebruik van de SOS kan een losse handleiding geraadpleegd worden [19].

Invloed voorland op mechanisme heave

In paragraaf 5.6.3 van *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen* [23] wordt ingegaan op de invloed van voorland op het mechanisme heave. Hierbij geldt dat het voorland een reducerend effect heeft op het optredende verticale verhang aan de binnenzijde van de waterkering. Bij grondwaterstromingsanalyses met behulp van het fragmentenmodel kan dit in rekening gebracht worden door het gebruik van een uiterwaarde-fragment. Voor de uitwerking hiervan wordt verwezen naar bijlage A van *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen* [23].

Bij grondwaterstromingsanalyses met behulp van een numeriek grondwaterstromingsmodel kan het effect in rekening gebracht worden door de afdekkende laag in het voorland mee te modelleren in de analyse.

Overigens wordt ook hier aanbevolen van grof naar fijn te werken en de invloed van het voorland in eerste instantie niet mee te nemen. Indien de analyse zonder voorland niet duidt op een voldoende kleine faalkans, dan kan de beoordeling op dit punt aangescherpt worden.

Fundering op palen

Bij heavecontroles met behulp van de fragmentenmethode is reductie van de weerstandsfactoren noodzakelijk indien sprake is van horizontale delen in een kwelweg ter plaatse van holten, bijvoorbeeld bij een paalfundering. Als veilige stelregel moeten de weerstandsfactoren van de fragmenten ter plaatse van een paalfundering worden gehalveerd. In dat geval kan het spreadsheet niet gebruikt

worden en moet worden teruggegrepen op de tabellen in bijlage A.3.2 van *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen* [23].

Verval over het kunstwerk

Het berekende kritieke verval over het kunstwerk wordt vergeleken met het optredende verval. Het optredende verval is het verschil tussen de buiten- en binnenwaterstand. Hiervoor geldt hetzelfde als in paragraaf 5.1 reeds is opgemerkt.

5.3 Parameters model opbarsten

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

$$\frac{(\gamma_{nat} - \gamma_w) \cdot d}{\gamma_w \cdot (\phi_z - h_p)} \geq \gamma_{up} \cdot \gamma_{b,u} \quad 71$$

Hierin zijn de volgende parameters opgenomen, die in de volgende subparagrafen besproken worden:

- Het natte volumegewicht van de cohesieve deklaag γ_{nat} .
- Het volumegewicht van water γ_w .
- De dikte van de cohesieve deklaag d .
- De stationaire stijghoogte in de zandlaag ϕ_z .
- Freatisch niveau ter plaatse van uittreepunt h_p .
- Een veiligheidsfactor voor het faalmechanisme opbarsten γ_{up} welke afhankelijk is van de gestelde betrouwbaarheidseis.
- Een schematiseringsfactor voor het faalmechanisme opbarsten $\gamma_{b,u}$.

5.3.1 Natte volumegewicht cohesieve deklaag

Wat is het?

Volumegewicht [kN/m³]

Het natte volumegewicht van de cohesieve deklaag is het gewicht van de volledig verzadigde deklaag.

Hoe te bepalen

Het volumiek gewicht van de grond wordt in een laboratorium bepaald. Hiertoe worden een voldoende aantal representatieve grondmonsters onderzocht. Aanbevolen wordt om hiervoor continu gestoken boringen met continue, ongeroerde monsternamen te gebruiken, zodat het totale gewicht van het afdekkende pakket kan worden bepaald en de gewichten per laag kunnen worden teruggerekend (zodanig dat het totale gewicht van het afdekkende pakket in de modelschematisering overeenkomt met het gemeten gewicht van het afdekkende pakket). In het geval dat gewerkt wordt met een proevenverzameling van volumieke gewichten, worden minimaal 12 metingen per grondsoort aanbevolen.

Voor de analyse wordt de karakteristieke schatting van de laaggemiddelde waarde (het gemiddelde over de hele laag) gebruikt. In bijlage B van *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen* [23] of in bijlage 1 van *Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies* [25] is aangegeven op welke wijze een karakteristieke schatting

van een laaggemiddelde waarde kan worden gemaakt. Bij gebrek aan gegevens kan worden uitgegaan van de waarden uit Tabel 2.b NEN 9097-1 [21].

Aandachtspunten

- Natuurlijke spreidingen van de afzonderlijke grondsoorten.
- Wisselende samenstelling van de deklaag.
- Wisselende dikte van de deklaag.

Voorbeeld

-

5.3.2 *Volumegewicht water*

Wat is het?

Volumegewicht [kN/m³]

Het volumegewicht van het water aan de binnenzijde van het kunstwerk.

Hoe te bepalen

Standaard wordt hiervoor 9,81 kN/m³ aangehouden.

Aandachtspunten

- Zout en brak water hebben iets andere eigenschappen dan zoet water, met name de viscositeit en de dichtheid variëren met zoutgehalte en temperatuur. Zout water heeft dan ook een ander volumegewicht.
- Bij een zoutgehalte van 35‰ en een temperatuur van 10 graden heeft water een dichtheid van 1027 kg/m³, en een volumegewicht van 10,07 kN/m³.

Voorbeeld

-

5.3.3 *Dikte cohesieve deklaag*

Wat is het?

Afstand [m]

De afstand tussen de bovenzijde en onderzijde van de cohesieve deklaag direct achter het kunstwerk.

Hoe te bepalen

Af te lezen uit het beschikbare grondonderzoek ter plaatse van het uittredepunt. Het is hierbij belangrijk dat de betreffende boring(en) en sondering(en) ook daadwerkelijk in de watergang achter het kunstwerk zijn genomen. Neem in dit geval de minimale waarde die is waargenomen.

Aandachtspunten

De overgang van deklaag naar zand is vaak geleidelijk over een hoogte van 0,3 tot soms (veel) meer dan 1 m. Op basis van het grondonderzoek moet met zekerheid kunnen worden aangegeven of dit overgangsgebied bestaat uit zandige kleilagen of kleiige zandlagen voordat deze overgangslaag mag worden meegenomen bij de dikte van de deklaag. Een waterspanningsindex gemeten met een piëzoconus kan

hierbij van nut zijn. Bij twijfel moeten er boringen worden gemaakt waarbij het materiaal in het laboratorium wordt beschreven.

Voorbeeld

-

5.3.4 *Freatisch niveau ter plaatse van uittreepunt*

Wat is het?

Peil [m+NAP]

Het freatisch niveau ter plaatse van het uittreepunt is de waterstand van het water aan de binnenzijde van het kunstwerk tijdens maatgevende omstandigheden.

Hoe te bepalen

De bepaling hiervan is analoog aan de bepaling van de binnenwaterstand in het model van Lane (zie paragraaf 5.1.5).

5.3.5 *Stationaire stijghoogte in de zandlaag*

Wat is het?

Stijghoogte [m+NAP]

De stijghoogte aan de onderzijde van de cohesieve deklaag bepaalt de opwaartse druk aan de onderzijde van de deklaag.

Hoe te bepalen

De bepaling hiervan is grotendeels vergelijkbaar met de bepaling van de stijghoogte aan de onderzijde van het benedenstroomse kwelscherm in het heave-model (zie paragraaf 5.2.1).

Als hulpmiddel hierbij kan gebruik gemaakt worden van de fragmentenmethode (zie paragraaf 5.2.4 en voorbeeld hieronder).

Voorbeeld

In Figuur 57 is een voorbeeld opgenomen van een kunstwerk met een deklaag aan de binnenzijde van het kunstwerk. Voor dit kunstwerk geldt een WBN (waterstand bij norm) van NAP+5 m. De binnenwaterstand onder hoogwateromstandigheden is NAP+2 m.

$10) / 10 = 3,2 \text{ m+NAP}$. De veiligheid tegen opbarsten bedraagt dan $(3,2 - 2) / (2,69 - 2) = 1,74$. Indien dit groter is dan het product van de benodigde veiligheidsfactor en de schematiseringsfactor treedt opbarsten dus niet op.

Overigens had in dit geval de controle op opbarsten achterwege kunnen worden gelaten, omdat het kritieke verhang over het benedenstroomse kwelscherm kleiner is dan 0,5 en hiermee dus al aan het heave-criterium wordt voldaan.

5.3.6 *Veiligheidsfactor voor opbarsten*

Wat is het?

Veiligheidsfactor [-]

Een veiligheidsfactor voor het faalmechanisme opbarsten welke afhankelijk is van de gestelde betrouwbaarheidseis.

Hoe te bepalen

Hiervoor wordt verwezen naar paragraaf 4.2 van de *Handreiking Ontwerpen met Overstromingskansen versie 4* [28].

Voorbeeld

-

5.3.7 *Schematiseringsfactor*

Wat is het?

Schematiseringsfactor [-]

Factor waarmee de mate van onzekerheid in de schematisatie meegenomen kan worden.

Hoe te bepalen

Hiervoor wordt verwezen naar het *Technisch Rapport Grondmechanisch Schematiseren van Dijken* [24].

Voorbeeld

-

5.4 **Parameters model van Bligh**

Het model van Bligh ziet er als volgt uit:

$$\Delta H = (h_{bu} - h_{bi}) \leq \Delta H_c = \frac{L}{C_{creep}}$$

72

Het model kent de volgende parameters, die in de volgende subparagrafen besproken worden:

- Kritieke verval $\Delta H_c = L / C_{creep}$
- Horizontale kwelweglengte L .
- Creep-factor behorend bij model van Bligh C_{creep} .
- Verval over het kunstwerk $\Delta H = h_{bu} - h_{bi}$.
- Buitenwaterstand h_{bu} .
- Binnenwaterstand h_{bi} .

Oorspronkelijk was de rekenregel van Bligh bedoeld om zowel verticale als horizontale kwelwegen te beoordelen. In de Nederlandse beoordelings- en ontwerp praktijk wordt de rekenregel van Bligh echter alleen toegepast bij horizontale kwelwegen.

5.4.1 Horizontale kwelweglengte

Wat is het?

Lengte [m]

De horizontale kwelweglengte is de som van alle delen van de kwelweg die onder een hoek van 45° of kleiner met de horizontaal lopen.

Hoe te bepalen

Dit is niet anders dan in het model van Lane, derhalve wordt hiervoor verwezen naar paragraaf 5.1.1. In tegenstelling tot het model van Lane wordt de horizontale kwelweglengte in het model van Bligh niet met een factor 1/3 vermenigvuldigd.

Aandachtspunten

Zie paragraaf 5.1.1.

Voorbeeld

-

5.4.2 Creep-factor behorend bij model van Bligh

Wat is het?

Parameter [-]

De creep-factor C_{creep} is een empirisch bepaalde materiaalconstante van de ondergrond die in feite de weerstand van de ondergrond tegen uitspoeling weergeeft. Hierbij geldt: hoe kleiner de creep-factor, des te groter de weerstand tegen uitspoeling. Net als bij het model van Lane is de creep-factor C_{creep} bij het model van Bligh gebaseerd op wat destijds werd gezien als een veilige benadering (bovengrens), wat impliceert dat bij gebruik van de regel van Bligh voor de veiligheidsfactor geldt: $\gamma = 1,0$. In Tabel 18 zijn de door Bligh aangegeven waarden voor verschillende typen materiaal in de grondlaag weergegeven.

Tabel 18: Creep-factoren voor de regels van Bligh

Grondsoort	Mediane korreldiameter [μm] ¹	C_{creep} (Bligh) met $\gamma = 1,0$
Uiterst fijn zand, silt	< 105	
Zeer fijn zand	105 – 150	18
Zeer fijn zand (mica)		18

Grondsoort	Mediane korreldiameter [µm] ¹	C _{creep} (Bligh) met $\gamma = 1,0$
Matig fijn zand (kwarts)	150 – 210	15
Matig grof zand	210 – 300	
Zeer/uiteerst 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)

Hoe te bepalen

Dit is niet anders dan in het model van Lane, derhalve wordt hiervoor verwezen naar paragraaf 5.1.3.

Aandachtspunten

In tegenstelling tot bij het model van Lane komt het in de praktijk eigenlijk niet voor dat de kwelweg door verschillende grondlagen met een andere creep-factor loopt.

Voorbeeld

-

5.4.3 *Buitenwaterstand*

Hiervoor wordt verwezen naar paragraaf 5.1.4.

5.4.4 *Binnenwaterstand*

Hiervoor wordt verwezen naar paragraaf 5.1.5.

5.5 Parameters model van Sellmeijer

Voor de bepaling van de parameters die horen bij het model van Sellmeijer wordt verwezen naar de handleiding Piping [27]. Alleen aan de parameters kwelweglengte, d_{70} en doorlatendheid wordt nader aandacht besteed, omdat deze anders bepaald moeten worden dan in het dijkenloop.

5.5.1 *Kwelweglengte*

Wat is het?

Lengte [m]

De horizontale kwelweglengte is de (horizontaal gemeten) som van alle delen van de kwelweg.

Hoe te bepalen

Het model van Sellmeijer is bedoeld voor horizontale grondwaterstroming in één richting. Voor de situatie onderloopsheid met een zuiver horizontale kwelweg, zoals bij een kunstwerk zonder kwelschermen, kan het model van Sellmeijer één op één worden toegepast. De kwelweglengte kan worden afgelezen van tekening of worden gemeten in het veld.

Aandachtspunten

Indien het kunstwerk op palen is gefundeerd, mag de horizontale kwelweg niet in rekening worden gebracht. De methode van Sellmeijer is dan niet van toepassing.

Overigens zal een kunstwerk dat op palen staat altijd zijn voorzien van kwelschermen.

Voorbeeld

-

5.5.2 d_{70}

Wat is het?

Diameter [m]

Zeeffmaat [m] die groter is dan de grootte van 70% van de zand- of grindkorrels van de zand- en grindfractie.

Hoe te bepalen

Voor de dieper gelegen grondlagen onder het funderingsniveau van het kunstwerk kan één op één worden aangesloten bij de waarden uit het dijkenstroom.

Voor de hoger gelegen grondlagen hangt het ervan af of sprake is van antropogene (geroerde) grond of niet. Indien sprake is van antropogene grond dan kan de d_{70} niet worden overgenomen uit het dijkenstroom. De karakteristieke waarde van de d_{70} kan middels zeven bepaald worden. Voor het aantal zeven kan geen algemene richtlijn worden gegeven.

5.5.3 *Doorlatendheid*

Wat is het?

Doorlatendheid [m/s]

De specifieke doorlatendheid, k , van een grondlaag is het debiet per seconde per 1 m^2 doorstroomd oppervlak bij een verhang van 1, gegeven in m/s (meters per seconde).

Hoe te bepalen

Voor de dieper gelegen grondlagen onder het funderingsniveau van het kunstwerk kan één op één worden aangesloten bij de waarden uit het dijkenstroom. De bepaling van de k -waarde voor piping in BOI verwijst naar een tabel met waarden voor k voor de verschillende SOS eenheden voor al de SOS segmenten van de waterkeringen. Met de gegevens over de ligging van het te beoordelen kunstwerk en de identificatie van de SOS zand eenheid onder de deklaag op die locatie kan de te gebruiken k -waarde worden vastgesteld. Hiervoor wordt verwezen naar de handleiding Piping [27].

Voor de hoger gelegen grondlagen hangt het ervan af of sprake is van antropogene (geroerde) grond of niet. Indien sprake is van antropogene grond dan kan de doorlatendheid niet worden overgenomen uit het dijkenstroom. Omdat toch al korrelverdelingen bekend moeten zijn om de d_{70} te bepalen, kan de doorlatendheid het eenvoudigst aan de hand van de korrelverdelingen worden bepaald volgens Bijlage B.8 van *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen* [23]. De doorlatendheid in de formule van Sellmeijer is de (karakteristieke bovengrens van de) gemiddelde doorlatendheid van de gehele zandlaag. Daarom is het van belang de zeven over de hoogte van de zandlaag te spreiden.

Andere methoden om de doorlatendheid te bepalen zijn in situ testen zoals pompproeven, peilbuiswaarnemingen of HTP-sonderingen. Het nauwkeurig bepalen van de doorlatendheid is niet eenvoudig. Eventueel kan een geohydroloog worden geraadpleegd.

Literatuur

- [1] *Achtergrondrapport toetsspoor hoogte kunstwerk I – Modellerings optredend overslag-/overloopdebiet (WTI 2017)*. Deltares, kenmerk 1220087-001-GEO-0004. Delft, december 2015. [[IPLo-link](#)]
+ bijlage A: review overtopping inclusief parafen [[IPLo-link](#)]
- [2] *Achtergrondrapport toetsspoor hoogte kunstwerk II – Bepaling kritiek overslag-/overloopdebiet (WTI 2017)*. Deltares, kenmerk 1220087-001-GEO-0011. Delft, december 2015. [[IPLo-link](#)]
+ bijlage A [[IPLo-link](#)] en B [[IPLo-link](#)]
- [3] *EurOtop Manual on wave overtopping of sea defences and related structures: Second edition 2018*. Van der Meer et. al., december 2018. [[link naar EurOtop website](#)]
+ bijlage A [[IPLo-link](#)] en B [[IPLo-link](#)]
- [4] *Technische Leidraad Hoogte bij kunstwerk*. [[IPLo-link](#)]
- [5] *Technische Leidraad Piping bij kunstwerk*. [[IPLo-link](#)]
- [6] *Technische Leidraad Sterkte en stabiliteit puntconstructies* [[IPLo-link](#)]
- [7] *Technische Leidraad Betrouwbaarheid sluiting kunstwerk* [[IPLo-link](#)]
- [8] *Geosynthetics and Geosystems in Hydraulic and Coastal Engineering*. K.W. Pilarczyk. Rijkswaterstaat, Delft, Balkema, Rotterdam, Netherlands, 2000. [Boek: ISBN 9789058093028, [Worldcat link](#)]
- [9] *Introduction to bed, bank and shore protection*. G.J. Schiereck en H.J. Verhagen. VSSD, Delft, 2012. [Boek: ISBN 978-90-6562-306-5, [TU Delft link](#)]
- [10] *Leidraad Kunstwerken*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. ISBN 90-369-5544-0. Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Delft, mei 2003. [[open.rws.nl link](#)]
- [11] *Ontwerp van schutsluizen*. Rijkswaterstaat, Bouwdienst, deel 1: ISBN 90-369-3305-6, deel 2: ISBN 90-369-3306-4. Utrecht, juni 2000. [[open.rws.nl link](#), januari 2000-versie]
- [12] *Scour Manual*. G.J.C.M. Hoffmans en H.J. Verheij, ISBN 90-5411-0673-5. January 1997. [[open.rws.nl link](#)]
- [13] *Toegepaste vloeistofmechanica, hydraulica voor waterbouwkundigen*. Nortier, ISBN 90-401-0318-6, 1996. [Boek, [Worldcat link](#)]
- [14] *Grondslagen voor hoogwaterbescherming*. ENW rapport, november 2017 [[open.rws.nl link](#) of [ENWinfo link](#)]

- [15] *Aanbeveling "Overloop van coupures en sluisdeuren".* A. Vrijburcht, RWS, Concept 3A. 2004 <document binnenkort op open.rws.nl>
- [16] *Werkwijzer Ontwerpen Waterkerende Kunstwerken,* RWS-WVL Waterkeringen, Groene versie, 1 november 2018 [[IPLO-link](#)]
- [17] *Hoe om te gaan met waterbezwaar als gevolg van hoge overslagdebieten?,* KPR-factsheet d.d. 15-10-2018 versie 2 [Adviesteam Dijkontwerp [link](#)]
- [18] *Toets op Maat voor stalen damwandschermen als stabiliteit-verhogende langsconstructie (WTI 2017 Kunstwerken).* Deltares rapport 1220087-005-GEO-0004. Delft, december 2015. <document binnenkort op open.rws.nl>
- [19] *Handleiding lokaal schematiseren met WTI-SOS.* G. Kruse, M. Hijma. Deltares rapport 1209432-004-GEO-0002, Delft, december 2015. [[IPLO-link](#)]
- [20] *NEN 3651:2020 Aanvullende eisen voor leidingen in kruisingen met belangrijke waterstaatswerken.* Nederlands Normalisatie Instituut. Delft.
- [21] *NEN-EN 9997-1: 2011 Eurocode 7: Geotechnisch ontwerp – Deel1: Algemene regels.* Nederlands Normalisatie Instituut. Delft.
- [22] *NPR 3659:1996 nl: Ondergrondse pijpleidingen - Grondslagen voor de sterkteberekening.* Nederlands Normalisatie Instituut, Delft.
- [23] *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen.* U. Förster, G. van den Ham, E.O.F. Calle, G.A.M. Kruse. Deltares rapport 1202123-003-GEO-0002 in opdracht van RWS Waterdienst. Delft, Maart 2012. [[open.rws.nl link](#)]
- [24] *Technisch Rapport Grondmechanisch Schematiseren bij Dijken.* Expertise Netwerk Waterveiligheid. Uitgave: Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving, oktober 2012. [[IPLO-link](#), [open.rws.nl link](#)]
- [25] *Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies, Geotechnische aspecten van dijken, dammen en boezemkaden.* Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, RWS-DWW, ISBN 90-369-3776-0, zie [www.enwinfo.nl](#). Delft, juni 2001. [[open.rws.nl link](#) + addendum]
- [26] *Technisch Rapport Zandmeevoerende wellen.* Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. RWS-DWW, Delft, maart 1999. [[IPLO-link](#)]
- [27] *Handleiding Overstromingskansanalyse Dijken/Dammen – Deel 2 piping,* [[IPLO-link](#)]

- [28] *Handreiking Ontwerpen met Overstromingskansen – Veiligheidsfactoren en Belastingen bij nieuwe Overstromingskansnormen*, versie OI2014v4, Rijkswaterstaat WVL, februari 2017. <document binnenkort op open.rws.nl>, oude link: [[Helpdesk Water link](#)]>
- [29] *Achtergrondrapport toetsspoor Betrouwbaarheid Sluiting kunstwerk III - Omgang met komberging. (WTI 2017)* - Deltares rapport 1220087-002-GEO-0010. Delft, december 2015. <document binnenkort op open.rws.nl>
- [30] *Richtlijnen Ontwerpen Kunstwerken ROK 2.0*. Rijkswaterstaat Technisch Document RTD 1001:2021, Rijkswaterstaat Dienst Grote Projecten en Onderhoud (GPO), december 2021. [[link standaarden RWS](#), [link ROK website](#)]
- [31] *Richtlijnen Vaarwegen 2020*, Rijkswaterstaat, WVL, ISBN 978-90-9033423-3. 31 juli 2020. [[link standaarden RWS](#)]
- [32] *Snelheden van schepen in voorhavens en sluizen*. Waterloopkundig Laboratorium, rapport Q1399/Q1401. Delft, maart 1992. [[open.rws.nl link](#)]
- [33] *Recommendations of the "Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways*, EAU 2012. [boek ISBN 9783433605172, [worldcat link](#)]
- [34] TNO 2017 R10788, *Kalibratie toetsvoorschrift constructief falen onder hoogwaterbelasting voor RBK-NAT*, TNO, juni 2017 [[IPLO-link](#)]
- [35] *Werkwijze bepalen kans op niet sluiten per sluitvraag met scoretabellen*, definitief v1.2, RWS rapport, A. Casteleijn, Bob van Bree, november 2017 [[IPLO-link](#)]
- [36] *Handleiding overstromingskansanalyse*, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, Rijkswaterstaat, 2022. <document binnenkort op open.rws.nl>
- [37] Handreiking Veiligheidsontwerp, <nog niet beschikbaar >
- [38] Handleiding Overstromingskansanalyse - Kunstwerken, [[IPLO-link](#)]

Bijlage A Afleiding formule voor kans op falen door niet sluiten in Riskeer

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 moet je steeds als volgt lezen:

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

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

De volgende parameters komen geregeld terug en worden hier gedefinieerd.

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

De afkorting KW staat voor 'kunstwerk'.

Algemeen toepasbare formules

In de meest algemene zin geldt:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Er ontstaat dan:

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

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

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

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

De verdere uitwerking van deze formule rond het "EN"-statement is afhankelijk van de mogelijke oorzaken van de noodzaak tot reparatie. Als de noodzaak van reparaties onafhankelijk is van het

sluiten van het kunstwerk (bijv. veroorzaakt door brand of aanrijding/aanvaring niet gesloten kunstwerk), dan kunnen we schrijven:

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

A-6

Ofwel:

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

A-7

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

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

A-8

Relatie met het BOI/Riskeer

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

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

Aanname 1 impliceert:

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

A-9

Hierin is:

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

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

Aanname 2 impliceert:

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

Aannames 1,2 en 3 impliceren:

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

Hierin is:

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

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

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

met (zie formule D-8):

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

Invullen geeft:

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

Het herschikken van termen geeft:

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

We introduceren nu de volgende term:

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

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

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

A-15

Dit is de formule die in het BOI is opgenomen in de handleiding voor *niet sluiten*.

De afleiding maakt duidelijk dat:

1. De BOI-formule berust op aannamen die niet altijd valide zijn. 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, etc.) 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 $h_{bui;toel}$. Het is eigenlijk een 'samenraapsel' van elementen uit de kans op niet-sluiten gegeven $h > h_{bui;toel}$ en de kans op de onmogelijkheid van een sluiting vanwege het in reparatie zijn van het kunstwerk gegeven $h > h_{bui;toel}$.
3. Het zal moeilijk of zelfs onmogelijk zijn om met alleen de gebruikelijke variabelen zoals P_{ns} , N_{open} en P_{open} recht te doen aan alle mogelijke situaties (dus waarbij de vier aannamen hierboven onterecht zijn). Soms zullen we dan woorden (variabelen) tekortkomen en/of trucs moeten uithalen met bijvoorbeeld P_{open} om op het juiste antwoord uit te komen.

Bijlage B Falen bij hoogfrequente waterstanden

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

Inleiding

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

Voor het bepalen van overschrijdingskansen van hoogfrequente waterstanden wordt aanbevolen om gebruik te maken van lokale waterstandsmetingen van meerdere jaren (hoe meer hoe beter) om de overschrijdingskansen van deze waterstanden inzichtelijk te maken³⁰.

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

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

Hierin is:

$P(F)_{BS}$	Faalkans <i>niet sluiten</i> per jaar
$P(H > h_{crit})$	Kans op overschrijding van kritieke buitenwaterstand per jaar vanuit tekort aan komberging en/of bezwijken bodembescherming
P_{open}	Kans dat het kunstwerk bij een naderend hoogwater geopend staat (zie §3.5.1)
n	Aantal identieke doorstroomopeningen (zie §3.5.3)
P_{ns}	Kans op niet sluiten per sluitvraag (zie §3.5.2)
$P_{f;herstel}$	Faalkans herstel van gefaalde situatie (zie §3.6.1)

Afvoergedomineerde watersystemen

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

³⁰ Met het gratis programma RMC-Bestfit van het USACE kan eenvoudig een hazard curve worden opgesteld op basis van historische reeksen en bijvoorbeeld non-exceedance thresholds (bijv. dat een bepaalde waterstand in een bepaalde periode niet is overschreden). Het is te downloaden via : <https://www.rmc.usace.army.mil/Software/> onder "Risk Calculations Suite" .

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

Getij-gedomineerde watersystemen

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

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

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

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

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

Hierin is:

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

Voor een heel jaar is de kans of falen dan:

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

Hierin is:

- m Aantal getijdeperioden per jaar

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

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

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

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

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

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

Voorbeeld getijde-gedomineerd gebied

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

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

De faalkans voor *niet sluiten* per jaar is met formule E-5 te bepalen.

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

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

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

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

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

Bijlage C Veiligheidsfilosofie constructieve veiligheid en haar historie

Algemeen

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

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

Werkwijze Hydra-Ring

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

Voor de sterktezijde (R) dient de gebruiker een constructieve sterkte op te geven. Voor de invoer van de sterkte voor zowel STCO en STCG geldt dat hier een verwachtingswaarde (R_m) ingevuld dient worden. De schematisering van R_m voor STCO wordt in paragraaf 4.3.2.3 (R_{in}) / paragraaf 4.3.2.4 (R_{kwad}) en voor STCG in paragraaf 4.4.1 (R_{in}) / paragraaf 4.4.2 (R_{kwad}) toegelicht. Hieronder wordt ter ondersteuning daarvan per tijdsperiode de achtergrond van R_m toegelicht voor STCO.

Veiligheidsfilosofie in ontwerpnormen vanaf 1990

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

Voor de sterkte geldt dat gezocht wordt naar de 5%-onderschrijdingswaarde. Deze waarde wordt dus in 5% van de gevallen bij een steekproef op sterkte onderschreden. Deze waarde wordt

gevonden door van de gemiddelde waarde 1,64 maal de spreiding af te trekken. De nu gevonden waarde wordt de karakteristieke waarde van de sterkte genoemd (R_k).

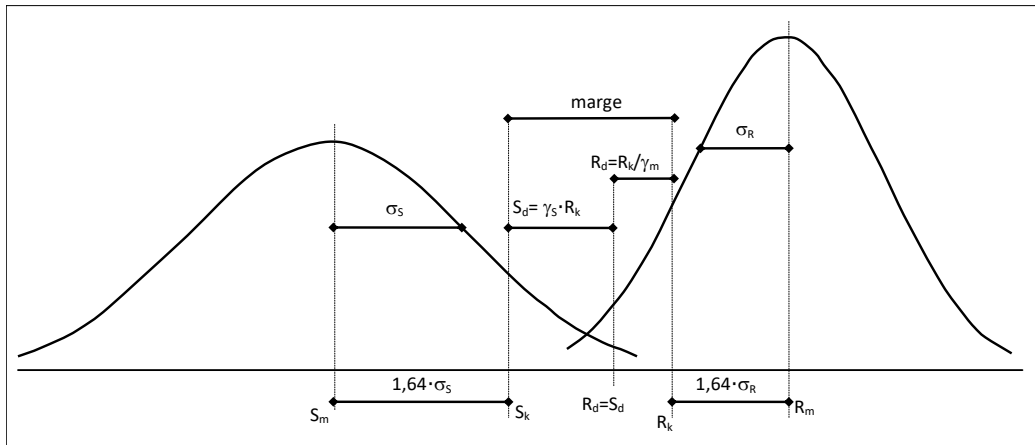
Voor het bepalen van de rekenwaarden van sterkte en belasting wordt in de Eurocodes en de TGB1990 gebruik gemaakt van partiële veiligheidsfactoren. Door de karakteristieke sterkte te delen door een materiaalfactor (γ_m) wordt de rekenwaarde van de sterkte (R_d) gevonden. Door de karakteristieke belasting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

Safety format 1990 – 2012 en 2012 - 2018:

Voor de belasting- en materiaalfactoren vanaf 1990 tot aan met 2012 wordt verwezen naar de TGB1990 en Leidraad Kunstwerken [10]. Vanaf 2012 tot aan met 2018 wordt specifiek voor waterkerende constructies verwezen naar de Eurocodes en Leidraad Kunstwerken. De TGB en Eurocodes zijn in principe geschreven voor gebouwen en in de Leidraad Kunstwerken wordt ingegaan op belastingen specifiek voor natte constructies. Vanaf 2012 is er een aanvulling op de Leidraad Kunstwerken beschikbaar ten gevolge van de komst van de Eurocodes³¹, waarin een nieuwe waarde voor de belastingfactor voor de hoogwaterbelasting wordt geïntroduceerd.

$$R_d \geq S_d$$

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



Figuur 59: Verhouding sterkte en belasting vanaf 1990

Safety format 2018 - heden:

Voor de vigerende werkwijze wordt verwezen naar de Werkwijzer Ontwerpen Waterkerende Kunstwerken (WOWK) [16] welke de Leidraad Kunstwerken in 2018 heeft vervangen. Daarmee is vanaf 2018 de belastingfactor voor specifiek de hoogwaterbelasting (verval en golven) komen te vervallen en wordt nu direct met de rekenwaarde van de hoogwaterbelasting gerekend. Er is geen karakteristieke waarde meer gedefinieerd. Voor alle overige belastingen is de werkwijze met een belastingfactor nog steeds van toepassing.

³¹ Zie ook het document "Afstemming Leidraad Kunstwerken en Eurocode, Activiteit 1: Belastingfactoren bij maatgevende waterstanden 1204875-002-GEO-0008" van Deltares. Dit document is op te vragen bij Helpdesk Water.

- Voor de Hoogwaterbelastingssituatie:

$$R_d \geq S_d$$

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

- Voor alle overige belastingen:

$$R_d \geq S_d$$

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

Veiligheidsfilosofie in ontwerpnormen 1972 – 1990 (TGB 1972)

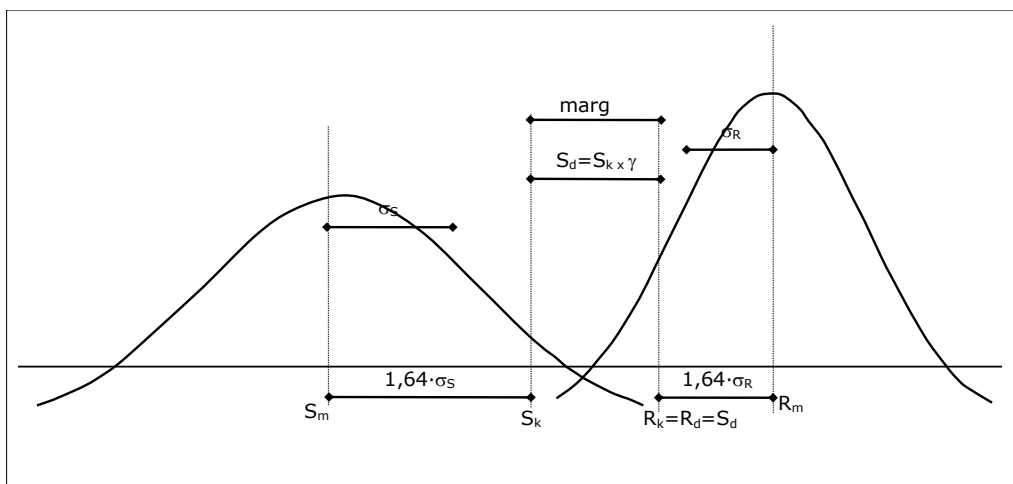
In de semi-probabilistische methode conform de ontwerpnormen vanaf 1972 tot 1990 werd ook al van zowel de sterkte als de belasting de gemiddelde waarde (R_m en S_m) en de karakteristieke waarde (R_k en S_k) bepaald. Voor het bepalen van de rekenwaarden gebruikte men daarentegen een overall veiligheidsfactor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

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

Safety format vanaf 1972 - 1990:

$$R_d \geq S_d$$

$$R_k \geq S_k \gamma$$



Figuur 60: Verhouding sterkte en belasting vanaf 1972 tot 1990

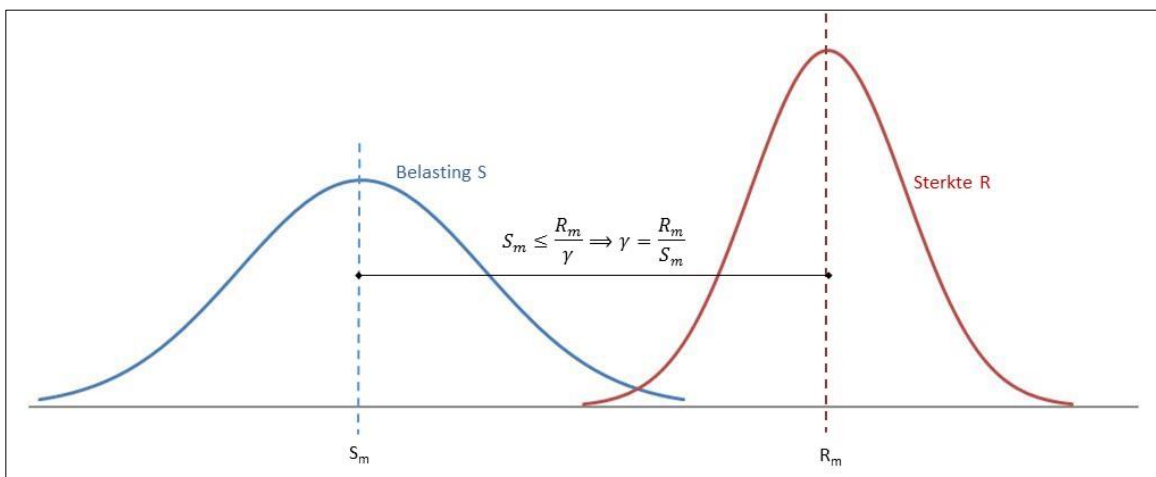
Veiligheidsfilosofie in ontwerpnormen vanaf 1955 (TGB 1955)

Voor 1972 beschouwde men in de ontwerpnormen belastingen en materiaalsterkte als deterministen. Veiligheid creëerde men door met toelaatbare materiaalspanningen (σ_a) te rekenen. Toelaatbare spanningen worden verkregen door de vloeigrens of de breuksterkte van het materiaal te delen door een veiligheidscoëfficiënt. Deze reductiefactor γ werd niet vermeld in de voorschriften, maar was impliciet opgenomen door σ_a voor te schrijven. Ten behoeve van het narekenen worden hier, waar mogelijk, de γ 's voor de verschillende materialen gegeven:

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

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

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



Figuur 61: Constructieve veiligheid TGB 1955

Bijlage D Afleiding kwelweglengte bij horizontaal short path

Analoog aan de werkwijze bij een short path bij verticale kwelwegen volgens Lane (zie ook paragraaf 5.1.2) is in paragraaf 5.1.1 het volgende criterium opgenomen om te bepalen of er sprake is van een short path bij horizontale kwelwegen:

Als de kortste afstand tussen de buitenzijde van twee kwelschermen kleiner is dan de helft van de kwelweglengte tussen beide punten, moet ervan uit worden gegaan dat stroming door de grond maatgevend wordt in plaats van de kwelweg langs de kwelschermen.

Dit betekent dat het omslagpunt ligt bij:

$$A_{\text{scherm}} = 0,5 \cdot (L_{\text{scherm1}} + L_{\text{scherm2}} + A_{\text{scherm}})$$

Hierbij is L_{scherm1} en L_{scherm2} de respectievelijke lengte van het eerste en tweede scherm uit de constructie en A_{scherm} de afstand tussen de schermen.

Bij schermen van gelijke lengte resulteert dit in een omslagpunt dat ligt bij $A_{\text{scherm}} = 2 \cdot L_{\text{scherm}}$. Invullen en herschikken van de termen levert immers:

$$\begin{aligned} A_{\text{scherm}} &= 0,5 \cdot (L_{\text{scherm}} + L_{\text{scherm}} + A_{\text{scherm}}) \\ A_{\text{scherm}} &= L_{\text{scherm}} + 0,5 \cdot A_{\text{scherm}} \\ 0,5 \cdot A_{\text{scherm}} &= L_{\text{scherm}} \\ A_{\text{scherm}} &= 2 \cdot L_{\text{scherm}} \end{aligned}$$

Als er sprake is van een short path dan kan de kwelweglengte worden bepaald door lineair te interpoleren tussen de kwelweglengte als er geen tussenruimte is tussen de schermen en de kwelweglengte als er geen sprake is van een short path als functie van de afstand tussen de schermen. Dit is in onderstaand voorbeeld gedaan voor een kunstwerk met gelijke lengte van de kwelschermen. Op analoge wijze kan de kwelweglengte bij schermen met ongelijke lengte worden bepaald.

Indien de afstand tussen de schermen 0 is dan geldt:

$$L_{h;A=0} = 2 \cdot L_{\text{scherm}}$$

Als de afstand tussen de schermen groter is dan 2x de scherm lengte dan is er geen sprake van een short path (zie hierboven). Voor de kwelweglengte geldt dan:

$$L_{h;A \geq 2L} = 4 \cdot L_{\text{scherm}} + A_{\text{scherm}}$$

Precies op de overgang tussen wel en geen short path als $A_{\text{scherm}} = 2 \cdot L_{\text{scherm}}$ geldt dan:

$$L_{h;A=2L} = 4 \cdot L_{\text{scherm}} + A_{\text{scherm}} = 4 \cdot L_{\text{scherm}} + 2 \cdot L_{\text{scherm}}$$

Als de afstand tussen de schermen tussen 0 en $2 \cdot L_{\text{scherm}}$ in zit, dan kan lineair worden geïnterpoleerd tussen deze beide kwelweglengten als functie van de afstand tussen de schermen:

$$L_{h;0 < A < 2L} = L_{h;A=0} + \frac{A_{\text{scherm}}}{2 \cdot L_{\text{scherm}}} \cdot (L_{h;A=2L} - L_{h;A=0})$$

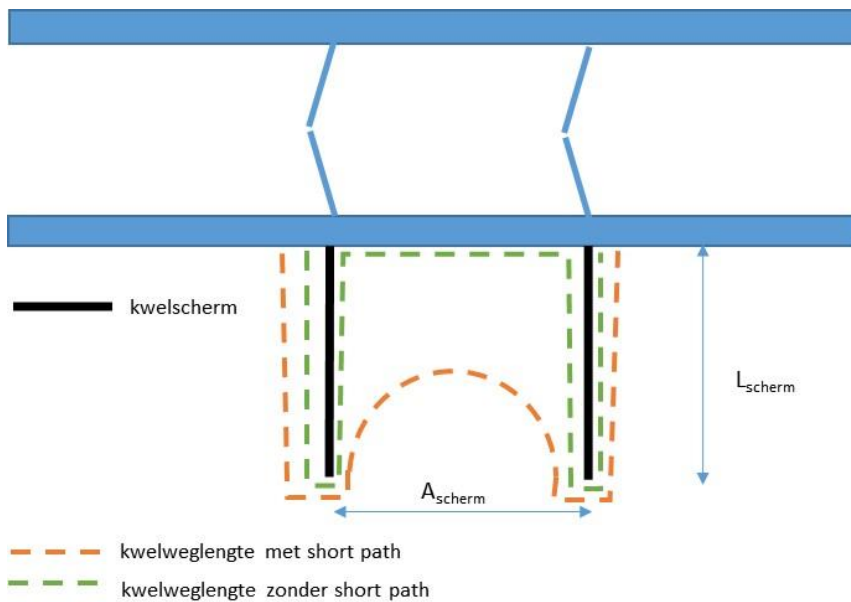
Invullen levert:

$$\begin{aligned} L_{h;0 < A < 2L} &= 2 \cdot L_{\text{scherm}} + \frac{A_{\text{scherm}}}{2 \cdot L_{\text{scherm}}} \cdot (4 \cdot L_{\text{scherm}} + 2 \cdot L_{\text{scherm}} - 2 \cdot L_{\text{scherm}}) \\ &= 2 \cdot L_{\text{scherm}} + \frac{A_{\text{scherm}} \cdot 4 \cdot L_{\text{scherm}}}{2 \cdot L_{\text{scherm}}} \\ &= 2 \cdot L_{\text{scherm}} + 2 \cdot A_{\text{scherm}} \end{aligned}$$

Bij schermen met gelijke lengte geldt dus bij een short path:

$$L_h = 2 (L_{\text{scherm}} + A_{\text{scherm}})$$

Zie ook navolgende figuur voor de afleiding.



Als $A_{\text{scherm}} = 0$:	$L_h = 2 \cdot L_{\text{scherm}}$
Als $A_{\text{scherm}} > 2 \cdot L_{\text{scherm}}$	$L_h = 4 \cdot L_{\text{scherm}} + A_{\text{scherm}}$
Als $0 < A_{\text{scherm}} < 2 \cdot L_{\text{scherm}}$:	$L_h = 2 \cdot L_{\text{scherm}} + \frac{A_{\text{scherm}}}{2 \cdot L_{\text{scherm}}} \cdot (4 \cdot L_{\text{scherm}} + 2 \cdot L_{\text{scherm}} - 2 \cdot L_{\text{scherm}})$ $= 2 \cdot L_{\text{scherm}} + \frac{A_{\text{scherm}} \cdot 4 \cdot L_{\text{scherm}}}{2 \cdot L_{\text{scherm}}}$ $= 2 \cdot L_{\text{scherm}} + 2 \cdot A_{\text{scherm}}$

Figuur 62: Afleiding kwelweglengte bij short path bij gelijke scherm lengte

Ter illustratie met de getallen uit het voorbeeld in paragraaf 5.1.1, waar $L_{\text{scherm}} = 4$ m en $A_{\text{scherm}} = 3$ m:

- als de schermen tegen elkaar aan staan dan is de kwelweglengte om de schermen heen $2 \times$ de scherm lengte, in dit voorbeeld dus $2 \times 4 = 8$ m.
- als de schermen 8 m uit elkaar staan, dan is er juist geen sprake meer van een short path en is de kwelweglengte $2 \times 4 + 8 + 2 \times 4 = 24$ m.
- als de schermen 3 m uit elkaar staan dan kan lineair worden geïnterpoleerd tussen de kwelweglengte van 8 m (als de schermen tegen elkaar aan zouden staan) en de kwelweglengte van 24 m (als de schermen 8 m uit elkaar zouden staan). In dit voorbeeld is de kwelweglengte dan $8 + \frac{3}{8} \times (24-8) = 8 + 6 = 14$ m. Merk op dat dit neerkomt op $2(L_{\text{scherm}} + A_{\text{scherm}})$.



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

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

BOI



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Deltares