



Ministerie van Infrastructuur en Milieu

## **Schematiseringshandleiding sterkte en stabiliteit kunstwerk**

WBI 2017

|        |                |
|--------|----------------|
| Datum  | 2 januari 2017 |
| Status | Definitief     |



## Colofon

|                 |  |
|-----------------|--|
| Uitgegeven door | Ministerie van Infrastructuur en Milieu  |
| Informatie      | Helpdesk Water, <a href="http://www.helpdeskwater.nl">www.helpdeskwater.nl</a> |
| Contact         | <a href="mailto:helpdeskwater@rws.nl">helpdeskwater@rws.nl</a>                 |
| Uitgevoerd door | Rijkswaterstaat, Water Verkeer en Leefomgeving                                 |
| Datum           | 2 januari 2017   |
| Status          | Definitief   |
| Versienummer    | 1.0  |



# Inhoud

## **Schematiseringshandleidingen en WBI 9**

### **1. Inleiding Schematiseringshandleiding sterkte en stabiliteit kunstwerk 13**

- 1.1 Uitgangspunten 13
- 1.2 Opbouw 13

### **2. Stappenschema 15**

- 2.1 Eenvoudige toets 16
- 2.2 Gedetailleerde toets 16
- 2.3 Toets op maat 18

### **3. Belastinggevallen en hydraulische belasting 19**

- 3.1 Hydraulische belastingen 19
- 3.2 Binnenwaterstanden 19
- 3.3 Windbelastingen 19
- 3.4 IJsbelasting 20
- 3.5 Grond- en grondwaterbelastingen 20
- 3.6 Veranderlijke belastingen 20
- 3.7 Aanvaarbelastingen 20
- 3.8 Bijzondere belastingen 21

### **4. Inventarisatie beschikbare gegevens 22**

- 4.1 Geometrie 22
- 4.2 Materialen 22
- 4.3 Grondgegevens 22
- 4.4 Praktijkgegevens 23
  - 4.4.1 Veldbezoek 23
  - 4.4.2 Ervaringsgegevens werking van het kunstwerk 23
  - 4.4.3 Inspectiegegevens 24
  - 4.4.4 Beheer en onderhoudsgegevens 24

### **5. Schematisering 28**

- 5.1 Bezwijken constructieonderdelen (STCO) 28
  - 5.1.1 Afweging welke mechanismen/onderdelen beschouwd moeten worden 29
  - 5.1.2 Schematisering van de sterkte van constructieonderdelen 31
  - 5.1.3 Gegevens van de constructie 32
  - 5.1.4 Gegevens actuele conditie en beheer en onderhoud 32
  - 5.1.5 Van grof naar fijn 33
  - 5.1.6 Bepalen dominante element 33
  - 5.1.7 Overige sterkten 33
- 5.2 Bezwijken door aanvaren 34
  - 5.2.1 Afweging of aanvaren beoordeeld moet worden 34
  - 5.2.2 Schematisering kans van aanvaren 37
  - 5.2.3 Schematisering van de opneembare energie van het keermiddel 37
  - 5.2.4 Schematisering van de kans op herstel van de sluiting 38
- 5.3 Bezwijken door instabiliteit constructie en grondlichaam 38
  - 5.3.1 Afweging welke mechanismen/onderdelen beoordeeld moeten worden 38
  - 5.3.2 Schematisering van de stabiliteit 40
  - 5.3.3 Gegevens van de constructie 41
  - 5.3.4 Gegevens actuele conditie 41
  - 5.3.5 Overige sterkten 42

|           |  |
|-----------|--|
| <b>6.</b> | <b>Overzicht parameters per deelfaalmechanisme 45</b>  |
| 6.1       | Deelfaalmechanisme Z411 Bezwijken constructieonderdelen door vervalbelasting (STCO) 48           |
| 6.1.1     | Parameters voor het model van Goda 48  |
| 6.1.1.1   | Bermbreedte 50   |
| 6.1.1.2   | Hoogte bovenkant constructie 50  |
| 6.1.1.3   | Bermhoogte 50  |
| 6.1.1.4   | Aantal golven per stormgebeurtenis 51  |
| 6.1.1.5   | Modificatiefactor voor de geometrie van de constructie 51  |
| 6.1.1.6   | Modificatiefactor voor de aard van de constructie 52   |
| 6.1.1.7   | Oriëntatie van de normaal van de constructie 52  |
| 6.1.2     | Parameters voor bezwijkfunctie 53  |
| 6.1.2.1   | Modelfactor belastingeffect 53   |
| 6.1.2.2   | Evaluatiehoogte 54   |
| 6.1.2.3   | Sterkteterm lineair belastingmodel 57  |
| 6.1.2.4   | Sterkteterm kwadratisch belastingmodel 65  |
| 6.1.2.5   | Binnenwaterstand constructief falen 66   |
| 6.2       | Deelfaalmechanisme Z <sub>43</sub> Instabiliteit constructie en grondlichaam (STCG) 67           |
| 6.2.1     | Sterkteterm stabiliteitsverlies lineair belastingmodel 68  |
| 6.2.2     | Sterkteterm stabiliteitsverlies kwadratisch belastingmodel 69                                    |
| 6.3       | Deelfaalmechanisme Z <sub>422</sub> Kans op aanvaring tweede keermiddel 69                       |
| 6.3.1     | Aantal nivelleringsen per jaar 70  |
| 6.3.2     | Kans op aanvaring 2de keermiddel per nivellering 72  |
| 6.4       | Deelfaalmechanisme Z <sub>421</sub> Aanvaarenergie groter dan kritieke waarde 73                 |
| 6.4.1     | Kritieke aanvaarenergie waarbij keermiddel bezwijkt 73   |
| 6.4.2     | Massa van het schip 75   |
| 6.4.3     | Modelfactor voor de aanvaarbelasting 77  |
| 6.4.4     | Aanvaarsnelheid 77   |
| 6.5       | Deelfaalmechanisme Z423 Kans op falen van het herstel van een fatale aanvaring 79                |
| 6.5.1     | Kritieke stroomsnelheid sluiting eerste deur 81  |
| 6.5.2     | Binnenwaterstand 82  |
| 6.6       | Deelfaalmechanisme Z21 Onvoldoende bergend vermogen (STCO, aanvaren) 82                          |
| 6.6.1     | Modelfactor kombergend vermogen 83   |
| 6.6.2     | Kombergend oppervlak 84  |
| 6.6.3     | Kritieke peilverhoging komberging 86   |
| 6.6.4     | Modelfactor instromend volume 88   |
| 6.6.5     | Factor voor stormduur hoogwater gegeven geopend kunstwerk 88                                     |
| 6.6.6     | Stormduur 89   |
| 6.6.7     | Instromend debiet door kunstwerk gegeven geopend kunstwerk 90                                    |
| 6.6.7.1   | Breedte van doorstroomopening(en) 91   |
| 6.6.7.1.  | Modelfactor overloopdebet volkomen overlaat 92   |
| 6.6.7.2   | Modelfactor voor onvolkomen stroming 93  |
| 6.6.7.3   | Binnenwaterstand 93  |
| 6.6.7.4   | Drempelhoogte niet gesloten kering 94  |
| 6.6.7.5   | Afvoercoëfficiënt verdronken koker 95  |
| 6.6.7.5.  | Doorstroomoppervlak van doorstroomopening(en) 96   |
| 6.7       | Deelfaalmechanisme Z <sub>22</sub> Falen bodembescherming achter constructie (STCO, aanvaren) 96 |
| 6.7.1     | Kritiek instromend debiet 97   |
| 6.7.2     | Stroomvoerende breedte 100   |
| 6.8       | Deelfaalmechanisme Z12 Bezwijken kunstwerk a.g.v. erosie bodem (STCO, aanvaren) 102              |
| 6.8.1     | Faalkans kunstwerk gegeven bezwijken bodembescherming en optreden van erosie bodem 102           |
| 6.9       | Deelfaalmechanisme Z412 Falen herstel sluiting na bezwijken keermiddel (STCO) 105                |
| 6.9.1     | Faalkans herstel waterkering van gefaalde situatie 106   |

|           |  |
|-----------|--|
| <b>7.</b> | <b>Voorbeeld 109</b>   |
| <b>A</b>  | <b>Literatuur 111</b>  |
| <b>B</b>  | <b>Begrippen en afkortingen 113</b>  |
| <b>C</b>  | <b>Veiligheidsfilosofie constructieve veiligheid en haar historie 115</b>                            |
| <b>D</b>  | <b>Schema werkwijze beoordeling sterkte en stabiliteit kunstwerken 119</b>                           |
| D.1       | Toelichting op het schema werkwijze beoordeling 119  |
| D.2       | Schema werkwijze beoordeling Sterkte en stabiliteit puntconstructies (STKWp) 120                     |
| D.3       | Referenties bij het schema werkwijze beoordeling Sterkte en stabiliteit puntconstructies (STKWp) 120 |



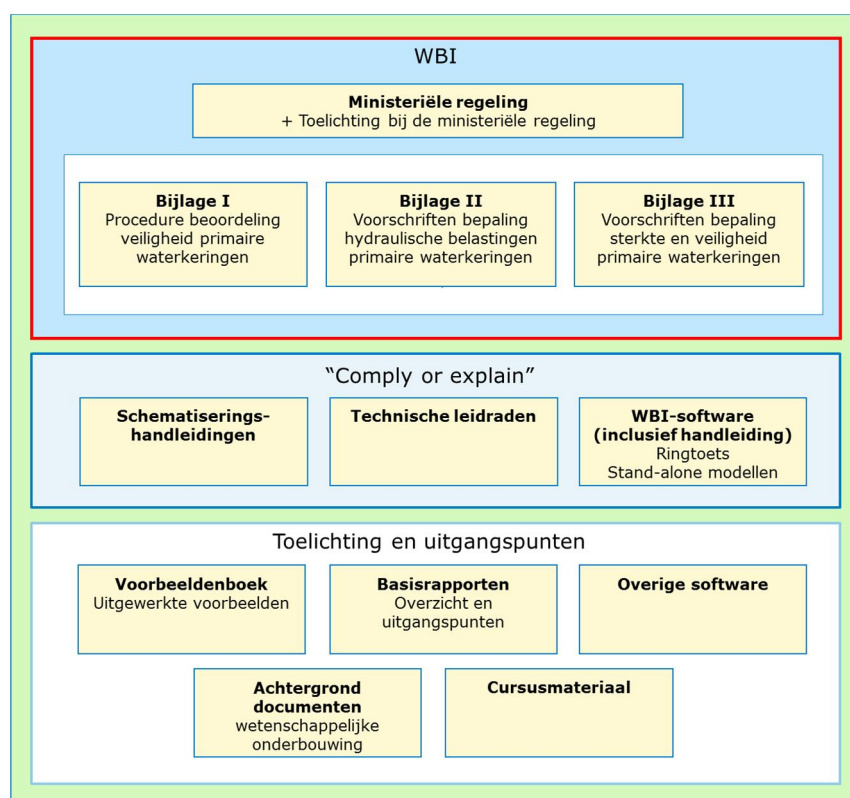


## Schematiseringshandleidingen en WBI

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

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

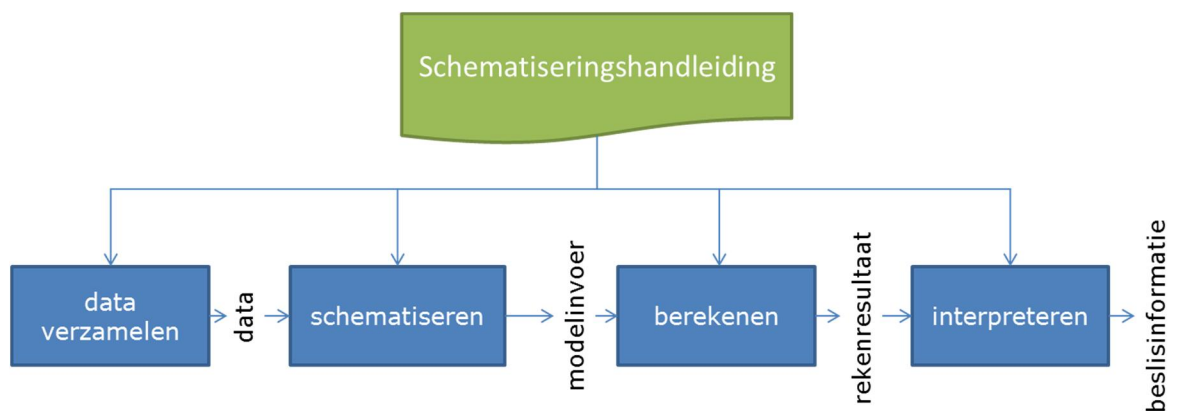
Het WBI bevat de voorschriften voor het uitvoeren van de beoordeling. In deze voorschriften wordt verwezen naar een aantal documenten en applicaties die de beheerder moet gebruiken bij het uitvoeren van de beoordeling, waaronder de schematiseringshandleidingen en de WBI software. Een overzicht van de structuur van het WBI en de daaraan gerelateerde documenten staat in Figuur 1.



Figuur 1 Het WBI 2017 en daaraan gerelateerde documenten

### Doel

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



Figuur 2 Activiteiten verbonden met een toets (zie ook bijlage D schema werkwijze beoordeling sterkte en stabiliteit kunstwerken)

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

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

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

*Deze handleiding is specifiek opgesteld voor het beoordelen van primaire waterkeringen en kan daarom niet zomaar worden toegepast voor andere doeleinden (regionale keringen, ontwerp, et cetera). Onderdelen van de schematiseringshandleiding zijn mogelijk wel toepasbaar voor andere doeleinden, maar op punten zal deze handleiding niet van toepassing of onvolledig zijn.*

### ***Uitgangspunten***

Voor alle schematiseringshandleidingen gelden de volgende uitgangspunten:

- Voor de gegevens die in het rekenmodel voor het toetsspoor worden ingevoerd wordt een format voorgeschreven. Het format sluit aan bij de Aquo standaard. Verdere informatie hierover is te vinden in de Handleiding datamanagement WBI [5].
- Deze schematiseringshandleiding ondersteunt gebruikers in het omzetten van (veld)gegevens naar de juiste rekenparameters en goede schematiseringen die in de beoordelingsmethoden kunnen worden toegepast.
- Deze schematiseringshandleiding geeft tevens aanwijzingen voor default waarden die voor parameters aangehouden kunnen worden als meetgegevens niet aanwezig zijn.

***Doelgroep***

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



## 1. Inleiding Schematiseringshandleiding sterkte en stabiliteit kunstwerk

### 1.1 Uitgangspunten

Voor deze schematiseringshandleiding gelden de volgende uitgangspunten:

- Deze schematiseringshandleiding heeft uitsluitend betrekking op zogenaamde puntconstructies zoals sluizen, gemalen, coupures en dergelijke. Zij heeft geen betrekking op langsconstructies (zoals damwanden en kade muren). Hiervoor wordt verwezen naar [14].
- Deze schematiseringshandleiding heeft betrekking op het faalmechanisme bezwijken constructieonderdelen en het faalmechanisme instabiliteit constructie en grondlichaam. Beide faalmechanismen vallen onder het toetsspoor sterkte en stabiliteit.
- Beide faalmechanismen worden in het toetsinstrumentarium middels een sterk vereenvoudigde grenstoestandsfunctie beschreven. Hierbij is het slechts mogelijk om één onderdeel van de constructie in te voeren in plaats van de gehele constructie. Het vaststellen van de sterkte van dit dominante onderdeel wordt niet ondersteund door software.
- In dit document wordt onder ander gesproken over de sterkte van bodembeschermingen. Onder deze term vallen ook aansluit- en overgangsconstructies van bodembeschermingen. Alhoewel hiervoor geen specifieke sterktemodellen voor handen zijn, dienen deze constructies kwalitatief te worden meegenomen in de beschouwingen voor zover dit mogelijk is. Dit betekent dat bij indicaties van slechte aansluitingen (bijvoorbeeld uit inspecties) de sterkte van de bodembescherming gereduceerd moet worden.
- Voor de faalmechanismen bezwijken constructieonderdelen en instabiliteit constructie en grondlichaam zijn een drietal toetsstappen voorzien in het WBI2017. Naast de eenvoudige toets en de toets op maat is dit de gedetailleerde probabilistische toets op vakniveau. Een gedetailleerde semi-probabilistische toets op vakniveau is voor dit faalmechanisme niet beschikbaar.

### 1.2 Opbouw

De opbouw van deze handleiding is als volgt:

| Onderwerp                                   | Locatie     |
|---|-------------|
| Stappenschema                               | Hoofdstuk 2 |
| Belastinggevallen en hydraulische belasting | Hoofdstuk 3 |
| Inventarisatie beschikbare gegevens         | Hoofdstuk 4 |
| Vakindeling                                 | Hoofdstuk 5 |
| Schematisering                              | Hoofdstuk 6 |
| Overzicht parameters per deelfaalmechanisme | Hoofdstuk 7 |

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

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

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

Voorbeelden zijn niet in een apart hoofdstuk opgenomen, maar worden gegeven bij de behandeling van de verschillende parameters (hoofdstuk 7).

## 2. Stappenschema

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

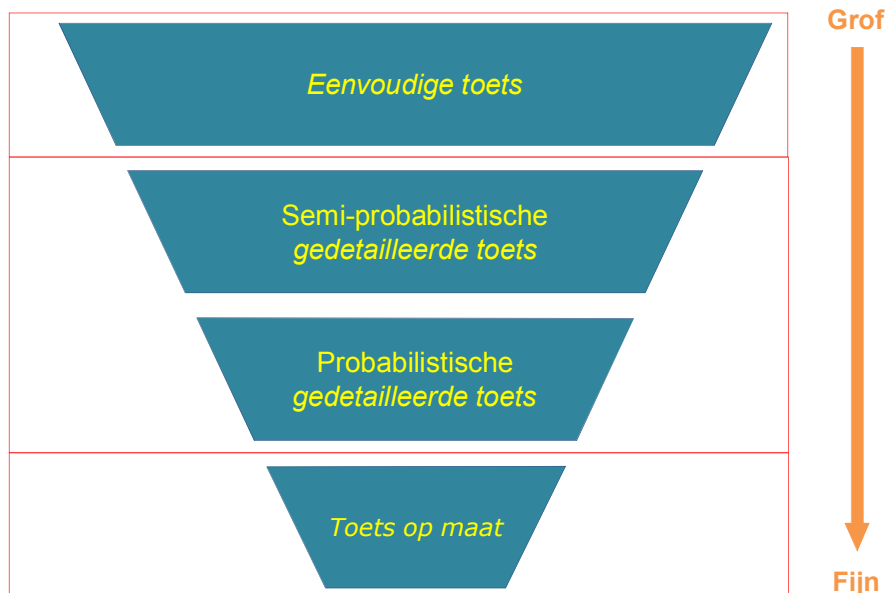
Uitgangspunt voor het toetsproces is dat van grof naar fijn, wordt gewerkt. Onzekerheden worden steeds nauwkeuriger meegenomen waardoor een steeds scherper beeld van het overstromingsrisico wordt verkregen.

Voor de toetsing van *sterkte en stabiliteit* geldt dat er in principe vele onderdelen en situaties bekeken kunnen worden. Belangrijk is dan ook om in de pre-processing goede keuzes te maken ten aanzien van de te beschouwen situaties en onderdelen. Hiermee kan de inspanning aanzienlijk worden beperkt. In paragraaf 6.1.1 wordt hier nader op ingegaan.

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

De toetsing is opgebouwd uit:

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



Figuur 2-1 De diverse toetsen in de toetsprocedure

Globaal genomen vraagt elke volgende toetslaag een grotere inspanning, maar dit is niet altijd het geval. Gegevens voor de ene toets kunnen ook input zijn voor de volgende toets, alleen worden ze dan bijvoorbeeld voor een ander model gebruikt. Voor *sterkte en stabiliteit kunstwerken* geldt dat de gedetailleerde toets probabilistisch is uitgewerkt.

De toetsschema's voor de *eenvoudige* en de *gedetailleerde toets* zijn gegeven in *WBI 2017 Bijlage III Sterkte en veiligheid*.

## 2.1

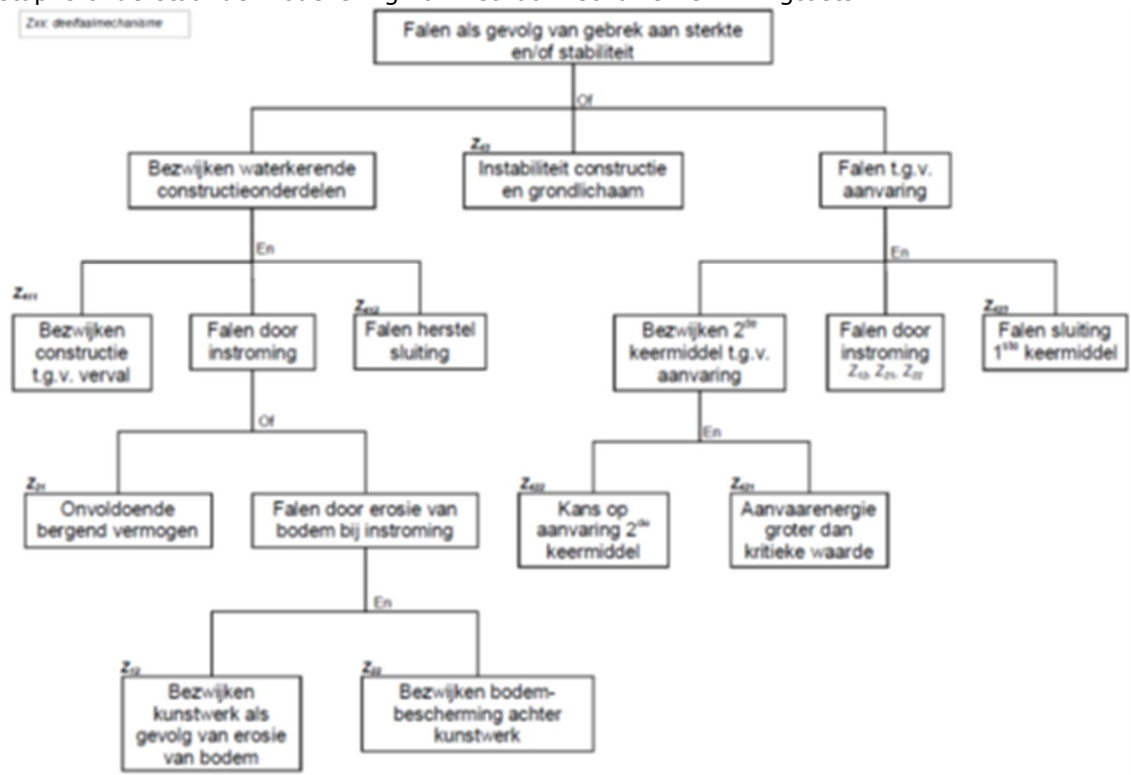
### Eenvoudige toets

Voor het toetsspoor *sterkte en stabiliteit kunstwerk* (puntconstructies) is geen *eenvoudige* toets beschikbaar, wel een in paragraaf 2.2 beschreven *gedetailleerde toets*.

## 2.2

### Gedetailleerde toets

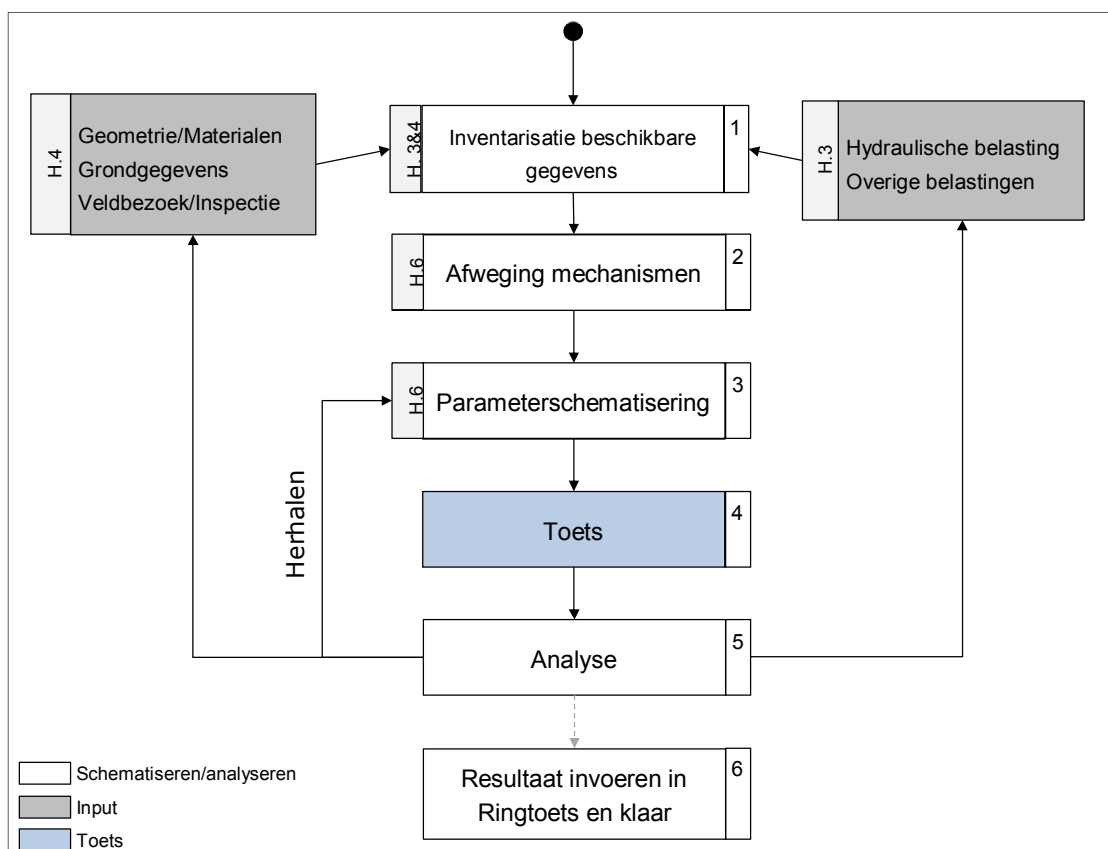
De gedetailleerde toets bestaat uit een probabilistische toets, die met Ringtoets uitgevoerd wordt. Hierbij wordt voor een kunstwerk een faalkans voor sterkte en stabiliteit berekend, die wordt vergeleken met de faalkanseis voor sterkte en stabiliteit kunstwerken. Basis voor deze stap is onderstaande modellering van het faalmechanisme in Ringtoets.



Figuur 2-2 Modellering toetsspoor sterkte en stabiliteit kunstwerk ten behoeve van deelsporen STCO en STCG

In het volgende schema is het stappenschema weergegeven voor het uitvoeren van de *gedetailleerde toets*.





Figuur 2-3 Stappenschema *gedetailleerde toets* voor sterkte en stabiliteit bij kunstwerken

In het schema van Figuur 2-3 is weergegeven met welke globale (schematiserings) stappen er gekomen kan worden van data naar beoordeling. De diverse onderdelen van dit schema worden in komende hoofdstukken behandeld. Onderstaand zijn de verschillende stappen kort beschreven.

**Stap 1. Inventarisatie van beschikbare gegevens.**

Dit betreft zowel constructiegegevens als relevante belastinggegevens. Ook gegevens uit de praktijk (geconstateerde globale conditie of schadebeelden) en inspectiegegevens (gedetailleerde schadebeelden) zijn van belang. Ook kan gebruik worden gemaakt van gegevens die bij (groot) onderhoud naar voren zijn gekomen.

**Stap 2. Afweging van mechanismen.**

Binnen het toetsspoor *sterkte en stabiliteit kunstwerken* zijn meerdere deelttoetssporen<sup>1</sup> van belang en daarbinnen zijn ook weer meerdere faalwijzen mogelijk. Zo geldt dat bij *instabiliteit constructie en grondlichaam* gekeken kan worden naar horizontale, verticale en kantelstabiliteit. Vaak is het heel goed mogelijk om voordat met rekenen begonnen wordt een afweging te maken welke faalwijzen kunnen bijdragen aan de faalkans. Deze afweging wordt gemaakt met het doel de toetsinspanning te beperken.

**Stap 3. Parameterschematisering.**

Dit betreft het schematiseren van de relevante faalmechanismen en daarbinnen de gekozen faalwijze(n). De schematisering leidt tot parameters die in het toetsinstrumentarium kunnen worden ingevuld.

**Stap 4. Beoordeling.**

Hier wordt de feitelijke beoordeling uitgevoerd met behulp van het

<sup>1</sup> *Bezwijken constructieonderdelen (STCO (met daarbinnen ook aanvaren)), en instabiliteit constructie en grondlichaam (STCG)*

toetsinstrumentarium. Aangezien er in het toetsinstrumentarium per som 'slechts' één faalwijze per faalmechanisme kan worden ingevuld, betekent dit dat er wellicht meerdere sommen moeten worden gemaakt. In het stappenschema in Figuur 2-3 is dit aangeduid door het pijltje met daarbij 'herhalen' geschreven. Aan de hand van de resultaten kan uiteindelijk de faalwijze met de grootste kans per faalmechanisme worden aangehouden als definitief resultaat.

Stap 5. Analyse.

Hier worden de berekeningsresultaten geanalyseerd. Indien de beoordeling 'onvoldoende' is, kan worden gekeken of er door het inwinnen van meer gegevens tot een 'voldoende' kan worden gekomen<sup>2</sup>.

Stap 6. Registratie beoordelingsresultaat.

Het uiteindelijke berekeningsresultaat wordt vastgelegd in Ringtoets.

Het vaststellen van de faalwijze(n) met de grootste faalkans kan een iteratief proces zijn. Teneinde dit iteratieve proces zoveel mogelijk te beperken, is het van belang op voorhand een goede keuze te maken van niet substantieel bijdragende faalwijzen. Daarnaast kan de toetsinspanning ook worden beperkt door te starten met een eenvoudige schematisering die rekening houdt met grote onzekerheden (in praktijk meestal conservatieve schematisering) van de te beschouwen faalwijzen. Indien met een dergelijke schematisering al aan de eisen wordt voldaan, kan een grotere inspanning achterwege worden gelaten. Voldoet een eerste grove schematisering van een faalwijze niet aan de faalkanseis dan kan een gedetailleerdere analyse worden uitgevoerd. Hierbij dient men zich bewust te zijn van het feit dat na deze gedetailleerde analyse een andere reeds eerder geanalyseerde faalwijze een grotere faalkans kan hebben en uiteindelijk in het instrumentarium moet worden ingevoerd.

Voor kunstwerken is er, in tegenstelling tot alle toetssporen betreffende dijken en duinen, geen aandacht in deze schematiseringshandleiding voor de vakindeling. Die is niet van toepassing bij het schematiseren van kunstwerken; ieder kunstwerk wordt (binnen Ringtoets) als apart vak gedefinieerd. Samengestelde kunstwerkcomplexen (bijvoorbeeld sluizencomplexen) worden hierbij ontleed, waarbij ieder kunstwerk waar mogelijk apart beoordeeld wordt. De samenhang tussen de onderdelen (bijvoorbeeld een gedeeld kwelscherm) dient hierbij niet uit het oog te worden verloren.

## 2.3

### **Toets op maat**

De *toets op maat* is niet in deze schematiseringshandleiding opgenomen. Daarvoor wordt verwezen naar het Toetsspoor rapport Sterkte en stabiliteit puntconstructies [15].

---

<sup>2</sup> Wanneer de gedetailleerde toets wordt uitbesteed is het verstandig om de verwachte inspanning nader te definiëren.

### 3. Belastinggevallen en hydraulische belasting

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de belastingen die een rol kunnen spelen bij het toetsen van de *sterkte en stabiliteit kunstwerken*. Het definiëren van algemeen toepasbare belastinggevallen (gelijk voor elke constructie) is niet mogelijk, als gevolg van de unieke situatie per object. Wel kan worden aangegeven welke belastingen meegenomen moeten worden en welke afwegingen een rol spelen bij het schematiseren van deze belastingen. Voor zover relevant worden bij de beschrijving van de parameters (schematisering) in hoofdstuk 7 hier meer handvatten aan gegeven.

Een belangrijk uitgangspunt dat wordt gehanteerd binnen het WBI2017 is dat onderhoudssituaties bij kunstwerken niet beoordeeld hoeven te worden. Dit is gestoeld op het feit dat in geval van onderhoudssituaties altijd apart bekeken wordt in hoeverre de waterkerende functie gewaarborgd is tijdens het onderhoud. Dit is feitelijk een ontwerpuitgangspunt van de onderhoudssituatie, wat moet worden beoordeeld op het moment dat onderhoud uitgevoerd gaat worden<sup>3</sup>.

Het tweede belangrijke uitgangspunt is dat bezwijken van onderdelen van de constructie als gevolg van vallend water na een hoogwater alleen wordt meegenomen in de toetsing als wordt ingeschat dat bezwijken van dit element kan leiden tot falen van het kunstwerk als geheel als er kort daarna een volgend hoogwater optreedt. Bij bijvoorbeeld vleugelwanden kan het zijn dat door vallend water de naar buiten gerichte belasting tijdelijk dusdanig hoog is dat dit element daardoor sterk vervormt of bezwijkt. Het is echter onwaarschijnlijk dat het bezwijken van een vleugelwand direct tot een dusdanige reductie van de sterkte zal leiden, dat bij een volgend hoogwater bresvorming optreedt. Hiervoor dient een adequate inschatting te worden gemaakt.

#### 3.1 Hydraulische belastingen

In de Wet is de veiligheidsnorm voor primaire waterkeringen per dijktraject vastgelegd als een maximaal toelaatbare overstromingskans per jaar. Voor het berekenen van de daadwerkelijke overstromingskansen van dijktrajecten en daarmee ook kunstwerken, zijn gegevens nodig omtrent de duur en hoogte van waterstanden en de hoogte en richting van golven in diverse omstandigheden. Deze gegevens staan bekend als de Hydraulische belastingen (HB)<sup>4</sup>. In het instrumentarium van het WBI 2017 zijn de hydraulische belastingen opgenomen, zodat met behulp van dit instrumentarium overstromingskansen kunnen worden bepaald.

#### 3.2 Binnenwaterstanden

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

#### 3.3 Windbelastingen

Door wind kunnen aanvullende belastingen worden uitgeoefend. De invloed hiervan tijdens een hoogwater is meestal zeer beperkt. Deels doet de wind al indirect mee middels de golfbelastingen en opzet van de waterstand. Daarnaast geldt dat bij maatgevende waterstanden er doorgaans nog maar een relatief klein deel van de constructie zich boven water bevindt, dat kan worden belast door windbelasting. Vooralsnog wordt er dan ook geen rekening gehouden met deze belasting bij de toetsing van de kunstwerken.

<sup>3</sup> Opgemerkt dat de belastingen bij een voorgekomen onderhoudssituatie in bepaalde gevallen informatie in de vorm van bewezen sterkte kunnen opleveren (veiligheid bij extreme omstandigheden).

<sup>4</sup> Het gaat hierbij om de waterstanden op het buitenwater, dus aan de buitenzijde van de primaire waterkering.

3.4

### IJsbelasting

Ijsbelasting op waterkeringen kan een rol spelen op het moment dat een dergelijke ijsbelasting in combinatie met een bepaalde waterstand dominant is voor het falen van de kering. Over het algemeen wordt aangenomen dat ijsbelasting in combinatie met maatgevende hoogwaterstanden niet optreedt. Ijsbelasting wordt in het WBI 2017 daarom niet beschouwd.

3.5

### Grond- en grondwaterbelastingen

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

3.6

### Veranderlijke belastingen

Er zijn meerdere veranderlijke belastingen die bij kunstwerken en rol kunnen spelen. In de meeste gevallen gaat het dan om dagelijkse situaties. Aanvullende veranderlijke belastingen spelen onder maatgevende omstandigheden nauwelijks een rol, omdat ze dan niet aanwezig zijn. Dit wordt in Tabel 3-1 nader beschreven.

Tabel 3-1 Overwegingen betrekken veranderlijke belastingen bij de toetsing

| Veranderlijke belasting | Overwegingen  |
|-------------------------|---|
| Stroming                | Dit gaat om stromingen als gevolg van overloop/overslag of het ongewild open staan van een kunstwerk (bijvoorbeeld als gevolg van niet sluiten, maar ook als gevolg van bezwijken van constructieonderdelen). Deze stromingen worden specifiek in het instrumentarium beschouwd.  |
| Scheepsgolven           | Scheepsgolven zijn relatief kortdurend en leveren naar verwachting geen dominante belastingen op tijdens een hoogwater. Daarnaast speelt dat onder maatgevende omstandigheden er geen of zeer beperkt scheepvaart plaatsvindt.  |
| Scheepsstroming         | Stromingen als gevolg van schepen worden bij de toetsing in het kader van waterkeren niet beschouwd, omdat er onder maatgevende omstandigheden nauwelijks sprake is van scheepvaart. Voor normale bedrijfssituaties kunnen deze belastingen een grote rol spelen.   |
| Troskrachten            | Troskrachten zijn niet relevant onder maatgevende omstandigheden, omdat kunstwerken (en met name sluizen) onder maatgevende omstandigheden gesloten zijn.   |
| Temperatuur             | Temperatuurbelastingen hoeven niet te worden beschouwd, omdat onder maatgevende omstandigheden geen extreme temperaturen (zowel hoog als laag) te verwachten zijn.  |
| Verkeersbelasting       | Verkeersbelastingen zijn alleen relevant voor zover ze aanwezig kunnen zijn onder hoogwateromstandigheden en de kritieke vervalbelasting kunnen beïnvloeden. Uitgangspunt hiervan is dat alle voorkomende verkeersbelastingen onder normale omstandigheden afgedekt zijn in het ontwerp en dat hier daarom niet in de beoordeling van dit toetsspoor meegenomen hoeft te worden. Feitelijk behoort dit tot het beheer en onderhoud van de kering. |

3.7

### Aanvaarbelastingen

Specifiek voor schutsluizen en keersluizen kan het aanvaren van een keermiddel leiden tot grote gevolgen. Voor schutsluizen kan dit optreden onder dagelijkse omstandigheden en dus onafhankelijk van het optreden van hoogwater. Voor keersluizen geldt dat een eventuele aanvaring van het gesloten keermiddel met name van belang is bij hoogwaters<sup>5</sup>.

<sup>5</sup> Sommige keersluizen zoals die aanwezig zijn bij recreatiehavens zijn standaard gedurende de winterperiode gesloten. Theoretisch gezien is dan dus ook bij dagelijkse omstandigheden aanvaren mogelijk. In de praktijk is deze kans verwaarloosbaar klein, omdat in het winterseizoen nauwelijks recreatievaart aanwezig is.

Aanvaren betreft een apart deelfaalmechanisme in het WBI 2017 (onderdeel van het faalmechanisme *bezwijken constructieonderdelen*). Aanvaarbelastingen zijn met name afhankelijk van het type scheepvaart, tonnage en vaarsnelheid. Ook de afmetingen van het doorstroomprofiel van een schutkolk kunnen een rol spelen.

### 3.8

#### **Bijzondere belastingen**

In de paragraaf 3.7 is reeds één van de bijzondere belastingen genoemd, zijnde aanvaren. Ook ijsbelasting wordt wel aangeduid als een bijzondere belasting (paragraaf 3.4). Daarnaast zijn nog andere bijzondere belastingen mogelijk, zoals belastingen voortkomend uit vandalisme/sabotage/terrorisme, aardbevingen en explosies. Met uitzondering van de aanvaarbelasting worden al deze belastingen niet beschouwd bij de toetsing van de primaire waterkeringen (WBI 2017).

## 4. Inventarisatie beschikbare gegevens

De inventarisatie van beschikbare gegevens bestaat in hoofdzaak uit het verzamelen van gegevens omtrent belastingen (zie hoofdstuk 3), geometrie, materialen, ondergrond en praktijkgegevens. Hierop wordt in onderstaande paragrafen nader ingegaan.

### 4.1 Geometrie

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

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

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

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

### 4.2 Materialen

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

Gegevens omtrent de materialen kunnen worden achterhaald uit tekeningen, berekeningen bestekken en productbladen van leveranciers. Daarnaast kan met behulp van inspectiemethodieken de materiaalklasse van constructieonderdelen worden bepaald. De conditie van de materialen dient in de praktijk te worden vastgesteld (zie paragraaf 4.4.1 en paragraaf 4.4.3).

### 4.3 Grondgegevens

Doorgaans zijn gegevens omtrent de ondergrond opgenomen in grondonderzoeksrapporten, al dan niet als bijlage bij ontwerprapporten of bestekken. Ook komt het voor dat dit grondonderzoek 'verscholen' zit in grondonderzoek dat voor een heel dijktraject is uitgevoerd. Opgepast moet worden met gebruik van grondgegevens 'uit de nabijheid' van een kunstwerk; bij de toetsing van kunstwerken zijn doorgaans alleen grondgegevens bruikbaar die echt lokaal zijn ingewonnen

#### 4.4

##### **Praktijkgegevens**

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

De praktijkgegevens kunnen uit verschillende soorten gegevens bestaan:

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

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

##### 4.4.1

###### *Veldbezoek*

Voorafgaand aan de toetsing van een kunstwerk wordt het aanbevolen om een veldbezoek uit te voeren. Hierbij zijn zowel de beheerder als de bedienaar van het object aanwezig. Tijdens dit veldbezoek wordt onder andere de algehele conditie van het kunstwerk beschouwd en wordt gekeken of er sprake is van schade en/of gebreken die de krachtswerking van de constructie (onderdelen) kunnen beïnvloeden of die een indicatie kunnen zijn voor een tekort aan sterkte. Het veldbezoek dient ook om een indruk te krijgen van met name de afmetingen van het object en de omgeving waarin het object zich bevindt.

Tijdens het veldbezoek is het mogelijk om eenvoudige metingen uit te voeren, zoals het opmeten met een meetlint van eenvoudig bereikbare onderdelen. Onder veldbezoek vallen geen uitgebreidere metingen, zoals het bepalen van staaldikten of wapeningsdiameters. Het gaat dus om eenvoudige visuele (en wellicht auditieve) waarnemingen zonder specialistische hulpmiddelen.

Schaden/gebreken die de krachtswerking kunnen beïnvloeden zijn bijvoorbeeld het ontbreken van een oplegging (bijvoorbeeld sponning is deels afgebrokkeld) of het (deels) ontbreken van bodembescherming<sup>6</sup>. Alhoewel deze schadebeelden op zichzelf voldoende reden kunnen zijn om over te gaan tot reparatie, is het mogelijk dat deze schadebeelden niet substantieel bijdragen aan de faalkans van het kunstwerk.

Bij schade en gebreken die kunnen duiden op een tekort aan sterkte kan worden gedacht aan verzakkingen of doorgaande scheuren.

##### 4.4.2

###### *Ervaringsgegevens werking van het kunstwerk*

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

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

---

<sup>6</sup> Het ontbreken van bodembescherming kan niet altijd visueel vanaf de kant worden waargenomen. Wel kunnen soms indicaties worden waargenomen, zoals losliggende stenen.

#### 4.4.3 *Inspectiegegevens*

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

Opgemerkt wordt dat er niet altijd voldoende aandacht is voor de bodembescherming aansluitend aan het kunstwerk. Deze wordt vaak niet geïnspecteerd. In het WBI 2017 wordt de overstromingsbenadering gehanteerd en krijgt sterkte van de bodembescherming als aanvullende sterkte een prominentere plek. Niet alleen bij *sterkte en stabiliteit kunstwerken*, maar ook bij andere toetssporen zoals *hoogte* en *betrouwbaarheid sluiting* is dit van belang. Monitoring van de bodembescherming wordt daarmee belangrijker. Ook met het oog op de levensduur van dit constructie-element is monitoring van belang.

#### 4.4.4 *Beheer en onderhoudsgegevens*

Gegevens omtrent het gevoerde beheer en onderhoud leveren ook de nodige informatie op met betrekking tot *sterkte en stabiliteit kunstwerken*. Dit is met name van belang in relatie tot het zichtjaar van de lopende toetsronde. Indien blijkt dat het beheer en onderhoud dusdanig is ingericht dat achteruitgang van de conditie actief wordt tegengegaan, kan dit dienen als onderbouwing voor het uitgangspunt dat de conditie van het kunstwerk aan het einde van de toetsperiode minimaal gelijk is aan de conditie die ten tijde van de toetsing is aangetroffen. In dat geval hoeft er wellicht geen rekening gehouden te worden met achteruitgang van de sterkte.





## 5. Vakindeling

Voor kunstwerken is er, in tegenstelling tot alle toetssporen betreffende dijken en duinen, geen vakindeling. Die is niet van toepassing bij het schematiseren van kunstwerken; ieder kunstwerk wordt (binnen Ringtoets) als apart vak gedefinieerd. Samengestelde kunstwerkcomplexen (bijvoorbeeld sluizencomplexen) worden hierbij ontleed, waarbij ieder kunstwerk waar mogelijk apart getoetst wordt. De samenhang tussen de onderdelen (bijvoorbeeld een gedeeld kwelscherm) dient hierbij niet uit het oog te worden verloren.

Grote samengestelde kunstwerkcomplexen vallen onder een toets op maat.

1. De aanname onafhankelijk falen van vakken/deelkunstwerken kan veel te optimistisch zijn, aanname afhankelijk falen veel te pessimistisch. Een goede onderbouwing en verdiscontering van de mate van afhankelijk falen is daarom nodig.
2. Bij kombergingsfalen kunnen afzonderlijke vakken/deelkunstwerken weliswaar afzonderlijk voldoen aan het kombergingscriterium, maar bij voldoende afhankelijk falen het gecombineerd falen niet omdat dan de schadedrempel wèl wordt overschreden.



## 6. Schematisering

De schematisering van de faalmechanismen binnen het toetsspoor *sterkte en stabiliteit kunstwerken* beslaat feitelijk een tweetal stappen (zie Figuur 2-3). De eerste stap is het afwegen van de te analyseren faalmechanismen en de tweede stap heeft betrekking op de daadwerkelijke bepaling van de parameterwaarden die gebruikt kunnen worden bij de toets met het instrumentarium. Aangezien voor de diverse (deel)faalmechanismen die onder *sterkte en stabiliteit kunstwerken* vallen, de stappen van de schematisering niet allemaal gelijk zijn, worden ze apart behandeld. Dit betekent een uitsplitsing naar:

- *Bezwijken constructieonderdelen (excl. aanvaren).*
- *Aanvaren.*
- *Instabiliteit constructie en grondlichaam.*

*Bij de schematiseringen wordt over het algemeen aanbevolen om in stappen van grof naar fijn te werken. Daarbij geldt dat als bij een stap voldaan wordt aan de eis die aan het beschouwde faalmechanisme wordt gesteld, een volgende meer verfijnde stap niet nodig is.*

In dit hoofdstuk wordt met name op procesniveau gekeken hoe een schematisering tot stand komt en welke elementen hierbij een rol spelen. Voor de specifieke invulling van het model en de bijbehorende parameters wordt verwezen naar hoofdstuk 7.

### 6.1 **Bezwijken constructieonderdelen (STCO)**

Het faalmechanisme *bezwijken van constructieonderdelen* heeft betrekking op het falen van onderdelen van de constructie als gevolg van verval- en golfbelastingen, waardoor een initiële opening in de waterkering ontstaat. Dit faalmechanisme is nagenoeg altijd gekoppeld aan de sterkte van het keermiddel en de opleggingen die hierbij aanwezig zijn. Andere onderdelen zijn bijvoorbeeld leidingen/kokers (persleidingen van een gemaal) die door de waterkering voeren en niet beweegbare afsluitingen van (delen van de) watervoerende elementen<sup>7</sup>. Overige constructieonderdelen zoals vleugelwanden, en bovenbouw zullen over het algemeen niet dominant zijn in geval van falen bij hoogwater en bij in achtneming van de gehanteerde overstromingsgevolgen.

Naast vervalbelastingen en golfbelastingen kunnen overige belastingen, zoals grondbelastingen, ook van belang zijn. Indien andere belastingen naast verval- en golfbelastingen mee moeten worden genomen, wordt aanbevolen om direct over te stappen naar een *toets op maat*. Het toetsinstrumentarium voorziet niet in het meenemen van andere belastingen.

Het faalmechanisme STCO wordt in het toetsinstrumentarium middels een sterk vereenvoudigde grenstoestandsfunctie beschreven. Hierbij is het slechts mogelijk om één onderdeel van de constructie in te voeren. Het bepalen van het dominante onderdeel en het vaststellen van de sterkte hiervan vindt geheel buiten het instrumentarium om plaats. Daarmee reduceert de grenstoestandsfunctie tot  $Z=R-S$ , waarin  $S$  de belasting voorstelt en  $R$  de sterkte. Deze sterkte  $R$  bestaat uit één in te voeren waarde. De sterkte wordt hierbij uitgedrukt in een kritieke druk (zijnde een kritiek verval). Andere sterktebeschrijvingen zijn in het model niet voorhanden. De door de gebruiker ingevulde waarde van de sterkte komt tot stand na een proces van selecteren van het dominante onderdeel en vervolgens hiervan bepalen van de sterkte.

---

<sup>7</sup> Bijvoorbeeld een koker die deels door een vaste verhoogde drempel en deels door een keermiddel wordt afgesloten.

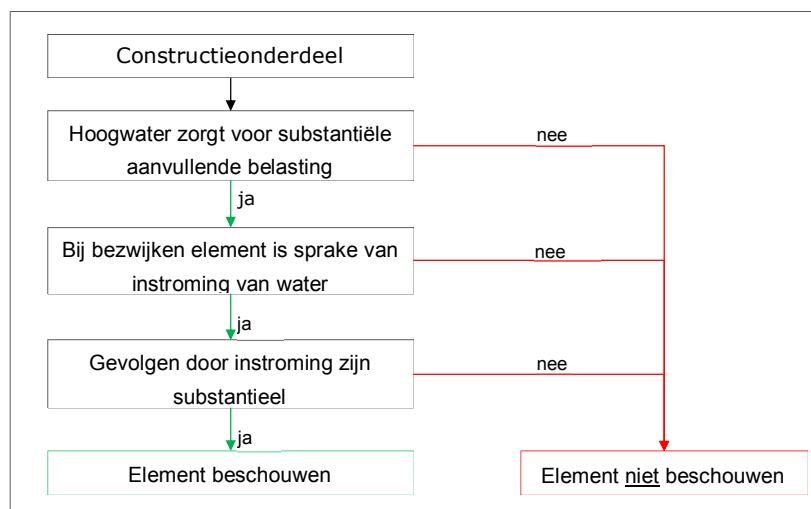
Voor het gros van de waterkerende constructies in Nederland levert deze werkwijze een conservatief resultaat op. Constructie onderdelen die minder relevant zijn voor de krachtopname worden verwaarloosd bij de keuze van een dominant onderdeel, zo ook de herverdeling van spanningen wanneer een dominant onderdeel bezwijkt. Wanneer vooraf duidelijk is dat een eenvoudige schematisatie van de constructie niet mogelijk is wordt aanbevolen om via het algemeen filter op vakniveau direct naar de toets op maat te gaan..

#### 6.1.1

##### *Afweging welke mechanismen/onderdelen beschouwd moeten worden*

Het afwegen van mechanismen/onderdelen is bedoeld om enerzijds de inspanning van de WBI-beoordeling zoveel mogelijk te richten op datgene wat daadwerkelijk van belang is (dominant is voor de overstromingskans) en anderzijds te voorkomen dat onderdelen over het hoofd worden gezien. Onderbouwing voor het al dan niet nader beschouwen van mechanismen/onderdelen dient altijd plaats te vinden.

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



Figuur 6-1 Schema ten behoeve van eerste selectie uit te werken mechanismen/onderdelen bij het faalmechanisme bezwijken constructieonderdelen (STCO)

Het schema in Figuur 6-1 geeft de te nemen stappen weer om een eerste selectie van te analyseren constructieonderdelen te maken. Hieronder wordt nog kort op deze stappen ingegaan:

##### 1. Hoogwater zorgt voor substantiële aanvullende belasting.

Uitgangspunt bij het beoordelen is dat een hoogwater niet mag leiden tot overstromingsgevolgen. Primaire belasting bij de beoordeling is de belasting die door de combinatie van buiten- en binnenwaterstand op (onderdelen van) het kunstwerk wordt uitgeoefend. Indien een hoogwater, al dan niet in combinatie met golven, niet of nauwelijks leidt tot aanvullende belastingen op een constructieonderdeel, is een beoordeling in het kader van de Waterwet niet nodig.

Voorbeeld 1

Neem een persleiding van een gemaal door een dijk. In geval van hoogwater kan bij een niet gesloten keermiddel aan de buitenzijde de waterdruk in de leiding oplopen. Deze lage-drukleidingen zijn echter ten aanzien van interne druk vaak behoorlijk overgedimensioneerd, omdat met name zettingen dominant zijn voor de sterkte van lage drukleidingen.

Een hoge buitenwaterstand kan daarnaast ook zorgen voor hogere grondwaterstanden in de dijk. Dit leidt tot grotere opwaartse krachten, maar ook de bovenbelasting op de leiding wordt groter. Kijkend naar de globale krachtwerving leidt dit tot ontlasting van de leiding. De aanvullende opwaartse druk is per saldo immers groter dan de aanvullende bovenbelasting. Lokaal gezien (op het niveau van dwarsdoorsnede) wordt de leiding wel aanvullend belast, maar relatief is de impact hiervan meestal zeer beperkt.

2. Bij bezwijken van het constructieonderdeel is sprake van instroming van water. Indien een constructieonderdeel bezwijkt onder invloed van een hoogwater maar dit leidt niet tot instroming van water, hoeft het constructieonderdeel niet beoordeeld te worden ten aanzien van de sterkte. Aanvullende randvoorwaarde daarbij is dat er geen sprake is van een domino-effect. Dit houdt in dat bezwijken van het beschouwde constructieonderdeel leidt tot dusdanige belastingen op een ander waterkerend constructieonderdeel dat dit bezwijkt en alsnog leidt tot overstromingsgevolgen.

Voorbeeld 2

Een stuw in de koker van een uitwateringssluiss mag bezwijken onder de invloed van hoogwaterbelastingen, wanneer de waterkerende functie van de uitwateringssluiss gewaarborgd is door andere specifieke keermiddelen.

3. Gevolgen door instroming zijn substantieel. Indien de gevolgen na het bezwijken van het constructieonderdeel substantieel zijn, draagt het constructieonderdeel direct bij aan het overstromingsrisico. Als de gevolgen niet substantieel zijn, dan hoeft het constructieonderdeel niet beoordeeld te worden. Wat 'substantieel' is wordt gedefinieerd door het faalcriterium dat wordt overschreden na bezwijken van het constructieonderdeel. Voor kunstwerken zijn de faalcriteria gerelateerd aan de bodembescherming en de komberging achter het kunstwerk.

Voorbeeld 3

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

Met de constructieonderdelen die na de selectie overblijven kan vervolgens worden gekeken of op voorhand aan te geven is welke onderdelen dominant zijn. Indien bijvoorbeeld twee keermiddelen in serie in dezelfde doorgang in de eerste selectie zitten, kan wellicht op basis van

gegevens van leverancier of ontwerpgegevens worden gekeken welk keermiddel dominant is voor de sterkte. Het zwakste keermiddel valt dan in principe af voor nadere analyse.<sup>8</sup>

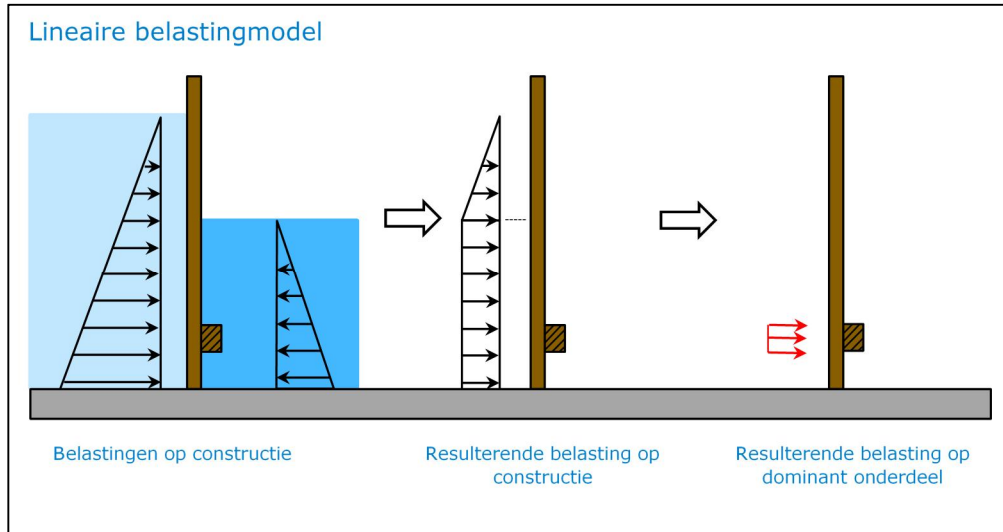
### 6.1.2

#### *Schematisering van de sterkte van constructieonderdelen*

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

Belangrijk bij de schematisering is het vaststellen van het invoergegeven dat in het instrumentarium moet worden ingevoerd voor het kunnen maken van een probabilistische toets op kunstwerkniveau. Het instrumentarium vraagt daarbij om de sterkte van een constructieonderdeel uitgedrukt in een kritieke druk<sup>9</sup>. Afhankelijk van het van toepassing zijnde belastingmodel (lineair dan wel kwadratisch) dient deze druk te worden opgegeven per vierkante meter dan wel per strekkende meter breedte van het constructieonderdeel.

De keuze voor het lineaire of het kwadratische belastingmodel wordt met name bepaald door het onderdeel dat wordt beschouwd. Indien bijvoorbeeld een regel van een keermiddel als dominant constructieonderdeel voor de faalkans wordt beschouwd, zoals in Figuur 6-2 weergegeven, kan de sterkte van deze regel het beste wordt uitgedrukt in een toelaatbare druk in  $\text{kN/m}^2$ .

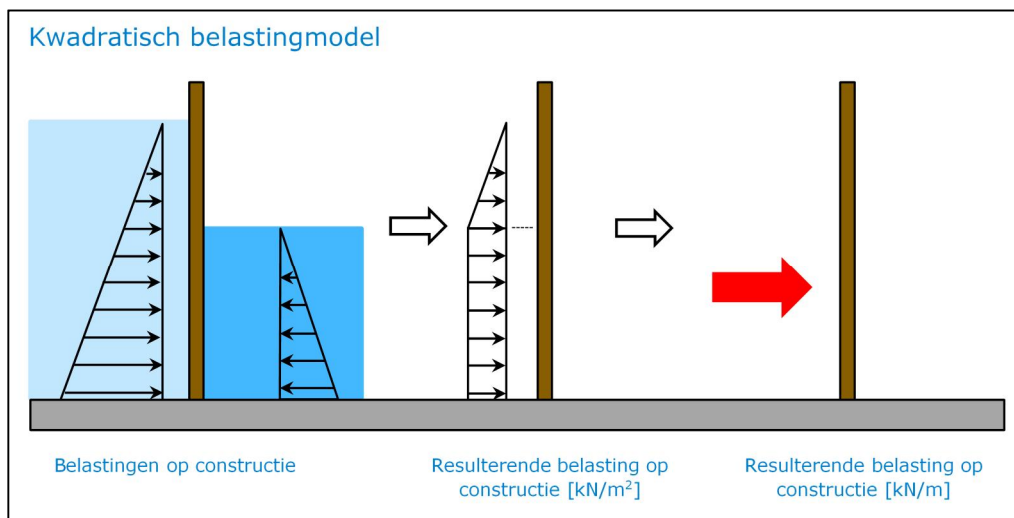


Figuur 6-2 Lineaire belastingmodel bij schematisering van sterkte constructieonderdelen

Wanneer echter de totale sterkte van het keermiddel wordt ingevoerd, is een resulterende druk per strekkende meter breedte van het keermiddel van belang. In Figuur 6-3 bestaat de resulterende belasting uit een deel met een constant verval en een deel met een verlopend verval. In dat geval wordt gebruik gemaakt van het kwadratische model en dus wordt de toelaatbare druk ingevoerd als  $\text{kN/m}^2$ .

<sup>8</sup> Opgemerkt wordt dat bij het faalmechanisme betrouwbaarheid sluiting het wel benodigd is om te kijken of het zwakste keermiddel ook in staat is hoogwater te keren.

<sup>9</sup> Druk kan hier worden gezien als een resulterende waterdruk als gevolg van verval en golven.



Figuur 6-3 Kwadratisch belastingmodel bij schematisering van sterkte constructieonderdelen

### 6.1.3

#### *Gegevens van de constructie*

Het kan voorkomen dat er geen tekeningen, berekeningen of andere informatie bekend is van constructieonderdelen. Het is dan van belang dat deze informatie via een inmeting wordt vastgesteld. Ook het bepalen van de materiaalsoort is van belang, wanneer gegevens hieromtrent niet voorhanden zijn. Voor vaststelling van deze gegevens is een expert benodigd. In sommige gevallen is onderzoek benodigd waarbij een monster uit het materiaal wordt gehaald.

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

Zonder de basisgegevens zoals hierboven aangegeven is een goede analyse niet mogelijk.

### 6.1.4

#### *Gegevens actuele conditie en beheer en onderhoud*

De beoordeling vindt plaats op de verwachte conditie op de peildatum. Daarbij dient uit te worden gegaan van normaal beheer en onderhoud. De actuele conditie van de beschouwde constructie(onderdelen) dient daarvoor te worden geëxtrapoleerd naar de conditie op peildatum. Deze actuele conditie kan worden vastgesteld middels inspectie. Indien de actuele en / of de conditie op peildatum niet in detail bekend is, wordt aanbevolen om bij de eerste analyses conservatieve aannamen (dit betreft een schatting van de ondergrens gegeven de onzekerheden) te doen op basis van visuele waarneming, gebruikservaringen en ouderdom van de constructie. Het wordt dan ook aanbevolen om een gevoeligheidsanalyse hierop uit te voeren.

Indien gedetailleerde inspectiegegevens voorhanden zijn, kan hiermee in de analyses direct rekening worden gehouden. Gedetailleerde gegevens kunnen bijvoorbeeld bestaan uit:

- Staaldiktemetingen.
- Bepaling betonsterkte.

Beheer en onderhoud speelt een belangrijke rol, omdat het moment van toetsen doorgaans niet het moment van het einde van de toetsperiode betreft. Beheer en onderhoud zijn van wezenlijk belang om uiteindelijk de conditie van het kunstwerk aan het einde van de toetsperiode te analyseren.



#### 6.1.5 *Van grof naar fijn*

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

Voorbeeld 4

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

Het toepassen van eenvoudige schematiseringen leidt bij sterkte vaak al tot voldoende kleine faalkansen omdat constructieonderdelen in de meeste gevallen behoorlijk overgedimensioneerd zijn. Voor bepaalde keermiddelen geldt dat andere factoren de sterkte bepalen. Voorbeelden hiervan zijn (standaard) terugslagkleppen en schuiven, waarbij vervormingsaspecten als gevolg van eisen aan het lekpercentage<sup>10</sup> vaak maatgevend zijn. Daarnaast leidt het rekenen met eenvoudige schematiseringen ertoe dat wanneer de constructie hiermee al voldoet aan de eisen, een foutieve keuze van het dominante onderdeel (zie volgende paragraaf) niet direct tot het onterecht goedkeuren van de constructie leidt.

#### 6.1.6 *Bepalen dominante element*

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

#### 6.1.7 *Overige sterkten*

Naast het bezwijken van een constructie(onderdeel) met als gevolg het instromen van water spelen de aanvullende sterkten 'bodembescherming' en 'komberging' nog een rol wanneer gekeken wordt naar overstromingsrisico's (zie foutenboom zoals opgenomen in paragraaf 2.2). Om de bijbehorende modellen te kunnen gebruiken zijn ook invoergegevens nodig. Voor de bodembescherming geldt dat bekend dient te zijn bij welke stroomsnelheid deze gaat eroderen, terwijl voor de komberging gegevens omtrent de beschikbare waterberging in het achterland voorhanden moeten zijn.

Aangezien de gegevens voor de schematisering voor deze deelfaalmechanismen lang niet altijd direct voorhanden zijn, wordt aanbevolen om ook hier van grof naar fijn te werken. Zo vindt het

<sup>10</sup> Eisen ten aanzien van lekpercentages kunnen zijn gebaseerd op bijvoorbeeld het voorkomen van instroming van zout water, vuil water of wateroverlast. Hierbij speelt de overstromingsgedachte dus geen rol.

bezwijken van constructie(onderdelen) nagenoeg altijd plaats bij erg hoge waterstanden, waardoor het verstandig kan zijn om in eerste instantie voor dit faalmechanisme<sup>11</sup> de schematiseringsinspanning voor bodembescherming te beperken. Immers bij bezwijken van de constructie zal door het grote verval doorgaans direct uitspoeling van de bodembescherming plaatsvinden, zodat op voorhand al duidelijk is dat dit nagenoeg geen aanvullende sterkte oplevert. Een en ander kan worden vormgegeven door uit te gaan van het ontbreken van bodembescherming.

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

## 6.2 **Bezwijken door aanvaren**

Het deelfaalmechanisme omtrent bezwijken van constructieonderdelen als gevolg van aanvaren heeft betrekking op het falen (van onderdelen) van de constructie als gevolg van een aanvaring. Het deelfaalmechanisme maakt onderdeel uit van het faalmechanisme *sterkte constructieonderdelen* (STCO), maar verschilt dusdanig van het bezwijken als gevolg van vervalbelasting, dat het apart beschreven wordt.

Falen als gevolg van aanvaren beperkt zich tot het aanvaren door reguliere scheepvaart van constructieonderdelen, welke direct verantwoordelijk zijn voor het waterkerende vermogen van het kunstwerk. In de praktijk gaat het hier om aanvaren van keermiddelen die op dat moment gesloten zijn. Onder het faalmechanisme valt niet het aanvaren van onderdelen van de waterkering als gevolg van een losgeslagen schip. De kans hierop wordt verwaarloosbaar klein geschat. Tijdens hoogwater is de meeste scheepvaart al stilgelegd. Daarnaast betreffen de kunstwerken relatief kleine elementen in de waterkering wat de kans op aanvaren door een losgeslagen schip ook aanzienlijk reduceert.

### 6.2.1 *Afweging of aanvaren beoordeeld moet worden*

Het beschouwen van het deelfaalmechanisme aanvaren is alleen van toepassing voor constructies waar scheepvaart kan passeren en waarbij sprake is van momenten waarop slechts één enkele kering aanwezig is. Dit impliceert dat het van toepassing is op keersluizen en schutsluizen. In Ringtoets is specifiek een model opgenomen dat gebruikt kan worden bij schutsluizen. Voor de specifieke situatie van keersluizen is geen model aanwezig. Hiervoor is gekozen omdat het aanvaren van een keersluis zoals hier bedoeld veel minder aannemelijk is dan het aanvaren van een schutsluis:

- Wanneer keersluizen gesloten zijn, is de waterstand al hoog en is nagenoeg alle scheepvaart reeds stilgelegd.
- Wanneer een keersluis gesloten is, is de primaire functie van de keersluis, het passeerbaar maken van de waterkering, buiten werking. Het bewust varen in de richting van de keersluis is dan een tegennatuurlijke actie. Bij een schutsluis geldt dat het varen in de richting van de schutsluis behoort bij de primaire functie van de schutsluis en daarmee een bewuste actie is. Dit betekent dat het aanvaren van een keersluis altijd gerelateerd zal zijn een onbeheersbare, onbewuste gebeurtenis zoals een losgeslagen schip.

In principe wordt aanvaren bij een keersluis daarom niet geanalyseerd. Uiteraard dient te worden geverifieerd of er argumenten zijn die ertoe leiden dat het risico op aanvaren wel substantieel kan bijdragen aan de faalkans. Denk hierbij aan het uitzonderlijke geval waarin een keersluis zodanig is gelegen aan een drukke locatie dat ondanks stremming van de scheepvaart

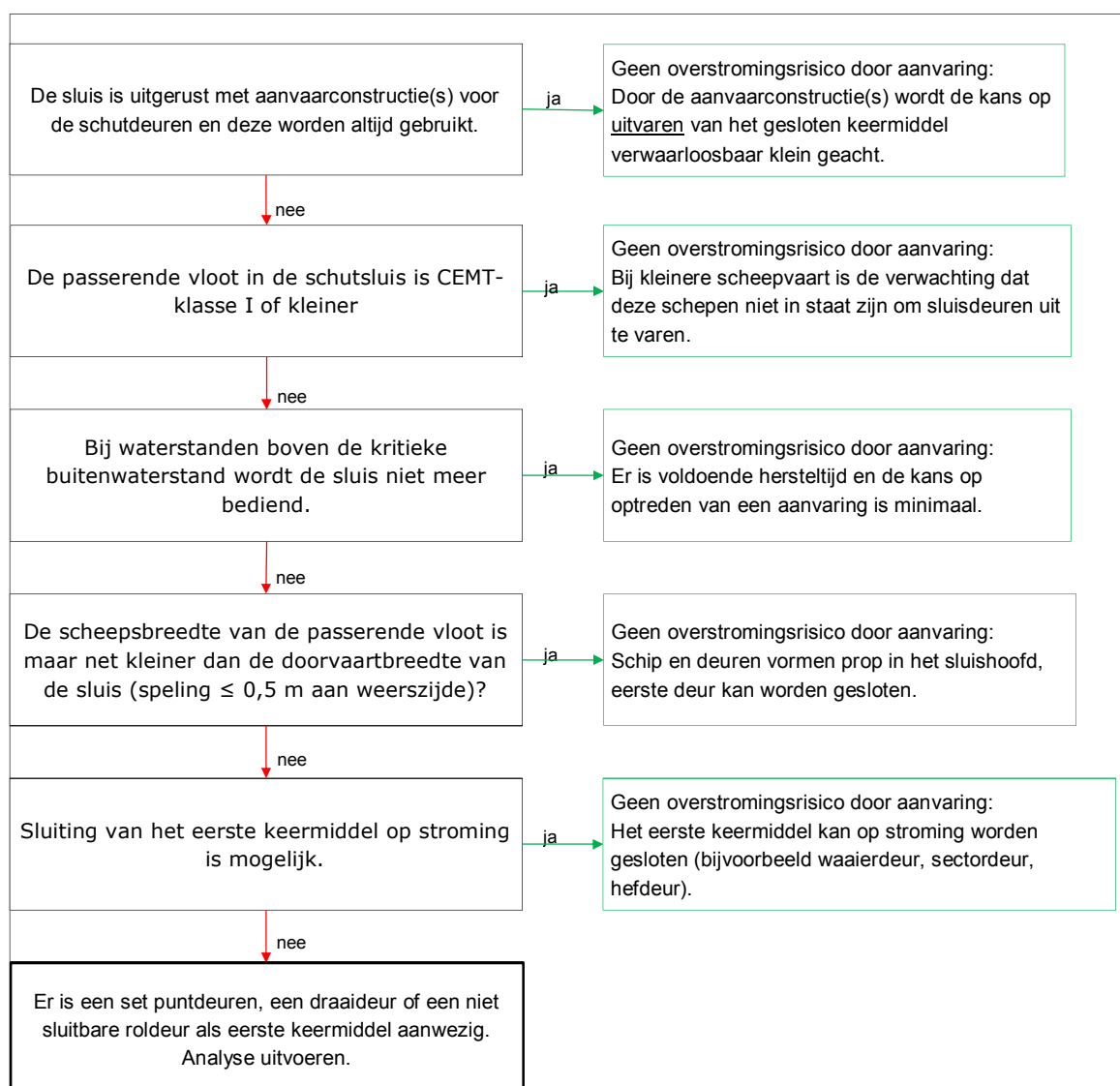
---

<sup>11</sup> Voor andere faalmechanismen (bijvoorbeeld betrouwbaarheid sluiting en hoogte) kan het wel van belang zijn om meer te weten te komen over de bodembescherming en de actuele conditie hiervan.

nog steeds verwacht wordt dat er een reële kans op aanvaren is. Indien aanvaren bij een keersluis wel van belang wordt geacht, kan dit in een *toets op maat* worden geanalyseerd.

De noodzaak tot het analyseren van aanvaren met falen van de waterkering als gevolg, kan voor schutsluizen plaatsvinden aan de hand van het schema in Figuur 6-4. Middels dit schema wordt gekeken naar risicovolle eigenschappen van een schutsluis en de scheepvaart die het deelfaalmechanisme beïnvloeden.

In Figuur 6-4 wordt gesproken over eerste en tweede keermiddel. Het tweede keermiddel is de deur die tijdens het invaren van schepen gesloten is. Het eerste keermiddel is de deur die tijdens invaren juist geopend is.



Figuur 6-4 Stroomschema afweging beoordelen aanvaren

In het bovenstaande schema zijn een aantal veronderstellingen gedaan die hieronder worden toegelicht.

#### Aanwezigheid aanvaarconstructies

Door de aanwezigheid van aanvaarconstructies voor de keermiddelen wordt verondersteld dat de kans op aanvaring van het gesloten keermiddel al dusdanig klein is dat het overstromingsrisico als gevolg van aanvaring verwaarloosbaar is.

#### Scheepvaartklasse passerende vloot

In het schema is ervan uitgegaan dat de schutdeuren van sluizen van oorsprong robuust zijn en bij lichtere aanvaringen niet direct bezwijken. De grens is nu gelegd bij scheepvaartklasse I van de binnenvaart. Voor recreatievaart geldt dat deze vloot geheel buiten beschouwing kan worden gelaten. Voor zeevaart geldt dat alle klassen van belang zijn, en dus in de analyse moeten worden betrokken.

#### Schutten boven kritieke buitenwaterstand

Indien het schutproces gestaakt wordt voordat de buitenwaterstand dusdanig hoog wordt dat dit bij geopend kunstwerk tot grote gevolgen zou leiden (kritiek buitenpeil), dan hoeft aanvaring niet te worden beschouwd. Problemen kunnen in dat geval alleen optreden als vlak voor het overschrijden van deze buitenwaterstand een aanvaring plaatsvindt en er niet voldoende tijd is om de gevolgen hiervan met betrekking tot hoogwaterkeren te herstellen. De kans op deze samenloop van omstandigheden wordt verwaarloosbaar klein geacht.

#### Beschikbare ruimte tussen schip en doorvaartopening.

Wanneer er tussen het schip en de doorvaartopening ter plaatse van het keermiddel weinig ruimte aanwezig is, zal bij het bezwijken van de aangevaren deur het zeer waarschijnlijk zijn dat de combinatie van keermiddel en schip een 'prop' vormt in de doorvaartopening. Deze prop belemmert verdere instroming vervolgens dusdanig dat de kans dat het eerste keermiddel gesloten kan worden groot is.

#### Op stroming te sluiten keermiddelen

Er zijn een aantal keermiddelen die geschikt zijn om op stroming te sluiten. Dit zijn met name de waaierdeur, de sectordeur, de segmentdeur en (in iets mindere mate) de hefdeur.

- Waaierdeuren zijn inherent stromingsbestendig en kunnen bij grote stroomsnelheden zeer gecontroleerd worden gesloten, evenals sector- en segmentdeuren met horizontale of verticale as. Stroomsnelheden van 5,0 m/s of hoger zijn mogelijk.
- Hefdeuren kunnen, gebruik makend van hun eigen gewicht, en al dan niet gebruikmakend van vergrendeling op afdrukinrichtingen, bij grote stroomsnelheden sluiten (orde 3 m/s). Wel bestaat de kans op ongecontroleerde verplaatsingen door onderdruk onder de deur als gevolg van de grote stroomsnelheden als de deur bijna dicht is.

Wanneer de sluis van een dergelijke eerste deur is voorzien, mag ervan uitgegaan worden dat deze na aanvaring alsnog kan worden gesloten.

Roldeuren zijn slechts beperkt te bewegen bij verval, omdat de vervalbelasting bijzonder ongunstig werkt. Onder welk verval deurbeweging nog mogelijk is hangt samen met de kolkbreedte. Hierbij geldt hoe groter de kolkbreedte, hoe lager het toelaatbare verval. Voor een roldeur moet daarom een analyse van het optredende verval plaatsvinden om vervolgens een inschatting te maken of het alsnog sluiten van deze roldeur na aanvaring mogelijk is. Als eerste schatting voor de maximum stroomsnelheid waarbij roldeuren nog gesloten kunnen worden kan een waarde van 2,0 m/s worden aangehouden.

Puntdeuren en draaideuren kunnen in de regel niet worden gesloten bij vervallen groter dan 5-10cm, dus stroomsnelheden in de orde van 1m/s. Bij punt- en draaideuren moet er dus vanuit worden gegaan dat sluiting na aanvaring niet mogelijk is.

### 6.2.2 *Schematisering kans van aanvaren*

Indien gebleken is dat aanvaren van het gesloten tweede keermiddel beschouwd moet worden, dient een schematisering van aanvaren te worden opgesteld. Hiertoe worden een aantal gegevens te verzameld over de scheepvaart, de schutsluis en de keermiddelen. Voor de beschrijving van het faalmechanisme wordt verwezen naar paragraaf 7.5.

Om de energie van een botsend schip te kunnen bepalen zijn gegevens omtrent verdelingen van vaarsnelheid, afmetingen en massa (beladen en onbeladen) van de passerende vloot benodigd. Ook gegevens omtrent aantallen schepen zijn benodigd, zodat de kans op aanvaren bepaald kan worden (zie paragraaf 7.5).

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

### 6.2.3 *Schematisering van de opneembare energie van het keermiddel*

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

Achtergrond:

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

Bedacht moet worden dat de robuustere deurtypen veelal op de bredere sluizen voorkomen. Daar zijn de aanvaarbestedingen ook groter, en is dus de 'winst' van de robuustere deur hard nodig. Het deurtype in het aangevaren hoofd lijkt daarmee niet heel erg onderscheidend.

De opneembare energie van het keermiddel kan op verschillende niveaus worden bepaald. Dit varieert van grof naar fijn. Met behulp van mechanica-regels kan bepaald worden welke energie (eenheid: kN) er nodig is om (een aantal) sterktebepalende onderdelen van het keermiddel plastisch<sup>12</sup> te laten bezwijken.

De opneembare energie wordt vervolgens vergeleken met de vrijkomende energie die door het keermiddel moet worden opgenomen na een aanvaring. Een grove benadering om de op te nemen aanvaarenergie te bepalen is om het schip onvervormbaar te veronderstellen en alle

---

<sup>12</sup> In het geval van houten keermiddelen is plasticiteit niet aan de orde, maar kan gebruik worden gemaakt van een elastische benadering, waarbij de partiële factoren navenant behandeld mogen worden en waarbij uitgegaan mag worden van een zeer korte belastingduur.

aanvaarenergie te laten resulteren in vervorming van het keermiddel. Er wordt in deze benadering dus geen aanvaarenergie opgenomen door het schip zelf.

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

#### 6.2.4 *Schematisering van de kans op herstel van de sluiting*

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

De doorstroomopening die overblijft na het uitvaren van het tweede gesloten keermiddel is afhankelijk van het feit of het schip tussen de uitgevaren deuren klem blijft zitten of dat het doorschiet de kolk uit. Indien het klem blijft zitten zal de uiteindelijk resulterende doorstroomopening veel kleiner zijn dan wanneer het schip na aanvaring de kolk uitschiet. Daardoor is bij een klemzittend schip de kans groter dat het eerste keermiddel alsnog gesloten kan worden, omdat de stroomsnelheden kleiner zullen zijn.

### 6.3 **Bezwijken door instabiliteit constructie en grondlichaam**

Het faalmechanisme *instabiliteit constructie en grondlichaam* heeft betrekking op het falen van het kunstwerk als geheel als gevolg van verval- en golfbelastingen, waardoor direct een dusdanige opening in de waterkering ontstaat dat er sprake is van een onbeheersbare situatie. Mechanismen die hiertoe kunnen leiden hebben betrekking op de stabiliteit van het kunstwerk. Conform de afbakening van het concept WTI2011 geldt dat alleen de grondconstructie voor en achter het kunstwerk betrokken wordt in mogelijke instabiliteitsvormen. De stabiliteit van de dijklichamen direct aansluitend aan het kunstwerk wordt getoetst in het dijkenstroom (macrostabiliteit).

#### 6.3.1 *Afweging welke mechanismen/onderdelen beoordeeld moeten worden*

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

Instabiliteit van de constructie betreft de volgende mogelijke mechanismen:

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

Voor horizontale stabiliteit zijn de volgende punten van belang:

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

Voorbeeld 5

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

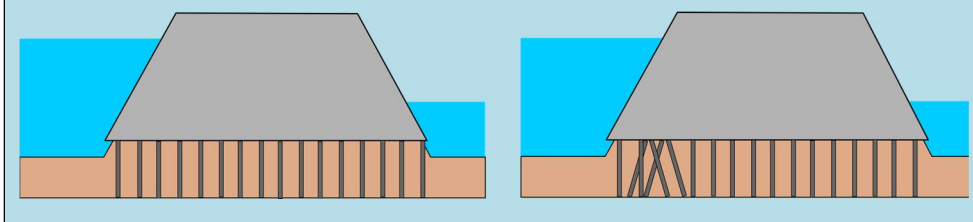


Dit blijft niet beperkt tot kleine constructies door een dijk. Ook bij schutsluizen met aanzienlijke lengte is de kans op horizontaal verschuiven klein.

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

Voorbeeld 6

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



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

Voor verticale stabiliteit zijn de volgende punten van belang:

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

Voor kantelinstabiliteit zijn de volgende punten van belang:

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

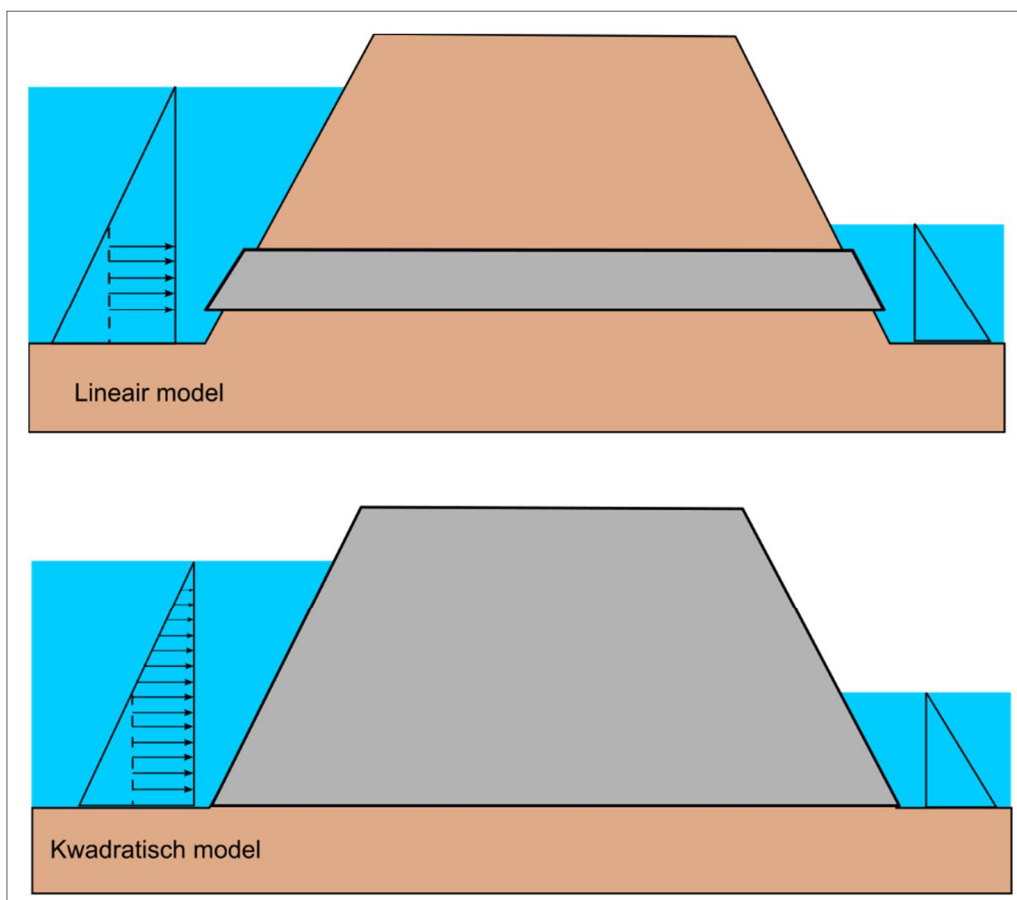
### 6.3.2

#### *Schematisering van de stabiliteit*

Schematiseringen en het bepalen van de stabiliteit van constructies kan plaatsvinden aan de hand van de geldende mechanica-regels en formules. Het niveau van de schematisering van de stabiliteit kan variëren van zeer eenvoudig (eenvoudige vuistregels) tot uitermate complex (inzet van Eindige Elementenprogramma's). Voor de wijze waarop dit uitgevoerd wordt, wordt verwezen naar de gangbare praktijk van de constructeur en de geotechnicus.

Belangrijk bij de schematisering is het vaststellen van het invoergegeven dat in het toetsinstrumentarium moet worden ingevoerd voor het kunnen maken van een probabilistische toets. Het instrumentarium vraagt daarbij om de stabiliteit van de constructie uitgedrukt in een kritiek verval. Afhankelijk van het gekozen belastingmodel (lineair dan wel kwadratisch) leidt dit tot een vervalbelasting per vierkante meter dan wel een vervalbelasting per strekkende meter breedte van het kunstwerk. Voor stabiliteit is het kwadratisch model het meest voor de hand liggend omdat het faalmechanisme met name speelt bij open bakconstructies in waterkeringen en niet zozeer bij kokers door dijken. In Figuur 6-5 is het verschil tussen lineair en kwadratisch inzichtelijk gemaakt.





Figuur 6-5 Toepassing lineair model en kwadratisch model bij stabiliteit

Het lineaire belastingmodel is toe te passen als de vervalbelasting over de gehele constructiehoogte constant is. Indien de resulterende vervalbelasting verloopt over de hoogte dan dient het kwadratisch model te worden toegepast.

### 6.3.3 *Gegevens van de constructie*

Zonder basisgegevens zoals afmetingen van het kunstwerk en gegevens omtrent de fundatie is een analyse niet mogelijk. Indien deze niet voorhanden zijn kan getracht worden via veldmetingen hierover het een en ander te verzamelen. Gegevens omtrent de fundatie zijn hiermee echter niet of nauwelijks te achterhalen. In die gevallen wordt het aanbevolen om zoveel mogelijk via een kwalitatieve redenering te onderbouwen waarom wel of niet naar de stabiliteit moet worden gekeken (substantiële bijdrage aan de faalkans of niet). Indien dit niet mogelijk is, volgt altijd een oordeel 'voldoet niet'.

### 6.3.4 *Gegevens actuele conditie*

Het is van belang om bij de analyses rekening te houden met de actuele conditie van het kunstwerk. Deze conditie kan worden vastgesteld middels inspectie en met name (hoogte-) metingen. Zodra uit de metingen blijkt dat het kunstwerk of onderdelen hiervan zettingen hebben ondergaan of er zijn doorgaande scheuren zichtbaar, kan dit een indicatie zijn van een fundatie die (deels) bezwaken is. Hiermee dient dan tijdens de analyses rekening te worden gehouden. Een indicatie van een bezwaken fundatie behoort altijd nader geanalyseerd te worden, waarbij wordt beschouwd of dit mogelijk leidt tot bezwijken van het kunstwerk onder hoogwater belasting. Indien dit laatste het geval is, leidt dit altijd tot een oordeel 'voldoet niet'. Indien het echter slechts om een beperkt gedeelte van het kunstwerk gaat (bijvoorbeeld het binnenhoofd van een schutsluis) kan nader worden geanalyseerd of het bezwijken van het

binnenhoofd direct tot een probleem met betrekking tot waterveiligheid leidt. In dat geval is het ook goed mogelijk dat dit met name problemen geeft vanuit dagelijks functioneren (beschikbaarheidseisen).

#### 6.3.5

##### *Overige sterkten*

Voor dit faalmechanisme geldt dat het uitgangspunt wordt gehanteerd dat falen gelijk staat aan vorming van een bres, het ontstaan van een onbeheersbare situatie en substantiële gevolgen. Er is dus geen sprake van reststerkte na bezwijken van het kunstwerk.





## 7. Overzicht parameters per deelfaalmechanisme

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

### 7.1 Overzichtstabel modelparameters

Per parameter wordt een aantal standaardgegevens in tabelvorm gepresenteerd. Er is aangegeven welke gegevens door de gebruiker kunnen worden aangepast. Een dikkere lijn onder een gegeven betekent dat dit gegeven door de gebruiker kan worden aangepast. In tabel 7.2 zijn de diverse gegevens nader toegelicht

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

| symbool                     | eenheid              | type | $\mu$         | $V_r$ of $\sigma$ | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ | paragraaf |
|-----------------------------|----------------------|------|---------------|-------------------|------------|----------|------------|----------|-----------|
| $B_M$                       | [m]                  | det  | <u>Invoer</u> | -                 | -          | -        | -          | -        | 7.2.1.1   |
| $h_{kr}$                    | [m+NAP]              | nor  | <u>Invoer</u> | $\sigma=0,05$     | -          | -        | -          | 1        | 7.2.1.2   |
| $\Delta h$                  | [m]                  | det  | <u>Invoer</u> | -                 | -          | -        | -          | -        | 7.2.1.3   |
| $N$                         | [-]                  | det  | <u>5000</u>   | -                 | -          | -        | -          | -        | 7.2.1.4   |
| $\lambda_1$                 | [-]                  | det  | 1,0           | -                 | -          | -        | -          | -        | 7.2.1.5   |
| $\lambda_2$                 | [-]                  | det  | 1,0           | -                 | -          | -        | -          | -        | 7.2.1.6   |
| $\theta_{kw}$               | [-]                  | det  | <u>Invoer</u> | -                 | -          | -        | -          | -        | 7.2.1.7   |
| $m_s$                       | [-]                  | nor  | 1,0           | $\sigma=0,05$     | -          | -        | -          | 1        | 7.2.2.1   |
| $h_j$                       | [m+NAP]              | det  | <u>Invoer</u> | -                 | -          | -        | -          | -        | 7.2.2.2   |
| $R_{lin}$                   | [kN/m <sup>2</sup> ] | logn | <u>Invoer</u> | $V_r=0,10-0,30$   | -          | -        | -          | 1        | 7.2.2.3   |
| $R_{kwad}$                  | [kN/m <sup>2</sup> ] | logn | <u>Invoer</u> | $V_r=0,10-0,30$   | -          | -        | -          | 1        | 0         |
| $h_{bi,CB}$                 | [m+NAP]              | nor  | <u>Invoer</u> | $\sigma=0,1$      | -          | -        | -          | 1        | 7.2.2.5   |
| $R_{stab\ verlies\ lin}$    | [kN/m <sup>2</sup> ] | logn | <u>Invoer</u> | $V_r=0,10-0,30$   | -          | -        | -          | 1        | 7.3.1     |
| $R_{stab\ verlies\ kwad}$   | [kN/m <sup>2</sup> ] | logn | <u>Invoer</u> | $V_r=0,10-0,30$   | -          | -        | -          | 1        | 7.3.2     |
| $f_{nivellering}$           | [1/jaar]             | det  | <u>Invoer</u> | -                 | -          | -        | -          | -        | 7.4.1     |
| $P_{aanvaring,nivellering}$ | [1/niv.]             | det  | <u>Invoer</u> | -                 | -          | -        | -          | -        | 7.4.2     |
| $E_c$                       | [kNm]                | logn | <u>Invoer</u> | $V_r=0,3$         | -          | -        | -          | -        | 7.5.1     |
| $m$                         | [ton]                | nor  | <u>Invoer</u> | $V_r=0,2$         | -          | -        | -          | -        | 7.5.2     |
| $m_E$                       | [-]                  | nor  | 1,0           | $V_r=0,2$         | -          | -        | -          | -        | 7.5.3     |
| $v$                         | [m/s]                | nor  | <u>Invoer</u> | $V_r=0,55$        | -          | -        | -          | 1        | 7.5.4     |
| $v_{c,sluit}$               | [m/s]                | nor  | <u>Invoer</u> | $V_r=0,2$         | -          | -        | -          | 1        | 7.6.1     |
| $h_{bi}$                    | [m+NAP]              | nor  | <u>Invoer</u> | $\sigma=0,1$      | -          | -        | -          | 1        | 7.6.2     |
| $m_{kom}$                   | [-]                  | logn | 1,0           | $\sigma=0,20$     | -          | 0        | -          | 1        | 7.7.1     |
| $A_{kom}$                   | [m <sup>2</sup> ]    | logn | <u>Invoer</u> | $V_r=0,10$        | -          | 0        | -          | 1        | 7.7.2     |
| $\Delta h_{kom}$            | [m]                  | logn | <u>Invoer</u> | $\sigma=0,10$     | -          | 0        | -          | 1        | 7.7.3     |
| $m_{in}$                    | [-]                  | det  | 1,0           | -                 | -          | -        | -          | 1        | 7.7.4     |
| $f_{slopen}$                | [-]                  | det  | <u>1,0</u>    | -                 | -          | -        | -          | 1        | 7.7.5     |
| $t_s$                       | [uur]                | logn | <u>6,0</u>    | $V_r=0,25$        | -          | 1        | -          | 0        | 7.7.6     |
| $B$                         | [m]                  | nor  | <u>invoer</u> | $\sigma=0,05$     | -          | 0        | -          | 1        | 7.7.7.1   |
| $m_{ol}$                    | [-]                  | nor  | <u>1,1</u>    | $\sigma=0,03$     | -          | 0        | -          | 1        | 7.7.7.2   |

| symbool                   | eenheid               | type | $\mu$      | $V_r$ of $\sigma$               | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ | paragraaf |
|---------------------------|-----------------------|------|------------|---------------------------------|------------|----------|------------|----------|-----------|
| $m_{ovv}$                 | [-]                   | nor  | <u>1,0</u> | $V_r=0,10$                      | -          | 0        | -          | 1        | 7.7.7.3   |
| $h_{bi}$                  | [m+NAP]               | nor  | Invoer     | <u><math>\sigma=0,10</math></u> | -          | 0        | 12uur      | 0        | 7.7.7.4   |
| $h_{dr}$                  | [m+NAP]               | nor  | Invoer     | <u><math>\sigma=0,10</math></u> | -          | 0        | -          | 1        | 7.7.7.5   |
| $\mu$                     | [-]                   | nor  | <u>1,0</u> | $\sigma=0,20$                   | -          | 0        | -          | 1        | 7.7.7.6   |
| $A$                       | [m <sup>2</sup> ]     | nor  | Invoer     | <u><math>\sigma=0,01</math></u> | -          | 0        | -          | 1        | 7.7.7.6   |
| $q_c$                     | [m <sup>3</sup> /s/m] | logn | Invoer     | <u><math>V_r=0,15</math></u>    | -          | 0        | -          | 1        | 7.8.1     |
| $B_{sv}$                  | [m]                   | logn | Invoer     | <u><math>\sigma=0,05</math></u> | -          | 0        | -          | 1        | 7.8.2     |
| $P_{f,kw erosie\ bodem}$  | [-]                   | det  | <u>1,0</u> | -                               | -          | 1        | -          | 1        | 7.9.1     |
| $P_{f,herstel\ sluiting}$ | [-]                   | det  | <u>1,0</u> | -                               | -          | -        | -          | -        | 7.10.1    |

Tabel 7-2 Toelichting gegevens vermeld bij parameters

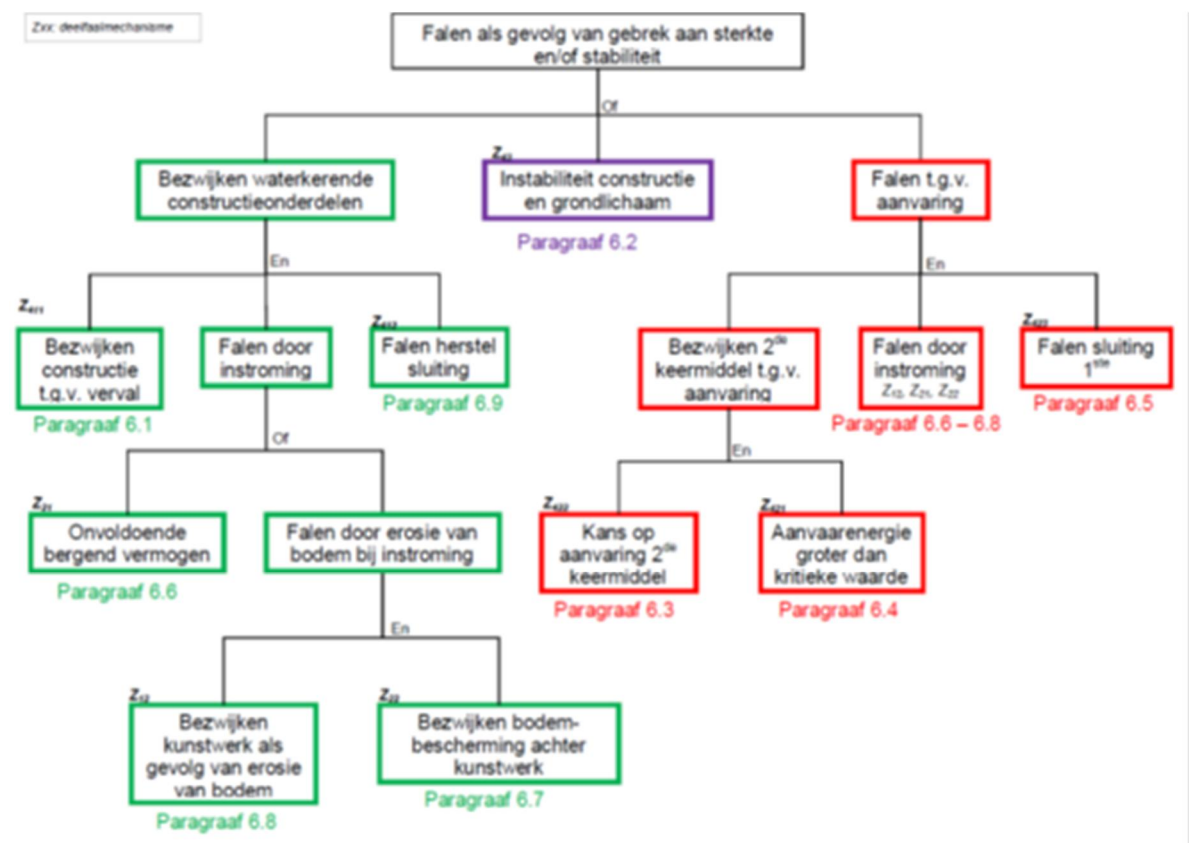
| Gegeven    | Toelichting  |
|------------|--|
| type       | Geeft aan of de parameter een stochast is of een determinist. Indien het een stochast is wordt het type kansverdeling aangegeven. De volgende aanduidingen kunnen voorkomen:<br>det determinist<br>nor normale verdeling<br>logn lognormale verdeling  |
| $\mu$      | Gemiddelde waarde van de parameter. Indien de parameter een determinist is, is dit de deterministische waarde. Indien deze parameter geen standaardwaarde kent, wordt dit aangegeven middels het woordje 'invoer', anders wordt de standaardwaarde vermeld.<br><b>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.</b> |
| $V_r$      | Variatiecoëfficiënt van de parameter. Alleen van toepassing bij een stochast. Er staat altijd een standaardwaarde ingevuld en deze mag alleen worden aangepast indien dit wordt onderbouwd.<br><b>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.</b>   |
| $\sigma$   | Standaarddeviatie van de parameter. Alleen van toepassing bij een stochast. Er staat altijd een standaardwaarde ingevuld en deze mag alleen worden aangepast indien dit wordt onderbouwd.<br><b>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.</b>   |
| $\Delta_x$ | 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 de gebruiker worden aangepast. N.B. De aanduiding 'KW' in de tabellen staat voor 'kunstwerk'.  |
| $\rho_x$   | Ondergrens van de correlatiecoëfficiënt met betrekking tot ruimtelijke spreiding. De waarde kan niet door de gebruiker worden aangepast  |
| $\Delta_t$ | Correlatietijdsduur voor variaties in de tijd. De waarde kan niet door de gebruiker worden aangepast   |
| $\rho_t$   | Ondergrens van de correlatiecoëfficiënt met betrekking tot variaties in de tijd. De waarde kan niet door de gebruiker worden aangepast   |

Voor het toetspoot *sterkte en stabiliteit kunstwerken* geldt dat dit bestaat uit een drietal afzonderlijke faalmechanismen, te weten:

1. Bezijken constructieonderdelen (STCO).
2. Bezijken door instabiliteit constructie en grondlichaam (STCG).
3. Aanvaren tweede keermiddel.

Onder het eerste faalmechanisme (STCO) valt feitelijk ook het faalmechanisme 'aanvaren'. Dit faalmechanisme is in de foutenboom echter als afzonderlijk faalmechanisme vermeld en wordt omwille van de leesbaarheid van dit hoofdstuk ook als apart faalmechanisme behandeld.

De (deel)faalmechanismen worden behandeld in de volgorde waarin ze in de foutenboom in Figuur 6-1, die onderstaand is overgenomen, ook aan bod komen. In paragraaf 7.2 wordt het bezwijken van de constructie-onderdelen door de vervelbelasting besproken. Paragraaf 7.3 behandelt de parameters die behoren bij het faalmechanisme STCG, waarna in paragrafen 7.4, 7.5 en 7.6 het faalmechanisme aanvaren wordt behandeld (middels respectievelijk de deelfaalmechanismen kans op aanvaren, kans op bezwijken na aanvaring en kans op falen van het herstel van een aanvaring). In paragrafen 7.7 tot en met 7.9 wordt ingegaan op de deelfaalmechanismen die de 'reststerkte' beschrijven na bezwijken van het keermiddel door vervelbelasting of aanvaren. Dit betreft het overschrijden van het komberegend vermogen (paragraaf 7.7), het falen van de bodembescherming (paragraaf 7.8) en de kans dat de constructie bezwijkt na falen van de bodembescherming (paragraaf 7.9). In paragraaf 7.10 tenslotte worden de parameters besproken die horen bij de faalkans van het herstel van een alternatieve sluiting nadat het keermiddel constructief is bezweken (STCO). In onderstaande afbeelding van de foutenboom is dit gevisualiseerd.



Figuur 7-1 Leeswijzer hoofdstuk 7 op basis van foutenboom toetsspoor sterkte en stabiliteit kunstwerken

De belangrijkste invoerparameters die in dit hoofdstuk bepaald worden zijn:

- $R_{lin}$  (sterkteterm voor het lineaire belastingmodel voor het faalmechanisme STCO, zie paragraaf 7.2.2.3).
- $R_{kwad}$  (sterkteterm voor het kwadratische belastingmodel voor het faalmechanisme STCO, zie paragraaf 0).
- $R_{stab.verlies, lin}$  (sterkteterm voor het lineaire belastingmodel voor het faalmechanisme STCG, zie paragraaf 7.3.1).
- $R_{stab.verlies, kwad}$  (sterkteterm voor het kwadratische belastingmodel voor het faalmechanisme STCG, zie paragraaf 7.3.2).

## 7.2

### Deelfaalmechanisme Z411 Bezijken constructieonderdelen door vervalbelasting (STCO)

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 danwel 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 Ringtoets automatisch meegenomen, doordat het golfbelastingmodel van Goda-Takahashi in Ringtoets is ingebouwd. Dit model bepaalt op basis van de golfbelastingen uit HydraRing de significante golfhoogte. 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 schematisering van de parameters voor het model van Goda-Takahashi en de parameters voor de sterkte.

De Z-functies voor het bezwijken van constructieonderdelen als gevolg van vervalbelastingen zijn:

$$Z_{lin} = R_{lin} - m_s \cdot S_{lin} \quad \text{lineair model} \quad 7-1$$

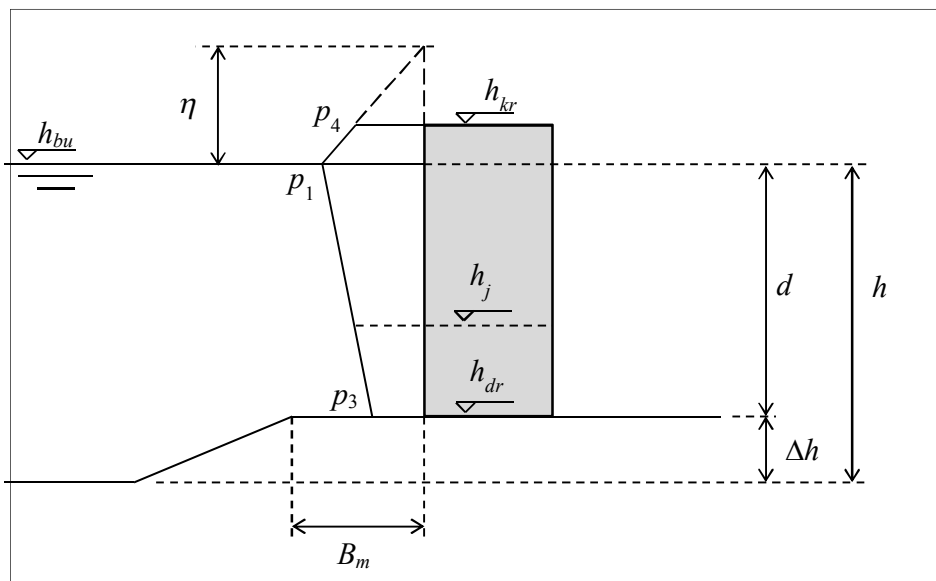
$$Z_{kwad} = R_{kwad} - m_s \cdot S_{kwad} \quad \text{kwadratisch model} \quad 7-2$$

### 7.2.1

#### *Parameters voor het model van Goda*

Het model van Goda 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 7-2 Schematische weergave situatie met golven en parameters Goda-model

In Figuur 7-2 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   |
| $h_{kr}$   | Hoogte bovenkant constructie  |
| $\Delta h$ | Verticale afstand tussen onderkant constructie en teen van de dijk/berm |
| $h_{dr}$   | Drempelhoogte constructie   |

#### Golven

|     |                                    |
|-----|------------------------------------|
| $N$ | Aantal golven per stormgebeurtenis |
|-----|------------------------------------|

#### Modelparameters

|                 |   |
|-----------------|---|
| $\lambda_1$     | Modificatiefactor voor de geometrie van de constructie      |
| $\lambda_2$     | Modificatiefactor voor aard van de constructie              |
| $\theta_{wall}$ | 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 vervallbelasting. De parameter  $h_{dr}$  wordt besproken in paragraaf 7.7.7.5.

#### 7.2.1.1 Bermbreedte

##### Wat is het

| Aanduiding | eenheid | type | $\mu$ | $V_r/\sigma$ | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ |
|------------|---------|------|-------|--------------|------------|----------|------------|----------|
| $B_M$      | [m]     | det  | 0,0   | -            | -          | -        | -          | -        |

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  $\Delta h$  (bermhoogte, zie paragraaf 7.2.1.3) ook een waarde van 0,0 te zijn ingevuld. Er is immers geen bermhoogte.

##### Voorbeeld

N.v.t.

#### 7.2.1.2 Hoogte bovenkant constructie

##### Wat is het

| Aanduiding | eenheid | type | $\mu$  | $V_r/\sigma$  | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ |
|------------|---------|------|--------|---------------|------------|----------|------------|----------|
| $h_{kr}$   | [m NAP] | nor  | invoer | $\sigma=0,05$ | KW         | 0        | -          | 1        |

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.

#### 7.2.1.3 Bermhoogte

##### Wat is het

| Aanduiding | eenheid | type | $\mu$ | $V_r/\sigma$ | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ |
|------------|---------|------|-------|--------------|------------|----------|------------|----------|
| $\Delta h$ | [m]     | det  | 0,0   | -            | -          | -        | -          | -        |

De bermhoogte  $\Delta h$  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 7.2.1.1). Indien er geen berm aanwezig is dienen beide parameters de waarde 0,0 te hebben toegewezen.

#### Voorbeeld

N.v.t.

### 7.2.1.4 Aantal golven per stormgebeurtenis

#### Wat is het

| Aanduiding | eenheid | type | $\mu$ | $V_r/\sigma$ | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ |
|------------|---------|------|-------|--------------|------------|----------|------------|----------|
| N          | [-]     | det  | 5000  | -            | -          | -        | -          | -        |

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.

### 7.2.1.5 Modificatiefactor voor de geometrie van de constructie

#### Wat is het

| Aanduiding  | eenheid | type | $\mu$ | $V_r/\sigma$ | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ |
|-------------|---------|------|-------|--------------|------------|----------|------------|----------|
| $\lambda_1$ | [-]     | det  | 1,0   | -            | -          | -        | -          | -        |

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. Aanpassing van deze waarde is in de *gedetailleerde toets* niet mogelijk.

#### Aandachtspunten

N.v.t.

#### Voorbeeld

N.v.t.

#### 7.2.1.6 Modificatiefactor voor de aard van de constructie

##### Wat is het

| Aanduiding  | eenheid | type | $\mu$ | $V_r/\sigma$ | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ |
|-------------|---------|------|-------|--------------|------------|----------|------------|----------|
| $\lambda_2$ | [-]     | det  | 1,0   | -            | -          | -        | -          | -        |

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

##### Hoe te bepalen

De parameter heeft standaard een waarde van 1,0. Aanpassing van deze waarde is in de *gedetailleerde toets* niet mogelijk.

##### Aandachtspunten

N.v.t.

##### Voorbeeld

N.v.t.

#### 7.2.1.7 Oriëntatie van de normaal van de constructie

##### Wat is het

| Aanduiding    | eenheid | type | $\mu$  | $V_r/\sigma$ | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ |
|---------------|---------|------|--------|--------------|------------|----------|------------|----------|
| $\theta_{kw}$ | [-]     | det  | invoer | -            | -          | -        | -          | -        |

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

##### Hoe te bepalen

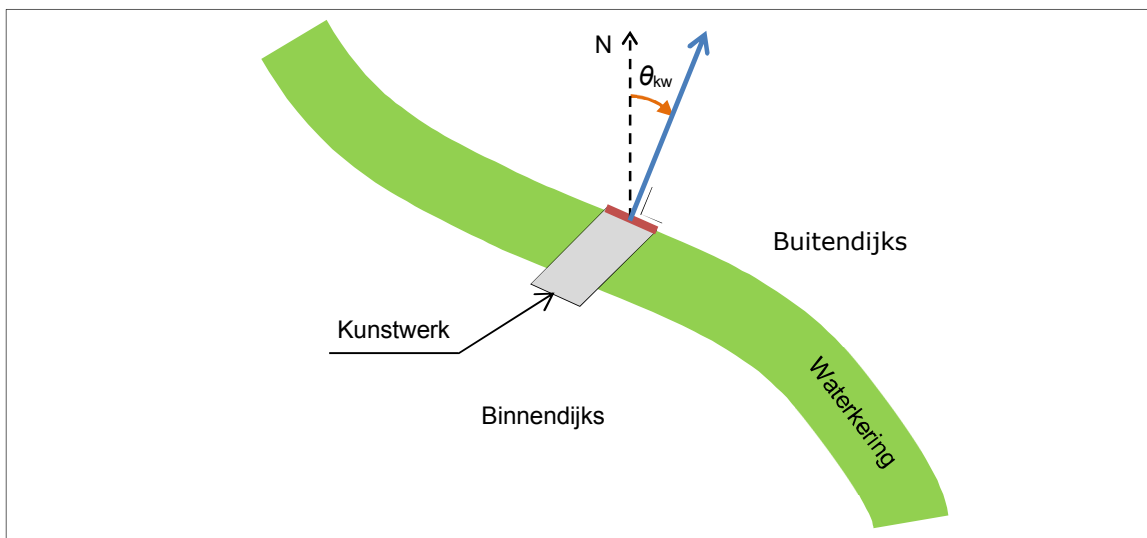
De in te voeren waarde voor deze parameter kan worden afgelezen/opgemeten uit tekeningen of met behulp van kaarten. De normaal van de constructie is hierbij gedefinieerd als de lijn die haaks staat op de langsrichting van de waterkerende elementen. Deze lijn loopt vanaf het waterkerende element richting 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°.



Figuur 7-3 Wijze van bepaling hoek kunstwerknormaal ten opzichte van Noord

### 7.2.2 Parameters voor bezwijkfunctie

In paragraaf 7.3 zijn de Z-functies voor *sterkte en stabiliteit kunstwerken* weergegeven (formules 6-3 en 6-4). Deze formules kennen de volgende invoerparameters:

- Sterkteterm lineair belastingmodel ( $R_{lin}$ ).
- Sterkteterm kwadratisch belastingmodel ( $R_{kwad}$ ).
- Modelfactor belastingeffect ( $m_s$ ).
- Binnenwaterstand met betrekking tot sterkte van de constructie ( $h_{bi;CB}$ ).

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 is de evaluatiehoogte  $h_j$  van belang. Dit 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.

Deze vijf parameters worden in de volgende subparagrafen behandeld.

#### 7.2.2.1 Modelfactor belastingeffect

##### Wat is het

| Aanduiding | eenheid | type | $\mu$ | $V_r/\sigma$  | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ |
|------------|---------|------|-------|---------------|------------|----------|------------|----------|
| $m_s$      | [-]     | nor  | 1,0   | $\sigma=0,05$ | -          | 0        | -          | 1        |

De modelfactor voor het belastingeffect  $m_s$  brengt de onzekerheid in rekening waarmee de belastingen uiteindelijk doorwerken op het belastingeffect (snedekrachten danwel spanningen).

##### 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.

## 7.2.2.2 Evaluatiehoogte

### Wat is het

| Aanduiding | eenheid     | type | $\mu$  | $V_r/\sigma$ | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ |
|------------|-------------|------|--------|--------------|------------|----------|------------|----------|
| $h_j$      | [+m<br>NAP] | det  | invoer | -            | -          | -        | -          | -        |

De evaluatiehoogte  $h_j$  is een parameter die wordt gebruikt om in het geval van het lineaire belastingmodel de belasting op het dominant gekozen keermiddelonderdeel te bepalen en in het geval van het kwadratisch belastingmodel 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 lineaire belastingmodel

Bij gebruik van het lineaire belastingmodel wordt gezocht naar het dominante constructieonderdeel (element) voor de faalkans. De keuze van het dominante constructieonderdeel 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 met 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. Hier 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 evaluatiehoogte  $h_j$ .

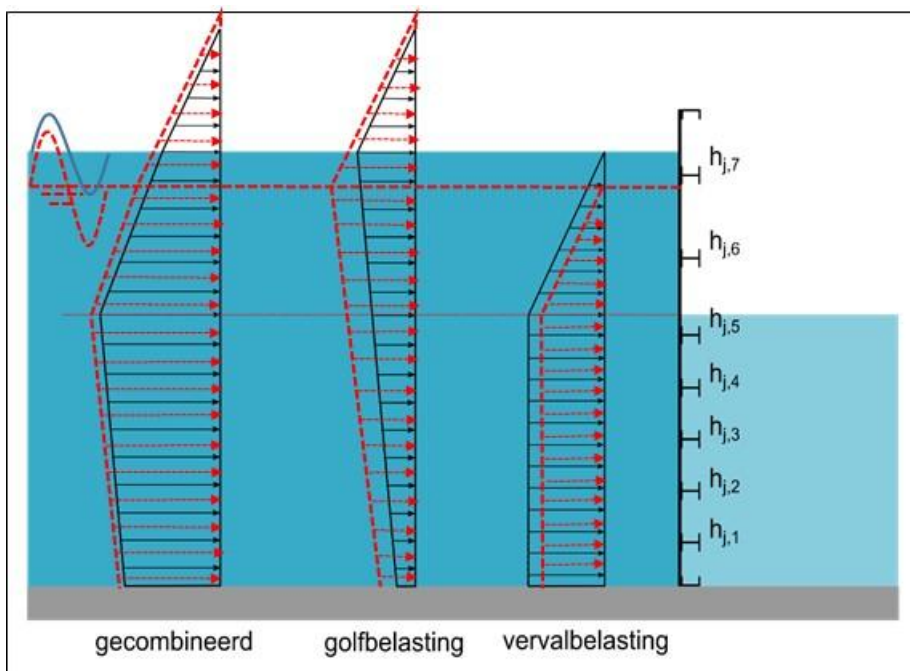
Om het maatgevende onderdeel van de constructie te bepalen kan het nodig zijn dat meerdere analyses met Ringtoets worden gemaakt. De analyse leidend tot de grootste faalkans dient vervolgens als definitieve som ingevoerd te worden.

In paragraaf 7.2.2.3 en 0 wordt aangegeven hoe de lineaire en kwadratische sterkte term  $R_{lin}$  en  $R_{kwad}$  op de evaluatiehoogte 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. Vanuit het ontwerp is gekozen om te werken met identieke dwarsdragers en de dwarsdragers aan de onderzijde van het keermiddel dichter op elkaar te zetten.

Voor het kiezen van het dominante constructieonderdeel dienen de onderstaande drukfiguren geverifieerd te worden aan de hand van een eerste toetsom. Hierbij dient geverifieerd te worden of de drukfiguur die volgt uit het illustratiepunt van de berekening in voldoende mate overeenkomt met de aangenomen drukfiguur bij het bepalen van het maatgevende onderdeel.



Figuur 7-4 Vergelijking van aangenomen (zwart) met berekende drukfiguur o.b.v. illustratiepunt (rood gestippeld); voldoende overeenkomst?

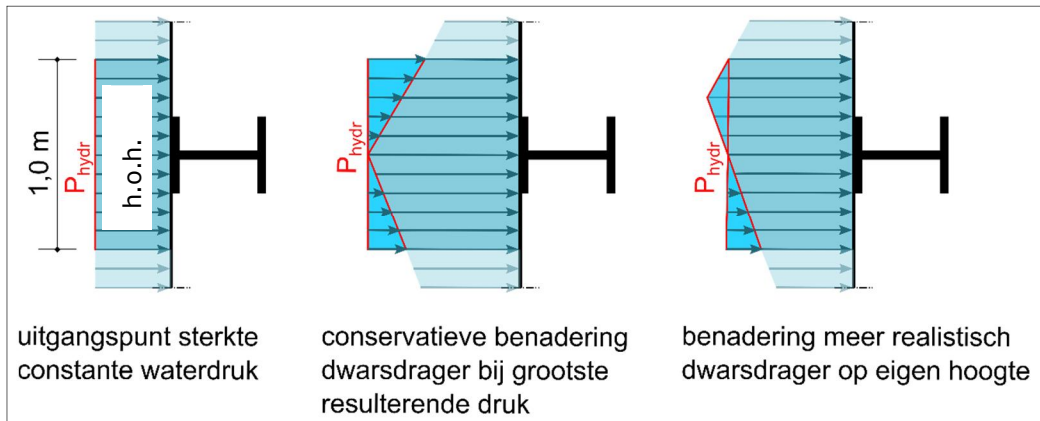
In eerste instantie worden de kerende plaat en de dwarsdragers apart bekeken. Wanneer de dwarsdragers worden beschouwd en dus de sterkte van een dwarsdrager wordt ingevoerd als  $R_{lin}$  in paragraaf 7.2.2.3, kunnen de volgende stappen worden gemaakt om  $h_j$  te bepalen:

#### *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 evaluatiehoogte  $h_j$  voor de onderste vijf dwarsdragers kunnen twee mogelijke waarden worden ingevoerd:

- Optie 1: voor  $h_j$  wordt de hoogte van de binnenwaterstand ingevoerd. Dit is niet de feitelijke hoogte van de vijfde dwarsdrager, maar levert wel de grootste hydraulische belasting op en is daarmee een conservatieve benadering. Bij de toetsberekening van de dwarsdrager gaat Hydra-ring namelijk uit van een constante belasting over de hoogte van de invloedzone van het constructieonderdeel (plaatje 1). Hierdoor wordt impliciet verondersteld dat de piekbelasting over de gehele invloedzone van de dwarsdrager aanwezig is (plaatje 2). Indien de dwarsdrager hier voldoet, voldoet deze ook op de werkelijke hoogte van dwarsdrager ( $h_{j,5}$ ).
- Optie 2: voor  $h_j$  wordt de werkelijke hoogte van  $h_{j,5}$  ingevoerd (plaatje 3). Dit levert een iets minder conservatieve benadering op omdat de vorm van de hydraulische belasting vanuit Ringtoets beter overeenkomt met de ingevoerde sterkte.

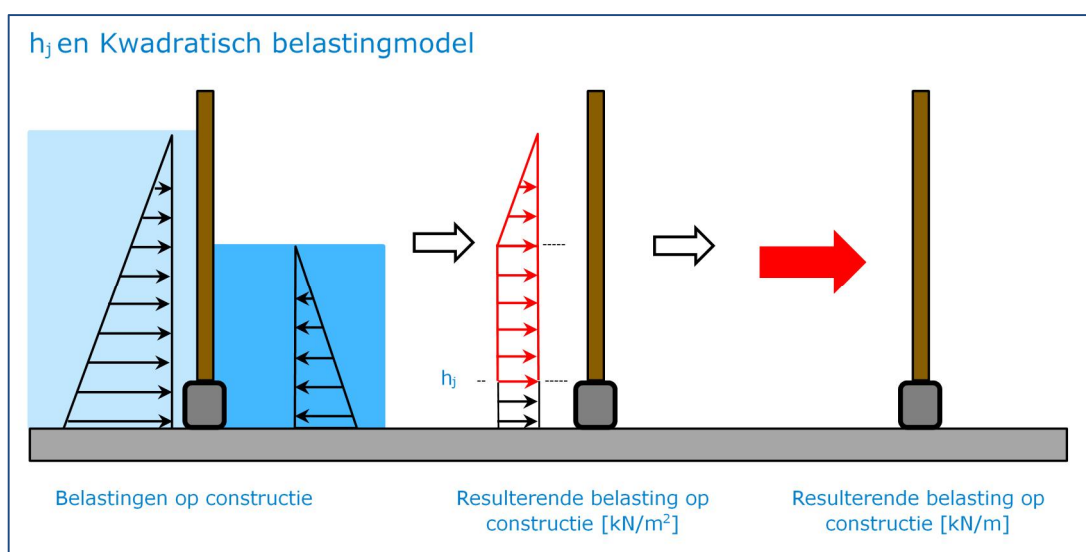


Als evaluatiehoogte  $h_j$  voor de bovenste twee dwarsdragers wordt de hoogte van de zesde dwarsdrager ingevuld ( $h_{j,6}$ ).

Kijkend naar 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 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 evaluatiehoogte  $h_j$ . In Figuur 7-5 is voor het keermiddel (bruine lijn element) de evaluatiehoogte  $h_j$  bepaald.



Figuur 7-5  $h_j$  en het kwadratisch belastingmodel



### 7.2.2.3 Sterkteterm lineair belastingmodel

#### Wat is het

| Aanduiding | eenheid              | type | $\mu$  | $V_r/\sigma$      | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ |
|------------|----------------------|------|--------|-------------------|------------|----------|------------|----------|
| $R_{lin}$  | [kN/m <sup>2</sup> ] | logn | invoer | $V_r=0,10-0,30^*$ | KW         | 0        | -          | 1        |

\* Afhankelijk van materiaal:

- Beton:  $V_R = 0,20$
- Staal:  $V_R = 0,10$
- Hout:  $V_R = 0,25$
- Metselwerk:  $V_R = 0,30$

De sterkteterm in het lineaire belastingmodel  $R_{lin}$  representeert de (dominante) sterkte van het beschouwde constructieonderdeel, waarbij de statische belasting (vervalbelasting) op dit constructieonderdeel als constant wordt aangehouden.

#### Hoe te bepalen

De sterkte van het beschouwde onderdeel moet worden uitgedrukt in een constante hydraulische belasting. Dat betekent dat vanuit de daadwerkelijk aanwezige constructie teruggerekend moet worden naar een kritieke hydraulische belasting. Voor een toelichting op het lineaire model wordt verwezen naar paragraaf 6.1.2. Voor de invoer van de constructieve sterkte geldt dat hier een verwachtingswaarde ingevuld dient te worden.

Afhankelijk van de beschikbare gegevens dient een andere weg te worden gevolgd om tot het gemiddelde van de sterkte te komen. Bij het bepalen van de constructieve sterkte kunnen zich drie situaties voordoen:

- Er kan slechts worden beschikt over de ontwerpwaarde van de sterkte in de vorm van een vervalbelasting.
- Er kan worden beschikt over de ontwerpwaarde van de sterkte in de vorm van berekeningen.
- 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 toetsen kunstwerk gebruik is gemaakt van de toen geldende ontwerpnormen. Wanneer bekend is welke ontwerpnormen zijn gebruikt is ook het toenmalige 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 te worden om vanuit de hierboven beschreven situaties tot een gemiddelde waarde van de constructieve sterkte te komen.

#### *Situatie 1: vervalbelasting bekend*

In dit geval is er een ontwerpwaarde voor de belasting ( $S_d$ ) aanwezig in de vorm van een vervalbelasting. De volgende gegevens dienen dan bekend te zijn, dan wel met redelijke zekerheid te kunnen worden aangenomen:

- Waterstand bij norm buiten (voorheen: ontwerpwaterstand buiten).
- Ontwerp golfbelasting.
- Ontwerpwaterstand 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 ontwerp golfbelasting kan, in het geval dat slechts kleine golfhoogtes zullen optreden, de golfbelasting verwaarloosd worden bij het bepalen van  $R_{in}$ . Dit dient geverifieerd te worden aan de hand van een proefsom uit de hoogtetoets voor kunstwerken en informatie uit het illustratiepunt in Hydra-Ring. In de hoogtetoets van kunstwerken is de waterstand gecorreleerd met de golfbelasting. Dit is fysisch correct.

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 ontwerp normen na 1990 is min of meer toepasbaar voor alle voorgaande normen, omdat de voorgaande normen een vereenvoudigde vorm hebben.

Uitgangspunt bij de volgende wijze van 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 conform de destijds geldende rekenregels zou leiden tot het rekenkundig net voldoen van de constructie ( $S_d=R_d$ ).

#### *Werkwijze situatie 1*

Conform de ontwerp normen 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. Hiervoor kunnen de onderstaande relaties worden gebruikt.

$$\left. \begin{array}{l} S_{d,oud} = \gamma_{S,oud} \times S_{k,oud} \\ R_{d,oud} = \frac{R_{k,oud}}{\gamma_{m,oud}} \end{array} \right\} \quad \gamma_{S,oud} \times S_{k,oud} = \frac{R_{k,oud}}{\gamma_{m,oud}} \Rightarrow R_{k,oud} = \gamma_{m,oud} \times \gamma_{S,oud} \times S_{k,oud}$$

De karakteristieke belasting is bekend omdat het ontwerpverval bekend is. 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. Hiervoor zijn de volgende relaties toepasbaar.

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_R = V_R \times R_{m,oud} \\ R_{m,oud} = \frac{R_{k,oud}}{(1 - 1,64 \times V_R)} \end{array} \right\} R_{m,oud} = \frac{\gamma_{m,oud} \times \gamma_{S,oud} \times S_{k,oud}}{(1 - 1,64 \times V_R)}$$

De variatiecoëfficiënt is gerelateerd aan het materiaal waarvan het constructieonderdeel gemaakt is. Hiervoor kunnen zonder nader onderzoek onderstaande waarden worden gehanteerd:

- Beton:  $V_R = 0,20$
- Staal:  $V_R = 0,10$
- Hout:  $V_R = 0,25$
- Metselwerk:  $V_R = 0,30$

- Stap 4. Pas eventuele reductie toe in verband met ouderdom en/of conditie. Indien de constructie hiertoe aanleiding geeft kan een reductie op de sterkte worden toegepast in de vorm van een percentage. Indien mogelijk dient dit percentage te worden onderbouwd. Onderbouwing kan bijvoorbeeld worden gevonden in 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:

$$R_{m,nieuw} = \gamma_{\Delta R} \times R_{m,oud}$$

De waarde van  $\gamma_{\Delta R}$  zal bijna altijd kleiner zijn dan 1 (afname van de sterkte door achteruitgang van het materiaal). Indien echter tijdens de levensduur onderdelen zijn toegevoegd (bijvoorbeeld oplossen 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  $\text{kN/m}^2$  en bij een kwadratisch belastingmodel een eenheid van  $\text{kN/m}$ .

- Stap 5. Voer de constructieve sterkte van het kunstwerk in in Ringtoets. Hierbij geldt afhankelijk van het belastingmodel (lineair dan wel kwadratisch) het volgende:

$$\left. \begin{array}{l} R_{lin} = R_{m,nieuw} \\ \text{of} \\ R_{kwad} = R_{m,nieuw} \end{array} \right\}$$

#### *Situatie 2: ontwerpwaarde van de sterkte is bekend*

Wanneer wel een ontwerpberekening voorhanden is, dienen 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:

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{\Delta C} &= \frac{\sigma_{d,ontwerp}}{\sigma_{S,d}} \\ S_{d,oud} &= \gamma_{\Delta C} \times \gamma_{S,oud} \times S_{k,ontwerp} \\ R_{d,oud} &= \frac{R_{k,oud}}{\gamma_{m,oud}} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \gamma_{\Delta C} \times \gamma_{S,oud} \times S_{k,ontwerp} &= \frac{R_{k,oud}}{\gamma_{m,oud}} \Rightarrow \\ R_{k,oud} &= \gamma_{\Delta C} \times \gamma_{m,oud} \times \gamma_{S,oud} \times S_{k,ontwerp} \end{aligned}$$

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 (torsieknik en plooi). In de formules voor deze criteria spelen de optredende spanningen een rol in de uiteindelijk toelaatbare spanning.

Indien niet aan bovenstaande criteria wordt voldaan, dient  $\gamma_{\Delta C}$  via een iteratief proces bepaald te worden.

Stap 4. 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 5. Voer de constructieve sterkte van het kunstwerk in Ringtoets in. Hierbij geldt afhankelijk van het belastingmodel (lineair dan wel kwadratisch) het volgende:

$$\begin{array}{l} R_{lin} = R_{m, nieuw} \\ \text{of} \\ R_{kwad} = R_{m, nieuw} \end{array}$$

*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  $\sigma_k$  en  $\tau_k$  dan wel  $\sigma_{rep}$  en  $\tau_{rep}$ ). 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 doorsnede grootheden 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 waarde van de van belang zijnde snedenkrachten 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 van de sterkte te delen door "1-1,64× $V_R$ ". De uitkomst hiervan dient uiteindelijk te worden ingevoerd in Ringtoets. Voor de variatiecoëfficiënt  $V_R$  kan zonder nader onderzoek onderstaande waarde worden gehanteerd:

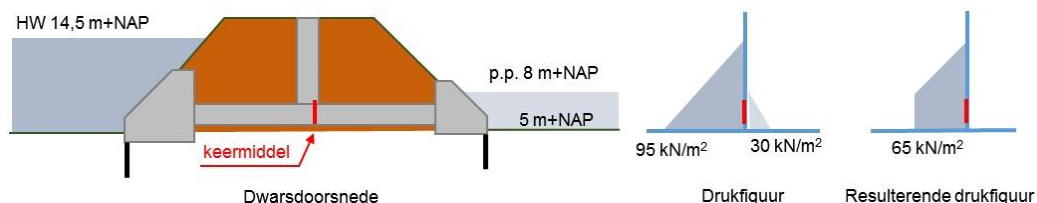
- Beton:  $V_R = 0,20$
- Staal:  $V_R = 0,10$
- Hout:  $V_R = 0,25$
- Metselwerk:  $V_R = 0,30$

#### Aandachtspunten

Voor alle drie de situaties geldt dat de sterkte-term dient te worden gerelateerd aan een bepaalde hoogte, de zogenoemde evaluatiehoogte  $h_j$  (zie paragraaf 7.2.2.2).

#### 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 spindelschuij 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. Er is geen informatie over ontwerp-golfcondities 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.



Figuur 7-6 Dwarsdoorsnede, drukfiguur stationaire waterstand en resulterende drukfiguur

De ontwerpnormen uit deze periode werkten met deterministische materiaalsterktes en belastingen, waarbij veiligheid werd gecreëerd door de vloe- of breuksterkte te reduceren met een reductiefactor  $\gamma$  naar een toelaatbare materiaalspanning ( $\sigma_a$ ). 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 toelaatbare spanning gelijk is aan:

$$S_{d,oud} = R_{d,oud}$$

$$R_{d,oud} = \frac{R_{k,oud}}{\gamma} \rightarrow R_{k,oud} = \gamma \times S_{d,oud} = 1,5 \times 65 = 98 \text{ kN} / \text{m}^2$$

$$R_{m,oud} = \frac{R_{k,oud}}{1 - 1,64 \times V_R} = \frac{98}{1 - 1,64 \times 0,10} = 117 \text{ kN} / \text{m}^2$$

Op basis van de resultaten van een uitgevoerde inspectie wordt ingeschat dat er een afname in sterkte van 20% heeft plaatsgevonden.

$$R_{m,nieuw} = R_{lin} = 0,8 \times 117 = 94 \text{ kN/m}^2$$

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:

$$R_{k,oud} = \gamma_{\Delta C} \times \gamma_{m,oud} \times \gamma_{s,oud} \times S_{k,ontwerp} = 1,25 \times 1,20 \times 1,20 \times 20 = 36 \text{ kN/m}^2$$

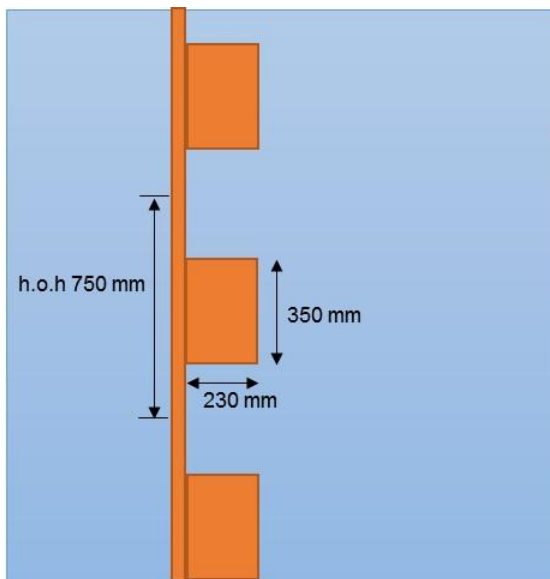
De gemiddelde waarde van de sterkte wordt dan bepaald middels  $R_{m,oud} = 36 / (1 - 1,64 \times 0,25) = 61,0 \text{ kN/m}^2$ .

Hierop wordt nog de sterktegradatie in rekening gebracht, hetgeen resulteert in de volgende waarde voor  $R_{lin}$ :

$$R_{m,nieuw} = R_{lin} = \gamma_{\Delta R} \times 53,5 = 0,60 \times 61,0 = 36,6 \text{ kN/m}^2$$

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 wordt meegenomen



Figuur 7-7 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 III en belastingklasse III. Hierbij hoort een modificatiefactor  $k_{mod}$  van 0,70. De representatieve waarde van de buigsterkte  $\sigma_{rep}$  kan nu als volgt bepaald worden:

$$\sigma_{rep} = f_{m;0;rep} \times k_{mod} \times k_h = 70 \times 0,70 \times 1,0 = 49 \text{ N/mm}^2$$

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  $M_{rep} = \sigma_{rep} \times W = 49 \times 3,085 \cdot 10^6 = 151 \text{ kNm}$ . Hiermee kan de representatieve waarde van de belasting per strekkende meter lengte bepaald worden:

- $q_{rep} = 8 \times M_{rep} / L^2 = 8 \times 151 / 3,69^2 = 88,7 \text{ kN/m}$

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:

$$Q_{rep} = q_{rep} / 0,75 = 88 / 0,75 = 118,3 \text{ kN/m}^2$$

Deze waarde wordt gelijkgesteld wordt aan de karakteristieke sterkte  $R_k$ . Hiermee kan de gemiddelde waarde van de sterkte als volgt berekend worden:

$$R_m = R_{lin} = R_k / (1 - 1,64 \times 0,25) = 200,5 \text{ kN/m}^2$$



#### 7.2.2.4 Sterkteterm kwadratisch belastingmodel

##### Wat is het

| Aanduiding | eenheid | type | $\mu$  | $V_r/\sigma$      | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ |
|------------|---------|------|--------|-------------------|------------|----------|------------|----------|
| $R_{kwad}$ | [kN/m]  | logn | invoer | $V_r=0,10-0,30^*$ | KW         | 0        | -          | 1        |

\* Afhankelijk van materiaal:

- Beton:  $V_R = 0,20$
- Staal:  $V_R = 0,10$
- Hout:  $V_R = 0,25$
- Metselwerk:  $V_R = 0,30$

De sterkteterm in het kwadratische belastingmodel  $R_{kwad}$  representeert de (dominante) sterkte van het beschouwde constructieonderdeel, waarbij de statische belasting (vervalbelasting) op dit constructieonderdeel als (deels) lineair verlopend wordt aangehouden.

##### Hoe te bepalen

De sterkte van het beschouwde onderdeel moet worden uitgedrukt in een constante hydraulische belasting per strekkende meter breedte van het onderdeel. Dat betekent dat vanuit de daadwerkelijk aanwezige constructie teruggerekend moet worden naar een maximaal toelaatbare hydraulische belasting. Voor een toelichting op het kwadratische belastingmodel wordt verwezen naar paragraaf 6.1.2. 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 7.2.2.3.

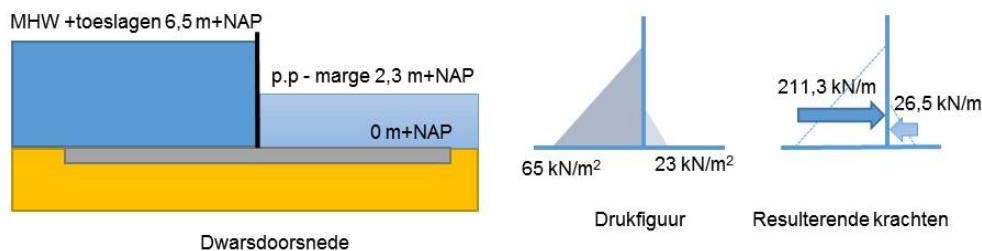
Opgemerkt wordt dat situatie 2 en 3 bij het kwadratisch model sprake kan zijn van een significante inspanning, omdat het lastig en bewerkelijk is van een constructietekening of beschikbare berekening middels een soort van reverse engineering de totale geïntegreerde sterkte over de hoogte van het keermiddel te bepalen. Aanbevolen wordt daarom om waar mogelijk het lineaire belastingmodel toe te passen.

##### Aandachtspunten

De sterkteterm  $R_{kwad}$  dient te worden gerelateerd aan een bepaalde hoogte, de zogenoemde evaluatiehoogte  $h_j$  (zie paragraaf 7.2.2.2).

##### 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. 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 meter - 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 aangenomen dat er nauwelijks golven zullen zijn. Bij de analyse van het faalmechanisme is deze aanname geverifieerd en blijkt te kloppen.



Figuur 7-8 Dwarsdoorsnede, drukfiguur stationaire waterstand en resulterende krachten op sluisdeur

De ontwerpnormen werken met een semiprobabilistisch safety format, waarbij de veiligheid wordt gecreëerd door een materiaalfactor, zie bijlage C. Voor staal geldt een materiaalfactor van 1,5.

$$S_{d,oud} = R_{d,oud} = 65 \times 6,5 \times 0,5 - 23 \times 2,3 \times 0,5 = 184,8 \text{ kN} / m$$

$$R_{d,oud} = \frac{R_{k,oud}}{\gamma} \rightarrow R_{k,oud} = \gamma \times S_{d,oud} = 1,5 \times 184,8 = 277,2 \text{ kN} / m^2$$

$$R_{m,oud} = \frac{R_{k,oud}}{1 - 1,64 \times V_R} = \frac{277,2}{1 - 1,64 \times 0,10} = 332 \text{ kN} / m^2$$

Gelet op levensduur en tevens het structurele onderhoud (inspectie) wordt gesteld dat er een afname in sterkte van 10% heeft plaatsgevonden.

$$R_{m,nieuw} = R_{kwad} = 0,9 \times 332 = 298 \text{ kN} / m$$

#### 7.2.2.5 Binnenwaterstand constructief falen

##### Wat is het

| Aanduiding  | eenheid     | type | $\mu$  | $V_r/\sigma$ | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ |
|-------------|-------------|------|--------|--------------|------------|----------|------------|----------|
| $h_{bi,CB}$ | [+m<br>NAP] | nor  | invoer | $\sigma=0,1$ | KW         | 0        | -          | 1        |

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. Bijvoorbeeld het opzetten van een kolk van een schutsluis (getrapt keren) kan in de analyse middels de parameter  $h_{bi,CB}$  worden meegenomen.

##### Hoe te bepalen

De parameter is altijd van toepassing in een bijzondere situatie. 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.

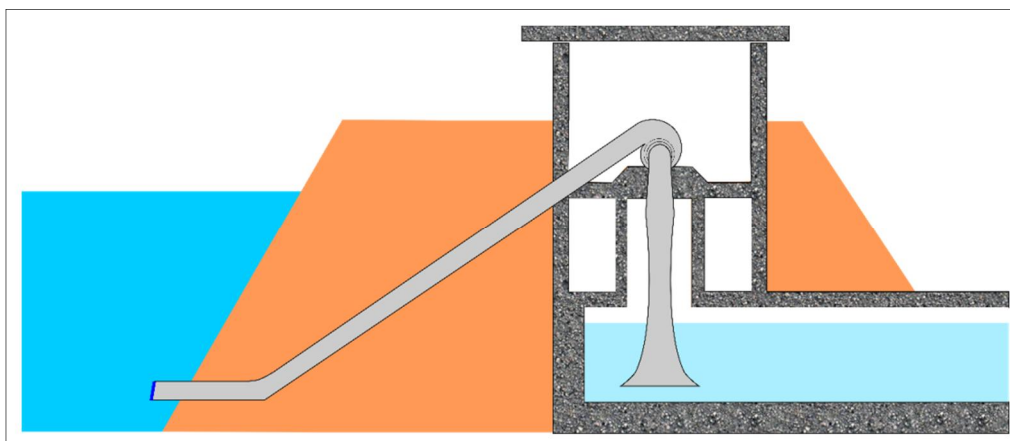
- Een gemaal waarbij de waterstand in de persleiding (en dus direct achter minimaal een van de keermiddelen) afwijkt van de waterstand in de achterliggende watergang. Indien de persleiding alleen instroombaar is via de pomp kan deze situatie zich voordoen. Het is zelfs mogelijk dat de persleiding leeggelopen is en bij een hoogwater er 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

Een gemaal voorzien van een terugslagklep in het buitendijks gelegen uitstroomwerk bevindt zich in een getijdengebied. 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 7-9 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 of wellicht 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 een hoge drempel ontstaat. In de toetspraktijk zal dus nog moeten bezien of dit gemaal geanalyseerd moet worden met Ringtoets.

## 7.3

### **Deelfaalmechanisme Z<sub>43</sub> Instabiliteit constructie en grondlichaam (STCG)**

Het deelfaalmechanisme Z<sub>43</sub> *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. Aangezien dit 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<sub>411</sub> (bezwijken constructieonderdelen door

vervalbelasting, zie paragraaf 7.2), 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 7.2.2.1.

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 7.2.2.1.

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 Ringtoets automatisch meegenomen, doordat het golfbelastingmodel van Goda-Takahashi in Ringtoets 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 7.2.1.

De evaluatiehoogte  $h_j$  is ook van belang. In paragraaf 7.2.2.2 is reeds ingegaan op de evaluatiehoogte.

De Z-functies voor het bezwijken van constructieonderdelen als gevolg van vervalbelastingen zijn:

$$Z_{\text{stab verlies, lin}} = R_{\text{stab verlies, lin}} - m_s \cdot S_{\text{lin}} \quad \text{lineair model} \quad 7-3$$

$$Z_{\text{stab verlies, kwad}} = R_{\text{stab verlies, kwad}} - m_s \cdot S_{\text{kwad}} \quad \text{kwadratisch model} \quad 7-4$$

### 7.3.1 Sterkteterm stabiliteitsverlies lineair belastingmodel

#### Wat is het

| Aanduiding                     | eenheid              | type | $\mu$  | $V_r/\sigma$      | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ |
|--------------------------------|----------------------|------|--------|-------------------|------------|----------|------------|----------|
| $R_{\text{stab verlies, lin}}$ | [kN/m <sup>2</sup> ] | logn | invoer | $V_r=0,10-0,30^*$ | KW         | 0        | -          | 1        |

\* Afhankelijk van materiaal (zie paragraaf 6.2.1.3).

De sterkteterm  $R_{\text{stab verlies, lin}}$  in het lineaire belastingmodel representeert de stabiliteit van de constructie of het als dominant beschouwde deel van de constructie, waarbij de statische belasting (vervalbelasting) op de constructie als constant wordt aangehouden.

#### Hoe te bepalen

De bepaling van de sterkteterm  $R_{\text{stab verlies, lin}}$  in het lineaire belastingmodel wijkt in principe niet af van de bepaling van de term  $R_{\text{lin}}$  bij STCO. Volstaan wordt daarom met een verwijzing naar paragraaf 7.2.2.3.

#### Aandachtspunten

-

#### Voorbeeld

-

### 7.3.2 Sterkteterm stabiliteitsverlies kwadratisch belastingmodel

#### Wat is het

| Aanduiding                      | eenheid              | type | $\mu$  | $V_r/\sigma$      | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ |
|---------------------------------|----------------------|------|--------|-------------------|------------|----------|------------|----------|
| $R_{\text{stab verlies, kwad}}$ | [kN/m <sup>2</sup> ] | logn | invoer | $V_r=0,10-0,30^*$ | KW         | 0        | -          | 1        |

\* Afhankelijk van materiaal (zie paragraaf 6.2.1.3)

De sterkteterm  $R_{\text{stab verlies, kwad}}$  in het kwadratische belastingmodel representeert de stabiliteit van de constructie, waarbij de statische belasting (vervalbelasting) op dit constructieonderdeel als (deels) lineair verlopend wordt aangehouden.

#### Hoe te bepalen

De bepaling van de sterkteterm  $R_{\text{stab verlies, kwad}}$  in het lineaire belastingmodel wijkt in principe niet af van de bepaling van de term  $R_{\text{kwad}}$  bij STCO. Volstaan wordt daarom met een verwijzing naar paragraaf 0.

#### Aandachtspunten

-

#### Voorbeeld

-

### 7.4 Deelfaalmechanisme Z<sub>422</sub> 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 6-1):

- Kans op het bezwijken van keermiddelen als gevolg van aanvaren (paragraaf 7.5).
- Kans op falen van het herstel van een fatale aanvaring (paragraaf 7.6).
- 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<sub>21</sub> (paragraaf 7.7) en Z<sub>22</sub> (paragraaf 7.8).

De kans op aanvaren ( $P_{\text{aanvaring}}$ ) wordt bepaald door de volgende parameters:

- Aantal nivelleringsen per jaar ( $f_{\text{nivellering}}$ ).
- Kans op aanvaring 2<sup>de</sup> keermiddel per nivellering ( $P_{\text{aanvaring};\text{nivellering}}$ ).

De vergelijking voor de kans op aanvaren is:

$$P_{aanvaring} = f_{nivellerin\ g} \cdot P_{aanvaring; nivellerin\ g}$$

7-5

#### 7.4.1

#### Aantal nivelleringen per jaar

Wat is het

| Aanduiding        | eenheid  | type | $\mu$  | $V_r/\sigma$ | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ |
|-------------------|----------|------|--------|--------------|------------|----------|------------|----------|
| $f_{nivellering}$ | [1/jaar] | det  | invoer | -            | -          | -        | -          | -        |

De parameter  $f_{nivellering}$  is het aantal schuttingsen dat met een schutsluis wordt uitgevoerd per jaar

Hoe te bepalen

Het aantal nivelleringen 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 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 kanaalpand is dit bijvoorbeeld niet.
- Nivelleringen die plaatsvinden bij waterstanden lager dan het Open KeerPeil (OKP) behoeven niet te worden beschouwd indien aannemelijk gemaakt kan worden dat het herstellen van het uitvaren van het gesloten keermiddel hersteld kan worden voordat de buitenwaterstand boven het OKP komt. Dit kan een rol spelen bij sluizen in getijdegebieden.
- Het aantal passerende schepen doet niet zozeer ter zake, omdat 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

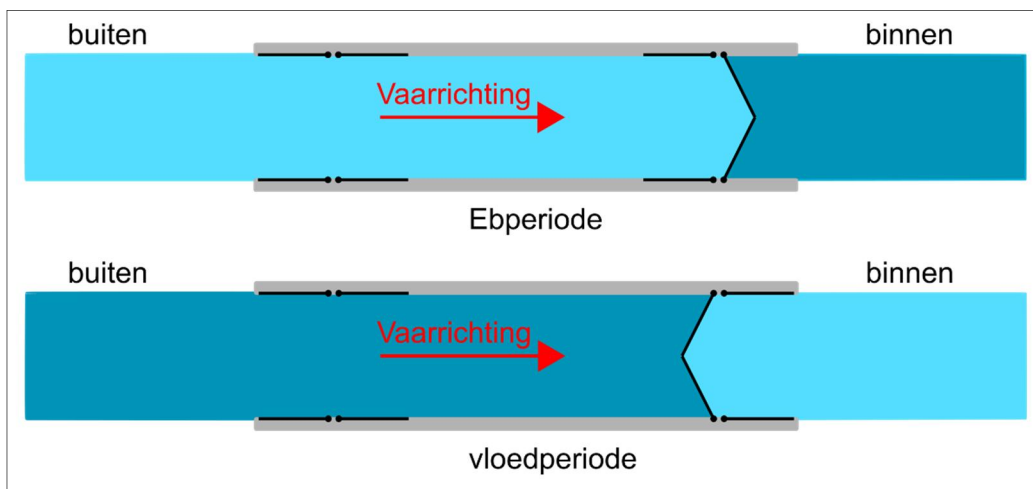
Een schutsluis (maximale scheepsafmetingen conform CEMT-klasse III) in een getijdegebied kent gemiddeld 4.000 nivelleringen per jaar. Deze nivelleringen zijn in beide richtingen gelijk verdeeld, dus 2.000 per jaar per richting. Naast beroepsvaart is er ook de nodige recreatievaart, welke zich alleen 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 het OKP. Het OKP ligt in dit voorbeeld op NAP. 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 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. De overige 60% 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).
- 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 een 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.



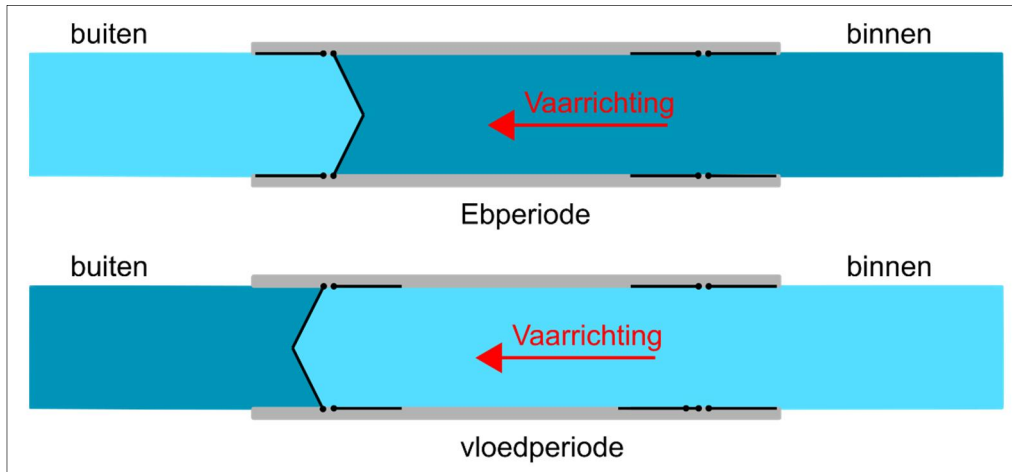
Figuur 7-10 Overzicht schuttings van buiten naar binnen in eb- en vloedperiode

In geval van een ebperiode zal bij aanvaan 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 het OKP) optreedt is geschat op een kans van 1/100. Dit betekent dat van de 400 nivelleringen 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. Van deze 800 vinden er 400 plaats in een ebperiode en 400 in een vloedperiode.



Figuur 7-11 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 er 4 worden meegenomen als mogelijk risicovolle nivelleringen.

In het geval van een vloedperiode geldt het schip tegen het verval in de deur uitvaart. Dit zorgt ervoor dat er een gerede 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. Dus invoer is  $f_{\text{nivellering}} = 608$  [1/jaar].

#### 7.4.2

##### *Kans op aanvaring 2de keermiddel per nivellering*

#### Wat is het

| Aanduiding                          | eenheid         | type | $\mu$  | $V_r/\sigma$ | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ |
|-------------------------------------|-----------------|------|--------|--------------|------------|----------|------------|----------|
| $P_{\text{aanvaring; nivellering}}$ | [1/nivellering] | det  | invoer | -            | -          | -        | -          | -        |

De parameter  $P_{\text{aanvaren, nivellering}}$  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 [12]. 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  $P_{\text{aanvaring;nivellering}} = 1/6.250 = 1,60 \cdot 10^{-4}$  [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 de draad voor het afmeren gebroken is of wordt misgegooid, kan worden verondersteld (en wellicht ook vanuit de bekende gevallen worden bevestigd) dat de aanvaarsnelheid zeer laag is 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].

## 7.5

### **Deelfaalmecanisme Z<sub>421</sub> Aanvaarenergie groter dan kritieke waarde**

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 aanvaarbelasting ( $m_E$ ).
- Massa van het schip ( $m$ ).
- Aanvaarsnelheid ( $v$ ).

De laatste 3 parameters bepalen de optredende aanvaarenergie ( $E_0$ ) welke is gedefinieerd als:

$$E_0 = \frac{1}{2} \cdot m_E \cdot m \cdot v^2 \quad 7-6$$

De -functie voor het bezwijken als gevolg van aanvaren is nu:

$$Z = E_c - \frac{1}{2} \cdot m_E \cdot m \cdot v^2 \quad 7-7$$

### 7.5.1

#### *Kritieke aanvaarenergie waarbij keermiddel bezwijkt*

##### Wat is het

| Aanduiding | eenheid | type | $\mu$         | $V_r/\sigma$ | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ |
|------------|---------|------|---------------|--------------|------------|----------|------------|----------|
| $E_c$      | [kNm]   | logn | <u>invoer</u> | $V_r = 0,3$  | KW         | 0        | -          | -        |

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.

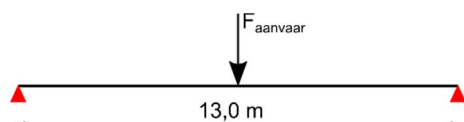
Indien een nadere bepaling van de kritieke aanvaarenergie gewenst is, dienen uitgebreidere sommen te worden gemaakt, waarbij de aannamen steeds minder conservatief zijn. Uiteindelijk kan met een programma met de Eindige Elementen Methode, die ook grote vervormingen toestaat, een nauwkeurige som worden gemaakt.

#### Voorbeeld

Een sluis is uitgerust met stalen hefdeuren, welke bestaan uit een plaat die middels horizontale dwarsdragers (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 heeft aangetoond dat bij een botsing 3 dwarsdragers 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.

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  $\frac{1}{4} \times F_{aanvaar} \times l$ . Hieruit kan de kracht worden berekend die leidt tot het optreden van het plastisch moment. Per dwarsdrager is dit:  $F_p = 4 \times M_p / l = 4 \times 1,4 / 13 = 431,35 \text{ kN}$ . De totale botskracht kan dus  $3 \times 431,35 = 1,29 \text{ MN}$  bedragen.

Bij het optreden van het plastische moment treedt de volgende verplaatsing op (vergeet-mij-nietje):

$$\delta = \frac{F\ell^3}{48EI} = \frac{431,35 \times 13^3}{48 \times 21 \cdot 10^8 \times 86,975 \cdot 10^{-5}} = 108 \text{ mm}$$

De totaal opneembare energie van de deur wordt met deze grove benadering dus gelijk aan  $E_c = F_{p,\text{totaal}} \times \delta = 1,29 \times 0,108 = 0,140 \text{ MNm} = 140 \text{ kNm}$ .

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.

## 7.5.2 Massa van het schip

### Wat is het

| Aanduiding | eenheid | type | $\mu$  | $V_r/\sigma$ | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ |
|------------|---------|------|--------|--------------|------------|----------|------------|----------|
| m          | [ton]*  | nor  | invoer | $V_r = 0,2$  | KW         | 0        | -          | -        |

\* 1 ton = 1.000 kg.

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 2011* [10]. 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':  $f_{\text{nivellering}}$  (paragraaf 7.4.1).

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 studies<sup>13</sup> 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.

<sup>13</sup> Zie onder andere afstudeerrapport "Aanvaarbelastingen door schepen op starre constructies", TUDelft, mei 1993.

### 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 onderstaande tabel, welke is afgeleid uit de Richtlijnen Vaarwegen [10] en afkomstig is uit de Richtlijnen Ontwerpen Kunstwerken [9].

Tabel 7-3 Gegevens scheepsklasse binnenvaart

| Klasse | Type                     | Lengte [m] | Breedte [m] | Diepgang <sup>1</sup> [m] | Massa <sup>2</sup> (ton) |
|--------|--------------------------|------------|-------------|---------------------------|--------------------------|
| 0      | Klein/recreatie          | < 30       | -           | -                         | < 250                    |
| I      | Spits                    | 30 - 50    | 5,05        | 1,80 - 2,20               | 250 - 400                |
| II     | Kempenaar                | 50 - 60    | 6,60        | 2,50                      | 400 - 650                |
| III    | Dormund-Eems kanaalschip | 60 - 80    | 8,20        | 2,50                      | 650 - 1.000              |
| IV     | Rijn-Herne-kanaalschip   | 80 - 90    | 9,50        | 2,50                      | 1.000 - 1.500            |
| Va     | Groot Rijnschip          | 90 - 110   | 11,40       | 2,50 - 2,80               | 1.500 - 3.000            |
| Vb     | Duwvaart 2-baks          | 110 - 180  | 11,40       | 2,50 - 4,50               | 3.000 - 6.000            |
| VIa    | Duwvaart 2-baks          | 110 - 180  | 22,80       | 2,50 - 4,50               | 3.000 - 6.000            |
| VIb    | Duwvaart 4-baks          | 110 - 190  | 22,80       | 2,50 - 4,50               | 6.000 - 12.000           |
| VIc    | Duwvaart 6-baks          | 190 - 280  | 22,80       | 2,50 - 4,50               | 10.000 - 18.000          |
| VII    | Duwvaart 9-baks          | 300        | 34,20       | 2,50 - 4,50               | 14.000 - 27.000          |

<sup>1</sup> Dit is de diepgang van het geladen schip

<sup>2</sup> 1 ton = 1.000 kg. Dit is het waterverplaatsingsvermogen bestaande uit constructie schip, lading en brandstof. De meebewegende watermassa is hierbij niet meegenomen.

Voor gegevens omtrent tonnage van zeeschepen dient specifiek naar de gegevens voor de betreffende sluis te worden gekeken. Een mogelijke indeling is terug te vinden in [9].

Met betrekking tot de duwvaart wordt nog opgemerkt dat een reductie van de massa met een factor 2 valt te overwegen conform [9]. 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

Van een binnenvaartsluis is bekend dat er zowel beroepsvaart als recreatievaart plaatsvindt. Er is geen statistiek bijgehouden conform 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 van de sluis gebruik maken.

De inschatting van de massa kan aan de hand van Tabel 7-3 plaatsvinden. In eerste instantie wordt uitgegaan van een massa 'm' van 825 ton. Dit is het gemiddelde van klasse III. 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 ( $= 825 + 1,65^{14} \times 165$ ) een overschrijdingskans van 5% heeft. Dit lijkt wat aan de conservatieve kant gelet op de gegevens uit Tabel 7-3.

<sup>14</sup> De waarde van 1,65 is afkomstig uit de tabellen met waarden voor de standaardnormale verdeling

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.

### 7.5.3 Modelfactor voor de aanvaarbelasting

#### Wat is het

| Aanduiding | eenheid | type | $\mu$ | $V_r/\sigma$ | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ |
|------------|---------|------|-------|--------------|------------|----------|------------|----------|
| $m_E$      | [-]*    | nor  | 1,0   | $V_r = 0,2$  | KW         | 0        | -          | -        |

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.

### 7.5.4 Aanvaarsnelheid

#### Wat is het

| Aanduiding | eenheid | type | $\mu$  | $V_r/\sigma$ | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ |
|------------|---------|------|--------|--------------|------------|----------|------------|----------|
| v          | [m/s]*  | nor  | invoer | $V_r = 0,55$ | KW         | 0        | -          | 1        |

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 [12]. Hierin zijn voor een aantal sluizen met verschillende vaarwegklasse (CEMT-klasse) vaarsnelheden in kolk gemeten en berekend. Uit deze rapportage is onderstaande tabel afgeleid:

**Tabel 7-4 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            |

| Vaarwegklasse | klasse<br>schip | lading    | Waterdiepte<br>[m] | V <sub>gem</sub><br>[m/s] |
|---------------|-----------------|-----------|--------------------|---------------------------|
|               | 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 7-4:

- 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 scheepvaart 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 4 zijn niet alle klassen sluizen 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 nivellerings (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<br>schip | Status    | aantal | $V_{gem}$<br>[m/s] | massa<br>[ton] | $E_{kin}$<br>[kJm] |
|-----------------|-----------|--------|--------------------|----------------|--------------------|
| 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 4 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 is dat bij bepaling van de energie nog rekening is gehouden met 10% massa toeslag als gevolg van meebewegende watermassa.

## 7.6

### **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:

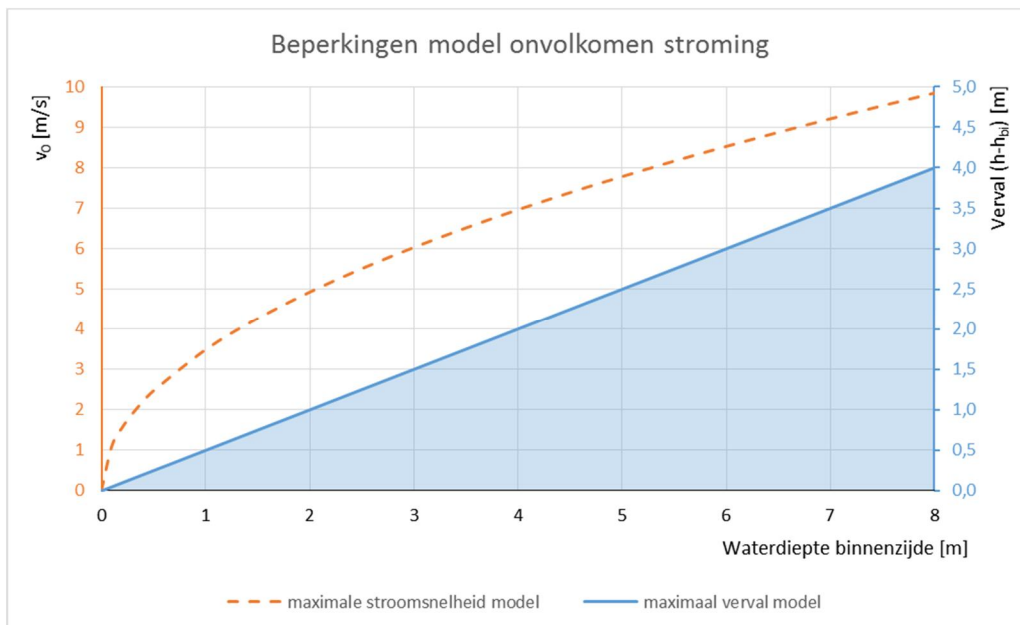
- De kritieke stroomsnelheid waarbij keermiddel nog net gesloten kan worden ( $v_{c,sluit}$ ).
- De buitenwaterstand ( $h$ ). Deze wordt bepaald door het instrumentarium.
- De binnenwaterstand ( $h_{bi}$ ).
- Modelfactor voor onvolkomen stroming ( $m_{onv}$ , zie paragraaf 7.7.7.2).
- Zwaartekrachtversnelling ( $g$ ).

De laatste 4 parameters bepalen de optredende stroomsnelheid in de sluis ( $v_0$ ) met behulp van het model voor een onvolkomen overlaat:

$$v_0 = m_{onv} \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot g \cdot (h - h_{bi})}}{0,9}$$

$$\text{Randvoorwaarde: } h \leq \frac{3}{2} \cdot h_{bi} - \frac{1}{2} \cdot h_{ok} \quad 7-8$$

Bovenstaand model zorgt ervoor dat gezocht wordt naar die buitenwaterstand waarbij de kritieke stroomsnelheid optreedt. 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.



Figuur 7-12 Geldigheidsgebied verval en stroomsnelheid bij maximaal verval in het model voor een onvolkomen overlaat

In de grafiek wordt uitgegaan van de waterdiepte aan de binnenzijde ( $h_{bi}-h_{ok}$ ). Deze staat op de horizontale as uitgezet. De blauwe doorgetrokken lijn geeft aan dat het model van onvolkomen stroming in het instrumentarium kan worden gebruikt (geldigheidsgebied) zolang het verval (verschil tussen buiten- en binnenwaterstand) kleiner of gelijk is aan de helft van de waterdiepte aan de binnenzijde (rechter verticale as; blauw gearceerd vlak). Aangezien de optredende stroomsnelheid bij het model van onvolkomen stroming afhankelijk is van het verval, kan de oranje gestreepte lijn getrokken worden. Deze lijn geeft per waterdiepte aan de binnenzijde weer, welke stroomsnelheid (linker verticale as) maximaal met het model berekend kan worden voordat het buiten het geldigheidsgebied van de onvolkomen stroming komt.

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.

De Z-functie voor het falen van het herstel middels het sluiten van het niet gesloten keermiddel is nu:

$$Z = v_{c,sluit} - m_{onv} \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot g \cdot (h - h_{bi})}}{0,9}$$



#### 7.6.1 Kritieke stroomsnelheid sluiting eerste deur

##### Wat is het

| Aanduiding    | eenheid | type | $\mu$  | $V_r/\sigma$ | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ |
|---------------|---------|------|--------|--------------|------------|----------|------------|----------|
| $V_{c,sluit}$ | [m/s]*  | nor  | Invoer | $V_r = 0,2$  | KW         | 0        | -          | 1        |

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 6.2.1. 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.

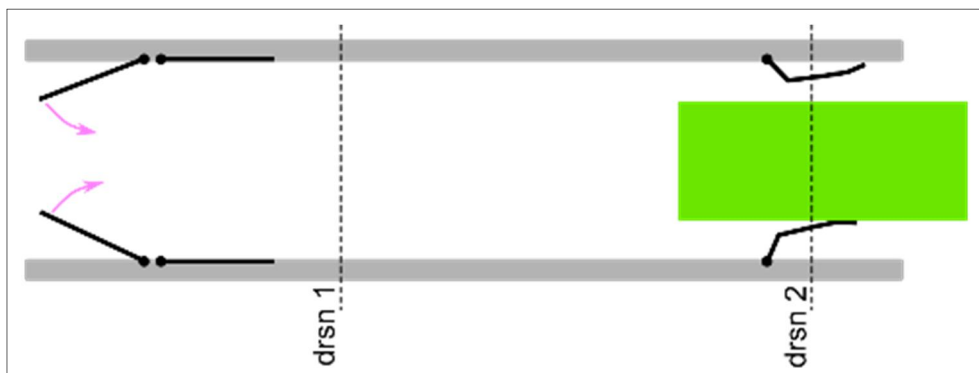
De waarde van de variatiecoëfficiënt kan niet aangepast worden.

##### 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 7-13 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:

$$v_{c;sluit} \times A_1 = v_2 \times A_2 = 1 \times B \times (h - h_{ok}) = m_{onv} \times \frac{\sqrt{2 \times 9,81 \times (h - h_{bi})}}{0,9} \times (B \times (h - h_{ok}) - B_s \times d_s)$$

$$1 \times 15 \times (h - 0,00) - m_{onv} \times \frac{\sqrt{2 \times 9,81 \times (h - 4)}}{0,9} \times (15 \times (h - 0,00) - 12 \times 2,5) = 0$$

Oplossen van bovenstaande vergelijking geeft een buitenwaterstand van NAP + 4,15 m. Hierbij hoort een verval van 0,15 m en dat leidt middels de formule 6-8 tot een stroomsnelheid van 1,93 m/s. Dit betekent dat  $v_{c;sluit} = 1,93$  m/s.

## 7.6.2 Binnenwaterstand

### Wat is het

| Aanduiding | eenheid | type | $\mu$  | $V_r/\sigma$  | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ |
|------------|---------|------|--------|---------------|------------|----------|------------|----------|
| $h_{bi}$   | [+mNAP] | nor  | invoer | $\sigma=0,10$ | KW         | 0        | -          | 1        |

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 7.7.7.4). 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 *sterkte 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 7.2.2.5). Verwisseling van de parameters dient uiteraard voorkomen te worden.

### Voorbeeld

Niet van toepassing.

## 7.7 Deelfaalmecanisme Z21 Onvoldoende bergend vermogen (STCO, aanvaren)

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 ( $\Delta h_{kom}$ ).
- 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:

$$V_c = m_{kom} \cdot A_{kom} \cdot \Delta h_{kom} \quad 7-10$$

De parameters betreffen de 'belasting' van het systeem en worden ook aangeduid als Instromend volume achterland ( $V_{instroom}$ ) welke is gedefinieerd als:

$$V_{instroom} = m_{in} \cdot f_{ts|open} \cdot t_s \cdot Q_{in|open} \quad 7-11$$

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

$$Z = V_c - V_{instroom} = m_{kom} \cdot A_{kom} \cdot \Delta h_{kom} - m_{in} \cdot f_{ts|open} \cdot t_s \cdot Q_{in|open} \quad 7-12$$

In het achtergrondrapport [3] wordt dieper op de achtergronden van komberging ingegaan.

Belangrijk aandachtspunt is dat het kombergingsmodel in de volgende situatie niet toegepast hoeft te worden:

- Als op voorhand het duidelijk is (en globaal aantoonbaar) 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 hiermee maatgevend.

Het kombergingsmodel kan in het bovenstaande geval worden gevuld met dusdanig grote waarden, dat de faalkansbijdrage van dit deelfaalmecanisme in Ringtoets verwaarloosbaar klein wordt.

### 7.7.1 Modelfactor kombergend vermogen

#### Wat is het

| Aanduiding | eenheid | type | $\mu$ | $V_r/\sigma$  | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ |
|------------|---------|------|-------|---------------|------------|----------|------------|----------|
| $m_{kom}$  | [-]     | logn | 1,0   | $\sigma=0,20$ | KW         | 0        | -          | 1        |

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.

## 7.7.2 Kombergend oppervlak

### Wat is het

| Aanduiding | eenheid           | type | $\mu$  | $V_r/\sigma$ | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ |
|------------|-------------------|------|--------|--------------|------------|----------|------------|----------|
| $A_{kom}$  | [m <sup>2</sup> ] | logn | Invoer | $V_r=0,10$   | KW         | 0        | -          | 1        |

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  $\Delta h_{kom}$  (zie paragraaf 7.7.3).

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:

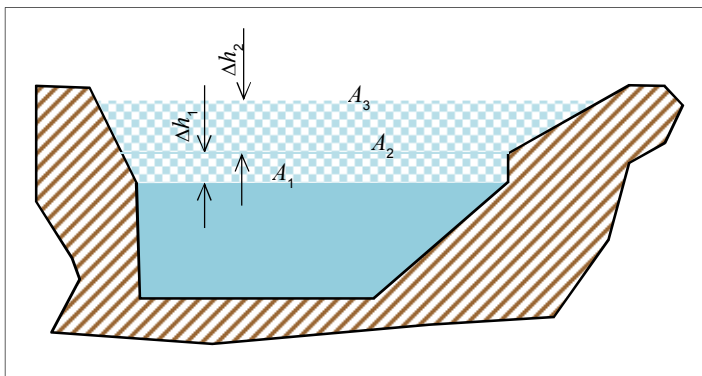
- 1 Toestroming van water vanuit het binnenland kan niet specifiek gemodelleerd worden, maar wel globaal worden meegenomen in de sommen. Deze toestroming kan plaatsvinden onder normaal verval, maar ook via poldergemalen die hun water lozen op de boezem.
- 2 Een kombergend volume kan worden benut door meerdere kunstwerken in een dijktraject. Indien de correlatie met betrekking tot *sterkte constructieonderdelen* groot is tussen deze kunstwerken<sup>15</sup>, 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 benut 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.
- 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 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

<sup>15</sup> Bijvoorbeeld kunstwerken die (nagenoeg) identiek zijn met betrekking tot vervalbelastingen en kerende hoogte in gesloten toestand

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  $\Delta h_{kom}$  is gelijk aan  $\Delta h_1 + \Delta h_2$ . Er zijn drie oppervlakten in de dwarsdoorsnede bepaald, te weten  $A_1$ ,  $A_2$  en  $A_3$ .



Figuur 7-14 Watergang waarbij natte oppervlak niet rechtevenredig 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 ( $Q_{pomp}$  m<sup>3</sup>/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  $Q_{achterland}$  m<sup>3</sup>/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::

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

Waarin:

|                  |   |
|------------------|---|
| $V_{c,kw}$       | Kombergend vermogen beschikbaar voor het beschouwde kunstwerk [m <sup>3</sup> ].  |
| $A_{gem}$        | Het vanuit kombergend gemiddeld beschikbare oppervlak [m <sup>2</sup> ].  |
| $\Delta h_{kom}$ | Toelaatbare peilverhoging op het binnenwater (zie §7.7.3) [m].  |
| $V_{achterland}$ | Ingestroomd volume als gevolg van aanvoer vanuit het achterland op het moment dat bezwijken van het constructieonderdeel plaatsvindt [m <sup>3</sup> ]. |

- $V_{pompen}$  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 ( $f_{ts|open} \times t_{hoogwater}$ ) kan de formule worden omgeschreven naar:

$$V_{c,kw} = A_{gem} \cdot \Delta h_{kom} + (Q_{pompen} - Q_{achterland}) \cdot f_{ts|open} \cdot t_{hoogwater} - \sum_{i=1}^{i=n} V_{kw,i}$$

De diverse parameters kunnen nu worden uitgewerkt:

$A_{gem}$ : Het gemiddelde beschikbare kombergend oppervlak is in dit geval gelijk aan (zie figuur vorige pagina):

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

$\Delta h_{kom}$  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 *sterkte constructieonderdelen* heeft. De keermiddelen van de schutsluis hebben een aanmerkelijk grotere sterkte.

$V_{kw,i}$  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  $K_{kw}$ .

$f_{ts|open}$  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:

$$V_{c,kw} = A_{gem} \cdot \Delta h_{kom} + (Q_{pompen} - Q_{achterland}) \cdot f_{ts|open} \cdot t_{hoogwater} - V_{c,kw}$$

$$V_{c,kw} = \frac{1}{2} \cdot (A_{gem} \cdot \Delta h_{kom} + (Q_{pompen} - Q_{achterland}) \cdot f_{ts|open} \cdot t_{hoogwater})$$

Het in te voeren kombergend oppervlak wordt nu:

$$A_{gem} = \frac{V_{c,kw}}{\Delta h_{kom}} = \frac{1}{2} \cdot A_{gem} + \frac{(Q_{pompen} - Q_{achterland}) \cdot 0,60 \cdot t_{hoogwater}}{2 \cdot \Delta h_{kom}}$$

### 7.7.3 Kritieke peilverhoging komberging

Wat is het

| Aanduiding | eenheid | type | $\mu$ | $V_r/\sigma$ | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ |
|------------|---------|------|-------|--------------|------------|----------|------------|----------|
|------------|---------|------|-------|--------------|------------|----------|------------|----------|

|                  |     |      |        |               |    |   |   |   |
|------------------|-----|------|--------|---------------|----|---|---|---|
| $\Delta h_{kom}$ | [m] | logn | Invoer | $\sigma=0,10$ | KW | 0 | - | 1 |
|------------------|-----|------|--------|---------------|----|---|---|---|

De parameter  $\Delta h_{kom}$  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:

|                  |   |
|------------------|---|
| $\Delta h_{kom}$ | Toelaatbare peilverhoging van het kombergend oppervlak [m].     |
| $h_{bi;toel}$    | Maximaal toelaatbare (kritieke) peil op het binnenwater [mNAP]. |
| $h_{bi;streef}$  | Streefpeil 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)
- 0,20 m water op straat/maaienveld staat (indien het watersysteem van de komberging is omringd door kades die niet door kunnen breken of als achter de kering geen regionaal watersysteem aanwezig is)

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

Voor het kritieke binnenpeil wordt dus in principe die waterstand aangehouden die past bij de normering van de achterliggende kades. Dit kan alleen worden toegepast als de achterliggende kades hier ook daadwerkelijk op zijn getoetst. Indien dit niet het geval is, kan het gebeuren dat er geen correct beeld van de veiligheid ontstaat. De kades kunnen immers wel genormeerd zijn met een bijbehorende waterstand, maar als ze hierop niet getoetst zijn, zegt deze normering niets over de daadwerkelijk aanwezige sterkte van deze kades en daarmee over de daadwerkelijke veiligheid van de primaire kering.

Het binnenpeil is het peil dat onder hoogwateromstandigheden 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 kwel<sup>16</sup> 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

<sup>16</sup> 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 de schematisering is ervoor gekozen om middels de parameter van het kombergend oppervlak ( $A_{kom}$  zie paragraaf 7.7.2) 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  $\Delta h_{kom} = \text{NAP} + 2,80 \text{ m} - \text{NAP} + 1,60 \text{ m} = 1,20 \text{ m}$ .

#### 7.7.4 *Modelfactor instromend volume*

##### Wat is het

| Aanduiding | eenheid | type | $\mu$ | $V_r/\sigma$  | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ |
|------------|---------|------|-------|---------------|------------|----------|------------|----------|
| $m_{in}$   | [-]     | logn | 1,0   | $\sigma=0,20$ | KW         | 0,4      | -          | 1        |

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. Zowel het gemiddelde als de standaardafwijking kunnen niet worden aangepast.

##### Aandachtspunten

n.v.t.

##### Voorbeeld

n.v.t.

#### 7.7.5 *Factor voor stormduur hoogwater gegeven geopend kunstwerk*

##### Wat is het

| Aanduiding    | eenheid | type | $\mu$ | $V_r/\sigma$ | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ |
|---------------|---------|------|-------|--------------|------------|----------|------------|----------|
| $f_{is open}$ | [-]     | det  | 1,0   | -            | -          | -        | -          | 0        |

De parameter  $f_{is|open}$  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 toets de score 'voldoet niet' is, 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 7.7.6) niet de gehele geschematiseerde stormduur in te voeren.

#### Voorbeeld

n.v.t.

### 7.7.6

#### *Stormduur*

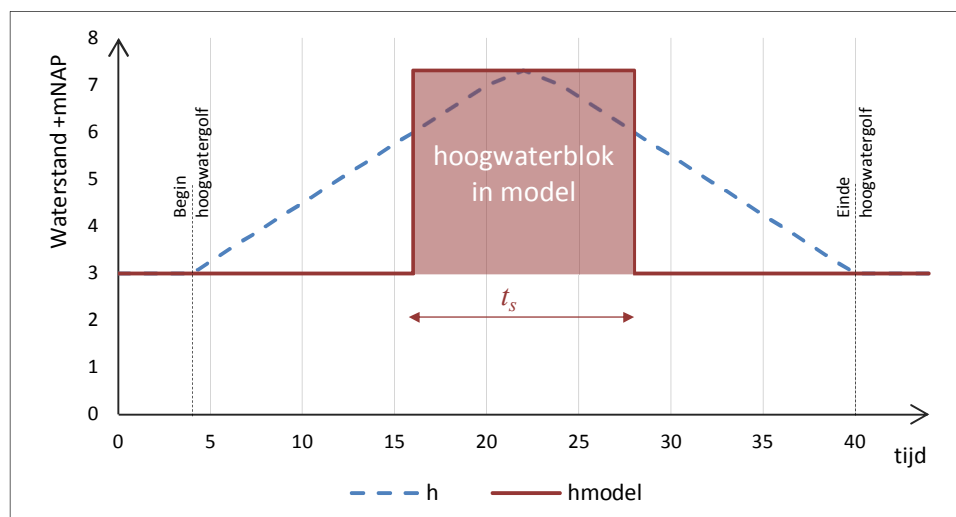
##### Wat is het

| Aanduiding | eenheid | type | $\mu$ | $V_r/\sigma$ | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ |
|------------|---------|------|-------|--------------|------------|----------|------------|----------|
| $t_s$      | [uur]   | logn | 6,0   | $V_r=0,25$   | KW         | 1        | -          | 0        |

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 het kritiek debiet lognormaal is verdeeld. Om die verdeling te karakteriseren moet de verwachtingswaarde  $\mu$  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 Ringtoets 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 7-15 Schematisering verloop hoogwatergolf in Ringtoets

In Ringtoets wordt de verwachtingswaarde voor de stormduur door de gebruiker opgegeven. Aanbevolen wordt om in eerste instantie te rekenen met een verwachtingswaarde van 6 uur. Omdat deze modellering grof is, is het mogelijk om de verwachtingswaarde 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 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.

Ten behoeve van de schematisering wordt de volgende werkwijze voorgesteld:

- Indien het om een klein kunstwerk (kokerconstructies, coupures, kleine sluizen) gaat, hanteer standaardwaarde van 6,0 uur. Uitgangspunt hierbij is dat een klein kunstwerk na 6,0 uur instroming alternatief gesloten moet kunnen zijn.
- Indien het om een groot kunstwerk gaat met een relatief hoge drempel, hanteer een standaardwaarde van 6,0 uur. Uitgangspunt hierbij is dat de drempelhoogte dusdanig is, dat slechts 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. Voor een kunstwerk aan de kust kan een tijdsduur van 6,0 uur dan wellicht nog steeds volstaan. In het rivierengebied is dit vermoedelijk te kort.

#### 7.7.7 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 bezweken constructieonderdeel. Er zijn een tweetal modellen beschikbaar met elk hun eigen formules. Hieronder zijn per model de formules gegeven (deze zijn overgenomen uit paragraaf 4.3.2 [15]). Sommige parameters komen in meerdere formules voor. Na de formules worden de diverse parameters stuk voor stuk besproken in onderstaande subparagrafen.

##### Lage drempel

Onvolkomen stroming:

$$Q_{in|open} = B \cdot m_{onv} \cdot (h_{bi} - h_{dr}) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h - h_{bi})} \quad h < \frac{3}{2} \cdot h_{bi} - \frac{1}{2} \cdot h_{dr} \quad 7-13$$

Volkomen stroming:

$$Q_{in|open} = B \cdot m_{OL} \cdot 0,55 \cdot \sqrt{g \cdot (h - h_{dr})^3} \quad h \geq \frac{3}{2} \cdot h_{bi} - \frac{1}{2} \cdot h_{dr} \quad 7-14$$

##### Stroming door verdronken koker

$$Q_{in|open} = \mu \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h - h_{bi})} \quad 7-15$$

De keuze voor het toe te passen model dient in Ringtoets 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:

| Kunstwerkttype | Model   |
|----------------|---|
| Coupure        | Lage drempel, waarbij door de invoer van parameters het programma automatisch zal uitkomen bij de formules voor volkomen 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). |

| Kunstwerktype                    | Model   |
|----------------------------------|---|
| 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<br>uitwateringssluis | Verdronken koker. De leiding(en) van een inlaatsluis bevindt/bevinden zich soms geheel onder water (duikerconstructie).<br>Lage drempel. Soms zijn het doorgangen met geen begrenzing aan de bovenzijde. Er is wel direct contact tussen binnen- en buitenwater |

#### 7.7.7.1 Breedte van doorstroomopening(en)

##### Wat is het

| Aanduiding | eenheid | type | $\mu$  | $V_r/\sigma$  | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ |
|------------|---------|------|--------|---------------|------------|----------|------------|----------|
| <i>B</i>   | [m]     | nor  | invoer | $\sigma=0,05$ | KW         | 0        | -          | 1        |

De parameter *B* is de breedte van de doorstroomopening(en).

##### Hoe te bepalen

De doorstroombreedte van de opening(en) waardoor het water stroomt als een constructieonderdeel bezwiken 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.

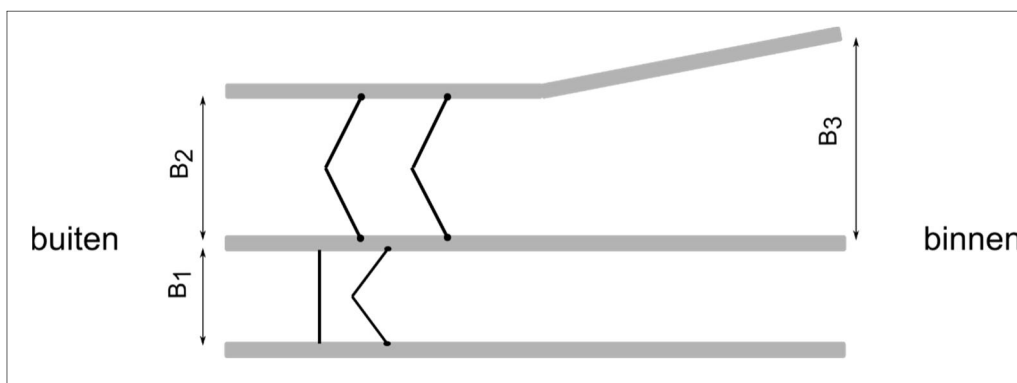
##### Aandachtspunten

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 7-16 Voorbeeld uitwateringssluis

Op basis van de analyse wordt gesteld dat de doorstroomopening met de twee stel puntdeuren het eerste watervoerend zal zijn als gevolg van bezwijken van de keermiddelen. Uitgangspunt hierbij is 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.

#### 7.7.7.2 Modelfactor overloopdebiet volkomen overlaat

##### Wat is het

| Aanduiding | eenheid | type | $\mu$ | $V_r/\sigma$  | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ |
|------------|---------|------|-------|---------------|------------|----------|------------|----------|
| $m_{OL}$   | [-]     | nor  | 1,1   | $\sigma=0,03$ | KW         | 0        | -          | 1        |

De parameter  $m_{OL}$  is de modelfactor voor overloopdebiet door een volkomen overlaat.

##### Hoe te bepalen

De parameter betreft een modelparameter die behoort bij situatie waarin sprake is van volkomen stroming. Dit betekent dat instromend debiet niet beïnvloed wordt door het binnenwater. In de formule voor volkomen stroming wordt  $m_{OL}$  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  $m_{OL}$  is een conservatieve waarde. Aanpassing van deze waarde wordt 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 geen verdere aandachtspunten.

##### Voorbeeld

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

### 7.7.7.3 Modelfactor voor onvolkomen stroming

Wat is het

| Aanduiding | eenheid | type | $\mu$ | $V_r/\sigma$ | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ |
|------------|---------|------|-------|--------------|------------|----------|------------|----------|
| $m_{onv}$  | [-]     | nor  | 1,0   | $V_r=0,1$    | KW         | 0        | -          | 1        |

Modelfactor voor onvolkomen stroming (onvolkomen overlaat).

#### Hoe te bepalen

De parameter betreft een modelparameter die behoort bij situatie waarin sprake is van onvolkomen stroming. Dit betekent dat instromend water wordt opgestuwd door het binnenwater, waardoor het binnenwater van invloed is op het instromende debiet. De parameter brengt een tweetal effecten in rekening. Het eerste heeft betrekking op de schematisering die bij afleiding van het model voor een onvolkomen stroming wordt toegepast. Het tweede effect dat wordt ingebracht via de parameter betreft de wrijving en de vormgeving van de overlaat. Voor meer informatie wordt verwezen naar de diverse vakliteratuur (bijvoorbeeld [13]) aangaande vloeistofmechanica.

Er bestaan twee soorten overlaten, de korte en de lange overlaat. Bij een korte overlaat zijn de stroomlijnen boven de overlaat gekromd, terwijl de stroomlijnen bij een lange overlaat nagenoeg helemaal horizontaal lopen. Bij de kunstwerken die worden bekeken is over het algemeen sprake van een lange overlaat.

De waarde van  $m_{onv}$  ligt voor stroomsluizen fungerende als lange overlaat tussen de 0,7 en 1,4 in. Standaard is een waarde van 1,0 aangehouden in het programma. Geadviseerd wordt om hier alleen van af te wijken indien hier een nadere onderbouwing aan ten grondslag ligt. Deze onderbouwing kan worden opgesteld met behulp van de diverse vakliteratuur. Opgemerkt wordt dat voor korte overlaten de waarde van  $m_{onv}$  maximaal circa 40% hoger is dan voor lange overlaten. Dit betekent dat de standaardwaarde voor een eventuele korte overlaat circa 1,4 bedraagt.

De variatiecoëfficiënt 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]).

### 7.7.7.4 Binnenwaterstand

Wat is het

| Aanduiding | eenheid | type | $\mu$  | $V_r/\sigma$  | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ |
|------------|---------|------|--------|---------------|------------|----------|------------|----------|
| $h_{bi}$   | [+mNAP] | nor  | invoer | $\sigma=0,10$ | KW         | 0        | -          | 1        |

De parameter  $h_{bi}$  is het waterpeil aan de binnendijkse zijde van het kunstwerk. De parameter  $h_{bi}$  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 7.6.2).

#### 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 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 *sterkte 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 7.2.2.5). 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 7.6.2). 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.

#### 7.7.7.5 Drempelhoogte niet gesloten kering

##### Wat is het

| Aanduiding | eenheid | type | $\mu$  | $V_r/\sigma$  | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ |
|------------|---------|------|--------|---------------|------------|----------|------------|----------|
| $h_{dr}$   | [+mNAP] | nor  | invoer | $\sigma=0,10$ | KW         | 0        | -          | 1        |

De parameter  $h_{dr}$  is de hoogte van de bovenkant van de constructie die uiteindelijk het instromende debiet bepaald. De parameter behoort bij het model 'lage drempel' en 'verdrongen koker' ter bepaling van het instromende debiet bij een niet gesloten (bezweken) kering.

#### 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.

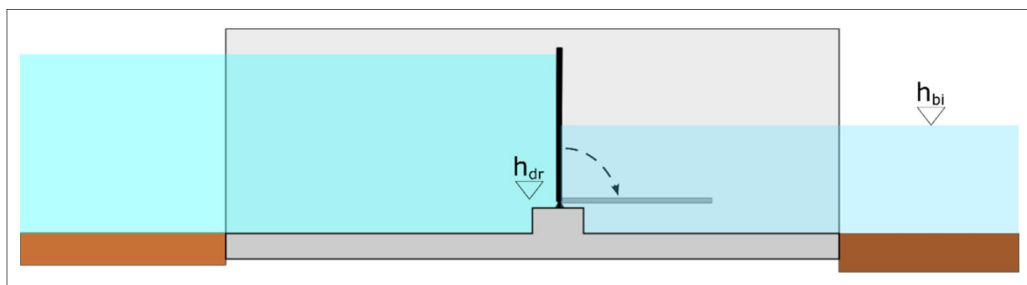
De standaardafwijking kan worden aangepast indien dit kan worden onderbouwd.

#### Aandachtspunten

De parameter behoort bij het model waarmee de 'belasting' (instromende debiet over bodembescherming) bepaald wordt. Het instromende debiet wordt gedicteerd door de kleinste doorstroomopening die in het kunstwerk aanwezig is en welke niet gesloten is na bezwijken van het keermiddel.

#### Voorbeeld

Onderstaand voorbeeld geeft een doorsnede over een kunstwerk waarin een stuw aanwezig is.



Figuur 7-17 Voorbeeld stuw

Wanneer de stuwklep bezwiken 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.

#### 7.7.7.6 Afvoercoëfficiënt verdronken koker

##### Wat is het

| Aanduiding | eenheid | type | $\mu$ | $V_r/\sigma$  | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ |
|------------|---------|------|-------|---------------|------------|----------|------------|----------|
| $\mu$      | [-]     | nor  | 1,0   | $\sigma=0,20$ | KW         | 0        | -          | 1        |

De parameter  $\mu$  is de afvoercoëfficiënt bij toepassing van het model 'verdronken koker'.

##### 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  $\mu$  wordt verwezen naar de vakliteratuur (bijvoorbeeld [13]).

De standaardwaarde voor het gemiddelde van  $\mu$  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]).

#### 7.7.7.6. Doorstroomoppervlak van doorstroomopening(en)

##### Wat is het

| Aanduiding | eenheid           | type | $\mu$  | $V_r/\sigma$  | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ |
|------------|-------------------|------|--------|---------------|------------|----------|------------|----------|
| $A$        | [m <sup>2</sup> ] | logn | invoer | $\sigma=0,01$ | KW         | 0        | -          | 1        |

De parameter  $A$  is het doorstroomoppervlak van de doorstroomopening(en). De parameter is van belang bij het model 'verdrongen koker' waarmee het instromende debiet kan worden bepaald indien de keermiddelen bezwijken.

##### Hoe te bepalen

De doorstroomoppervlakte van de opening(en) waardoor het water stroomt als de keermiddelen bezwijken 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.

#### 7.8 **Deelfaalmecanisme Z<sub>22</sub> Falen bodembescherming achter constructie (STCO, aanvaren)**

Falen van de bodembescherming achter de constructie treedt op 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<sup>3</sup>/s/m] wordt vermenigvuldigd met de stroomvoerende breedte  $B_{sv}$  ter plaatse van de bodembescherming om het totale kritieke debiet  $Q_c$  [m<sup>3</sup>/s] te berekenen. Dit is de 'sterktekant' van het deelfaalmecanisme Z<sub>22</sub> welke er in formulevorm uit ziet als:

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

7-16

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. De 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 wel tot instabiliteit van de bodembescherming, maar de verwachting is dan nog steeds dat dit niet binnen een hoogwaterperiode leidt tot instabiliteit van de constructie. Welke lengte van de bodembescherming voldoende is, is afhankelijk van de specifieke situatie. Per geval dient hiervoor een afweging te worden gemaakt. Uiteindelijk bepaald de combinatie van het kritieke debiet per strekkende meter en de waterdiepte wat het dominante totale kritieke debiet ( $Q_c$ ) is.

Het instromende debiet  $Q_{in|open}$  is afhankelijk van de situatie en de afmetingen van het kunstwerk. Het instromende debiet wordt met behulp van de formules in paragraaf 7.7.7 bepaald door het instrumentarium.

De Z-functie voor het bezwijken als gevolg van een tekort aan sterkte en vervolgens het falen van de bodembescherming is:

$$Z = Q_c - Q_{in|open} = q_c \cdot B_{sv} - Q_{in|open} \quad 7-17$$

#### 7.8.1 Kritiek instromend debiet

Wat is het

| Aanduiding | eenheid               | type | $\mu$  | $V_r/\sigma$ | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ |
|------------|-----------------------|------|--------|--------------|------------|----------|------------|----------|
| $q_c$      | [m <sup>3</sup> /s/m] | logn | Invoer | $V_r=0,15$   | KW         | 0        | -          | 1        |

De parameter  $q_c$  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.

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:

$$q_c = u_c \cdot (h_{bi} - h_{dr}) \quad 7-18$$

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], [11] en A is in onderstaande tabel hiervan een overzicht samengesteld. Deze waarden kunnen worden gebruikt als eerste richtgetallen.

**Tabel 7-5 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        |

#### Aandachtspunten

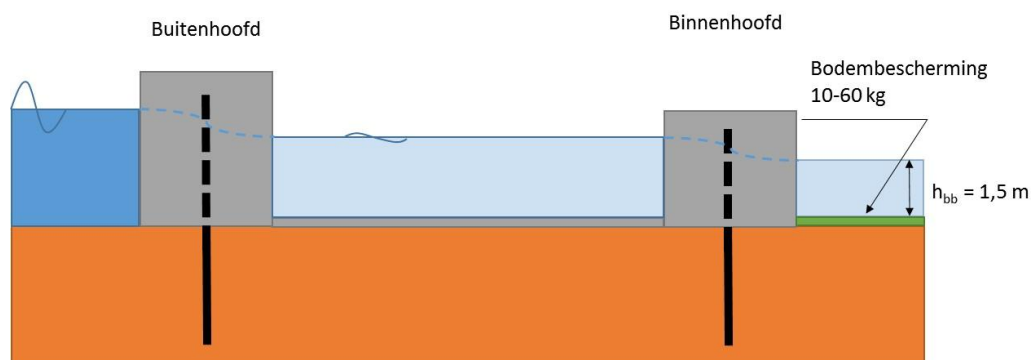
Met betrekking tot de kritieke stroomsnelheid voor de bodembescherming en daarmee het kritieke debiet kunnen de volgende aandachtspunten worden vermeld:

- 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 en kunnen direct tot erosie van een bodembescherming leiden. De reststerkte die bij *sterkte 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 7.8.2).

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' [7] 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 7-18 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:

$$D = \frac{\varphi_{sc}}{\Delta} \frac{0,035}{\psi_{cr}} k_h k_{sl}^{-1} k_t^2 \frac{U^2}{2g} \quad 7-19$$

welke is te herschrijven als:

$$U = \sqrt{\frac{2g\Delta D \psi_{cr} k_{sl}}{\varphi_{sc} 0,035 k_h k_t^2}} \quad 7-20$$

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).
- $\varphi_{sc}$  Ervan uitgaande dat de bodembescherming niet boven de drempel van het binnenhoofd uitsteekt kan worden uitgegaan van een waarde van de stabiliteitsparameter  $\varphi_{sc}$  van 0,75, horende bij breuksteen in een doorgaande laag (minimale twee lagen stenen) [-].
- $\Delta$  Relatieve dichtheid:  $\Delta = (\rho_s - \rho_{water}) / \rho_{water} = (2650 \text{ kg/m}^3 - 1000 \text{ kg/m}^3) / 1000 \text{ kg/m}^3 = 1,65$  [-].
- $\psi_{cr}$  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 [-].<br>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/s <sup>2</sup> ].  |

Invullen van formule 6-20 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 m<sup>3</sup>/s/m.

#### Voorbeeld 2

Van een gemaal is bekend dat deze onder normale omstandigheden maximaal 1,0 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/s ruimschoots aan kan. Dit wordt onderbouwd door het feit dat bij het ontwerp van bodembescherming de uitgerekende 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 7.8.2) 2,0 m bedraagt, dan is een inschatting van de waarde van  $q_c$  gelijk aan 1,0/2,0 = 0,5 m<sup>3</sup>/s/m.

### 7.8.2 Stroomvoerende breedte

#### Wat is het

| Aanduiding | eenheid | type | $\mu$  | $V_r/\sigma$  | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ |
|------------|---------|------|--------|---------------|------------|----------|------------|----------|
| $B_{sv}$   | [m]     | logn | Invoer | $\sigma=0,05$ | KW         | 0        | -          | 1        |

De parameter  $B_{sv}$  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.

#### Hoe te bepalen

De stroomvoerende breedte dient te worden betrokken op de bodem waarvoor het kritieke debiet (zie paragraaf 7.8.1) is bepaald. Samen met de kritieke stroomsnelheid behorende bij de bodem(bescherming) levert de stroomvoerende breedte het totale kritieke debiet op.

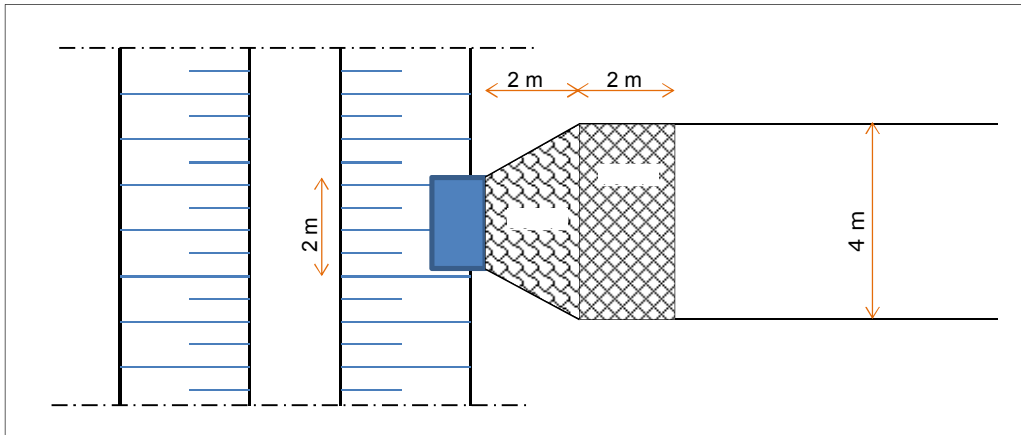
Het vaststellen van de stroomvoerende breedte kan met behulp van tekeningen of metingen in het veld. Een globale schatting is ook nog mogelijk met GIS-applicaties. Indien dit laatste wordt gehanteerd verdient het de aanbeveling om de spreiding van de parameter enigszins op te voeren. Bij de bepaling 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 7.8.1).

### Voorbeeld

Een gemaal met een maximale capaciteit van  $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$  komt binnendijks uit in een uitstroomwerk 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.



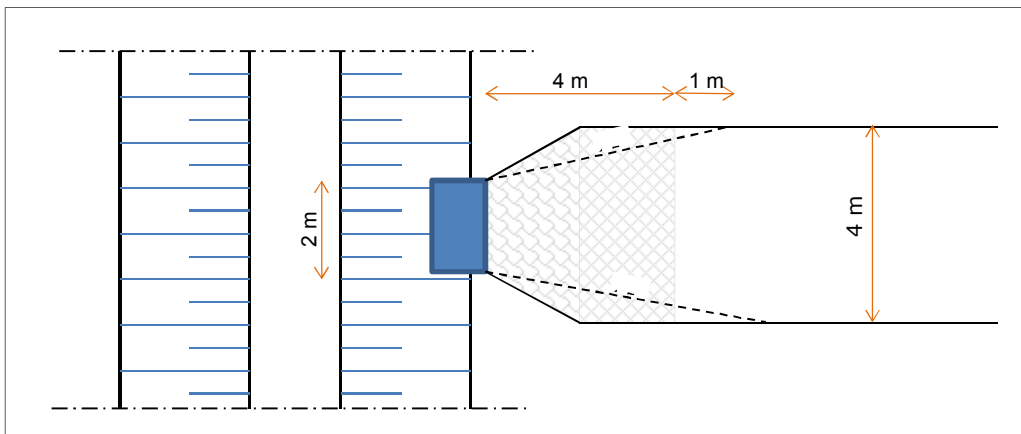
Figuur 7-19 Situatie bodembescherming achter gemaal

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  $1 \text{ m/s}$  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 7-20 Illustratie berekening kritiek debiet bodembescherming achter gemaal

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

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

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 7-5):

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

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.

7.9

### **Deelfaalmechanisme Z12 Bezwijken kunstwerk a.g.v. erosie bodem (STCO, aanvaren)**

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 kunstwerk gegeven bezwijken bodembescherming en optreden van erosie bodem ( $P_{f,kw|erosie\ bodem}$ ).

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

$$Z = -\Phi^{-1}\left(P_{f,kw|erosie\ bodem}\right) - u \quad \Phi^{-1}: \text{inverse van de normale verdeling} \quad 7-21$$

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

7.9.1

*Faalkans kunstwerk gegeven bezwijken bodembescherming en optreden van erosie bodem*

Wat is het

| Aanduiding               | eenheid | type | $\mu$ | $V_r/\sigma$ | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ |
|--------------------------|---------|------|-------|--------------|------------|----------|------------|----------|
| $P_{f,kw erosie\ bodem}$ | [-]     | det  | 1,0   | -            | -          | -        | -          | -        |

De parameter  $P_{f,kw|erosie\ bodem}$  is de kans op bezwijken van het kunstwerk als gevolg van het eroderen van de bodem.

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 eerste instantie de standaardwaarde van '1,0' te hanteren (*gedetailleerde toets*, probabilistisch op vakniveau). Dit past binnen de filosofie van het WBI 2017 om van grof naar fijn te werken. 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 faalmecanisme *bezwijken 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. Deze zijn meestal alleen relevant voor de *toets op maat*. Middels deze aandachtspunten is het wellicht mogelijk om buiten het instrumentarium om (preprocessing) een nadere bepaling van de waarde van de parameter te onderbouwen. Opgemerkt wordt dat niet voor elk deelproces behorende bij het bezwijken van het kunstwerk als gevolg van erosie van de bodem, ook modellen beschikbaar zijn die een

kwantitatieve waarde opleveren. Er kan dus ook sprake zijn van een kwalitatieve benadering. De hieronder gegeven aandachtspunten zijn niet uitputtend:

- Indien de fundatie van het kunstwerk aan de binnenzijde van de waterkering geheel met damwanden is omgeven (bijvoorbeeld als gevolg van bouwen 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' [7] 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.
- 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 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 (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

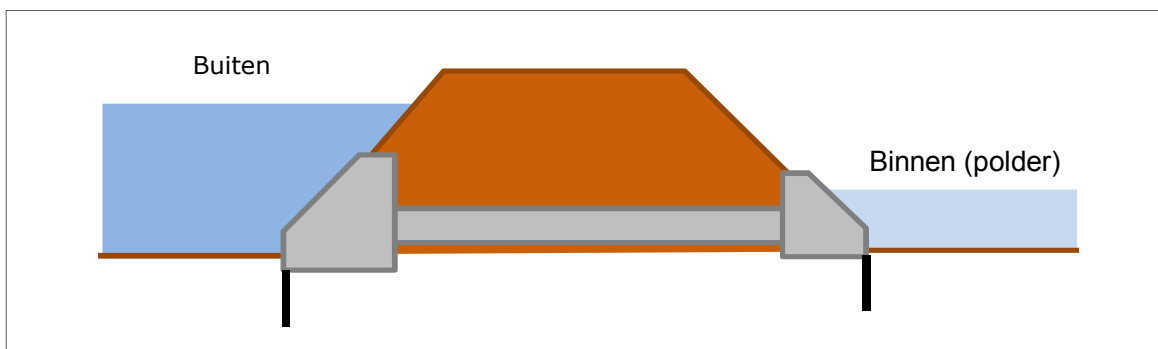
Bij het bepalen/schatten van de kans op bezwijken kunstwerk als gevolg van erosie van de bodem zijn de volgende aandachtspunten van belang:

- 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-/overloopdebiet in rekening gebracht worden. Hierbij wordt de hoogwatergolf opgedeeld in tijdsperioden en kan de groei van de ontgrondingskuil bij de diverse tijdsperioden bepaald worden.
- Niet alle aspecten van de onderbouwing van een waarde voor  $P_{f,kw|erosie\ bodem}$  kunnen kwantitatief worden onderbouwd. Kwalitatieve onderbouwing speelt ook een rol. Hierbij is inzicht in constructies en (faal)mechanismen vereist.

#### Voorbeeld

Bij een uitwateringssluuis bestaande uit een instroomwerk, een leiding en een uitstroomwerk is het enige keermiddel bezweken. Als gevolg hiervan stroomt er ongewenst water de polder in.



Figuur 7-21 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.

De volgende gegevens zijn nog voorhanden:

- 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 ( $\Delta$ ) =  $(\rho_{zand} - \rho_{water}) / \rho_{water} = (2650 - 1000) / 1000 = 1,65$ .
  - Coëfficiënt voor invloed turbulentie ( $\alpha$ ) = 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 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 formules<sup>17</sup> (zie [7], formule 16.31 a en 16.31b) kan worden benaderd wanneer de ontgrondingskuil even diep is als de binnenwaterstand (1,5 m):

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

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

Waarin:

|                  |  |
|------------------|--|
| $y_{\max}$       | maximum-kuildiepte na tijd $t$ [m].  |
| $h_{\text{bin}}$ | 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].   |
| $\alpha$         | coëfficiënt voor invloed turbulentie [-] = $1,5 + 5 \cdot r$ .   |
| $r$              | relatieve turbulentie-intensiteit [-].   |
| $\Delta$         | relatieve dichtheid [-] = $(\rho_s - \rho_{\text{water}})/\rho_{\text{water}} = (2650 \text{ kg/m}^3 - 1000 \text{ kg/m}^3)/1000 \text{ m}^3 = 1,65$ . |
| $u_{kr}$         | kritieke stroomsnelheid bodemmateriaal [m/s].  |

Invullen levert:

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

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

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

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  $P_{f,kw|\text{erosie bodem}}$  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 wel aanzienlijk kleiner. Een waarde van bijvoorbeeld 0,1 voor  $P_{f,kw|\text{erosie bodem}}$  is dan verdedigbaar.

7.10

#### **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 ( $P_{f,\text{herstel sluiting}}$ ).

De faalfunctie voor falen van herstel van de waterkering na bezwijken van een constructieonderdeel wordt beschreven met:

$$Z = -\Phi^{-1} \left( P_{f,\text{herstel sluiting}} \right) - u \quad 7-22$$

<sup>17</sup> 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.

Waarin:

$\Phi^{-1}$  inverse van de normale 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  $P_{f,herstel\ shuiving}$  geschikt gemaakt voor een probabilistische berekening.

#### 7.10.1 Faalkans herstel waterkering van gefaalde situatie

Wat is het

| Aanduiding                | eenheid | type | $\mu$ | $V_r/\sigma$ | $\Delta_x$ | $\rho_x$ | $\Delta_t$ | $\rho_t$ |
|---------------------------|---------|------|-------|--------------|------------|----------|------------|----------|
| $P_{f,herstel\ shuiving}$ | [-]     | det  | 1,0   | -            | -          | -        | -          | -        |

De parameter  $P_{f,herstel\ shuiving}$  is de kans dat het herstellen van de waterkering faalt nadat een constructieonderdeel bezwaken 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. 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 $1,0 \times 1,0$ 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, die ook getoetst moet zijn aan de realiteit. Deze toetsing bestaat uit het voorleggen van een mogelijke herstelregel aan de man met kennis en ervaring van het object en zijn omgeving.

#### Voorbeeld

-



## 8. Voorbeeld

Hiervoor wordt verwezen naar de diverse voorbeelden die zijn opgenomen in Hoofdstuk 6.

## Verantwoording

Deze *Schematiseringshandleiding sterkte en stabiliteit kunstwerken* is in opdracht van Rijkswaterstaat, Water, Verkeer en Leefomgeving opgesteld door Deltares. Dit document is als onderdeel van het WBI 2017 besproken met keringbeheerders in de WBI-coördinatiegroep en beoordeeld door de ENW Voorbereidingsgroep WBI 2017.

### Schrijver:

R.C.M. Delhez (Greenrivers B.V.).  
B. van Bree (Bob van Bree - Waterbouwkundig advies en projectmanagement).  
A. Casteleijn (RWS)

### Regie:

A. Casteleijn (RWS).  
J. van der Hammen (RWS).  
K. S. Lam (Deltares).  
M.M. de Visser (Arcadis).

### Review:

A.C.W.M. Vrouwenvelder (TNO)  
Martin van der Meer (Fugro)  
E.O.F. Calle (Deltares)  
Sipke van Manen (RWS)  
D. Pereboom (Deltares).  
B. van Bree (Bob van Bree - Waterbouwkundig advies en projectmanagement).

### Eindredactie:

R. 't Hart (Deltares).  
A. Bizzarri (RWS).  
M. Hazelhoff (RWS).

### Eindcontrole:

R. Slomp (RWS).  
J.G. Knoeff (Deltares).  
M. Bottema (RWS).

## A Literatuur

- [1] *Aanbeveling "Overloop van coupures en sluisdeuren"*. A. Vrijburcht, RWS, Concept 3A. 2004.
- [2] *Achtergrondrapport toetsspoor hoogte kunstwerk II - Bepaling kritiek overslag-/overloopdebiet (WTI 2017)*. Deltares, kenmerk 1220087-001-GEO-0011. Delft, december 2015.
- [3] *Achtergrondrapport toetsspoor Betrouwbaarheid Sluiting kunstwerk III - Omgang met komberging. (WTI 2017)* - Deltares rapport 1220087-002-GEO-0010. Delft, december 2015.
- [4] *Fenomenologische beschrijving faalmechanismen WBI*. Rijkswaterstaat - Water, Verkeer en Leefomgeving. Lelystad, september 2016.
- [5] *Handleiding datamanagement WBI 2017*. Rijkswaterstaat - Water, Verkeer en Leefomgeving. Lelystad, september 2016.
- [6] *Leidraad Kunstwerken*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. ISBN 90-369-5544-0. Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Delft, mei 2003.
- [7] *Ontwerp van schutsluizen*. Rijkswaterstaat, Bouwdienst, deel 1: ISBN 90-369-3305-6, deel 2: ISBN 90-369-3306-4. Utrecht, juni 2000.
- [8] *Probabilistic Model Code*. Joint Committee on Structural Safety, ISBN 978-3-909386-79-6. Technical University of Denmark, Lyngby march 2001.
- [9] *Richtlijnen Ontwerpen Kunstwerken ROK 1.2*. Rijkswaterstaat Technisch Document RTD 1001:2013, Rijkswaterstaat Dienst Infrastructuur. Utrecht, januari 2013.
- [10] *Richtlijnen Vaarwegen 2011*. Rijkswaterstaat, Dienst Verkeer en Scheepvaart, dr.ir. J.U. Brolsma en ir. K. Roelse, ISBN 9789036900690. december 2011.
- [11] *Scour Manual*. G.J.C.M. Hoffmans en H.J. Verheij, ISBN 90-5411-0673-5. January 1997.
- [12] *Snelheden van schepen in voorhavens en sluizen*. Waterloopkundig Laboratorium, rapport Q1399/Q1401. Delft, maart 1992.
- [13] *Toegepaste vloeistofmechanica, hydraulica voor waterbouwkundigen*. Nortier, ISBN 90-401-0318-6, 1996.
- [14] *Toets op Maat voor stalen damwandschermen als stabiliteit-verhogende langsconstructie (WTI 2017 Kunstwerken)*. Deltares rapport 1220087-005-GEO-0004. Delft, december 2015.
- [15] *Toetsspoorrapport Sterkte en stabiliteit puntconstructies (WTI 2017 Kunstwerken)*. Deltares rapport 1220087-004-GEO-0007, versie D1. Delft, december 2015.
- [16] *Grondslagen voor hoogwaterbescherming*. ENW rapport, december 2016





## B Begrippen en afkortingen

Voor de verklaring van afkortingen en de definities van de begrippen wordt verwezen naar de begrippenlijst bij *WBI 2017 Bijlage I Procedure*, Appendix B.

Verwezen wordt naar de parameterlijsten zoals opgenomen in de *Handleiding datamanagement WBI 2017* [5].



## 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 met verschillende veiligheidsfilosofieën. Om op een juiste wijze te schematiseren in WBI 2017 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 ( $R$ ) in de toetssommen dient de gebruiker een constructieve sterkte op te geven. Voor de invoer van de constructieve 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 7.2.2.3 ( $R_{lin}$ ) / paragraaf 0 ( $R_{kwad}$ ) en voor STCG in paragraaf 7.3.1 ( $R_{lin}$ ) / paragraaf 7.3.2 ( $R_{kwad}$ ) toegelicht. Hieronder wordt ter ondersteuning daarvan per tijdsperiode de achtergrond van  $R_m$  toegelicht.

### Veiligheidsfilosofie in ontwerpnormen vanaf 1990

In de semi-probabilistische methode conform de Eurocodes en NEN1990 (zie onderstaande figuur) wordt van zowel de sterkte als de belasting de gemiddelde waarde (= verwachtingswaarde =  $S_m$  en  $R_m$ ) en de spreiding ( $\sigma_S$  en  $\sigma_R$ ) 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 veiligheid factoren. Door de karakteristieke sterkte te delen door een materiaalfactor ( $\gamma_m$ ) wordt de rekenwaarde van de sterkte ( $R_d$ ) gevonden. Door de karakteristieke belasting te vermenigvuldigen met een belastingfactor ( $\gamma_s$ ) wordt de rekenwaarde van de belasting ( $S_d$ ) gevonden. Op deze wijze wordt de in de huidige normen de geëiste veiligheidsmarge gecreëerd.

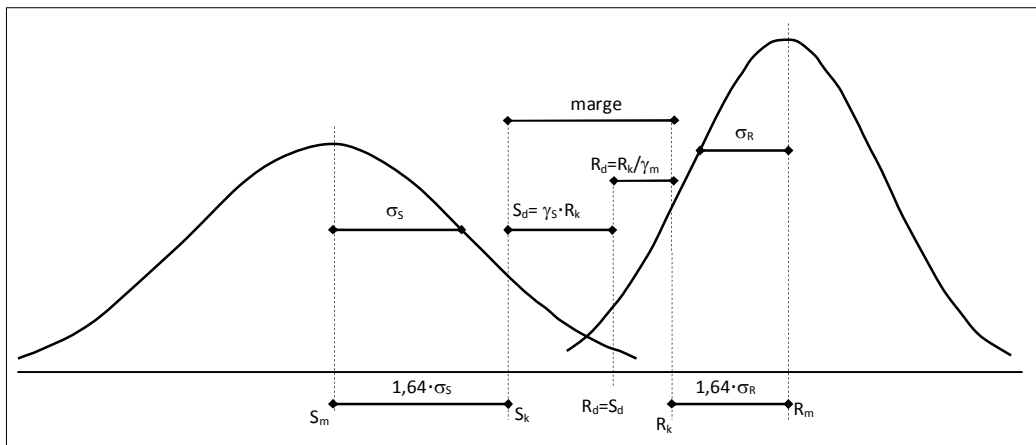
Voor de vigerende belasting- en materiaalfactoren wordt verwezen naar de Eurocodes en Leidraad Kunstwerken[6]. De Eurocodes zijn in principe geschreven voor gebouwen en in de Leidraad Kunstwerken wordt ingegaan op belastingen specifiek voor natte constructies. Vanaf

2012 is er een aanvulling op de Leidraad Kunstwerken beschikbaar ten gevolge van de komst van de Eurocodes<sup>18</sup>.

Safety format vanaf 1990:

$$R_d \geq S_d$$

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



Figuur 8-1 Verhouding sterkte en belasting vanaf 1990

### Veiligheidsfilosofie in ontwerpnormen 1972 - 1990

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.

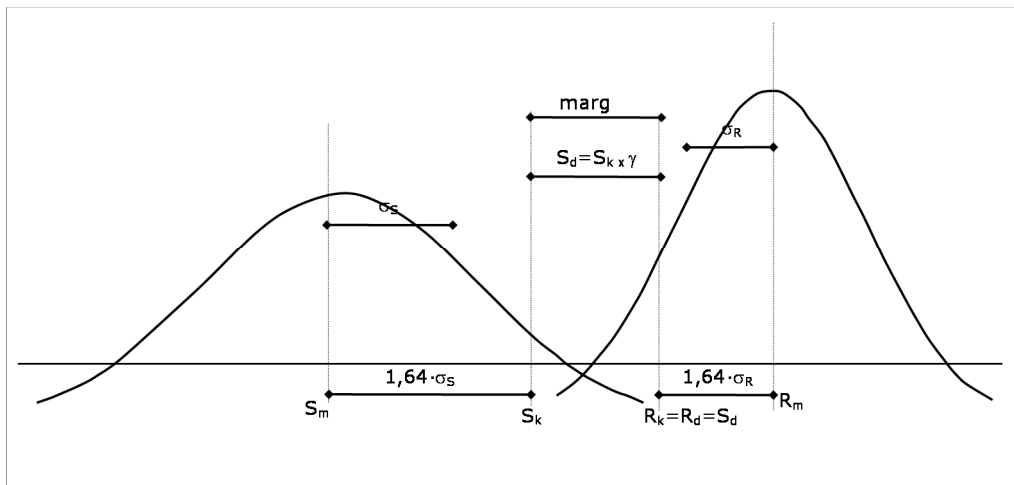
- Beton:  $\gamma = 1,7$  (VB1974/1984-beton, NEN3880: Regulations concrete, Artikel A401.2.2)
- Staal:  $\gamma = 1,5$  (TGB1972-staal, NEN3851: Staalconstructies, Artikel 1.9.2)
- Hout: vanaf 1972 bleef men voor hout de methode van voor 1972 gebruiken, zie volgende kopje.

Safety format vanaf 1972 - 1990:

$$R_d \geq S_d$$

$$R_k \geq S_k \gamma$$

<sup>18</sup> 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.



Figuur 8-2 Verhouding sterkte en belasting vanaf 1972 tot 1990

### Veiligheidsfilosofie in ontwerpnormen voor 1972

Voor 1972 beschouwde men in de ontwerpnormen belastingen en materiaalsterkte als deterministen. Veiligheid creëerde men door met toelaatbare materiaalspanningen ( $\sigma_a$ ) te rekenen. Toelaatbare spanningen worden verkregen door de vloeigrens of de breeksterkte van het materiaal te delen door een veiligheidscoëfficiënt. Deze reductiefactor  $\gamma$  werd niet vermeld in de voorschriften, maar was impliciet opgenomen door  $\sigma_a$  voor te schrijven. Ten behoeve van het narekenen worden hier, waar mogelijk, de  $\gamma$ 's voor de verschillende materialen gegeven:

- Beton en betonstaal  $\gamma = 1,8$
- Staal:  $\gamma = 1,5$
- Hout:  $\gamma$  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 ( $\sigma_a$ ) en vloe- 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 ( $\sigma_a$ ) te interpreteren als ontwerpwaarde en de vloe- of breukspanning als representatieve waarde.

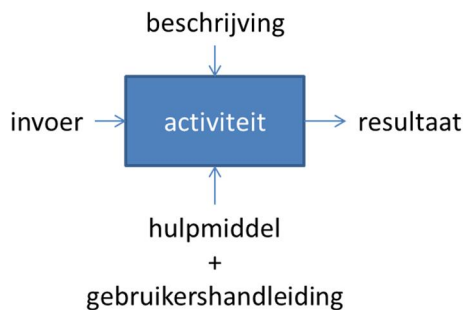


## D Schema werkwijze beoordeling sterkte en stabiliteit kunstwerken

Hieronder is schematisch de werkwijze van de beoordeling van het toetsspoor Sterkte en stabiliteit puntconstructies (STKWp) weergegeven (Figuur D.2).

### D.1 Toelichting op het schema werkwijze beoordeling

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

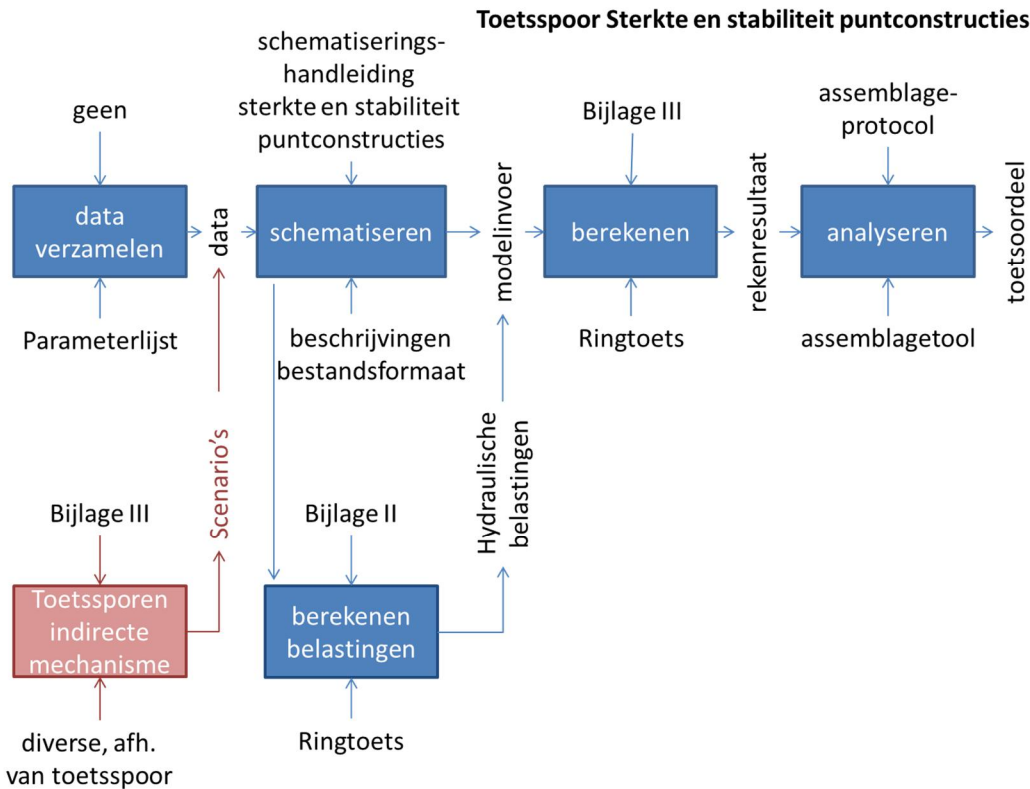


*Figuur D.1 Het algemene schema van een activiteit. Een aaneenschakeling van benodigde activiteiten bij een beoordeling geeft de schematische werkwijze van de beoordeling weer.*

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

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

## D.2 Schema werkwijze beoordeling Sterkte en stabiliteit puntconstructies (STKWp)



Figuur D.2

*Schema werkwijze beoordeling Sterkte en stabiliteit puntconstructies (STKWp). In het schema zijn alleen de belangrijkste documenten en/of tools/software genoemd. De lijst met alle beschikbare documenten en tools/software die betrekking hebben op een activiteit wordt hieronder beschreven. Let bij dit toetsspoor op dat voor het berekenen van de belastingen mogelijk een schematisatie nodig is.*

## D.3 Referenties bij het schema werkwijze beoordeling Sterkte en stabiliteit puntconstructies (STKWp)

### D.3.1 Activiteit 'data verzamelen'

Referenties beschrijving activiteit

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

Referenties hulpmiddel activiteit

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

### D.3.2 Activiteit 'schematiseren'

Referenties beschrijving activiteit

- Schematiseringshandleiding sterkte en stabiliteit puntconstructies*, WBI 2017. Rijkswaterstaat, Water, Verkeer en Leefomgeving. Lelystad, september 2016.
- Schematiseringshandleiding Hydraulische condities bij de dijkteen*, WBI 2017. Rijkswaterstaat, Water, Verkeer en Leefomgeving. Lelystad, september 2016.

Referenties hulpmiddel activiteit



- geen

#### D.3.3 Activiteit 'berekenen hydraulische belastingen'

Referenties beschrijving activiteit

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

Referenties hulpmiddel activiteit

- *Ringtoets, Software voor de beoordeling van primaire waterkeringen*. Deltares, Delft, september 2016.
- *Ringtoets, Installatiehandleiding, Wettelijk Toets Instrumentarium 2017*. Deltares, Delft, september 2016.
- *Ringtoets, Gebruikershandleiding, Wettelijk Toets Instrumentarium 2017*. Deltares, Delft, september 2016.
- *Tool Waterstandsverloop*
- *Gebruikershandleiding Waterstandsverloop, Versie 2.0*. J. Ansink, R. Kamp, C.P.M. Geerse. HKV, Rapport PR2803.10. Lelystad, mei 2014.
- *Waternormalen* ([www.rijkswaterstaat.nl/waternormalen](http://www.rijkswaterstaat.nl/waternormalen)). Rijkswaterstaat.

#### D.3.4 Activiteit 'berekenen toetsoordeel'

Referenties beschrijving activiteit

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

Referenties hulpmiddel activiteit

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

#### D.3.5 Activiteit 'analyseren'

Referenties beschrijving activiteit

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

Referenties hulpmiddel activiteit

- *Assemblagetool WBI2017*. Nog in ontwikkeling.

#### D.3.6 Toelichting bij de referenties

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

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