

# Basisrapport Waterkerende Kunstwerken en Bijzondere Constructies

De Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen werd door de Minister van Verkeer en Waterstaat ingesteld.

De commissie adviseert de minister omtrent alle technisch-wetenschappelijke aspecten die van belang kunnen zijn voor een doelmatige constructie en het onderhoud van waterkeringen, dan wel voor de veiligheid van door waterkeringen beschermde gebieden.

Met vragen omtrent werk van de TAW kan men zich wenden tot het werkorgaan van de commissie, ondergebracht bij de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van de Rijkswaterstaat.  
Postbus 5044, 2600 GA Delft,  
tel. 015-699436

Basisrapport Waterkerende Kunstwerken en Bijzondere Constructies

T  
A  
W

**T**echnische  
**A**dviescommissie voor de  
**W**aterkeringen



# **BASISRAPPORT**

behorende bij de TAW-leidraad

## **WATERKERENDE KUNSTWERKEN**

**EN**

## **BIJZONDERE CONSTRUCTIES**

juni 1997

**T**echnische

**A**dviscommissie voor de

**W**aterkeringen

---

# INHOUDSOPGAVE

---

<b>1</b>	<b>UITWERKING BETROUWBAARHEIDSANALYSE</b>	<b>9</b>
1.1	Inleiding	9
1.1.1	Doel van dit hoofdstuk	9
1.1.2	Definitie van een "betrouwbaarheidsanalyse"	9
1.1.3	Mogelijkheden en beperkingen van een "betrouwbaarheidsanalyse"	10
1.1.4	Opzet van dit hoofdstuk	11
1.2	Opzet betrouwbaarheidsanalyse en terminologie	12
1.2.1	Het begrip falen	12
1.2.2	Het begrip grenstoestand	12
1.2.3	Faalmechanismen	13
1.2.4	Foutenbomen en gebeurtenissenbomen	13
1.2.5	Berekenen van de betrouwbaarheid	15
1.3	Kwantificering van de foutenboom voor waterkerende kunstwerken en bijzondere constructies	18
1.3.1	Toelaatbare faalkans	18
1.3.2	Kwantificering van de foutenboom	19
1.4	Betrouwbaarheid ten aanzien van overlopen en overslag	23
1.5	Betrouwbaarheid ten aanzien van sterkte en stabiliteit	24
1.5.1	Inleiding	24
1.5.2	Betrouwbaarheidsanalyse	25
1.5.3	Gebruik NEN-normen 6700-serie	29
1.6	Betrouwbaarheid van de sluitingsoperatie	32
1.6.1	Inleiding	32
1.6.2	Menselijk falen	34
1.6.3	Technisch falen	39
1.6.4	Betrouwbaarheidsanalyse bewegingswerk	41
1.6.5	Numerieke gegevens	52
<b>2</b>	<b>AANBEVELINGEN VOOR SLUITINGSPROCEDURES</b>	<b>59</b>
2.1	Inleiding	59
2.2	Aanbevelingen	59
2.2.1	Fasering sluitingsprocedure	59
2.2.2	Documentatie en informatievoorziening	61
2.2.3	Oefeningen	62
2.2.4	Onderhoud en inspectie	62
2.3	Voorbeelduitwerking van een sluitingsprocedure	62
2.3.1	Algemeen	62

2.3.2	Betrokken partijen	64
2.3.3	Handelingen en beslissingen	65
<b>3</b>	<b>STANDAARD BEOORDELINGSMETHODE BETROUWBAARHEID SLUITINGSOPERATIE</b>	<b>69</b>
3.1	Inleiding	69
3.2	Systeembeschrijving	70
3.2.1	Hoofdtypen beweegbare keringen	70
3.2.2	Faalmechanismen	71
3.2.3	Voornaamste begrippen	72
3.2.4	Formulering betrouwbaarheidseis	76
3.2.5	Vereenvoudigde numerieke uitwerking	77
3.3	Standaard beoordelingsmethode	80
3.3.1	Algemeen	80
3.3.2	Hoogwateralarmeringssysteem	81
3.3.3	Mobilisatie	84
3.3.4	Bedieningsprocedure voor de sluiting	87
3.3.5	Bedrijfszekerheid van de afsluitmiddelen	90
3.3.6	Kwantitatieve beschouwing scoretabellen	92
3.4	Conclusies	93
<b>4</b>	<b>GOLFBELASTING OP EEN VERTIKALE WAND</b>	<b>95</b>
4.1	Inleiding	95
4.2	Inkomende golven	95
4.3	Bepaling ontwerp golf	97
4.4	Reflectie en overslag	98
4.5	Golfbreking	99
4.6	Krachten door golven	100
4.7	Reductie door scheve golfinval en kortkammigheid	102
<b>5</b>	<b>BEPALING KERENDE HOOGTE</b>	<b>105</b>
5.1	Inleiding	105
5.2	Ontwerpeis voor de kerende hoogte	105
5.2.1	Algemeen	105
5.2.2	Maximum toelaatbaar debiet tijdens MHW	106
5.2.3	Toelaatbare overslag in verband met komberging	107
5.2.4	Reductie waakhogte wegens toelaatbare overloop	110
5.3	Bepaling van de overslagfactoren $\alpha$ (figuren 5.1.1 t/m 5.2.4)	110
5.3.1	Algemeen	110

5.3.2	Berekening van $\alpha$ als functie van het overslagdebiet (fig. 5.1.1 en 5.1.2)	110
5.3.3	Berekening van $\alpha_{\text{komb}}$ als functie van het kombergend vermogen (fig. 5.2.1 t/m 5.2.4)	111
5.3.4	Stappenplan voor de figuren 5.2.1 t/m 5.2.4	113
5.4	Bepaling van de reductie $h_{\text{ovl}}$ in geval van overloop	113
5.5	Voorbeeld	114
<b>6</b>	<b>ONDER- EN ACHTERLOOPSHEID</b>	<b>123</b>
6.1	Inleiding	123
6.2	Begrippen en definities	123
6.3	Aandachtspunten bij het ontwerp	124
<b>7</b>	<b>KRUISINGEN VAN PIJPLEIDINGEN MET WATERKERINGEN</b>	<b>135</b>
7.1	Inleiding	135
7.2	Aanvullende voorzieningen bij kruisingen van (pijp)leidingen met waterkeringen	136
7.3	Doorgaande pijpleidingen	137
7.4	Leidingen, direct in verbinding staande met het buitenwater	138
<b>8</b>	<b>ONDERHOUDSCONCEPT EN ONDERHOUDSPAN</b>	<b>141</b>
8.1	Inleiding	141
8.1.1	Doel van deze bijlage	141
8.1.2	Ontwerp- en onderhoudsstrategieën	142
8.1.3	Inspectie en onderhoud	146
8.2	Onderhoudsconcept	148
8.2.1	Kenmerken van het onderhoudsconcept	148
8.2.2	Onderhoud en het Programma van Eisen	148
8.2.3	Onderdelen van het onderhoudsconcept	149
8.3	Onderhoudsplan	151
8.3.1	Kenmerken van het onderhoudsplan	151
8.3.2	Analyse van de onderhouds- en inspectieplanning	151
8.3.3	Onderdelen van het onderhoudsplan	157
<b>9</b>	<b>KWALITEITSBORGING ONTWERPPROCES</b>	<b>159</b>
9.1	Inleiding	159
9.2	Fasering ontwerpproces	159
9.3	Beheersing ontwerpproces	165

<b>10</b>	<b>OVERZICHT WATERKERENDE KUNSTWERKEN EN BIJZONDERE CONSTRUCTIES</b>	<b>167</b>
10.1	Inleiding	167
10.2	Waterkerende kunstwerken	167
10.2.1	Schutsluizen	168
10.2.2	Spuisluizen	173
10.2.3	Inlaatsluizen	174
10.2.4	Afsluitbare duikers	175
10.2.5	Stormvloedkeringen/keersluizen	175
10.2.6	Gemalen	176
10.2.7	Coupures	177
10.2.8	Pijpleidingkruisingen en tunnels	178
10.3	Bijzondere waterkerende constructies	179
10.3.1	Kwelschermen (onder- en achterloopschermen)	179
10.3.2	Erosieschermen	180
10.3.3	Vliesconstructies	181
10.3.4	Kistdammen	182
10.3.5	Keermuren/wanden en kademuren	183
10.3.6	Dijkmuurtjes	185
<b>11</b>	<b>PRAKTIJKVOORBEELD "KEERSLUIJ"</b>	<b>187</b>
11.1	Beschrijving van de keersluis	187
11.2	Belastingen	188
11.3	Overlopen en overslag	189
11.4	Sterkte en stabiliteit	190
11.4.1	Controle kwelschermen op piping	190
11.4.2	Sterkte stalen puntdeuren	191
11.4.3	Sterkte betonnen sluiswanden	193
11.4.4	Stabiliteit bodembescherming	195
11.4.5	Ontgroningen	196
11.4.6	Toelaatbaar paal draagvermogen	197
11.4.7	Invloed planperiode	199
11.5	Betrouwbaarheid sluitingsoperatie	200
11.5.1	Beoordelingsmethode	200
11.5.2	Bepaling aantal vragen per jaar	201
11.5.3	Bepaling kans op niet sluiten bij gegeven noodzaak	201
11.5.4	Beoordeling betrouwbaarheid sluitingsoperatie	207
11.6	Samenvatting	208

**LITERATUUR** 209**APPENDIX I AFSTEMMING WET OP DE WATERKERING EN BOUWBESLUIT** 215

I.1	Aanleiding en doel	215
I.2	Aanpak en belangrijkste resultaten	215
I.2.1	Opzet	215
I.2.2	Verloop partiële factor als functie van de betrouwbaarheidsindex	217
I.2.3	Keuze partiële factor	218
I.2.3.1	Betrouwbaarheidsniveau gerelateerd aan normfrequentie uit Wet op Waterkering	218
I.2.3.2	Betrouwbaarheidsniveau volgens de TGB	219
I.2.3.3	Betrouwbaarheidsniveau volgens de "oude ontwerppraktijk"	219
I.2.3.4	Vergelijking verschillende veiligheidsbenaderingen	220
I.3	Conclusies en aanbevelingen	221
I.4	Eindconclusie	222

**APPENDIX II PRAKTIJKVOORBEELD "KEERSLUIJ"** 223

II.1	Inleiding	223
II.2	Bepaling aantal vragen per jaar	223
II.3	Bepaling faalkans per aanvraag	225
II.4	Faalruimte afsluitmiddelen	227

**APPENDIX III ALTERNATIEVE LAY-OUT STANDAARD BEOORDELINGSMETHODE** 229

III.1	Hoogwateralarmeringssysteem	229
III.2	Mobilisatie	230
III.3	Bedieningsfout	231
III.4	Technische storing	232

**TOTSTANDKOMING** 233**VRIJWARING** 235

---

# 1 UITWERKING BETROUWBAARHEIDSANALYSE

---

## 1.1 Inleiding

### 1.1.1 Doel van dit Hoofdstuk

In bijzondere gevallen kan behoefte bestaan aan een nauwkeuriger bepaling van de betrouwbaarheid dan mogelijk is met behulp van de in Hoofdstuk 3 gegeven standaard beoordelingsmethode. In die gevallen kan dan een betrouwbaarheidsanalyse worden uitgevoerd. Dit Hoofdstuk heeft derhalve de volgende doelen:

- De ontwerper of beheerder fungeert vaak als opdrachtgever voor een betrouwbaarheidsanalyse, die in principe door specialisten op dit gebied wordt uitgevoerd. Inzicht in de werkwijze en terminologie die in een betrouwbaarheidsanalyse worden toegepast is bevorderlijk voor de communicatie tussen de opdrachtgever en de specialist. Het primaire doel van dit hoofdstuk is dan ook aan de ontwerper of beheerder van een waterkerend kunstwerk of bijzondere constructie enig inzicht te geven in de opzet en uitwerking van een betrouwbaarheidsanalyse. Dit hoofdstuk is niet in eerste instantie bedoeld als handleiding voor de uitvoering van een betrouwbaarheidsanalyse.
- Een tweede doel van dit hoofdstuk is duidelijk te maken wanneer het zinvol is om een betrouwbaarheidsanalyse uit te (laten) voeren. Naast de mogelijkheden komen derhalve ook de beperkingen van een betrouwbaarheidsanalyse aan de orde.
- Tevens wordt beoogd inzicht te geven in de achtergronden van de in de Leidraad beschreven ontwerpmethodiek. Met name voor het constructief ontwerp en voor de beoordeling van de eventuele bewegingswerken van de kering is in de Leidraad een standaard recept beschreven. Inzicht in de achtergronden van dit recept en in de keuzen die bij de totstandkoming ervan gedaan zijn, kan voor niet-standaard gevallen een opening geven naar een aangepaste ontwerpmethodode.

Dit hoofdstuk is ontleend aan studie [1.23], uitgevoerd door TNO-BOUW en KEMA in het kader van de Leidraad Kunstwerken en Objecten in, op en nabij waterkeringen.

### 1.1.2 Definitie van een "betrouwbaarheidsanalyse"

Onder een "betrouwbaarheidsanalyse" wordt verstaan een onderzoek naar de kans dat de te ontwerpen of te beheren constructie of onder-

deel daarvan zijn functie niet zal vervullen. Het vaststellen van deze kans op uitvallen van een functie, ofwel "faalkans", is van belang, omdat de faalkans binnen economisch wenselijke en wettelijk bepaalde grenzen dient te vallen.

Een betrouwbaarheidsanalyse hoeft zich niet te beperken tot het vaststellen van de kans op constructief bezwijken of excessief vervormen, maar kan ook betrekking hebben op het falen van (deel)processen, beheer- en onderhoudsystemen en kwaliteitsborging.

Een betrouwbaarheidsanalyse kan onderdeel zijn van een "risico-analyse". In een risico-analyse wordt niet alleen de faalkans bepaald, maar wordt ook nagegaan welke gevolgen eventueel falen kan hebben in de vorm van materiële en/of immateriële schade. Een betrouwbaarheidsanalyse gaat dus wat minder ver dan een risico-analyse. In veel gevallen is het analyseren van de gevolgen van falen minder relevant, omdat wetgeving voorhanden is die rechtstreekse eisen aan de faalkans stelt. De gevolgen van falen zijn dan al impliciet in de wettelijke eis verwerkt.

### 1.1.3 Mogelijkheden en beperkingen van een "betrouwbaarheidsanalyse"

De redenen om een betrouwbaarheidsanalyse uit te (laten) voeren kunnen velerlei zijn:

- Identificatie van zwakke schakels in constructies of processen, zodat verbetering hiervan gericht kan worden aangepakt.
- Maatwerk, waar standaardoplossingen te duur zijn. Bij complexe constructies kan het strikt hanteren van ontwerp-voorschriften en -normen, zoals onder meer omschreven in Hoofdstuk 3 leiden tot onevenredig hoge kosten. Het is echter ook mogelijk, dat de ontwerpvoorschriften onvoldoende toegesneden zijn op de constructie in kwestie, waardoor het onduidelijk is of een ontwerp volgens de voorschriften wel voldoet aan de eisen gesteld aan de faalkans.
- Maatwerk, waar standaard oplossingen geen recht doen aan de locatie-specifieke factoren en/of andere belangen, zoals bijvoorbeeld natuurbelangen.
- Stellen van prioriteiten bij de inzet van mensen en middelen ten aanzien van uiteenlopende problemen. Door faalkansen vast te stellen kan een objectieve discussie worden gevoerd over de mogelijke consequenties van bepaalde beslissingen.
- Leggen van de koppeling tussen "ontwerp" en "beheer en onder-

houd". Met behulp van een betrouwbaarheidsanalyse kan worden nagegaan in hoeverre de faalkans wordt beïnvloed door een gekozen onderhoudsstrategie.

In een aantal situaties ligt uitvoering van een uitgebreide betrouwbaarheidsanalyse minder voor de hand:

- Bij standaard constructies en constructieonderdelen is het vaak aantrekkelijk de reeds gebaande wegen te bewandelen. Door een zeker repetitie-effect worden de ontwerpspanningen minimaal en is ook de kans op onvoorziene problemen bij onderhoud en vervanging van onderdelen klein. In deze gevallen is het vaak niet lonend om iedere constructie of constructie-onderdeel als uniek te zien en hiervoor een aparte analyse en ontwerp uit te voeren.
- Wanneer de technieken en specialistische kennis die nodig zijn voor een gedegen betrouwbaarheidsanalyse niet voorhanden zijn, kan beter worden teruggegrepen op beproefde ontwerpvoorschriften.

### 1.1.4 Opzet van dit hoofdstuk

Allereerst worden in paragraaf 1.2 enkele algemene begrippen en de basisopzet van een betrouwbaarheidsanalyse behandeld. Verder wordt in paragraaf 1.3 de toelaatbare faalkans afgeleid voor (onderdelen van) kunstwerken en constructies, zoals deze zijn opgenomen in de TAW-Leidraad voor Waterkerende Kunstwerken en Bijzondere Constructies.

Vervolgens worden in paragraaf 1.4 t/m 1.6 de 3 hoofdoorzaken behandeld, waardoor de betrouwbaarheid van een kunstwerk of constructie in gevaar kan komen:

- overlopen en overslag
- stabiliteitsverlies, of ook: gebrek aan sterkte
- falen sluitingsoperatie

Bijzondere aandacht wordt besteed aan de betrouwbaarheidsanalyse van de sluitingsoperatie.

De behandeling in deze bijlage is toegesneden op de kerende functie van kunstwerken en bijzondere constructies in waterkeringen. Dit betekent, dat er met het kunstwerk of object van alles mis mag gaan zolang de kerende functie maar onaangetaast blijft. In deze zin is dus de "betrouwbaarheid" van het kunstwerk of de constructie pas in het geding, wanneer de waterkerende functie niet meer wordt vervuld.

## 1.2 Opzet betrouwbaarheidsanalyse en terminologie

### 1.2.1 Het begrip falen

Zodra een constructie of onderdeel daarvan één of meer van de gewenste functies niet meer vervult, spreekt men van "falen" voor zover het die functie betreft. Zoals hierboven echter reeds opgemerkt, staat in de betrouwbaarheidsanalyse van kunstwerken en bijzondere constructies in (primaire) waterkeringen de waterstaatkundige veiligheid centraal. Dit betekent, dat "falen" voor kunstwerken en constructies wordt opgevat als **"niet meer voldoen aan de waterkerende functie"**. Wanneer bijvoorbeeld in een schutsluis in een primaire waterkering de deuren niet meer geopend kunnen worden en er dus geen scheepvaart mogelijk is, dan is volgens deze beperkte definitie geen sprake van falen, omdat de waterkering intact blijft.

Naast het begrip "falen van een (deel van een) individueel kunstwerk of constructie" kan ook het begrip "falen van de gehele ringdijk" worden gehanteerd. Met dit laatste falen wordt inundatie bedoeld, het onder water lopen van het dijkkringgebied.

### 1.2.2 Het begrip grenstoestand

Een grenstoestand is de grens tussen een gewenste en een ongewenste toestand. Overschrijding van een grenstoestand houdt in principe altijd een vorm van falen in. Grenstoelstanden kunnen naar hun aard worden onderverdeeld in:

- uiterste grenstoelstanden;
- bruikbaarheidsgrenstoelstanden.

Uiterste grenstoelstanden zijn die welke verband houden met de diverse vormen van bezwijken van de constructie of toestanden die het bezwijken van de constructie benaderen. Dit betreft onder andere verlies van standzekerheid van de constructie of enig deel daarvan, bezwijken door extreme vervorming, erosie of zetting, overgang naar een mechanisme, breuk of stabiliteitsverlies van de constructie of enig deel daarvan, met inbegrip van ondersteuning en funderingen.

Bruikbaarheidsgrenstoelstanden komen overeen met toestanden waarbij wanneer ze overschreden worden, niet meer wordt voldaan aan bepaalde criteria voor de constructie betreffende het gebruik of de functie hiervan.

Dit zijn bijvoorbeeld vervormingen of doorbuigingen die het doelmatig gebruik van de constructie belemmeren, trillingen die de functionele doelmatigheid verminderen en schadelijke scheurvorming.

De grens tussen falen en niet falen ten opzichte van de waterkerende functie van kunstwerken en constructies (bescherming van het achterland tegen inundatie) zal in zijn algemeenheid als uiterste grenstoestand moeten worden beschouwd.

Bezwijken van grote onderdelen van een waterkering zal meestal gepaard gaan met een directe aantasting van de primaire functie en derhalve gerekend worden tot de uiterste grenstoestand. Bezwijken van onderdelen zal vaak het karakter hebben van een bruikbaarheidsgrenstoestand, doch een scherp onderscheid zal niet altijd mogelijk zijn.

### 1.2.3 Faalmechanismen

De toestand falen kan langs verscheidene wegen worden bereikt. Deze wegen worden de faalmechanismen genoemd.

In de Leidraad Waterkerende Kunstwerken en Bijzondere Constructies worden als hoofdfaalmechanismen genoemd:

- overlopen en overslag;
- stabiliteitsverlies, of ook: gebrek aan sterkte;
- falen van de sluitingsoperatie, ofwel het niet gesloten zijn van de waterkering op het moment dat het, gelet op de buitenwaterstand, noodzakelijk is.

Het derde hoofdfaalmechanisme is uitsluitend voor afsluitbare waterkerende kunstwerken van belang, de overige twee mechanismen zijn voor alle elementen in de dijkkring relevant. Binnen ieder hoofdfaalmechanisme zijn weer diverse deel-faalmechanismen te onderscheiden.

### 1.2.4 Foutenbomen en gebeurtenissenbomen

De wegen, waarlangs falen op kan treden kunnen schematisch worden weergegeven met behulp van een foutenboom. De topgebeurtenis van de foutenboom is "falen", bijvoorbeeld "inundatie van het dijkkringgebied". In de takken van de boom wordt aangegeven via welke ketens van gebeurtenissen (van beneden naar boven) de betreffende topgebeurtenis kan ontstaan. Hierbij worden de diverse onderdelen van



het systeem met hun (deel)mechanismen op systematische wijze in kaart gebracht.

Het overzicht dat een foutenboom geeft is bij ontwerp en beoordeling van een kering van grote waarde. De veiligheidsbeoordeling van veel keringen is dermate complex dat een dergelijk overzicht van groot belang is. In feite is het een checklist-achtig hulpmiddel waar men alle uit te voeren controles voor deelmechanismen kan terugvinden.

De onderlinge relatie tussen de symbolen en gebeurtenissen is dusdanig dat zij een "hoger" in de boom liggende gebeurtenis kunnen veroorzaken. De topgebeurtenis van de foutenboom moet éénduidig gedefinieerd zijn en kan maar betrekking hebben op één bepaalde toestand van falen. De constructie van de foutenboom vindt plaats vanaf deze topgebeurtenis. Van iedere component in het systeem wordt bekeken hoe die kan falen. Dit kan in de boom dan aangegeven worden door een nieuwe deelgebeurtenis of door een of meer basisgebeurtenissen.

In figuur 1.1 is de hoofdfoutenboom getekend voor kunstwerken. Onderscheiden worden drie hoofdmechanismen: overlopen en overslag, sterkte/stabiliteit onvoldoende en falen sluitingsoperatie.

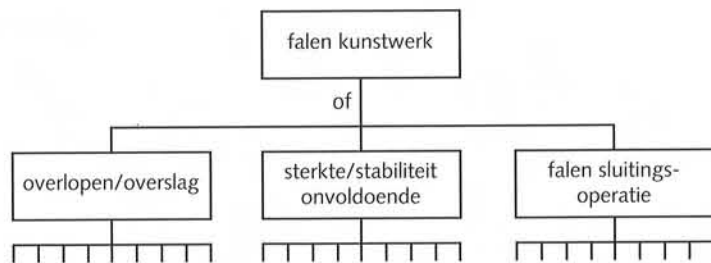


Fig. 1.1 Hoofdfoutenboom voor een kunstwerk

In paragraaf 1.3 is deze hoofdfoutenboom verder gedetailleerd en gekwantificeerd (zie figuur 1.3 voor de dijkkringbenadering en figuur 1.4 voor de dijkvakbenadering). Ook in deze gedetailleerde foutenbomen geldt dat voor een individueel geval bepaalde onderdelen verder kunnen worden uitgewerkt of juist worden weggelaten. Soms zijn ook interacties mogelijk, bijvoorbeeld omdat een storing of bedieningsfout leidt tot

hogere belastingen. In een algemeen schema is dit niet nader aan te geven. Voor specifieke gevallen wordt aanbevolen specifieke foutenbomen te maken, waarin deze interacties wel zijn opgenomen. De gebeurtenissen aan de onderkant van de boom in figuur 1.3 en 1.4 zijn geen basis-gebeurtenissen, maar gebeurtenissen die nog een nadere uitwerking behoeven. Zo is bijvoorbeeld de gebeurtenis "keermiddel niet tijdig gesloten" in paragraaf 1.6 uitvoerig uitgewerkt.

Bij het opzetten van een foutenboom doet men er goed aan systematisch alle onderdelen te beschouwen en rekening te houden met mogelijke volgorde- en tijdseffecten. Vaak is het raadzaam eerst gebeurtenissenbomen op te stellen, bijvoorbeeld beginnend met een stijging van de waterstand als functie van de tijd en alle mogelijke reacties van het systeem daarop te analyseren.

Een voorbeeld van een dergelijke gebeurtenissenboom is opgenomen in figuur 1.2. Aan het einde van de gebeurtenissenboom treft men gebeurtenissen aan als "geen inundatie", "beperkte inundatie", "onderhoud nodig", "inundatie" enz. Door bijvoorbeeld alle takken met een bepaalde ongewenste eindgebeurtenis eruit te lichten en op de juiste wijze samen te voegen, krijgt men een foutenboom.

#### 1.2.5 Berekenen van de betrouwbaarheid

In totaal bestaat een foutenboomanalyse uit twee delen, namelijk een kwalitatief deel en een kwantitatief deel. In het kwalitatieve deel wordt bepaald op welke manieren het systeem kan falen. Het kwantitatieve deel van een foutenboomanalyse bestaat uit het toekennen van kansen aan de diverse basisgebeurtenissen en het uitrekenen van de kans op de topgebeurtenis.

Bij een kwantitatieve methode staan twee wegen open:

- "bottom-up": men bepaalt de faalkans van ieder onderdeel en controleert of het totaal voldoet aan de gestelde betrouwbaarheidseisen;
- "top-down": men begint met een toelaatbare faalkans aan de top en wijst op grond van bijvoorbeeld onderhoudstechnische redenen de toelaatbare faalkansen per onderdeel en mechanisme toe. Vervolgens ontwerpt men hierop of kijkt of eraan voldaan wordt. In de waterbouwkunde wordt meestal "top-down" gewerkt.

Bij het berekenen van de faalkans van een hoofdmechanisme moet rekening gehouden worden met de onderverdeling in deelmechanismen. Hierbij speelt de onderlinge afhankelijkheid van de deelmechanismen en de opeenvolging van deelmechanismen een rol.

Beschouw, bijvoorbeeld, een hoofdmechanisme dat alleen optreedt als eerst deelmechanisme A optreedt en daarna deelmechanisme B. In concreto zou A kunnen staan voor "het niet sluiten van de sluisdeur" en B voor "het niet kunnen plaatsen van schotbalken". Indien voor het hoofdmechanisme een maximum faalkans van  $10^{-4}$  wordt geëist, kan men dit bereiken via  $10^{-3}$  voor mechanisme A en  $10^{-1}$  voor mechanisme B. Men kan uit economische overwegingen ook voor het omgekeerde kiezen, of alle andere verhoudingen, zolang het produkt maar  $10^{-4}$  blijft.

Het is vaak zinvol de boom op te zetten voor diverse waterstandsintervallen (bijvoorbeeld tussen 2,0 en 3,2 m, tussen 3,2 en 3,5 m enz.) en de consequenties en kansen voor ieder interval afzonderlijk na te gaan. Bij de berekening kan men de kansen op gebeurtenissen beneden in de boom dus opvatten als kansen bij een gegeven waterstand. Omdat waterstanden groter dan de kerende hoogte al zijn afgedekt bij het mechanisme overloop, behoeven deze bij de twee overige hoofdmechanismen niet nader in de berekening betrokken te worden. De berekening resulteert in een aantal mogelijke inundatiepatronen met bijbehorende kansen. De som van deze kansen dient kleiner te zijn dan de toelaatbare waarde. Indien hieraan niet voldaan wordt, kan men nagaan of sommige bijdragen aan de kans corresponderen met relatief kleine gevolgen (lokale inundatie met kleine waterdiepte). In overleg met overheden en betrokkenen zou dan overwogen kunnen worden deze te verwaarlozen.

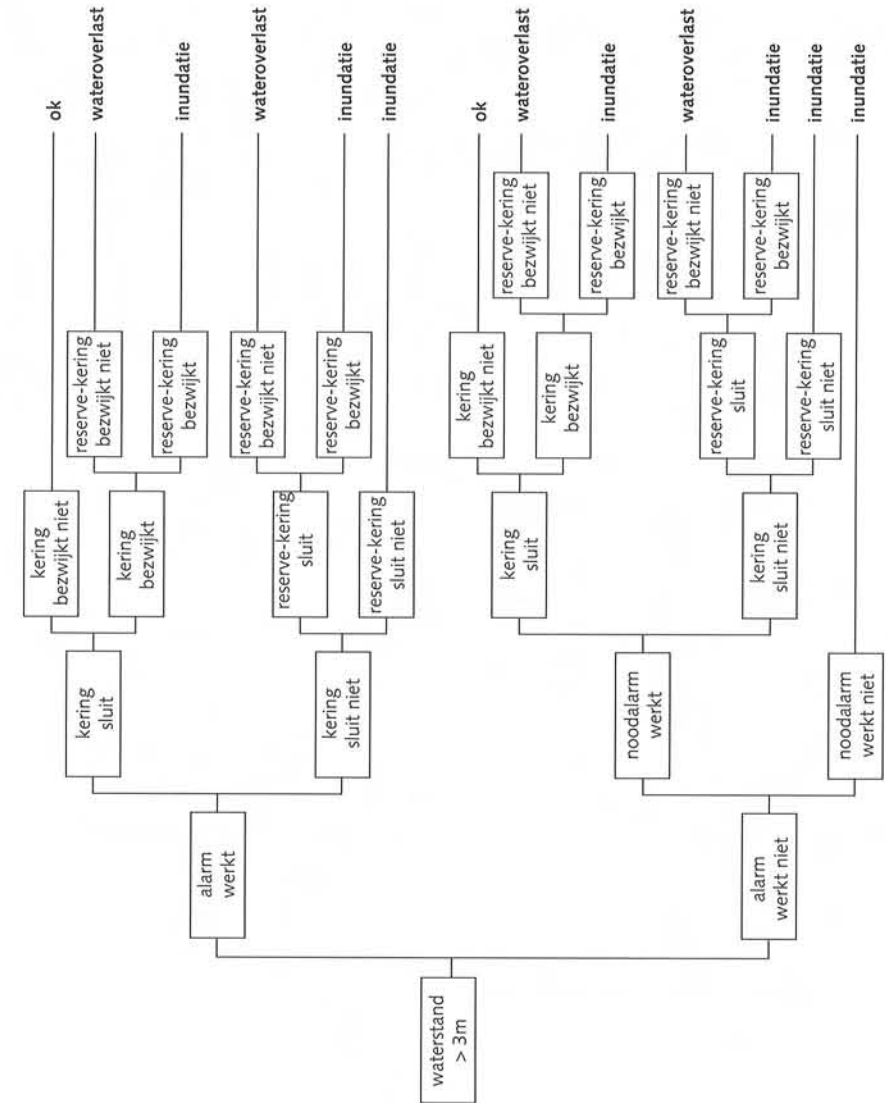


Fig. 1.2 Voorbeeld gebeurtenissenboom; uitgangspunt bij deze boom is dat bij het activeren van aanwezige nood- of reservesystemen zodanige vertraging optreedt dat enige wateroverlast plaats vindt. Het faalpeil is hier gedefinieerd als een buitenwaterstand op NAP +3,0 m.

### 1.3 Kwantificering van de foutenboom voor kunstwerken en bijzondere constructies.

#### 1.3.1 Toelaatbare faalkans

Voor een beoordeling van de veiligheid volgens de Wet op de Waterkering dient de *optredende* faalkans te worden vergeleken met een toelaatbare waarde. De *toelaatbare* faalkans is op tamelijk complexe wijze gekoppeld aan de in de Wet op de Waterkering vastgelegde overschrijdingsfrequentie van de maatgevende hoogwaterstand (MHW).

Als startpunt bij de kwantificering van de foutenboom voor kunstwerken en bijzondere constructies dient het niveau in de foutenboom te worden beschouwd waarop de eisen met betrekking tot de toelaatbare faalkans zijn gesteld.

#### *Dijkvakbenadering versus dijkkringbenadering*

Uitgangspunt is de "*dijkvakbenadering*" volgens de normen van de Delta-commissie. Volgens deze benadering wordt verondersteld dat bij ontwerp en onderhoud elk kunstwerk separaat in beschouwing wordt genomen. De TAW-Leidraad Waterkerende Kustwerken en Bijzondere Constructies is gebaseerd op de dijkvakbenadering.

Onder "*dijkkringgebied*" wordt conform de Wet op de Waterkering een gebied bedoeld, dat door een gesloten stelsel van primaire waterkeringen (de dijkkring) wordt beveiligd tegen overstroming.

De "*dijkkringbenadering*" veronderstelt dat bij ontwerp en onderhoud de dijkkring met alle elementen van de waterkeringen in beschouwing worden genomen. Rekening wordt gehouden met samenhang tussen belastingen en faalmechanismen op verschillende lokaties van de dijkkring, alsmede met mogelijke verschillen in kosten van beveiliging en gevolgen bij inundatie. Soms kan het noodzakelijk zijn de werking van andere dijkkringen in de beschouwing te betrekken. Bij de berekening van de optredende faalkans dient rekening te worden gehouden met alle elementen waaruit het systeem bestaat (dijken, duinen, kunstwerken, etc.) en de mechanismen waardoor elk van deze elementen kan falen (golfoverslag, afschuiving, etc.). Andersom geredeneerd kan de toelaatbare faalkans voor het beschouwde kunstwerk worden afgeleid uit een veronderstelde verdeling van de toelaatbare faalkans over alle dijken, kunstwerken etc. van de beschouwde dijkkring.

De toelaatbare faalkans volgens de dijkkringbenadering dient te zijn

gecalibreerd op het veiligheidsniveau dat zou zijn bereikt, indien alle afzonderlijke dijkvakken en kunstwerken volgens de dijkvakbenadering volgens de normen van de Delta-commissie zouden zijn gedimensioneerd.

#### *Dijkvakbenadering met overbelasting*

Voor de *toelaatbare* faalkans is op dit moment geen wettelijk vastgelegde norm aanwezig. De Wet op de Waterkering specificeert nog uitsluitend een overschrijdingsfrequentie per jaar van de hoogwaterstand waarop de waterkering, gelet ook op andere factoren die het waterkerend vermogen bepalen, moet zijn berekend. Deze andere factoren zijn de overige belastingen, de sterkte-aspecten en aspecten van bediening, storing, en niet-beschikbaarheid. Teneinde de genoemde andere factoren op consistente wijze met de wettelijke bepaling omtrent de waterstand in rekening te kunnen brengen is in de Leidraad de overbelastingsbenadering gevolgd.

De essentie van de overbelastingsbenadering is, dat géén uitspraak wordt gedaan over de faalkans van de dijkkring, maar dat als *primair ontwerpcriterium* een eis gesteld wordt aan de hoogte van de kering. Deze eis is gekoppeld aan een *toelaatbaar overslagdebiet*, en kan worden opgevat als "begin van falen".

Als *tweede criterium* wordt gesteld dat de kans op *falen* (doorbraak) door *alle overige faalmechanismen* tezamen zeer klein moet zijn. Deze eis wordt opgevat als "volledig falen". Onder "zeer klein" kan in dit geval worden verstaan minder dan 10% van de voorgeschreven overschrijdingsfrequentie ('de norm') van maatgevend hoogwater (MHW) zoals vastgelegd in de Wet op de Waterkering.

Het tweede criterium heeft alleen relevantie, wanneer aan het primaire ontwerpcriterium wordt voldaan: wanneer de hoogte niet voldoet en er sprake is van een ontoelaatbaar overloop- of overslagdebiet is direct sprake van falen en worden de overige faalmechanismen niet relevant geacht. Het niet optreden van een ontoelaatbaar overloop- of overslagdebiet kan derhalve als nevenvoorwaarde worden ingevoerd.

#### 1.3.2 Kwantificering van de foutenboom

Indien wordt uitgegaan van de *dijkkring*-benadering met overbelasting dan kan de hoofdfoutenboom volgens figuur 1.3 worden opgesplitst.

De opsplitsing is gemaakt op basis van een inschatting van de huidige praktijk, met als randvoorwaarde, dat de toelaatbare faalkans (norm) aan de top van de foutenboom dient te worden gerealiseerd. Uit deze foutenboom (zie figuur 1.3) kan de foutenboom voor één kunstwerk worden afgeleid (zie figuur 1.4). De in figuur 1.4 weergegeven opdeling heeft als basis gediend voor de Leidraad Waterkerende Kunstwerken en Bijzondere Constructies. In de toekomst kan de foutenboom van figuur 1.3 als basis dienen. De norm zal dan per dijkkringgebied na calibratie moeten worden vastgesteld.

Indien uitgegaan wordt van de *dijkvak*-benadering met overbelasting dan kan de hoofdfoutenboom volgens figuur 1.4 worden opgesplitst. Elke opdeling van de foutenboom is echter arbitrair; in voorkomende gevallen is het dan ook mogelijk om een andere opsplitsing te kiezen, mits aan het in de vorige paragraaf genoemde primaire en secundaire ontwerpcriterium wordt voldaan. Wanneer bijvoorbeeld de faalkans van een bepaald deelmechanisme slechts met zeer hoge kosten aan de opdeling van figuur 1.4 is te conformeren, dan zou met een grotere faalkans kunnen worden volstaan, indien elders in de foutenboom zinvolle compensatie kan worden gerealiseerd.

*De overgangskans*

In de meeste gevallen zal falen van een constructieonderdeel niet direct tot volledig falen van de waterkering leiden. De *overgangskans*, dit is de kans op volledig falen van de waterkering gegeven dat het beschouwde constructie-onderdeel faalt, wordt geschat op 0,1 à 0,5. Door de TAW wordt nader onderzoek verricht naar de kwantificering van de overgangskans voor de verschillende mechanismen.

De toelaatbare faalkans voor een constructie-onderdeel is daarmee een factor 2 à 10 hoger dan uit de verdeling in de foutenboom zou blijken. De overgangskans moet echter per geval nader onderbouwd worden, met name indien sprake is van een serie-systeem met een groot aantal elementen of anderszins een groot aantal onafhankelijke grenstoestanden.

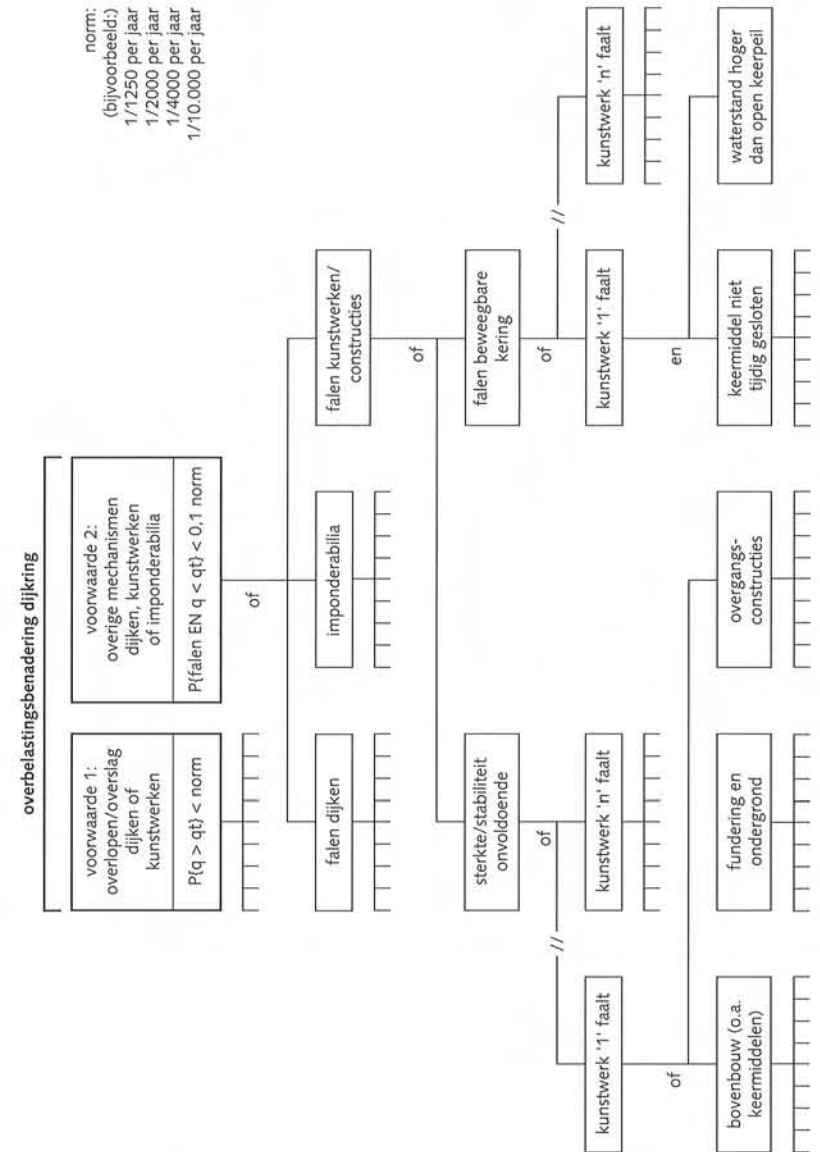


Fig. 1.3 Algemene foutenboom voor een dijkkring met kunstwerken (overbelastingsbenadering)

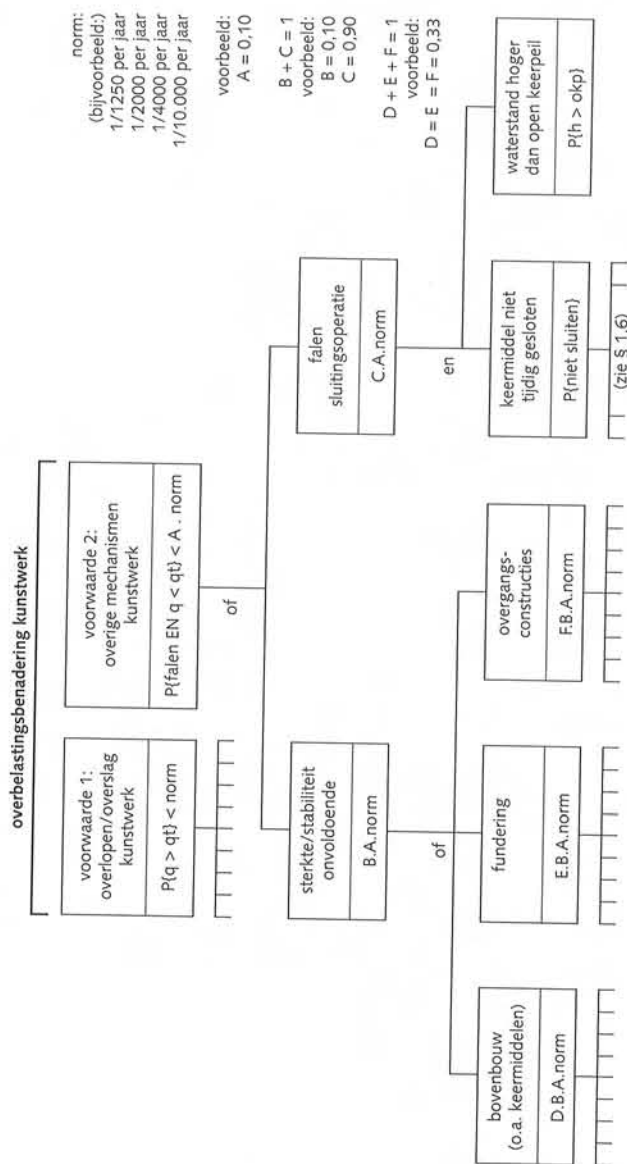


Fig. 1.4 Kwantificering van de foutenboom voor een kunstwerk (dijkvakbenadering en overbelastingbenadering). De foutenboom betreft voorwaarde 2.

#### 1.4 Betrouwbaarheid ten aanzien van overlopen en overslag

In figuur 1.4 is de model-foutenboom voor een kunstwerk gekwantificeerd, afgestemd op de zogenaamde "overbelastingsbenadering". Voor het mechanismen overlopen en overslag moet worden voldaan aan de voorwaarde:

$$P\{q > q_t\} < \text{norm}$$

waarin:

- $P\{..\}$  = kans dat in een jaar de tussen { } geplaatste gebeurtenis zich voordoet
- $q$  = overslagdebiet, volgend uit geometrie, waterstand en golven
- $q_t$  = toelaatbaar overslagdebiet, bijvoorbeeld 100 l/s/m of volgend uit algemene constructiekenmerken (o.a. breedte kunstwerk) en het bergend/afvoerend vermogen van het achterliggend gebied (zie Hoofdstuk 5)
- norm = de voorgeschreven overschrijdingsfrequentie van maatgevend hoogwater, zoals vastgelegd in de Wet op de Waterkering

Bij de bepaling van het toelaatbaar overslagdebiet gelden meestal andere criteria dan voor dijken, omdat constructies van hout, beton of staal veel minder erosiegevoelig zijn. Bovendien wordt meestal voorzien in een degelijke bodembescherming.

Voorwaarde is dat wordt aangetoond dat dit debiet gedurende de duur van de hoogwaterstand in het achter het kunstwerk gelegen systeem van waterlopen veilig kan worden afgevoerd of geborgen. Ook mag dit debiet geen erosie van bodem en aansluitende grondconstructies veroorzaken

Door middel van nadere analyses kan onderzocht worden of een groter overslagdebiet voor een specifiek geval toelaatbaar is. Dit hangt onder meer af van:

- het waterbezwaar in de polder, via alle "samenhangende" kunstwerken (d.w.z. gecorreleerd via de buitenwaterstand en direct of indirect lozend op hetzelfde binnenwater). Dit kan betrekking hebben op de waterkwantiteit en op de waterkwaliteit (bijvoorbeeld zoutwaterbezwaar);
- de tijdsduur dat het toelaatbaar debiet wordt overschreden (kust of rivier);

- algemene constructiekenmerken (breedte);
- kenmerken van achterliggend gebied: bergend vermogen, verdeel-sleutel i.v.m. debieten over overige kunstwerken en dijklichaam, stabiliteit kunstwerk en achterliggende kaden, eventuele afname van het bergend vermogen door uitvallende pompcapaciteit bij hoge buitenwaterstanden.

Bij de bepaling van de ontwerphoogte dient rekening te worden gehouden met onzekerheden in waterstanden en golfrandvoorwaarden, geometrie, relatieve zeespiegelrijzing, seiches, buistoten, bui-oscillaties, lokale op-waaiing, golfoverslag. Voor nadere informatie over de bepaling van de kerende hoogte van kunstwerken en bijzondere constructies wordt verwezen naar Hoofdstuk 5.

Tenslotte dient boven de ontwerphoogte ook nog een overhoogte in rekening te worden gebracht i.v.m. zetting. Deze overhoogte bepaalt in feite de "levensduur t.a.v. de hoogte" van het kunstwerk.

## 1.5 Betrouwbaarheid ten aanzien van sterkte en stabiliteit

### 1.5.1 Inleiding

Zoals in paragraaf 1.3.1 is aangegeven geldt als tweede ontwerpcriterium dat de kans op falen als gevolg van alle andere mechanismen dan overbelasting tezamen kleiner moet zijn dan 10% van de voorgeschreven overschrijdingsfrequentie van maatgevend hoogwater (MHW) zoals vastgelegd in de Wet op de waterkering. Omdat door de sluitingsoperatie in het algemeen een groot beslag wordt gelegd op de beschikbare faalruimte en omdat het in het algemeen goed mogelijk is de faalruimte voor stabiliteitsverlies te verkleinen, wordt aanbevolen de kans op stabiliteitsverlies kleiner te maken dan 1% van de normfrequentie. In formulevorm luidt dit criterium dan:

$$P(\text{stab. verlies EN } q < q_t) < \text{norm}/100$$

waarin:

"stab. verlies EN  $q < q_t$ " = falen als gevolg van onvoldoende sterkte/stabiliteit zonder dat het toelaatbaar overslagdebiet wordt overschreden (veelal bij waterstanden lager dan MHW)

Uit bovenstaande formule volgt dat de maatgevende belasting moet worden afgeleid van de actuele belasting (waterstand en golven) binnen het domein  $q < q_t$ .

Voor waterkerende kunstwerken en bijzondere constructies zonder beweegbare afsluitmiddelen kan in principe deze eis versoepeld worden. Uit een speciaal daartoe uitgevoerde studie, waarvan een samenvatting als appendix is opgenomen, blijkt echter dat dan de kans bestaat op strijdigheid met de TGB en vigerende praktijk. Ter illustratie wordt verwezen naar tabel 2 van Appendix I (WoW en Bouwbesluit). Afwijkingen van dit criterium moeten dus goed worden onderbouwd.

### 1.5.2 Betrouwbaarheidsanalyse

In de hoofdfoutenboom in figuur 1.1 is één van de hoofdfaalmechanismen "sterkte/stabiliteit onvoldoende". Dit hoofdmechanisme kan weer worden onderverdeeld in deelmechanismen, waarbij per deelmechanisme een belasting en sterkte worden gedefinieerd, zodanig dat "belasting groter dan sterkte" correspondeert met "falen" en "belasting kleiner dan sterkte" met "niet falen". Als de belasting gelijk is aan de sterkte wordt gesproken van een grenstoestand.

Bij de betrouwbaarheidsanalyse ten aanzien van sterkte en stabiliteit voor een bepaald kunstwerk (bestaand of in ontwerp) wordt als volgt te werk gegaan:

1. vaststellen van de belastingen en bedreigingen
2. vaststellen van de constructie-eigenschappen en (deel) mechanismen
3. vaststellen van de te beschouwen grenstoestanden
4. opstellen van de foutenbomen
5. vaststellen van streefwaarden voor de faalkansen
6. nagaan of voor alle grenstoestanden de streefwaarde voor de veiligheid wordt gehaald met behulp van een semi-probabilistische rekenmethode

Het maakt daarbij niet uit of het om een geheel kunstwerk gaat of om een onderdeel. Verder geldt bovenstaand schema zowel voor ontwerp als voor toetsingssituaties.

Aangetoond dient te worden, dat de kans, dat de sterkte kleiner is dan de belasting voldoet aan de eisen, die hieraan op grond van de opdeling van de foutenboom in figuur 1.5 worden gesteld. Deze kans wordt aangeduid als

$$P\{R < S\}$$

met:

- R = stochastische sterkte
- S = stochastische belasting

De belasting kan groter zijn dan de sterkte, doordat de belasting groter is dan verwacht, of doordat de sterkte kleiner is dan verwacht.

Het mechanisme "belasting groter dan de sterkte" ( $S > R$ ) is in figuur 1.5 schematisch uitgewerkt.

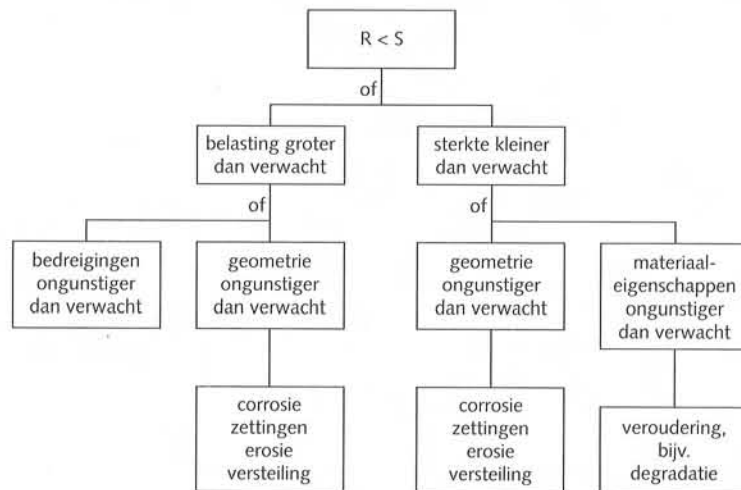


Fig. 1.5 Mechanisme "belasting (S) groter dan sterkte (R)"

Toelichting bij figuur 1.5:

- Het mechanisme waarlangs de constructie faalt t.o.v. de primaire functie (bescherming tegen inundatie van het achterland) kan zijn opgebouwd uit een aantal deelmechanismen. De belangrijkste (deel-) mechanismen die direct tot falen kunnen leiden zijn:

- plasticiteit/breuk;
- vervorming/kruip;
- piping;
- kwel/onder- en achterloopsheid;
- stabiliteitsverlies fundering;
- ontgronding;

Niet elk van deze mechanismen zal bij elk keringtype van belang zijn. Aan de andere kant is het ook mogelijk dat nog andere mechanismen kunnen optreden. Per situatie zal onderzocht moeten worden of de opsomming volledig is.

- Ten behoeve van de beschrijving van mechanismen worden rekenmodellen opgesteld, waarmee het gedrag van de constructie bij een gegeven belasting kan worden gesimuleerd. Een dergelijk model is een functie van constructie-eigenschappen die kunnen worden opgedeeld in geometrische grootheden (geometrie van kering en voorland, afmetingen van diverse onderdelen, laagdiktes van de ondergrond) en materiaaleigenschappen (sterkte, stijfheid, dichtheid, duurzaamheid).
- De belasting op een constructie volgt uit een voor het mechanisme relevante combinatie van bedreigingen en de (geometrische) eigenschappen van de kering inclusief zijn directe omgeving. Een bedreiging is een van buiten komende oorzaak die kan leiden tot niet goed functioneren van de waterkering. In beginsel is een bedreiging onafhankelijk van de vorm en conditie van de waterkering. De belangrijkste bedreigingen zijn water, wind, etc. Men spreekt ook wel van natuurlijke- of omgevingsrandvoorwaarden.
- De sterkte wordt bepaald door enerzijds de materiaaleigenschappen en anderzijds de vormgeving (geometrie) van de beschouwde constructie of constructie-onderdeel. Bijzondere sterkteparameters in een model zijn de toestandparameters (of gidsparameters). Dit zijn meetbare of uit meting berekenbare constructieparameters die de conditie van een waterkering beschrijven. Gedurende de levensduur van de constructie kan over deze variabelen door inspectie nader informatie worden gewonnen.
- Geometrische grootheden worden deels door de omstandigheden en deels door de ontwerper bepaald. Rekening moet worden gehouden met mogelijke afwijkingen ten opzichte van de specificaties. Afwijkingen kunnen het gevolg zijn van onnauwkeurigheden in de uitvoering al dan niet conform toleranties, of (tijdsafhankelijke) natuurlijke processen (laagdikte-variatie, zetting, klink, corrosie, erosie).

Door middel van kwaliteitscontrole en metingen kunnen afwijkingen van de gewenste geometrie worden opgespoord.

- Onder veroudering worden mechanismen verstaan, die langzaam de sterkte verminderen of vergroten. Verouderingsmechanismen moeten meestal worden gecombineerd met een van de directe mechanismen alvorens falen optreedt. Het effect van de verouderingsmechanismen kan worden teruggedrongen via inspectie en onderhoud.

#### falen

Het falen van een constructief onderdeel wordt vaak beschreven met behulp van een betrouwbaarheidsfunctie of grenstoestandsfunctie ( $Z$ ), die bepaald wordt door een groot aantal variabelen  $X_i$ . Per definitie corresponderen positieve waarden van de grenstoestandsfunctie  $Z$  met "functioneren", negatieve waarden van  $Z$  met "falen". Gecontroleerd moet dus worden op:

$$P\{Z < 0\} < \text{toelaatbare waarde} \quad (1.1)$$

$Z = Z(X_1, X_2 \dots X_n)$  = betrouwbaarheidsfunctie (grenstoestandsfunctie)  
 $X_i$  = stochastische variabele

De eenvoudigste vorm van een betrouwbaarheidsfunctie is:

$$Z = R - S \quad (1.2)$$

met:

$R$  = stochastische sterkte  
 $S$  = stochastische belasting

Het is mogelijk de eis (1.1) met behulp van probabilistische technieken te toetsen. In de Leidraad is er echter voor gekozen om van de eis een vertaling in semi-probabilistische termen te maken, zoals dit ook gebeurt in de NEN 6700-serie. De eis " $P\{Z < 0\} < \text{toelaatbare waarde}$ " wordt dan vertaald in de equivalente eis:

$$Z\{X_{d1}, X_{d2} \dots X_{dn}\} > 0 \quad (1.3)$$

Hierin zijn:

$X_{di}$  = rekenwaarde van de variabele  $i$

De rekenwaarde komt overeen met wat in de NIVO-II analyse bekend staat als de ontwerp- of 'design-point'-waarde. In het geval van normaal verdeelde variabelen worden deze gegeven door:

$$X_{di} = \mu_i - \alpha_i \beta \sigma_i \quad (1.4)$$

In deze formule is:

$\beta$  = betrouwbaarheidsindex, gedefinieerd als de verhouding  $\mu_z/\sigma_z$   
 $\alpha_i$  = probabilistische invloedscoëfficiënt van variabele  $X_i$   
 $\mu_i$  = gemiddelde waarde van de stochastische variabele  $X_i$   
 $\sigma_i$  = standaardafwijking van de stochastische variabele  $X_i$

De vereiste betrouwbaarheidsindex  $\beta$  volgt uit de toelaatbare faalkans via:

$$\Phi(-\beta) = P\{F\} \quad (1.5)$$

Hierin is:

$\Phi$  = verdelingsfunctie van de Normale Verdeling  
 $P\{F\}$  = de kans op falen

In Tabel 1.1. is voor sommige faalkansen de waarde van de betrouwbaarheidsindex  $\beta$  gegeven.

Tabel 1.1: Tabel voor normale verdeling

P{F}	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>
$\beta$	1,3	2,3	3,1	3,7	4,2	4,7	5,2

De waarden van  $\alpha$  hangen af van de details van het probleem, en volgen uit een NIVO II-analyse.

#### 1.5.3 Gebruik NEN-normen 6700-serie

##### Rekenwaarden van belasting en sterkte

Voor de berekening van onderdelen in staal, hout, beton, metselwerk en voor de beoordeling van de fundering kan gebruik worden gemaakt van de dimensionering volgens de TGB (Technische grondslagen voor bouwconstructies, NEN 6700-serie).



Gebruik van deze normen betekent feitelijk, dat de ontwerp-sterkte vast ligt via de in de materiaalgebonden normen gedefinieerde materiaal-factoren.

In de huidige NEN 6702 worden de karakteristieke waarden voor variabele belastingen gedefinieerd met behulp van een herhalingstijd van 50 jaar (uitgezonderd vloerbelasting) en voor sterkte als de 5% onderschrijdingswaarde. Geometrische eigenschappen worden nominaal genomen, uitgezonderd excentriciteiten bij knikstaven. De partiële belastingsfactoren en de partiële materiaalfactoren zijn gedeeltelijk gebaseerd op probabilistische overwegingen, gedeeltelijk op een historische of empirische motivering. Voor iedere individuele ontwerpsituatie is er echter de mogelijkheid tot calibreren van de specifieke coëfficiënten, om op die manier het benodigde betrouwbaarheidsniveau te bereiken. Met name als rekenregels gebaseerd zijn op laboratoriumproeven voor een compleet onderdeel, is hiervoor ruimschoots de gelegenheid.

In NEN 6702 worden geen aanbevelingen gedaan voor karakteristieke hydraulische belastingen bij waterbouwkundige constructies. Om te kunnen voldoen aan de vereiste faalkans volgens de TAW richtlijnen, maar tegelijkertijd toch de NEN normen te kunnen blijven gebruiken, ligt het daarom voor de hand om de hierboven genoemde calibratie tot de hydraulische belasting te beperken. Dit betekent dus dat de rekenwaarde van de hydraulische belasting door een geschikte keuze van de belastingsfactor zodanig aan wordt gepast, dat aan de gestelde toelaatbare faalkans voor het betreffende mechanisme (zie figuur 1.4), wordt voldaan. De genoemde hydraulische belasting op waterbouwkundige kunstwerken wordt sterk gedomineerd door de resulterende waterdruk bij maatgevende hydraulische randvoorwaarden, ofwel bij Maatgevend Hoogwater (MHW). De rekenwaarde van de waterdruk komt tot stand door de resulterende waterdruk bij MHW te vermenigvuldigen met een belastingsfactor. De rekenwaarde van de maatgevende resulterende waterdruk ( $p_d$ ) is derhalve als volgt gedefinieerd:

$$P_d = \gamma_H P_{MHW} \quad [\text{N/m}^2] \quad (1.6)$$

waarin:

- $\gamma_H$  = belastingsfactor
- $P_{MHW}$  = waterdruk bij buitenwaterstand gelijk aan Maatgevend Hoogwater

Op grond van de in paragraaf 1.3 beschreven overbelastingsbenadering voor een dijkvak en op grond van een speciaal daartoe uitgevoerde studie [lit. 1.22] wordt aanbevolen één belastingsfactor van  $\gamma_H = 1,25$  voor alle mogelijke constructie-onderdelen en ontwerp-frequenties te hanteren. Voor een samenvatting van genoemde studie wordt verwezen naar Appendix I van dit Basisrapport.

Voor controle van het mechanisme piping wordt de vereiste veiligheid bereikt door  $\gamma_H = 1,0$ .

Voor de hantering van belasting-combinatiefactoren worden in Hoofdstuk 3 van de Leidraad aanbevelingen gedaan.

#### Referentie-periode

In de Wet op de Waterkering (WoW) wordt uitgegaan van een ontwerp-overschrijdingsfrequentie. Dit is een overschrijdingsfrequentie van hoogwater per jaar.

In de NEN wordt uitgegaan van een bepaalde referentieperiode.

De karakteristieke belasting volgens NEN 6702 is betrokken op deze referentieperiode, meestal 50 jaar.

De in de NEN beoogde waarde van de faalkans van de constructie is, in tegenstelling tot de TAW-richtlijnen, onafhankelijk van de referentieperiode. Dit betekent dat, indien het begrip MHW (overschrijdingskans per jaar) in combinatie met belastingen en sterkte volgens de TGB (herhalingstijd of levensduur van 50 jaar) wordt gebruikt, er een vertaalslag nodig is. Aanbevolen wordt om bij deze vertaalslag als uitgangspunt een referentie-periode te kiezen gelijk aan de planperiode, bijvoorbeeld 50 of 100 jaar.

Dit betekent, dat de overschrijdingsfrequentie van maatgevend hoogwater per 50 of 100 jaar wordt gehanteerd. Deze kan worden afgeleid, door de Gumbel-verdeling van de 1 jaar overschrijdingskromme uit te drukken in de 50 of 100 jaar overschrijdingskromme.

De rekenwaarde van de waterdruk bij MHW wordt vervolgens berekend, gebruik makend van een belastingsfactor  $\gamma_H$  als bovengenoemd.

De overige belastingen en de sterkte worden conform het gestelde in de NEN normen berekend.

## 1.6 Betrouwbaarheid van de sluitingsoperatie

### 1.6.1 Inleiding

In de Leidraad Waterkerende Kunstwerken en Bijzondere Constructies worden beweegbare keringen in zijn algemeenheid behandeld, waarbij het uitgangspunt is dat een kering dient te sluiten (keersluis, coupure, stormvloedkering) dan wel gesloten dient te blijven (schutsluis, inlaat-sluis) indien gevaar voor inundatie optreedt. De beweegbare kering geldt als voldoende veilig als de uitgaande van het aanwezige systeem en organisatie berekende faalkans voor de sluitingsoperatie kleiner is dan de daarvoor gereserveerde faalkansruimte.

In Hoofdstuk 3 wordt een standaard beoordelingsmethode gepresenteerd. Deze is gebaseerd op de in dit hoofdstuk (1.7) behandelde aspecten en gegevens. Voor het opstellen van nauwkeuriger beoordelingen of het ontwerpen van verbeteringen kan dit hoofdstuk een hulpmiddel zijn.

Zowel in de Leidraad als in Hoofdstuk 3 zijn enige definities van peilen en hoogten opgenomen, die van belang zijn voor de beoordeling van de sluitingsoperatie (signaleringspeil, open keerpeil, open keerhoogte, sluitpeil).

Zoals in paragraaf 1.3.1 is aangegeven geldt als 2e ontwerpcriterium dat de kans op falen als gevolg van een ander mechanisme dan overbelasting zeer klein moet zijn. Aangenomen dat de faalkansruimte voor de sluitingsoperatie een factor groter moet zijn dan die voor sterkte en stabiliteit dient in het geval van falen van de sluitingsoperatie onder "zeer klein" te worden verstaan 10% van de voorgeschreven overschrijdingsfrequentie van maatgevend hoogwater (MHW) zoals vastgelegd in de Wet op de Waterkering. In formulevorm luidt dit criterium dan:

$$P\{\text{sluiting faalt EN } q < q_t\} < \text{norm}/10 \quad (1.7)$$

waarin:

"sluiting faalt EN  $q < q_t$ " = falen als gevolg van het falen van de sluitingsoperatie zonder dat, indien de kering gesloten zou zijn geweest, het toelaatbaar overslag-debiet zou zijn overschreden.

De actuele faalkans van een beweegbare kering wordt enerzijds bepaald door het aantal keren per jaar dat de kering moet worden gesloten en anderzijds door de kans op het niet tijdig gesloten zijn van de afsluitmiddelen, per vraag:

$$P_{fa} = n_j \cdot P_{ns} \quad (1.8)$$

met:

$P_{fa}$  = actuele faalkans kunstwerk t.g.v. een falend afsluitmiddel [faalkans/jaar]

$n_j$  = het aantal keren per jaar dat de kering moet worden gesloten [vragen/jaar]

$P_{ns}$  = kans op niet sluiten, gegeven noodzaak [faalkans/vraag]

Het aantal keren per jaar dat de kering moet worden gesloten is gelijk aan de overschrijdingsfrequentie van die buitenwaterstand die, vermeerderd met de waakhogte, juist gelijk is aan het open keerpeil. In formulevorm is deze frequentie bepaald door:

$$n_j = N\{h_{okp} \leq h+w \leq h_{dk}\} \quad [\text{vragen/jaar}] \quad (1.9)$$

waarin:

$n_j$  = aantal vragen per jaar

$h$  = buitenwaterstand [m t.o.v. NAP]

$w$  = waakhogte [m]

$h_{okp}$  = open keerpeil [m t.o.v. NAP]

$h_{dk}$  = kerende hoogte bij gesloten afsluitmiddel of dijktafelhoogte [m t.o.v. NAP]

*Opmerkingen:*

- "Zonder overbelasten" (dus  $q < q_t$ ) is eenvoudigheidshalve gelijkgesteld aan "buitenwaterstanden welke vermeerderd met een waakhogte niet hoger zijn dan de kerende hoogte bij gesloten afsluitmiddel".
- De waakhogte is afhankelijk van de buitenwaterstand en de geometrie van het kunstwerk. Voor de bepaling van de kerende hoogte van kunstwerken en bijzondere constructies wordt verwezen naar Hoofdstuk 5.

De kans op het niet tijdig sluiten van de afsluitmiddelen  $P_{ns}$  volgt uit een betrouwbaarheidsanalyse van:

- het hoogwaterwaarschuwingssysteem;
- de mobilisatie;
- de bedieningsprocedure voor de sluiting;
- de bedrijfszekerheid van de afsluitmiddelen.

De kans op niet sluiten dient bepaald te worden met behulp van een betrouwbaarheidsanalyse. In het algemeen kan worden gesteld dat het sluiten van een kering in twee fasen verloopt. De eerste fase betreft het voortraject, waarin de beslissing genomen wordt de kering te sluiten. Deze beslissing kan gebaseerd zijn op een "optredende" en op een "voorspelde" waterstand, elk met hun eigen relevante factoren en foutenbomen. De tweede fase betreft het uitvoeringstraject, waarin de sluiting daadwerkelijk plaatsvindt (zie figuur 1.6).

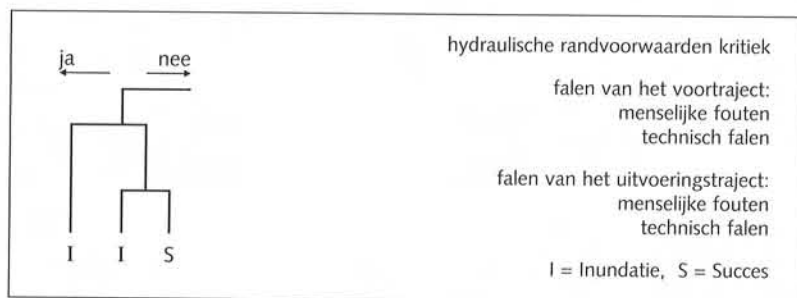


Fig. 1.6 Globale indeling van de faalkansberekening voor beweegbare keringen.

Menselijke fouten en technisch falen leiden in het voortraject meestal tot het niet tijdig gesloten zijn van de kering, terwijl zij in het uitvoeringstraject leiden tot het niet of niet geheel sluiten van de kering. In appendix II wordt nader ingegaan op de sluitingsprocedure.

### 1.6.2 Menselijk falen

Ten aanzien van menselijk handelen kunnen een tweetal aspecten worden onderscheiden. Het éne aspect betreft het verkeerd uitvoeren van een handeling of een reeks van handelingen, waardoor een procesgang wordt onderbroken of vertraagd. Het andere aspect betreft het tegenovergestelde; door inventief te handelen is de mens in staat een proces weer op gang te brengen of te versnellen. Ontbreekt dit handelen, dan wordt ook van menselijke fouten gesproken. Een ander onderscheid wat gemaakt

kan worden is dat een menselijke handeling enerzijds een ongewenste gebeurtenis kan initiëren, waardoor een verkeerd proces op gang wordt gebracht, en anderzijds beschouwd kan worden als onvolkomenheden in de mens-techniek relatie. Die onvolkomenheden zullen toegeschreven worden aan de mens, zeker als deze niet al te frequent en systematisch voorkomen.

Gezien het feit dat menselijke fouten moeilijk zijn te voorspellen, speelt men vaak met de gedachte door automatisering de onberekenbare mens te elimineren. Het grote voordeel van de mens is echter dat de mens zich kan aanpassen aan allerlei niet voorziene eigenaardigheden van de techniek. Via een leerproces is men bovendien in staat deze aanpassing te optimaliseren. Daarnaast is de mens wegens zijn inventiviteit in staat op een hoger abstractie niveau regelende acties te ondernemen, daar waar de automatisering tekort schiet. Tevens heeft de mens de mogelijkheid zich te herstellen.

In het algemeen (zie figuur 1.7) zijn menselijke fouten te onderscheiden in verzuimfouten, keuzefouten, behandelingsfouten, volgorde-fouten en buitengewone acties. In het bijzonder betreft het fouten in menselijke voorspellingen, het uitblijven van beslissingen, het nemen van verkeerde beslissingen, het niet uitvoeren van beslissingen, en het fout uitvoeren van beslissingen.

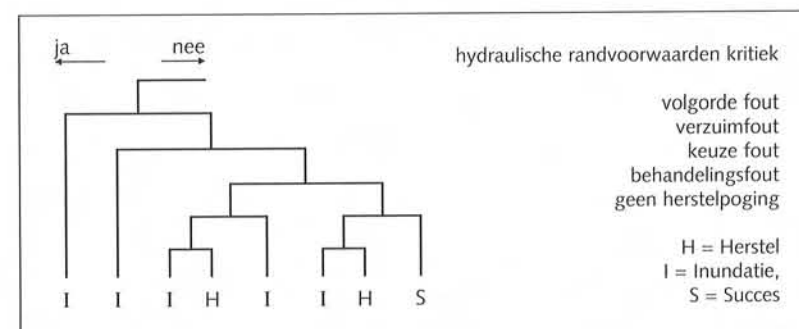


Fig. 1.7 Standaardindeling van de faalkansberekening tengevolge van menselijke fouten bij kritieke hydraulische randvoorwaarden

Om de kans op menselijke fouten te verlagen, kunnen preventieve acties worden uitgevoerd. Deze preventieve acties betreffen:

- Het maken of verbeteren van procedures en afspraken.

- Het verbeteren van de mens-machine relatie.
- Het observeerbaar en regelbaar maken van menselijke fouten.
- Het trainen van menselijke handelingen.
- Het controleren van menselijke handelingen door middel van technische systemen.

Hieronder volgt van elk van de punten een nadere uitwerking.

#### *Het opstellen van procedures en afspraken*

Voor het opstellen daarvan dient men de volgende richtlijn in acht te nemen:

1. Eventuele andere procedures die eerst gedaan moeten worden, dienen te worden aangegeven.
2. De toestanden moeten worden aangegeven waarin een proces of (deel)installatie moet zijn voordat de procedure mag worden toegepast.
3. De acties moeten duidelijk in de vorm van handelingen worden gespecificeerd.
4. Grenswaarden moeten kwantitatief worden weergegeven.
5. De te hanteren regel-eenheden of "displays" moeten volledig geïdentificeerd zijn.
6. De procedure moet kunnen worden uitgevoerd in de volgorde waarin hij geschreven is.
7. De procedure moet kunnen worden uitgevoerd zonder aanvullende informatie te verkrijgen van personen of documenten die niet door de procedure worden gespecificeerd.
8. De procedure moet kunnen worden uitgevoerd zonder directe assistentie van personen die niet door de procedure gespecificeerd worden.
9. Iedere stap af laten tekenen.
10. Iedere bladzijde bevat voldoende identificatie-informatie ten aanzien van: procedurenummer en/of titel, datum van uitgifte, revisienummer en paginanummer
11. Laatste bladzijde van de procedure is duidelijk aangegeven.
12. Procedure heeft een uniek en permanent nummer.
13. Procedure heeft een inleiding met een verklaring-doel procedure.
14. De procedure bevat de voorzorgsmaatregelen die in acht moeten worden genomen bij het uitvoeren van de procedure.
15. Kwalificatie van het personeel dat de procedure uitvoert, is aangegeven.
16. Aantal personeelsleden om procedures uit te voeren is aangegeven.

#### *Het verbeteren van de ergonomie*

Toepassing van ergonomische richtlijnen kan een belangrijke bijdrage leveren aan een verbetering van de werksituatie en daarmee een verlaaging van de kans op menselijke falen. Veelal zijn deze richtlijnen kwalitatief, d.w.z. ze hebben een invloed op de kans, maar hoe groot de invloed kwantitatief is, is vaak moeilijk aan te geven. Overigens is het toepassen van ergonomische vuistregels niet altijd voldoende.

Het punt is dat de mens in staat is zich goed aan te passen aan veranderde omstandigheden in de werksituatie. Juist dit vermogen maakt het alleen toepassen van ergonomische richtlijnen niet altijd mogelijk en is de ervaring van een ergonoom vereist.

Beschouw als voorbeeld de opstelling van een regelpaneel, waarbij ondermeer rekening gehouden dient te worden met de volgorde van acties die men moet uitvoeren. Als het paneel zodanig is ingericht dat men bij een sluitingsprocedure iedere keer van de ene naar de andere kant van het paneel moet lopen, kan dit de kans op fouten vergroten. In het algemeen is men in die situatie geneigd zich aan te passen aan deze onvoldoende ergonomische situatie door de gewenste acties in een andere volgorde uit te voeren. Indien daarvoor echter een officiële werkinstructie ontbreekt, wordt de kans op ongewenste situaties vergroot, bijvoorbeeld doordat een essentiële handeling vergeten wordt.

#### *Menselijke fouten observeerbaar en herstelbaar maken*

In tegenstelling tot technische systemen heeft de mens de mogelijkheid gemaakte fouten te herstellen. Dit herstellfenomeen blijkt bij het voorkomen van ongewenste gevolgen door menselijke fouten een belangrijke rol te spelen. De kans op een ongewenst gevolg is een combinatie van de kans op een menselijke fout en de kans op het niet op tijd herstellen van die fout. Bij het voorkomen van veel ongewenste situaties blijkt het herstelaspect bij de mens een minstens zo belangrijke rol te spelen als de fout zelf.

De kans op herstel wordt bepaald door het feit dat de mens merkt dat er wat mis is (het falen moet observeerbaar zijn) en er moet nog tijd zijn om de fout te herstellen (het proces moet nog in een reversibele toestand zijn).

Ook het proces zodanig inrichten dat de mens in staat is fouten op tijd te herstellen is essentieel. Veelal wordt een proces zodanig beveiligd en geregeld dat de mens de finesses van het proces niet meer kent: hij wordt buiten de regelkring geplaatst. Indien een proces zodanig is geautomatiseerd dat de mens herstelbare fouten mag maken, dan komt

de mens beter te weten waar de systeemgrenzen liggen. Dit draagt bij tot een beter begrip van het proces en tot een optimaal gedrag van de mens in noodsituaties.

Voorbeeld: het observeerbaar maken kan gebeuren door het aanbrengen van alarmeringen. Dit hoeft overigens niet altijd tot een veiliger situatie te leiden. Er zijn ongevallen bekend waar juist teveel alarmeringen waren, waardoor de observeerbaarheid juist afnam.

In tegenstelling tot het observeerbaar maken, is het herstelbaar maken van fouten minder goed mogelijk. Dit wordt namelijk in belangrijke mate bepaald door de tijd die men nodig heeft om fouten te herstellen. Deze tijd bestaat uit de tijd om vast te stellen wat er aan de hand is (waarom sluit de kering niet?), de tijd die men nodig heeft voor de herstelhandeling (de kering wordt alsnog gesloten) en de tijd die vervolgens nodig is om de gewenste situatie te bereiken (de kering is gesloten). Het herstelbaar maken komt er dan vooral op neer de tijd voor het uitvoeren van de herstelhandelingen te verkleinen of de tijd nodig voor het vaststellen waarom de kering niet sluit te verkleinen door middel van training in ongewenste situaties.

#### *Het trainen van menselijke handelingen*

Mensen dienen getraind te worden in het uitvoeren van de juiste handelingen tijdens kritieke omstandigheden. Hiertoe dienen oefeningen te worden opgesteld waarbij de werkelijke omstandigheden zo goed mogelijk worden nagebootst. Gedetailleerde uitwerking hangt daarbij van het type kering af. Bij een coupure zal men bijvoorbeeld eenmaal per jaar op een niet aangekondigd tijdstip de schotbalken moeten aanbrengen. Bij een kering met een grote regelkamer, kan men de gehele rekenkamer knop voor knop nabouwen en met een computer buiten-omstandigheden en gevolgen van handeling simuleren. Om herstelvaardigheden te oefenen kan men tijdens een oefening bewust technische of menselijke fouten introduceren.

#### *Controle door techniek*

Controle van menselijke handelingen door technische systemen kan de kans op menselijke fouten belangrijk reduceren. Controle impliceert echter wel dat het systeem globaal de procedure bevat volgens welke de acties dienen te verlopen. Daarnaast dient het controlesysteem de belangrijkste toestanden van het te regelen systeem te kennen om zo-doende te kunnen signaleren dat een bepaalde grootte door het menselijk handelen nog niet gerealiseerd is. Om de kosten niet onnodig

te verhogen, verdient het aanbeveling dit alleen toe te passen voor menselijke handelingen die een relatief hoge faalkans hebben.

#### 1.6.3 Technisch falen

Gesteld mag worden dat het technisch falen betrekking heeft op de mechanische, elektrische en elektronische systemen van een beweegbare kering. De conditionele (= gegeven een vraag) kans dat inundatie optreedt tengevolge van het falen van een van deze systemen wordt systeemfaalkans genoemd, in dit hoofdstuk kortweg faalkans. Er zijn in beginsel drie oorzaken te onderscheiden die tot technisch falen kunnen leiden. Dit zijn: het niet operationeel zijn, het falen bij de start en het falen tijdens bedrijf van een systeem (zie figuur 1.8).

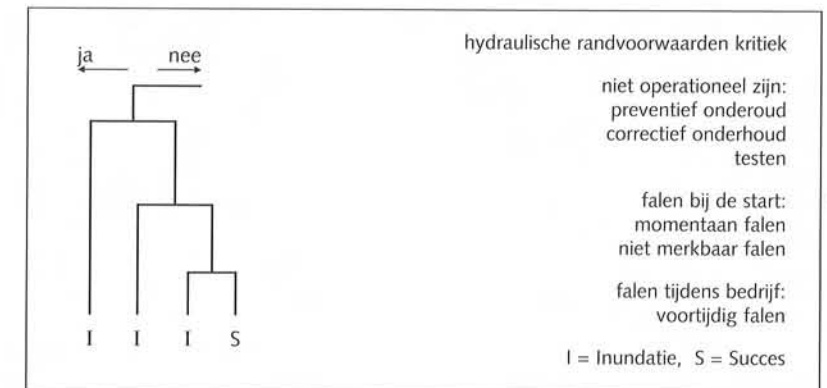


Fig. 1.8 Standaardindeling van de faalkansberekening tengevolge van technisch falen bij kritieke hydraulische randvoorwaarden

#### *Niet operationeel zijn*

Ten tijde dat de kering niet in gebruik is, kunnen er allerlei gebeurtenissen plaatsvinden waardoor de kering niet functioneert op het moment dat dit gewent is. Die gebeurtenissen betreffen onderhoudsactiviteiten aan de kering die, gepland (preventief) dan wel niet gepland (correctief), leiden tot het buiten bedrijf stellen van de kering.

Uitgaande van het bestaan van een onderhoudsplan is het mogelijk te berekenen wat de voorziene (gemiddelde) niet-beschikbaarheid zal zijn van de kering ten gevolge van het geplande onderhoud. Moeilijker zal het zijn de onvoorziene niet-beschikbaarheid te bepalen. Met behulp van

een storingsanalyse is het mogelijk de grootst mogelijke verzameling gebeurtenissen te genereren die kunnen leiden tot niet geplande onderhoudsactiviteiten. Daarna zal met een data-analyse eventueel in combinatie met foutenboomanalyses moeten worden geschat hoe vaak die gebeurtenissen zullen optreden en hoe lang de kering hierdoor buiten bedrijf zal blijven.

#### *Het falen bij de start*

Verondersteld wordt dat, bij een vraag om de kering te sluiten, de kering operationeel is. In dat geval bestaat er nog steeds de kans dat een systeem bij de start niet zal functioneren. Dit kan enerzijds het gevolg zijn van het momentaan falen van componenten, zoals het niet starten van dieselgeneratoren en elektromotoren of het niet openen dan wel sluiten van relais of kleppen. Deze componenten hebben een faalkans per vraag en dragen afhankelijk van de configuratie direct dan wel indirect bij aan de totale faalkans van de kering. Anderzijds kan dit het gevolg zijn van het feit dat componenten onopgemerkt niet functioneren (niet-merkbaar falen). Deze componenten hebben een faalfrequentie en kunnen falen in de periode dat de kering in rust is, zonder dat men het weet. De grootte van de bijdrage van deze componenten aan de kans dat de kering niet sluit is afhankelijk van de lengte van de periode waarin die componenten gefaald kunnen zijn. Door middel van het uitvoeren van een test is de lengte van die periode te beïnvloeden, en dus de bijdrage aan de totale faalkans. Overigens kan het testen van componenten weer leiden tot het niet operationeel zijn van de kering, waardoor het van belang wordt het testinterval te minimaliseren. Met behulp van de systeembeschrijving en een data-analyse is uit te vinden welke componenten een faalkans per vraag hebben en welke componenten niet-merkbaar kunnen falen. Met behulp van een foutenboomanalyse is aan te geven welke invloed het falen van die componenten heeft op de faalkans van de kering.

#### *Het falen tijdens bedrijf*

Verondersteld wordt dat, bij een vraag om de kering te sluiten, de kering operationeel is en ook in bedrijf komt (begint te sluiten). In dat geval bestaat er nog steeds de kans dat de kering niet zal sluiten. Het tijdens bedrijf falen van componenten, zoals het voortijdig stoppen van dieselgeneratoren en elektromotoren of het uitvallen van elektrische voedingen, hebben een faalfrequentie en dragen afhankelijk van de configuratie direct dan wel indirect bij aan de totale faalkans van de kering. Met behulp

van de systeembeschrijving en een data-analyse is uit te vinden welke componenten een faalfrequentie hebben en hoe lang ze dienen te functioneren. Verder dient te worden onderzocht of er tijd is voor niet geplande reparaties tijdens de sluiting. Meestal is een storing in bijvoorbeeld de elektrische voeding vrij snel verholpen. Met behulp van een foutenboomanalyse is ook dan weer aan te geven welke invloed het falen van de componenten heeft op de faalkans van de kering.

#### *1.6.4 Betrouwbaarheidsanalyse bewegingswerk*

In de betrouwbaarheidsanalyse van technisch/menselijk falen van een bewegingswerk worden twee grootheden gebruikt om het falen van een component te beschrijven, namelijk faalkans per tijd (faalfrequentie) en de niet beschikbaarheid.

De *faalkans per tijd* of de *faal-frequentie* wordt aangegeven met:

$$\lambda \quad [1/\text{tijdseenheid}]$$

Van een faalfrequentie is altijd sprake bij een component met een continue functie. Voorbeelden zijn: Niet blijven draaien van een motor; lek of breuk van een drukvat; dichtstaande schakelaar opent spontaan. Heeft de betreffende component een constante faalfrequentie dan geldt dat de kans dat de component in het interval  $[0...t]$  faalt, gelijk is aan:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (1.11)$$

De functie  $F(t)$  wordt ook de niet-betrouwbaarheid op tijdstip  $t$  genoemd. Door deze functie in een reeks te ontwikkelen kan worden aangetoond dat voor  $\lambda t < 0,1$  met voldoende benadering geldt:

$$F(t) = \lambda t \quad (1.12)$$

De faalkans neemt dus voor kleine perioden lineair met de tijd toe.

De *niet-beschikbaarheid* van een component bij een vraag om functioneren kan het gevolg zijn van spontaan falen, van niet-merkbaar gefaald zijn in de voorafgaande periode, van testen of van reparatie tijdens de vraag. In formulevorm:

$$U = Q + U_{nmf} + U_{test} + U_{rep} \quad (1.13)$$

- $U$  = totale kans op niet-beschikbaarheid  
 $Q$  = kans op spontaan falen per vraag  
 $U_{nmf}$  = kans op niet-beschikbaarheid door niet-merkbaar falen  
 $U_{test}$  = kans op niet-beschikbaarheid door testen  
 $U_{rep}$  = kans op niet-beschikbaarheid door reparatie

Per term volgt een korte bespreking.

#### Spontaan falen

De faalkans per vraag heeft betrekking op een component die slechts één enkele momentane beweging moet uitvoeren. Voorbeelden zijn: een motor start; een afsluiter opent; een relais schakelt; een handeling wordt uitgevoerd. Per keer dat die momentane toestandsverandering wordt gevraagd is er een kans  $Q$  dat de toestandswijziging niet plaatsvindt.

#### Niet-merkbaar falen

Met name als systemen, zoals in de waterbouw, niet permanent hun functie hoeven te vervullen, kunnen deze tussen twee tijdstippen van de niet-gefaalde overgaan in de gefaalde toestand. Soms zal dat direct merkbaar zijn en soms niet. Indien de component niet wordt aangesproken gedurende een bepaalde periode of als er een andere component is die de taak overneemt, dan valt de gefaalde toestand niet op. Wil men deze toestand toch op tijd ontdekken, dan zal men de component met enige regelmaat moeten inspecteren en/of testen.

Het effect van een test is in figuur 1.9 weergegeven. De kans dat tijdens een test een component in een gefaalde toestand wordt aangetroffen is volgens betrekking (1.12) gelijk aan  $F(T) = \lambda T$ ;  $T$  is in dit geval de lengte van het testinterval. Het zal duidelijk zijn dat men een reparatie uitvoert

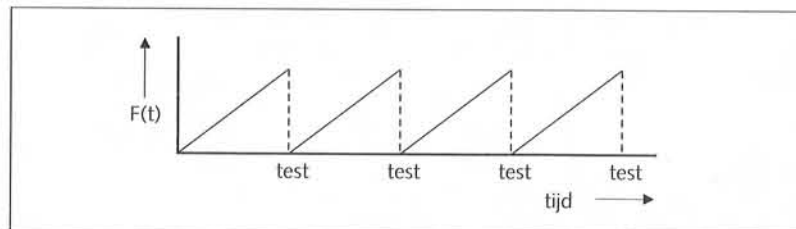


Fig. 1.9 Het gedrag van een component met een faalsnelheid bij regelmatig testen.  $F(t)$  is de kans in een gefaalde toestand te zijn in een gegeven testinterval.

als de betreffende component bij een test gefaald blijkt te zijn. Door te testen beïnvloedt men de duur van de gefaalde toestand van een component als gevolg van niet merkbaar falen; niet de storingsfrequentie van de component.

In ieder tijdsinterval  $\Delta t$  heeft de niet-merkbaar falende component een even grote kans om te falen (nl.  $\lambda \Delta t$ ) en dus kan dit falen zich net zo makkelijk aan het begin van het tijdsinterval voordoen als aan het eind. Gemiddeld zal het tijdstip van falen halverwege het testinterval zijn. Als dat falen niet zelfmeldend is (niet merkbaar falen), dan betekent dat, dat de gemiddelde niet-beschikbare periode gelijk is aan een half testinterval ( $T/2$ ). De kans op niet-beschikbaarheid verloopt van 0 aan het begin tot  $\lambda T$  aan het testinterval. Gemiddeld is de (kans op) niet-beschikbaarheid dan gelijk aan:

$$U_{nmf} = 1/2 \lambda T \quad (1.14)$$

#### Testen

Na ieder testinterval is er, althans voor een enkelvoudig systeem, een periode  $\tau$  (= testduur) dat de component niet beschikbaar is. (Zie figuur 1.10). Dit betekent dat de niet-beschikbaarheid door testen gelijk is aan:

$$U_{test} = \frac{\tau}{T + \tau} = \frac{\tau}{T} \quad (1.15)$$

Deze formule geldt alleen als de component op volkomen onverwachte ogenblikken nodig kan zijn. In de waterbouw kan men testen meestal zo inrichten dat testen worden uitgevoerd in niet-gevaarlijke perioden. Deze term blijft daarom verder buiten beschouwing.

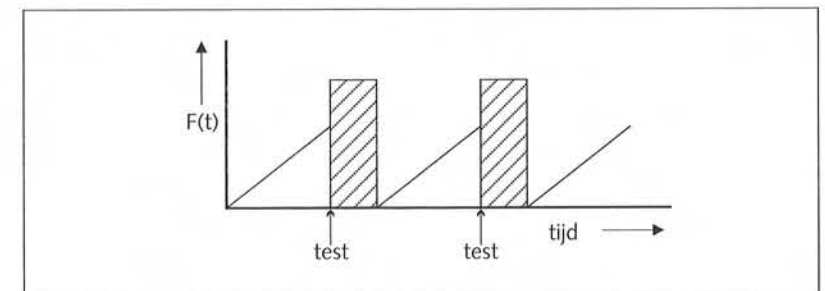


Fig. 1.10 Niet beschikbaarheid door testen

**Reparatie**

De niet-beschikbaarheid ten gevolge van reparatie wordt analoog aan de niet-beschikbaarheid ten gevolge van niet merkbaar falen bepaald. Als de gemiddelde reparatieduur van die component gelijk is aan  $\theta$  dan is de niet-beschikbaarheid die door reparatie veroorzaakt wordt gelijk aan:

$$U_{rep} = \frac{\theta}{1/\lambda} = \lambda \theta \quad (1.16)$$

**Totale niet-beschikbaarheid**

De totale niet-beschikbaarheid van een component die niet merkbaar faalt is gelijk aan (testen wordt niet meegenomen):

$$U = Q + \frac{1}{2} \lambda T + \lambda \theta \quad (1.17)$$

Soortgelijke formules kunnen ook worden afgeleid voor andere gevallen. In de tabellen 1.2a en 1.2b zijn de formules voor een niet merkbaar falende component samengevat, samen met de formules voor een merkbaar falende component en voor een component met een faalkans per vraag. In de tabellen 1.3a en 1.3b staan de formules die voor het kwantificeren van meervoudige systemen gebruikt worden. In deze formules zijn sommige hogere orde termen verwaarloosd. Verder is aangenomen dat de testintervallen van beide componenten gelijk zijn.

Tabel 1.2a Formules voor het niet beschikbaar zijn van een component (eerste orde minimale deelverzamelingen)

component	niet beschikbaarheid	
	falen	reparatie
A1 — $\lambda$   n.m. —	$\frac{1}{2} \lambda T$	$\lambda \theta$
A2 — $\lambda$   m. —	-	$\lambda \theta$
A3 — Q   - —	Q	$\frac{Q\theta}{T}$

n.m. = Niet merkbaar falen  
m. = Merkbaar falen

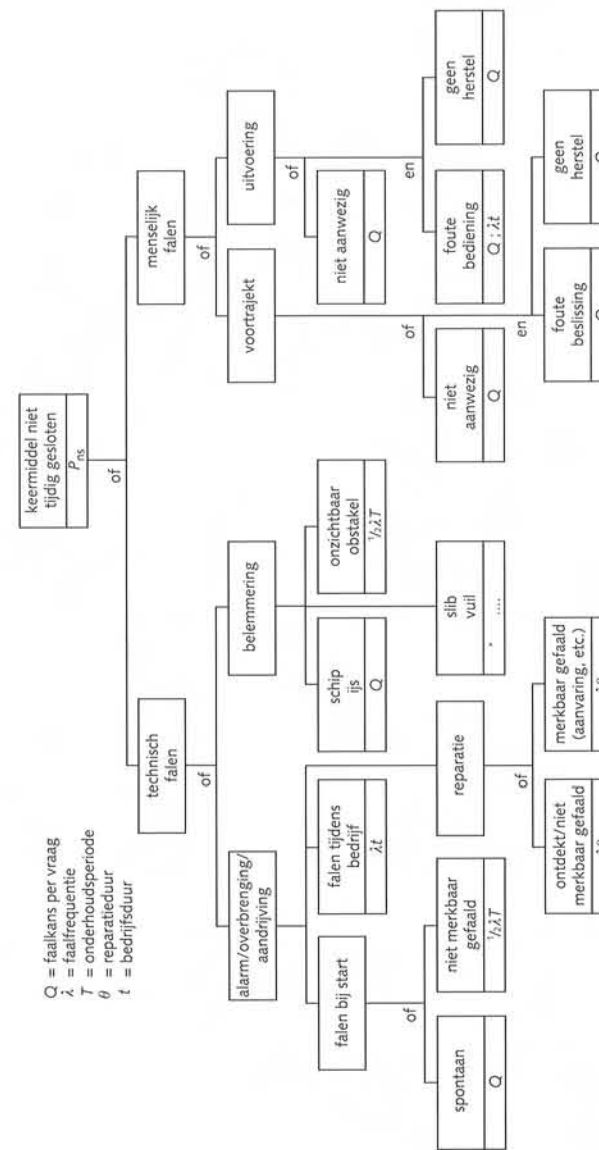


Fig. 1.11 Uitwerking foutenboom voor gebeurtenis keermiddel niet tijdig gesloten.

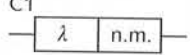
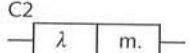
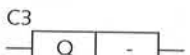


In figuur 1.11 is het onderdeel van de foutenboom voor "keermiddel niet tijdig gesloten" verder gedetailleerd. Uiteraard is dit een algemeen schema dat in een bijzonder geval nog verder uitgewerkt kan worden. Per basisgebeurtenis is aangegeven of deze van het  $\lambda t$ ,  $Q$ ,  $\frac{1}{2}\lambda t$  of  $\lambda\theta$  type is. Voor "slib" en "vuil" is geen formule ingevuld omdat dit cumulatieve processen zijn. Ook de boom voor menselijke fouten zal in een concreet geval verder gedetailleerd moeten worden door alle beslissings- en uitvoeringsacties te analyseren. Merk op dat "per vraag" hier zowel betrekking kan hebben op de volledige sluitingsprocedure als op een individuele beslissing of handeling.

Opmerkingen bij de foutenboom:

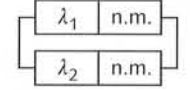
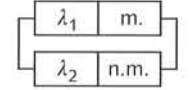
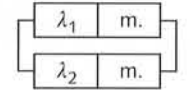
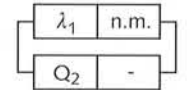
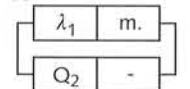
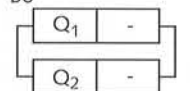
1. De kans dat benodigd materiaal of materieel niet aanwezig is, is bij een permanent keermiddel (deuren) een orde kleiner dan bij een keermiddel dat moet worden aangevoerd (schotbalken).
2. De kans op falen t.g.v. obstakels wordt bij de aanwezigheid van een tweede onafhankelijk keermiddel aanmerkelijk verkleind.
3. De kans op falen t.g.v. een niet functionerend bewegingswerk wordt aanmerkelijk verkleind bij de aanwezigheid van een tweede onafhankelijk stuursysteem en energievoorziening.
4. Etc.

Tabel 1.2b Formules voor de niet betrouwbaarheid van een component (eerste orde minimale deelverzamelingen)

component	aantal storingen in tijdsinterval T	
	$N(0,T) < 0.1 \Rightarrow F(0,T) \approx N(0,T)$	
C1 	$\lambda T$	
C2 	$\lambda T$	
C3 	Geen algemeen geldende formule mogelijk	

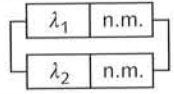
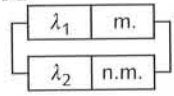
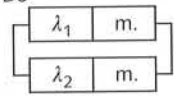
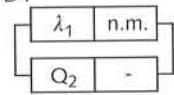
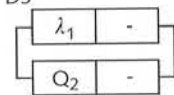
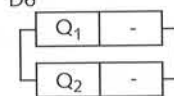
n.m. = Niet merkbaar falen  
m. = Merkbaar falen

Tabel 1.3a Formules voor de niet beschikbaarheid van redundante systemen (tweede orde minimale deelverzamelingen)

componenten	niet beschikbaarheid	
	falen	reparatie
B1 	$\frac{1}{2} \lambda_1 \lambda_2 T^2$	$\lambda_1 \lambda_2 \theta_1 T$
B2 	-	$\frac{1}{2} \lambda_1 \lambda_2 \theta_1 T$
B3 	-	$\lambda_1 \lambda_2 \theta_A (\theta_A + \theta_B)$ $\theta_A = \min(\theta_1, \theta_2)$ $\theta_B = \max(\theta_1, \theta_2)$
B4 	$\frac{1}{2} \lambda_1 T Q_2$	$\lambda_1 \theta_1 Q_2$
B5 	-	$\lambda_1 \theta_1 Q_2$
B6 	$Q_1 Q_2$	$\frac{Q_1 Q_2 (\theta_1 + \theta_2)}{T}$

n.m. = Niet merkbaar falen  
m. = Merkbaar falen

Tabel 1.3b Formules voor de niet betrouwbaarheid van redundante systemen (tweede orde minimale deelverzamelingen)

componenten	aantal storingen in tijdsinterval (0,T)
	$N(0,T) < 0.1 \Rightarrow F(0,T) \approx N(0,T)$
D1 	$\lambda_1 \lambda_2 T^2$
D2 	$\frac{1}{2} \lambda_1 \lambda_2 T^2$
D3 	$\lambda_1 \lambda_2 (\theta_A + \theta_B) T$
D4 	Geen algemeen geldende formule mogelijk
D5 	Geen algemeen geldende formule mogelijk
D6 	Geen algemeen geldende formule mogelijk

n.m. = Niet merkbaar falen  
m. = Merkbaar falen

**Aanvaring**

Aanvaring kan in het algemeen worden gemodelleerd als een vorm van merkbaar falen van onderdelen van de kering. De beweegbare delen als deuren en schuiven zijn in dit verband het meest kwetsbaar. Door ontzetting of beschadiging van wanden of hoofden kan echter ook een situatie optreden van niet-beschikbaarheid.

In het geval van aanvaring wordt  $\lambda$  gegeven door:

$$\lambda = p N \quad (1.18)$$

$p$  = kans op aanvaring per schip ( $p'$  = idem, per lengte-eenheid)

$N$  = aantal schepen per tijdseenheid.

Bij een kering die zich aan de zijkant van de waterweg bevindt kan  $p$  evenredig zijn met de blootgestelde lengte:  $p = p' L$ .

De reparatietijd  $\theta$  kan van geval tot geval verschillen, afhankelijk van de massa  $m$  en aanvaarsnelheid  $v$  van het schip op het moment van aanvaring en de impact-bestendigheid van de kering. In wezen kunnen we dus alleen spreken over de verwachtingswaarde van de reparatietijd:

$$E(\theta) = \iint \theta(m,v,\dots) f_m(m) f_v(v)\dots dm dv \quad (1.19)$$

Daarmee wordt de niet-beschikbaarheid door aanvaring:

$$U_{aanv} = p N E(\theta) \quad \text{of} \quad U_{aanv} = p' L N E(\theta) \quad (1.20)$$

Afhankelijk van het type kering kan het ook noodzakelijk zijn rekening te houden met aanvaring in kerende toestand.

**Voorbeeld beveiligingssysteem**

In figuur 1.12 is als voorbeeld een eenvoudig systeem geschetst. Het systeem bestaat uit een proces en een beveiliging. Veronderstel dat het proces een dijkkringgebied vertegenwoordigt dat tegen inundatie beveiligd moet worden. Veronderstel verder dat boven een bepaalde waterstand de beveiliging een kering dient te sluiten. Neem aan dat de beveiliging niet merkbaar kan falen.

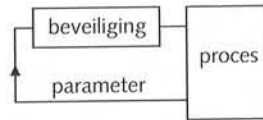


Fig. 1.12 Een beveiligingssysteem

De beveiliging zal dus getest moeten worden. Hoe vaak er getest moet worden, wordt (in het geval de bijdrage aan de niet beschikbaarheid tengevolge van testen niet van toepassing is) bepaald door de eis dat de totale niet beschikbaarheid kleiner moet zijn dan een gegeven waarde. Stel dat  $\lambda = 10^{-6}$ /uur,  $\theta = 20$  uur en de norm luidt dat de niet-beschikbaarheid kleiner moet zijn dan  $10^{-3}$ , dan is het voldoende om de beveiliging 6 keer per jaar te testen. In dat geval wordt het testinterval 1460 uur en wordt de niet-beschikbaarheid gelijk aan:

$$U \approx \frac{1}{2} * 10^{-6} * 1460 + 20 * 10^{-6} = 7,5 \cdot 10^{-4} \text{ uur/uur}$$

Dit betekent dat op een willekeurig gekozen tijdstip de gemiddelde kans  $7,5 \cdot 10^{-4}$  is dat de beveiliging niet ingrijpt bij een te hoge waterstand (hoger dan open keerpeil). Men kan ook zeggen dat de beveiliging gemiddeld eens in de 1333 keer dat het open keerpeil overschreden wordt niet zal ingrijpen. Welke maatregelen kunnen er nu genomen worden om de niet-beschikbaarheid te verlagen? De reparatieduur van 20 uur is vrij lang. Veronderstel eens dat die teruggebracht wordt naar 2 uur indien men een reservebeveiliging in voorraad zou hebben. Dan wordt de niet-beschikbaarheid gelijk aan:

$$U \approx \frac{1}{2} * 10^{-6} * 1460 + 2 * 10^{-6} = 7,3 \cdot 10^{-4} \text{ uur/uur}$$

Ten opzichte van de oude waarde  $7,5 \cdot 10^{-4}$  is dit een marginale winst. Het is dus nauwelijks de moeite waard om een reservebeveiliging in voorraad te hebben. Echter indien de norm voorschrijft dat de totale niet-beschikbaarheid kleiner moet zijn dan  $10^{-4}$ , zal iedere week getest moeten worden. In dat geval wordt het testinterval 168 uur en wordt de niet-beschikbaarheid gelijk aan:

$$U \approx \frac{1}{2} * 10^{-6} * 168 + 20 * 10^{-6} = 1,04 \cdot 10^{-4} \text{ uur/uur}$$

Het is nu wel zinvol een reserve beveiliging in voorraad te hebben:

$$U = 8,4 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot 10^{-6} = 8,6 \cdot 10^{-5}$$

Een andere mogelijkheid om de niet-beschikbaarheid te verlagen is de volgende:

Maak *niet-merkbaar falen* merkbaar. Het merkbaar maken van het falen kan bijvoorbeeld worden gerealiseerd door iedere seconde aan de uitgang van de beveiliging te controleren of de beveiliging goed werkt. Vooral bij moderne elektronica is dat goed mogelijk. Wordt dit verwezenlijkt dan reduceert (1.17) tot:

$$U = \lambda \theta \quad (1.21)$$

In dit voorbeeld betekent dit dat de niet-beschikbaarheid van  $7,5 \cdot 10^{-4}$  naar  $2 \cdot 10^{-5}$  gaat. Dit betekent dus een factor 37 winst!

Het stil zetten van het proces tijdens reparatie verlaagt ook de niet-beschikbaarheid. In dit kader zou het stilzetten van het proces betekenen dat alvorens het waarschuwingssysteem gerepareerd wordt, de desbetreffende kering wordt gesloten. In dat geval heeft men gedurende die periode geen behoefte aan een beveiliging. Afhankelijk van de norm en het testinterval kan het zinvol zijn een dergelijke bedrijfsvoering te overwegen (zie het effect van een reserve beveiliging).

Indien een keer in de week testen niet werkbaar is, of indien de norm nog strenger is, bijvoorbeeld de totale niet-beschikbaarheid moet kleiner zijn dan  $10^{-5}$ , dan zijn de bovengenoemde mogelijkheden onvoldoende, en kan het plaatsen van een tweede, redundante beveiliging parallel aan de eerste uitkomst bieden. Volgens tabel 1.3a wordt de niet-beschikbaarheid van een dergelijk (1 uit 2) systeem, waarvan beide componenten niet-merkbaar falen gegeven door de formule voor systeem B1:

$$U = \frac{1}{3} \lambda_1 \lambda_2 T^2 + \lambda_1 \lambda_2 \theta_1 T \quad (1.22)$$

Dit betekent voor de gegeven  $\lambda$  en  $\theta$ :

$$U = \frac{1}{3} * 10^{-6} * 10^{-6} * T^2 + 10^{-6} * 10^{-6} * 20 * T$$

Kies T nu zodanig dat voldaan wordt aan de norm. Een goede waarde voor T is dan 2920 uur, hetgeen overeenkomt met 3 keer per jaar testen. De niet-beschikbaarheid is dan:

$$U = 2.8 \cdot 10^{-6}$$

Ten opzichte van de niet redundante beveiliging is dit dus een enorme verbetering.

Het voorbeeld van de beveiliging is wel erg eenvoudig, en niet in overeenstemming met de vaak veel complexere praktijk. Wil men dit soort berekeningen op complexere systemen toepassen dan heeft men de foutenboom-techniek nodig.

#### 1.6.5 Numerieke gegevens

Voor het uitvoeren van een kwantitatieve analyse heeft men behoefte aan getalwaarden voor faalkansen, faalfrequenties, testperioden en reparatietijd. In de tabellen 1.4.1 tot en met 1.4.6 zijn faalkansen  $Q [1/d] = [1/"demand"] = [1/vraag]$  en faalfrequenties  $\lambda [1/hr] = [1/uur]$  (of andere tijdseenheid) of  $\lambda [1/km]$  (of andere lengte-eenheid) voor een aantal veel voorkomende gebeurtenissen gegeven. Reparatie-tijden zijn niet opgenomen en zullen van geval tot geval geschat moeten worden.

In de tabellen worden de volgende rubrieken onderscheiden:

- 1.4.1 Elektrische/electronische componenten
- 1.4.2 Electromechanische componenten
- 1.4.3 Hydraulische, mechanische, pneumatische componenten
- 1.4.4 Operationele belemmeringen
- 1.4.5 Menselijk falen
- 1.4.6 Enkele geïntegreerde systemen

De vermelde faalfrequenties hebben, tenzij anders aangegeven, betrekking op de toestand dat de component actief in werking is. Mocht bij een bepaalde component falen gedurende "stand-by" van belang zijn, dan wordt aanbevolen hiervoor een faalfrequentie te nemen die een halve of hele orde lager ligt.

De meeste getalwaarden in de tabellen zijn afkomstig van zogenaamde generieke databanken, dat wil zeggen, de getalwaarden zijn gemiddelden

van schattingen of observaties over verschillende merken, typen, toepassingsgebieden enz. Specifieke bedrijfsomstandigheden worden op die manier niet in rekening gebracht. De tabellen geven wel (5%-) onderen (95%-) bovengrenzen. Deze grenzen gelden voor de gehele verzameling van de beschouwde componenten. Heeft men eenmaal een keuze voor een bepaald merk en type gemaakt dan zullen andere, meer specifieke, getallen moeten worden gebruikt. De getalwaarden zijn verder tijdsafhankelijk, hetgeen betekent dat veroudering niet optreedt of via afdoende onderhoud wordt ondervangen. Voor opmerkingen en bronvermelding, zie de bladzijde na de tabellen.

In de tabellen is een kolom "Lit" voor "literatuur" opgenomen. De nummers in deze kolom verwijzen naar de literatuurlijst aan het eind van dit Hoofdstuk.

In de tabellen is ook een kolom "opmerking" opgenomen. De daarin vermelde nummers verwijzen naar onderstaande legenda:

#### Legenda Opmerkingen:

1. Accubatterij staat stand-by.
2. Alleen de connector, niet de kabel. De ondergrens is berekend aan de hand van de gegeven bovengrens.
3. Op basis van 3 storingen in 9 jaar.
4. Op basis van 47 storingen in 6 jaar.
5. Op basis van 14 storingen.
6. Op basis van 10 storingen.
7. Op basis van 0 storingen en Bayesiaanse update.
8. Errorfactor = 10 op basis van engineering judgement.
9. KEMA onderzoek wees uit dat er een significant verschil bestaat in de niet-start kans van een dieselgenerator met en zonder repteerstart.
10. AC motoren.
11. Op basis van 3 storingen.
12. 12% van de faalmechanismen veroorzaakt blokkeren.
13. Errorfactor = 3 op basis van "engineering judgement".
14. Aanvaring vindt plaats met gemiddelde snelheid  $\mu_v = 3$  m/s (geladen schepen) of 2,5 m/s (ongeladen schepen) en standaardafwijking  $\sigma_v = 0,5$  m/s.

Tabel 1.4.1 Elektrische- en electronische componenten van beweegbare afsluitmiddelen

Tabel 1.4.2: Electromechanische componenten van beweegbare afsluitmiddelen

Component	Faalmanier	$\lambda$ [/h] of Q[/d]	5% ondergrens	95% bovengrens	Lit./blz	Opm
Accubatterij	levert geen spanning stopt voortijdig	6,6.10 <sup>-3</sup> [/d]	7,1.10 <sup>-4</sup>	2,1.10 <sup>-2</sup>	1.9/3B34	1
		1,9.10 <sup>-6</sup> [/h]	1,8.10 <sup>-7</sup>	6,4.10 <sup>-6</sup>	1.9/3B38	-
Coax-verbinding	maakt geen contact	1,7.10 <sup>-7</sup> [/h]	1,2.10 <sup>-7</sup>	2,5.10 <sup>-7</sup>	1.13/191	2
Drukknop	maakt geen contact	1,0.10 <sup>-5</sup> [/d]	1,2.10 <sup>-6</sup>	3,1.10 <sup>-5</sup>	1.6/22	-
Eindschakelaar	opent niet	3,0.10 <sup>-5</sup> [/d]	3,7.10 <sup>-6</sup>	9,3.10 <sup>-5</sup>	1.6/22	-
	sluit niet	3,0.10 <sup>-5</sup> [/d]	3,7.10 <sup>-6</sup>	9,3.10 <sup>-5</sup>	1.6/22	-
	opent spontaan	1,0.10 <sup>-6</sup> [/h]	3,8.10 <sup>-8</sup>	3,8.10 <sup>-6</sup>	1.6/22	-
GEB / LS-aansluiting	valt uit	4,0.10 <sup>-5</sup> [/h]	1,0.10 <sup>-5</sup>	1,0.10 <sup>-4</sup>	1.3/66	3
Gelijkrichter Gestab. voeding 24V	geeft geen gelijkspanning	7,8.10 <sup>-6</sup> [/h]	3,5.10 <sup>-7</sup>	2,9.10 <sup>-5</sup>	1.9/3B15	-
Hoogspanningslijn	50 kV valt uit	0,9.10 <sup>-6</sup> [/h]	0,6.10 <sup>-6</sup>	1,3.10 <sup>-6</sup>	1.12/64	-
	110-220 kV valt uit	0,8.10 <sup>-6</sup> [/h]	0,5.10 <sup>-6</sup>	1,0.10 <sup>-6</sup>	1.12/76	-
	380 kV valt uit	0,3.10 <sup>-6</sup> [/h]	0,2.10 <sup>-6</sup>	0,5.10 <sup>-6</sup>	1.12/88	-
Kabel (bovengronds)	breekt	3,0.10 <sup>-6</sup> [/km/h]	2,4.10 <sup>-7</sup>	9,0.10 <sup>-6</sup>	1.4/767	-
Kabel (grond)	breekt	1,0.10 <sup>-6</sup> [/km/h]	7,0.10 <sup>-7</sup>	1,4.10 <sup>-6</sup>	1.3/83	4
Kabel (in goot)	breekt	1,2.10 <sup>-7</sup> [/km/h]	3,0.10 <sup>-8</sup>	3,6.10 <sup>-7</sup>	1.4/764	-
Kabel (signaal/controle)	breekt	1,0.10 <sup>-5</sup> [/km/h]	1,0.10 <sup>-7</sup>	2,0.10 <sup>-5</sup>	1.4/772	-
Kabel (glasfiber)						
Omvormer	geeft geen wisselspanning	1,2.10 <sup>-5</sup> [/h]	4,0.10 <sup>-6</sup>	2,1.10 <sup>-5</sup>	1.8/257	-
Modem (Solid State Device)	faalt	3,0.10 <sup>-6</sup> [/h]	1,1.10 <sup>-7</sup>	1,1.10 <sup>-5</sup>	1.6/24	-
PLC	CPU valt uit	5,1.10 <sup>-5</sup> [/h]	3,1.10 <sup>-5</sup>	8,0.10 <sup>-5</sup>	1.8/291	5
	I/O kaart valt uit	9,0.10 <sup>-6</sup> [/h]	4,9.10 <sup>-6</sup>	1,5.10 <sup>-5</sup>	1.8/291	6
	Voeding valt uit	2,9.10 <sup>-5</sup> [/h]	3,0.10 <sup>-6</sup>	9,4.10 <sup>-5</sup>	1.8/291	7
	Geheugen module valt uit	1,0.10 <sup>-5</sup> [/h]	3,8.10 <sup>-7</sup>	3,8.10 <sup>-5</sup>	Eng.Judg.	-
Rail	aan aarde	4,5.10 <sup>-8</sup> [/h]	1,4.10 <sup>-9</sup>	1,7.10 <sup>-7</sup>	1.9/3B1	-
Relais	bekrachtigt niet	3,0.10 <sup>-4</sup> [/d]	1,1.10 <sup>-5</sup>	1,1.10 <sup>-3</sup>	1.6/21	-
Schakelaar (hand-)	schakelt niet	3,0.10 <sup>-5</sup> [/d]	1,1.10 <sup>-6</sup>	1,1.10 <sup>-4</sup>	1.2/5.1-1	-
Schakelaar (vermogens-)	opent / sluit niet	3,0.10 <sup>-3</sup> [/d]	1,1.10 <sup>-4</sup>	1,1.10 <sup>-2</sup>	1.2/5.1-1	-
	opent spontaan	5,0.10 <sup>-7</sup> [/h]	1,8.10 <sup>-8</sup>	1,8.10 <sup>-6</sup>	1.11/A.D-25	8
Smeltveiligheid	opent niet	1,0.10 <sup>-6</sup> [/d]	3,8.10 <sup>-7</sup>	3,8.10 <sup>-5</sup>	1.6/22	-
	opent spontaan	1,0.10 <sup>-7</sup> [/h]	3,8.10 <sup>-9</sup>	3,8.10 <sup>-7</sup>	1.6/22	-
Spil-eindschakelaar	sluit niet	1,0.10 <sup>-4</sup> [/d]	2,7.10 <sup>-5</sup>	2,4.10 <sup>-4</sup>	1.2/5.1-1	-
	voortijdig open	9,0.10 <sup>-8</sup> [/h]	3,0.10 <sup>-9</sup>	3,0.10 <sup>-7</sup>	1.15/III 4.2	-
Thermische beveiliging	beveiligt niet	3,0.10 <sup>-7</sup> [/d]	1,1.10 <sup>-8</sup>	1,1.10 <sup>-6</sup>	1.6/21	-
	voortijdig open	3,0.10 <sup>-7</sup> [/h]	1,1.10 <sup>-8</sup>	1,1.10 <sup>-6</sup>	1.6/21	-
Transformator	valt uit	1,0.10 <sup>-6</sup> [/h]	3,8.10 <sup>-8</sup>	3,8.10 <sup>-6</sup>	1.6/22	-

Component	Faalmanier	$\lambda$ [/h] of Q[/d]	5% ondergrens	95% bovengrens	Lit./blz	Opm
Dieselgenerator	niet starten					
	met repeteerstart	1,8.10 <sup>-3</sup> [/d]	3,6.10 <sup>-4</sup>	1,0.10 <sup>-2</sup>	1.1/-	9
	zonder rep. start	1,7.10 <sup>-2</sup> [/d]	1,1.10 <sup>-2</sup>	2,5.10 <sup>-2</sup>	1.1/-	9
	gecombineerd stopt voortijdig	1,0.10 <sup>-2</sup> [/d] 3,0.10 <sup>-3</sup> [/h]	1,2.10 <sup>-3</sup> 1,1.10 <sup>-4</sup>	3,1.10 <sup>-2</sup> 1,1.10 <sup>-2</sup>	1.6/13 1.2/5.1-1	- -
E-motor	start niet	3,0.10 <sup>-5</sup> [/h]	1,1.10 <sup>-6</sup>	1,1.10 <sup>-4</sup>	1.6/22	10
	stopt voortijdig	3,0.10 <sup>-5</sup> [/h]	1,1.10 <sup>-6</sup>	1,1.10 <sup>-4</sup>	1.6/22	10
E-motor gestuurde klep	sluit niet	6,0.10 <sup>-3</sup> [/d]	6,7.10 <sup>-4</sup>	1,9.10 <sup>-2</sup>	1.9/3M30	-
	opent niet	5,1.10 <sup>-3</sup> [/d]	1,4.10 <sup>-3</sup>	1,2.10 <sup>-2</sup>	1.9/3M52	-
	stopt voortijdig	1,4.10 <sup>-6</sup> [/d]	2,4.10 <sup>-7</sup>	3,8.10 <sup>-6</sup>	1.9/3M68	-
E-motor aangedreven pomp	start niet	4,8.10 <sup>-3</sup> [/d]	5,5.10 <sup>-4</sup>	1,5.10 <sup>-2</sup>	1.9/3M09	-
	stopt voortijdig	8,5.10 <sup>-5</sup> [/h]	3,7.10 <sup>-6</sup>	3,1.10 <sup>-4</sup>	1.9/3M21	-
Luchtkoeler	start niet	2,1.10 <sup>-4</sup> [/d]	9,4.10 <sup>-6</sup>	7,7.10 <sup>-4</sup>	1.9/3A01	-
	stopt voortijdig	1,1.10 <sup>-5</sup> [/h]	1,6.10 <sup>-6</sup>	3,1.10 <sup>-5</sup>	1.9/3A05	-

Tabel 1.4.3: Hydraulische-, mechanische- en pneumatische componenten van beweegbare afsluitmiddelen.

Component	Faalmanner	$\lambda$ [1/h] of Q [1/d]	5% ondergrens	95% bovengrens	Lit./blz	Opm
Cilinder	faalt	$1,0 \cdot 10^{-7}$ [h]	$3,7 \cdot 10^{-9}$	$3,7 \cdot 10^{-7}$	1.10/568	8
Drukvat	lekkage	$5,0 \cdot 10^{-6}$ [h]	$1,8 \cdot 10^{-7}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	1.6/19	-
Filter	verstopt	$1,0 \cdot 10^{-5}$ [h]	$3,7 \cdot 10^{-7}$	$3,7 \cdot 10^{-5}$	1.6/19	-
Kogelkraan	opent/sluit niet	$3,5 \cdot 10^{-4}$ [d]	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	1.9/3-XYZ-1	-
	verstopt	$1,9 \cdot 10^{-7}$ [h]	$2,8 \cdot 10^{-8}$	$5,8 \cdot 10^{-7}$	1.9/3-XYZ-7	-
Lier	faalt tijdens bedrijf	$7,9 \cdot 10^{-5}$ [h]	$5,3 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	1.8/295	-
Pakking	lekkage	$5,0 \cdot 10^{-7}$ [h]	$1,8 \cdot 10^{-8}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	1.10/568	8
Regelklep	inwendige lekkage	$5,2 \cdot 10^{-6}$ [h]	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	1.8/167	11
	regelt niet	$2,6 \cdot 10^{-5}$ [h]	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$6,7 \cdot 10^{-5}$	1.8/167	-
	verstopt	$1,7 \cdot 10^{-6}$ [h]	$9,0 \cdot 10^{-8}$	$8,2 \cdot 10^{-6}$	1.8/167	-
Slang zwaar belast	lekkage	$4,0 \cdot 10^{-5}$ [h]	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	1.10/568	8
Slang licht belast	lekkage	$4,0 \cdot 10^{-6}$ [h]	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	1.10/568	8
Tandwielkast	blokkeren	$1,5 \cdot 10^{-7}$ [h]	$4,0 \cdot 10^{-8}$	$3,6 \cdot 10^{-7}$	1.7/774	12
	voortijdig falen	$1,3 \cdot 10^{-6}$ [h]	$3,5 \cdot 10^{-7}$	$3,1 \cdot 10^{-6}$	1.5/2-2	13
Tank	lekkage	$5,0 \cdot 10^{-7}$ [h]	$1,8 \cdot 10^{-8}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	1.6/12	-
Terugslagklep	opent niet	$1,5 \cdot 10^{-4}$ [d]	$3,5 \cdot 10^{-5}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$	1.9/3-C-76	-
	sluit niet	$1,6 \cdot 10^{-3}$ [d]	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$5,7 \cdot 10^{-3}$	1.9/3-C-64	-
	opent voortijdig	$9,5 \cdot 10^{-7}$ [h]	$5,0 \cdot 10^{-8}$	$3,4 \cdot 10^{-6}$	1.9/3-C-83	-
Veerbelaste veiligheid	opent/sluit niet	$1,5 \cdot 10^{-4}$ [d]	$5,5 \cdot 10^{-6}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$	1.14/273	-
	sluit niet na openen	$1,0 \cdot 10^{-2}$ [d]	$3,7 \cdot 10^{-4}$	$3,7 \cdot 10^{-2}$	1.14/273	-
Zuiger	lekkage langs cilinder	$5,0 \cdot 10^{-7}$ [h]	$1,8 \cdot 10^{-8}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	1.10/568	8

Tabel 1.4.4 Schuiven, deuren, schotbalken

Component	Gebeurtenis	$\lambda$ [1/jr] of Q [1/d]	Lit.	Opm
Schotbalken	niet kunnen plaatsen in den droge	$1,10^{-2}$ /d	1.18	
	niet kunnen plaatsen in den natte	$1,10^{-1}$ /d	1.18	
	niet kunnen plaatsen in den natte, gegeven falen deuren/schuiven	$3,10^{-1}$ /d	1.18	
Schuifdeur	weigeren bewegingswerk	$3,10^{-5}$ - $3,10^{-3}$ /d	1.19	
	obstakel op de bodem	$1,10^{-4}$ - $1,10^{-2}$ /yr	1.19	
	ernstige ijsvorming	$1,10^{-9}$ /d	1.20	
	aanvaring gesloten kering	$2,10^{-5}$ /sluiting	1.20	14
Sluisdeur	weigeren bewegingswerk	$1,10^{-4}$ /d	1.19	
	zand/vuil op de bodem	$1,10^{-2}$ /yr	1.18	
	obstakel op de bodem	$1,10^{-4}$ /yr	1.19	
	weigeren tweede stel deuren			
	gegeven falen eerste stel	$1,10^{-1}$ /d	1.18	
	aanvaring gesloten deur	$3,10^{-9}$ /schip	1.21	14
Onderdeel sluiscolk	aanvaring	$1,10^{-4}$ /schutting	1.19	
Zijkant vaarweg	aanvaring	$1,10^{-6}$ /km/schip	1.19	

Tabel 1.4.5: Menselijke fouten

Type fout	Q [1/d]	Lit.	Opm
Alarmfout	aangewezen functionaris	$1,10^{-3}$ /d	18
	andere functionaris	$5,10^{-2}$ /d	18
	bevolking	$1,10^{-1}$ /d	18
Niet beschikbaar personeel	ziek	$5,10^{-2}$ /d	-
	ongeluk bij transport	$1,10^{-5}$ /km	-
	niet bereikbaar (indien geregeld)	$1,10^{-2}$ /d	-
	niet bereikbaar (indien niet geregeld)	$2,10^{-1}$ /d	-
Volgordefout (handeling uit hoofd)	2 items	$6,10^{-3}$ /d	16
	5 items	$4,10^{-1}$ /d	16
Verzuimfout	met checklist	$1,10^{-3}$ - $3,10^{-3}$ /d	16
	zonder checklist	$3,10^{-3}$ - $1,10^{-2}$ /d	16
Keuzefout (zonder gedachtefout)	verkeerde schakelaar	$5,10^{-4}$ - $3,10^{-3}$ /d	16
	verkeerde display	$1,10^{-3}$ - $5,10^{-2}$ /d	16
Behandelingsfout	schakelaar verkeerde stand	$5,10^{-4}$ - $5,10^{-1}$ /d	16
	verkeerd aflezen (factor 10)	$5,10^{-4}$ - $4,10^{-1}$ /d	16
Geen herstellpoging	$1,10^{-1}$ /d	-	

Tabel 1.4.6: Systemen

Component	Faalmanner	$\lambda$ of Q	Grenzen	Opm
Gestabiliseerde Computervoeding	Gelijkrichter	$7,8 \cdot 10^{-6}$ [/h]		
	Transformator	$1,0 \cdot 10^{-6}$ [/h]		
	Schakelaar (spontaan open)	$5,0 \cdot 10^{-7}$ [/h]		
	Zekering (spontaan open)	$1,0 \cdot 10^{-7}$ [/h]		
	Systeem (gelijkrichters redundant)	$1,6 \cdot 10^{-6}$ [/h]	$6,1 \cdot 10^{-8} - 6,1 \cdot 10^{-6}$	
	Systeem (gelijkrichters niet redundant)	$9,4 \cdot 10^{-6}$ [/h]	$3,8 \cdot 10^{-7} - 3,8 \cdot 10^{-5}$	
Laadgelijkrichter	Accubatterij	$1,9 \cdot 10^{-6}$ [/h]		
	Gelijkrichter	$7,8 \cdot 10^{-6}$ [/h]		
	Omvormer	$1,2 \cdot 10^{-5}$ [/h]		
	Schakelaar (spontaan open)	$5,0 \cdot 10^{-7}$ [/h]		
	Systeem	$2,2 \cdot 10^{-5}$ [/h]	$8,2 \cdot 10^{-7} - 8,2 \cdot 10^{-5}$	
No-Break set	Pillar (inclusief net)	$1,0 \cdot 10^{-6}$ [/h]	$3,8 \cdot 10^{-8} - 4,6 \cdot 10^{-6}$	17
	Strüver	$1,2 \cdot 10^{-6}$ [/h]	$4,6 \cdot 10^{-8} - 4,6 \cdot 10^{-6}$	17
Regelbare aandrijving	E-motor	$3,0 \cdot 10^{-5}$ [/h]		
	Solid State Drive	$3,0 \cdot 10^{-6}$ [/h]		
	Systeem (drie solid state devices plus E-motor)	$3,9 \cdot 10^{-5}$ [/h]	$1,5 \cdot 10^{-6} - 1,5 \cdot 10^{-4}$	17
Naderingsschakelaar	Relais (bekrachtigt niet)	$3,0 \cdot 10^{-4}$ [/d]	$1,1 \cdot 10^{-5} - 1,1 \cdot 10^{-3}$	
	Relais (geeft ten onrechte signaal)	$5,0 \cdot 10^{-7}$ [/h]	$1,9 \cdot 10^{-8} - 1,9 \cdot 10^{-6}$	
Meetopnemer	NBD4017 en Rittmeyer (spontaan open per contact)	$9,0 \cdot 10^{-8}$ [/h]	$3,4 \cdot 10^{-9} - 3,4 \cdot 10^{-7}$	
	(niet sluiten per contact)	$1,0 \cdot 10^{-4}$ [/d]	$3,8 \cdot 10^{-6} - 3,8 \cdot 10^{-4}$	
	Camille Bauer	$4,0 \cdot 10^{-6}$ [/h]	$1,5 \cdot 10^{-7} - 1,5 \cdot 10^{-5}$	
	Codegever Stegmann	$1,5 \cdot 10^{-5}$ [/h]	$5,7 \cdot 10^{-7} - 5,7 \cdot 10^{-5}$	
Nivometer	NBD4012 Drukdoos/Ultrasonor sys			
	Druksensor	$3,0 \cdot 10^{-6}$ [/h]		
	Meetversterker	$5,0 \cdot 10^{-6}$ [/h]		
	Solid State Device	$3,0 \cdot 10^{-6}$ [/h]		
Systeem	$1,1 \cdot 10^{-5}$ [/h]	$4,2 \cdot 10^{-7} - 4,2 \cdot 10^{-5}$		
	NBD4012 Vlotter systeem			
	Druksensor (2x)	$6,0 \cdot 10^{-6}$ [/h]		
	Mechanische vlotter	$1,0 \cdot 10^{-5}$ [/h]		
	Solid State Device	$3,0 \cdot 10^{-6}$ [/h]		
Systeem	$1,9 \cdot 10^{-5}$ [/h]	$7,2 \cdot 10^{-7} - 7,2 \cdot 10^{-5}$		
	NBD4012 Borrelbuis systeem			
	Druksensor (2x)	$6,0 \cdot 10^{-6}$ [/h]		
	Meetversterker	$5,0 \cdot 10^{-6}$ [/h]		
	Solid State Device	$3,0 \cdot 10^{-6}$ [/h]		
	Compressor (relatief laag ingeschat)	$1,0 \cdot 10^{-5}$ [/h]		
	Systeem	$2,4 \cdot 10^{-5}$ [/h]	$9,1 \cdot 10^{-7} - 9,1 \cdot 10^{-5}$	

## 2.1 Inleiding

In dit Hoofdstuk worden aanbevelingen gedaan voor de te hanteren sluitingsprocedures voor beweegbare waterkeringen. Dit betreft permanent bemande waterkeringen, niet permanent bemande waterkeringen die indien onbemand voldoende waterkerend zijn, alsmede niet permanent bemande waterkeringen die onbemand onvoldoende waterkerend zijn. Onbemane waterkeringen die bij hoogwater automatisch worden gesloten worden buiten beschouwing gelaten.

Aan deze aanbevelingen kunnen beheerders richtlijnen ontleen voor een veilig beheer van hun beweegbare waterkeringen, rekening houdend met specifieke omstandigheden ten aanzien van de beschouwde waterkering en hun organisatie.

Aanbevolen wordt de sluitingsprocedure af te stemmen met de organisatie rondom de dijkbewaking, als ook met de organisatie voor het uitvoeren van rampenplannen bij doorbraak van een hoofdwaterkering.

## 2.2 Aanbevelingen

### 2.2.1 Fasering sluitingsprocedure

Aanbevolen wordt om in de sluitingsprocedure drie fasen te onderscheiden [lit. 2.1]:

- de waarschuwingfase, beginnend op het signaleringsmoment;
- de mobilisatiefase, beginnend wanneer het signaleringspeil wordt overschreden;
- de sluitingsfase, beginnend wanneer het sluitpeil wordt overschreden.

Beslissingen omtrent het starten van de procedure en het overgaan naar een volgende fase zijn gerelateerd aan verwachte of actuele overschrijdingen van vooraf vastgestelde buitenwaterstanden. Er worden drie belangrijke peilen onderscheiden namelijk:

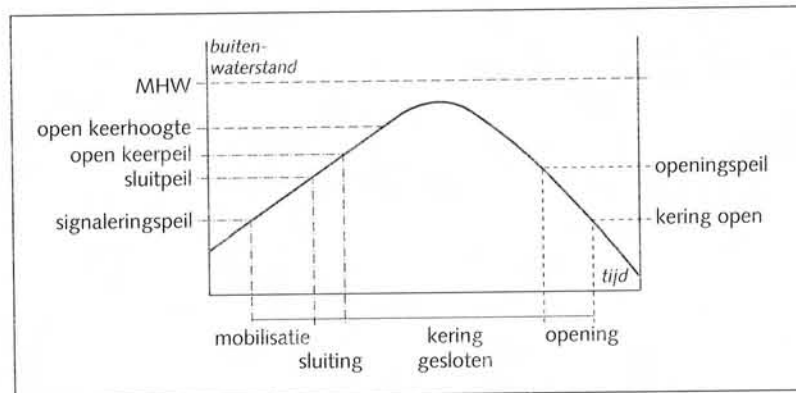
- het signaleringspeil;
- het sluitpeil;
- het open keerpeil.

In figuur 2.1 zijn deze begrippen nader in beeld gebracht.

Als de voorspelling van het waterstandsverloop duidt op een overschrijding van het open keerpeil, worden waarschuwingen verzonden en het bedienend en beslissend personeel gewaarschuwd. Dit is het signaleringsmoment.

Het *signaleringspeil* is een gedefinieerde stand van verhoogd water die ter plaatse van een beweegbare waterkering wordt gemeten. Bij een overschrijding van het signaleringspeil gaat de mobilisatiefase in, en wordt het bedienend- en beslissend personeel in staat van paraatheid gebracht, ook als de voorspelling van het waterstandsverloop nog niet duidt op een overschrijding van het open keerpeil. In de sluitprocedure moet rekening worden gehouden met de tijd, nodig om de bemanning op de gewenste plaatsen te krijgen.

Het *sluitpeil* is een gedefinieerde stand van verhoogd water die ter plaatse van een beweegbare kering wordt gemeten of verwacht. Wanneer de waterstand het sluitpeil heeft bereikt wordt de waterkering door de bedieners gesloten. Voordat het sluitpeil wordt bereikt dient de



waterkering te zijn bemand.

Fig. 2.1. Waterstandsverlooptijdlijn met de voornaamste peilen

Het *open keerpeil* is de waterstand die bij open afsluitmiddel nog veilig gekeerd kan worden.

In Hoofdstuk 3 wordt ook nog genoemd de *open keerhoogte*. Dit is de kerende hoogte van een waterkering met beweegbare afsluitmiddelen bij open afsluitmiddel. Er is een marge tussen open keerhoogte en open

keerpeil in verband met golfaanval en onnauwkeurigheden in de voorspelling van de waterstanden

De keuze van het signaleringspeil en het sluitpeil is enerzijds afhankelijk van het open keerpeil en de verwachte stijgsnelheid van het buitenwater, anderzijds van de tijdsduur die gemoeid is met het doorlopen van de verschillende fasen in de sluitingsprocedure. Deze tijdsduur is sterk afhankelijk van het aantal en de typen beweegbare waterkeringen, de bereikbaarheid van de waterkeringen en andere omstandigheden, die van geval tot geval zeer uiteenlopend kunnen zijn.

Aanbevolen wordt om beweegbare waterkeringen te voorzien van een verwacht signaleringspeil met daarnaast een gemeten signaleringspeil als back-up. Dit geldt met name voor waterkeringen die niet permanent zijn bemand, en onbemand niet voldoende waterkerend zijn. Deze waterkeringen brengen het verhoogde risico met zich mee, dat zij bij hoogwater onbemand (kunnen) zijn en zonder bediening niet veilig waterkerend zijn. Het is dus gewenst dat een geheel afwezige bemanning zo vroeg mogelijk wordt opgeroepen.

Waarschuwingen met betrekking tot verwachte hoogwaterstanden, en lokaal gemeten waterstanden dienen bij voorkeur te worden ontvangen door een continu bezette meld-/regelkamer.

### 2.2.2 Documentatie en informatievoorziening

Aanbevolen wordt om in een instructie vast te leggen welke partijen betrokken zijn bij de sluitingsprocedure, hoe de verdeling van taken en verantwoordelijkheden tussen de partijen is geregeld, en hoe de communicatie tussen de partijen verloopt. De instructie dient aanwezig te zijn bij de bedieningsmiddelen van de waterkering, en bekend te zijn bij alle betrokkenen. Wijzigingen moeten tijdig worden verwerkt en doorgegeven.

Aanbevolen wordt om door de betrokken partijen een logboek bij te laten houden, bij ingang van elke nieuwe sluitingsprocedure. In het logboek worden de verstrekte opdrachten en beslissingen vastgelegd.

Speciale aandacht dient te worden geschonken aan het aantal aanwezige en bruikbare communicatiemiddelen op of bij een beweegbare waterkering.



### 2.2.3 Oefeningen

Aangezien bepaalde (nood)situaties onder omstandigheden van hoogwater zelden voorkomen verdient het aanbeveling zulke situaties regelmatig te oefenen.

### 2.2.4 Onderhoud en inspectie

Storingen aan beweegbare waterkeringen dienen systematisch te worden geregistreerd, geanalyseerd en opgeheven.

## 2.3 Voorbeelduitwerking van een sluitingsprocedure

### 2.3.1 Algemeen

Een voorbeelduitwerking wordt gegeven van de opzet van een sluitingsprocedure. Deze opzet is bedoeld voor bemande en onbemane waterkeringen, die voor aanvang van de procedure nog onvoldoende hoogwaterkerend zijn.

In figuur 2.2 is de sluitingsprocedure schematisch weergegeven.

De sluitingsprocedure is verdeeld in drie fasen:

- waarschuwingsfase;
- mobilisatiefase;
- sluitingsfase.

Achtereenvolgens zal een nadere toelichting worden gegeven van de betrokken partijen en de in de procedure opgenomen handelingen.

In deze procedure dient rekening te worden gehouden met het tijdsaspect. De definitie van de verschillende fasen van de sluitingsprocedure is afhankelijk van de mogelijke snelheden waarmee de waterstand kan stijgen en van de mogelijkheden om de betrokken partijen te mobiliseren. Daarom wordt aanbevolen om voor elke beweegbare waterkering een afzonderlijk scenario op te zetten, aangepast aan de lokale situatie.

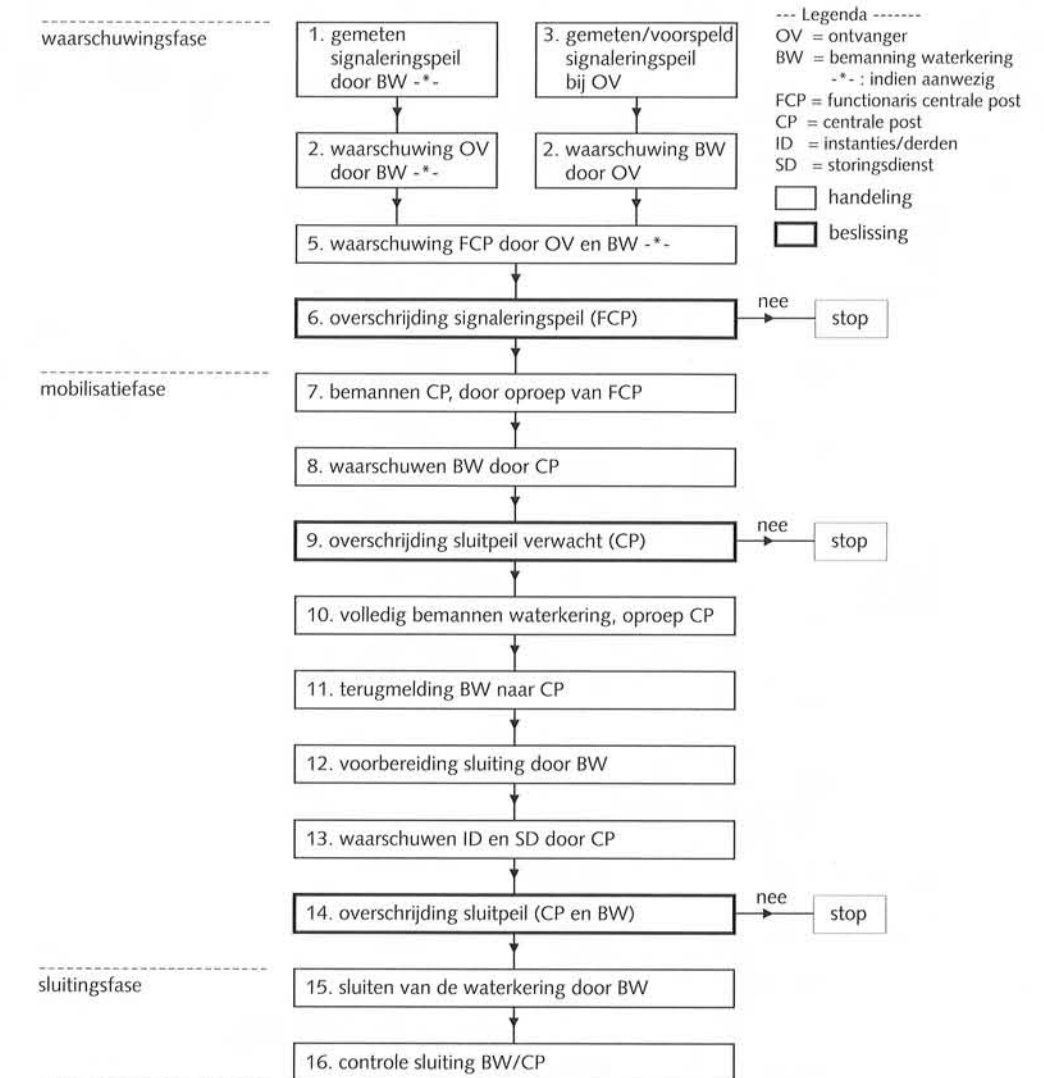


Fig. 2.2 Sluitingsprocedure beweegbare waterkering

### 2.3.2 Betrokken partijen

De volgende betrokken partijen worden onderscheiden:

- Ontvanger;
- Bemanning Waterkering;
- Functionaris Centrale Post;
- Centrale Post;
- Instanties en derden;
- Storingsdienst.

*Ontvanger* is een instantie die 24 uur per dag, en elke dag in de week, operationeel is. Hier ontvangt men de actuele of verwachte waterstand, en wordt de fase van paraatheid gestart indien het signaleringspeil bij een beweegbare waterkering wordt overschreden. De Ontvanger is altijd bereikbaar. Een dergelijke instantie treft men bijvoorbeeld aan in een continu bezette meld-/regelkamer van een waterschap of gemeente en een alarmcentrale van de politie of brandweer.

De *Bemanning Waterkering* is verantwoordelijk voor de waterstands-signalering ter plaatse van de waterkering, en voor het uitvoeren van de sluiting van de waterkering. Bij onbemande waterkeringen dient de bemanning te worden opgeroepen. Bij bemande waterkering zal in sommige gevallen een tweede bediener moeten worden opgeroepen.

De *Functionaris Centrale Post* is iemand die bevoegd is de waterkering door de Bemanning Waterkering te laten sluiten. Hij is eveneens bevoegd de waarschuwingfase in het organisatieschema sluitprocedure te beëindigen zonder verder actie te hebben ondernomen. Functionaris is bijvoorbeeld hoofd van een waterschapsdistrict of chef van een technische dienst bij een waterschap of gemeente.

De *Centrale Post* is verantwoordelijk voor en coördineert de sluitingsoperatie vanaf het ingaan van de fase van paraatheid. Alleen de Centrale Post heeft de bevoegdheid de fase van mobilisering te beëindigen. Na afloop evalueert de Centrale Post de mobilisatiefase en laat de waterkeringen inspecteren. De Centrale Post wordt bezet door personen die functies hebben vergelijkbaar met die van dijkgraaf, havenmeester en chef van technische diensten in waterschap of gemeente. Als lokatie van de Centrale Post kan men denken aan een districtskantoor van een waterschap of een centrale meldkamer van een waterschap of gemeente.

*Instanties en derden* kunnen zijn een burgemeester, de politie, een hulpdienst of een particulier aannemingsbedrijf waarmee een contract is afgesloten voor de situatie van mobilisatie.

De *Storingsdienst* kan maatregelen treffen om eventuele storingen te verhelpen. Daartoe kunnen ook andere instanties worden gemobiliseerd. Behalve vanuit de Centrale post is de Storingsdienst ook direct bereikbaar voor de Bemanning Waterkering.

### 2.3.3 Handelingen en beslissingen

De handelingen en beslissingen zijn in figuur 2.2 genummerd. Onderstaand worden deze stuk voor stuk nader toegelicht.

1. Gemeten signaleringspeil door Bemanning Waterkering (indien aanwezig).  
In het geval dat de waterkering permanent bediend is, of indien de waterkering bij afwezigheid van bedienend personeel gesloten en voldoende hoogwaterkerend is, kan het signaleringspeil ter plaatse worden gemeten door de Bemanning Waterkering.
2. Waarschuwing Ontvanger door Bemanning Waterkering (indien aanwezig).  
De Ontvanger wordt onmiddellijk na meting van het signaleringspeil daarvan op de hoogte gebracht door Bemanning Waterkering.
3. Gemeten/voorspeld signaleringspeil bij Ontvanger.  
Wanneer de waterpeilmeter ter plaatse van de waterkering het signaleringspeil meet, wordt een automatische melding daarvan naar de Ontvanger gestuurd (bevestiging dat de voorspelde waterstand het signaleringspeil heeft bereikt). Dit kan bijvoorbeeld worden bereikt door middel van een signaallamp of een alarmbel in een meldkamer van de Ontvanger.
4. Waarschuwing Bemanning Waterkering door Ontvanger.  
De Bemanning Waterkering (indien aanwezig) worden onmiddellijk na ontvangst van het signaleringspeil daarvan op de hoogte gebracht door Ontvanger, ofwel krijgen een signaal via de waterpeilmeter ter plaatse wanneer de werkelijke waterstand het signaleringspeil zal hebben bereikt.

5. Waarschuwing Functionaris Centrale Post door Ontvanger en Bemanning Waterkering (indien aanwezig)  
Een Functionaris van de Centrale Post of zijn plaatsvervanger wordt onmiddellijk na ontvangst van de signaleringspeil daarvan op de hoogte gebracht door Ontvanger. De Bemanning Waterkering, wanneer zij op de waterkering aanwezig zijn, melden aan Functionaris de ontvangst van de verwachte waterstand, afkomstig van Ontvanger. Wanneer de melding uitblijft neemt Functionaris contact op met Bemanning Waterkering. In de communicatie tussen de Bemanning Waterkering en Functionaris wordt de laatstgenoemde op de hoogte gehouden van het verloop van de werkelijke waterstand.
6. Overschrijding signaleringspeil (Functionaris Centrale Post).  
Indien het signaleringspeil wordt overschreden, kan de Functionaris beslissen om de Centrale Post in paraatheid te brengen door bepaalde personen of hun plaatsvervangers op te roepen om zich naar de Centrale Post te begeven. De verantwoordelijkheid voor de verdere sluitingsoperatie wordt in dat geval door Functionaris overgedragen naar de Centrale Post.  
In het geval het signaleringspeil niet wordt overschreden besluit de Functionaris om de waarschuwingsfase te beëindigen en stelt Ontvanger en Bemanning Waterkering (indien aanwezig) hiervan op de hoogte.
7. Bemannen Centrale Post, door oproep van Functionaris Centrale Post.  
De Centrale Post wordt volledig bemand. Aanbevolen wordt om in deze fase de communicatiekanalen tussen Centrale Post en Bemanning Waterkering te testen, en eventuele storingsen hierin te verhelpen.
8. Waarschuwen Bemanning Waterkering door Centrale Post.  
De aanwezige bemanningen op de waterkeringen worden door de Centrale Post ingelicht dat de fase van paraatheid is ingegaan. Voorzover aanvullende bediening noodzakelijk is voor de sluiting van de waterkering, wordt deze door de Centrale Post gewaarschuwd zich beschikbaar te houden voor een eventuele voltallige bemanning van de waterkering.

9. Overschrijding sluitpeil verwacht (Centrale Post).  
Op de Centrale Post beraadt men zich op eventuele verdere actie. De criteria die hierbij een rol spelen zijn behalve voorspelde en gemeten waterstanden, het waargenomen verloop van het water en andere lokale (weers)-omstandigheden. De Centrale Post kan beslissen de fase van paraatheid te beëindigen, waarvan elke bemande waterkering op de hoogte wordt gesteld. Wanneer de Centrale Post besluit de organisatie te mobiliseren, worden de waterkeringen (indien bemand) ingelicht.
10. Volledig bemannen waterkering, oproep Centrale Post.  
Voorzover noodzakelijk voor de sluiting, wordt de waterkering volledig bemand. Reeds aanwezige bemanning wordt van de mobilisatie op de hoogte gesteld door de Centrale Post. Het is denkbaar dat aan de oproep in de praktijk niet kan worden voldaan, bijvoorbeeld in geval van een coupure in een woning. In dit geval kan het nodig zijn dat de Centrale Post uit eigen gelederen het personeel levert dat de coupure tijdig en veilig kan sluiten.
11. Terugmelding Bemanning Waterkering naar Centrale Post.  
De geroepen bedieners melden hun aankomst op de waterkeringen aan de Centrale Post.
12. Voorbereiding sluiting door Bemanning Waterkering.  
De Bemanning Waterkering treffen de voorbereiding voor een veilige sluiting van de waterkering. Hieronder kan vallen: het ontsteken van de verlichting, het ontgrendelen van deuren die toegang geven tot de ruimtes van de mechanisch en handmatige bedieningsinstallaties; het testen van bedieningsinstallaties op hun bruikbaarheid.
13. Waarschuwen Instanties/Derden en Storingsdienst door Centrale Post.  
Door de Centrale Post worden de bij een eventuele sluiting betrokken instanties en derden gewaarschuwd. Tevens wordt de Storingsdienst gemeld dat zij zich beschikbaar moet houden.
14. Overschrijding sluitpeil (Centrale Post en Bemanning Waterkering).  
Wanneer de waterstand het lokale sluitpeil van de waterkering

bereikt, wordt de kering in ieder geval gesloten of dient deze reeds gesloten te zijn. In alle andere gevallen kan de waterkering alleen worden gesloten in overleg tussen de Centrale Post en de bedieners van de waterkering.

15. Sluiten van de waterkering door Bemanning Waterkering.  
Door de Bemanning Waterkering wordt de kering gesloten.
16. Controle sluiting door Bemanning Waterkering en/of Centrale Post.  
Aanbevolen wordt om direct na overschrijding van het sluitpeil te controleren of de kering daadwerkelijk gesloten is. Dit kan bijvoorbeeld door een terugmelding van de Bemanning Waterkering naar de Centrale Post, of door inspectie door de Centrale Post. De sluitingsfase dient te zijn beëindigd voordat het faalpeil wordt overschreden.

## 3 STANDAARD BEOORDELINGSMETHODE BETROUWBAARHEID SLUITINGSOPERATIE

### 3.1 Inleiding

Dit Hoofdstuk is ontleend aan een studie [Lit. 3.1] uitgevoerd door TNO-BOUW en Fugro Ingenieursbureau B.V. met medewerking van de provincie Zuid-Holland. De studie is uitgevoerd in het kader van de activiteiten van de TAW-projectgroep D6 "Leidraad Kunstwerken", in opdracht van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat. De in paragraaf 3.3 gepresenteerde "Standaardbeoordelingsmethode" beoogt een hulpmiddel te zijn bij de veiligheidsbeoordeling van waterkerende kunstwerken met beweegbare afsluitmiddelen. Zij is ontwikkeld na bestudering van- en toetsing aan een aantal reeds eerder, ook door anderen uitgevoerde, beoordelingen van kunstwerken met beweegbare afsluitmiddelen. De hier gepresenteerde methode heeft niet de pretentie volledig te zijn of beter dan andere methoden. Wel beoogt zij een voorzet te geven tot een algemeen aanvaarde, goede en hanteerbare methode. Opmerkingen en suggesties voor verbetering zijn dan ook van harte welkom (te richten aan het werkorgaan van de TAW).

Allereerst wordt in paragraaf 3.2 de systeembeschrijving voor een waterkering met beweegbare afsluitmiddelen gegeven en wordt de betrouwbaarheidseis geformuleerd.

In paragraaf 3.3 wordt een "raamwerk" voor de beoordeling opgesteld, bestaande uit een standaard foutenboom en een vragenlijst met bijbehorende categorie-indeling.

In paragraaf 3.4 wordt een samenvatting gegeven.

In Appendix II is een voorbeeld opgenomen van de toepassing van de methode. De betreffende keersluis is dezelfde als in die behandeld in Hoofdstuk 11, Praktijkvoorbeeld "Keersluis".

In Appendix III zijn alternatieve scoringstabellen opgenomen, waarmee de in paragraaf 3.3 opgestelde methode beknopt is samengevat.

## 3.2 Systeembeschrijving

### 3.2.1 Hoofdtypen beweegbare keringen

Onderscheid kan worden gemaakt in vier hoofdtypen beweegbare keringen:

Type A: *Te sluiten bij overschrijding van sluitpeil.*

De afsluitmiddelen staan in beginsel open, en worden uitsluitend bij overschrijding van het sluitpeil gesloten. Dit betreft onder andere kleppenkeringen, stormvloedkeringen, de meeste keersluizen, coupures, afsluitbare duikers en schutsluizen met aparte hoogwaterdeuren, waarbij de voor het schutproces gebruikte afsluitmiddelen niet (voldoende) hoogwaterkerend zijn.

Type B: *Te openen op aanvraag.*

De afsluitmiddelen zijn in beginsel gesloten, en worden uitsluitend op aanvraag geopend. Dit betreft onder andere spuisluizen, inlaatsluizen en sommige keersluizen. Stuwen vallen buiten het kader van deze studie, omdat deze geen onderdeel vormen van de primaire waterkering.

Type C: *Altijd gesloten.*

In alle gevallen is er sprake van een gesloten afsluitmiddel. Dit betreft schutsluizen, waarbij alle voor het schutproces gebruikte afsluitmiddelen voldoende hoogwaterkerend zijn. Indien dit niet het geval is of indien om andere redenen bij MHW het schutproces moet worden onderbroken, vallen de sluisen onder type A.

Type D: *Te sluiten bij calamiteit.*

De afsluitmiddelen zijn in beginsel ook bij hoogwater open en worden uitsluitend in het geval van een calamiteit gesloten. Dit betreft onder andere pijpleidingkruisingen en tunnels.

Onderhavige bijlage beperkt zich tot type A "te sluiten bij overschrijding sluitpeil". Bij de overige typen zal de kans op het optreden van calamiteiten op zichzelf zo laag (moeten) zijn dat geen bijzonder hoge eisen aan de sluitingsprocedure hoeven te worden gesteld.

### 3.2.2 Faalmechanismen

In de hoofdfoutenboom van een kunstwerk worden drie hoofd-faalmechanismen onderscheiden (zie figuur 3.1):

- overlopen/overslag bij gesloten kering;
- sterkte/stabiliteit onvoldoende;
- sluiting beweegbare kering faalt.



Fig. 3.1 Hoofdfoutenboom kunstwerk

Uitsluitend het hoofdfaalmechanisme "sluiting beweegbare kering faalt" wordt in onderhavige bijlage uitgewerkt. Voor een nadere uitwerking van de overige hoofdfaalmechanismen wordt verwezen naar [3.6] voor "sterkte/stabiliteit" en [3.7] voor "overlopen/overslag".

Beweegbare keringen van type A zijn voorzien van één of meer afsluitmiddelen. In figuur 3.2 is de foutenboom voor het hoofdfaalmechanisme "sluiting beweegbare kering faalt" nader uitgewerkt.

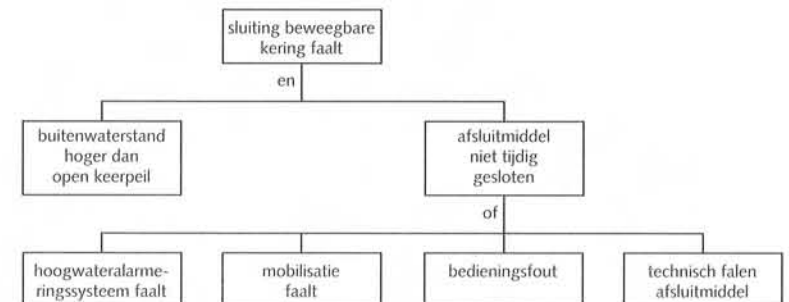


Fig. 3.2 Foutenboom voor "sluiting beweegbare kering faalt"

De beweegbare kering faalt indien de buitenwaterstand hoger is dan het open keerpeil en indien het afsluitmiddel niet gesloten is. Het *open keerpeil* is gedefinieerd als de maximale waterstand die nog veilig gekeerd kan worden bij geopend afsluitmiddel. Dit *open keerpeil* is lager dan de open keerhoogte. De open keerhoogte is gedefinieerd als de kruinhoogte van de waterkering bij geopend afsluitmiddel. Het verschil tussen open keerhoogte en open keerpeil is de *waakhoogte*, nodig bij de nog juist veilig te keren waterstand bij geopend afsluitmiddel.

De betrouwbaarheid van de sluiting is afhankelijk van vier subsystemen:

- Hoogwater waarschuwingssysteem: falen waterstandsregistratie, falen alarm, etc.
- Mobilisatie: bedienend personeel niet tijdig op de beweegbare kering aanwezig.
- Bedieningsfout: verkeerde handeling of nalaten handeling.
- Technisch falen afsluitmiddelen: bewegingswerk faalt, aanvaring, obstakels, etc.

De sub-systemen worden nader uitgewerkt in paragraaf 3.3.

### 3.2.3 Voornaamste begrippen

Onderstaand zijn de voornaamste begrippen kort toegelicht. In de figuren 3.3a en 3.3b zijn schematische dwarsdoorsneden over twee soorten keringen gegeven, met daarin de belangrijkste hoogtematen. In figuur 3.4 wordt het waterstandsverloop in de tijd geschetst, met daarin de belangrijkste peilen waarop beslissingen ten aanzien van mobilisatie en sluiting worden gebaseerd.

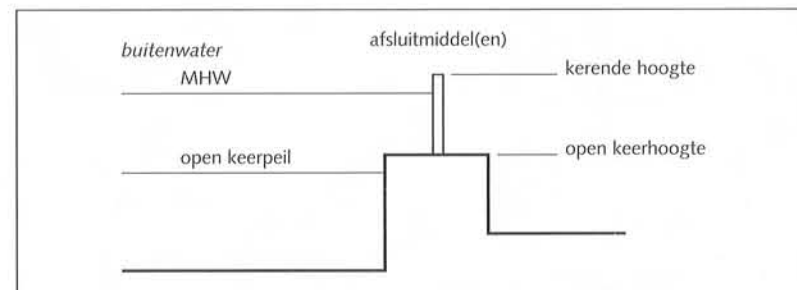


Fig. 3.3a Dwarsdoorsnede over een kering (coupure bijvoorbeeld) met de voornaamste hoogtematen.

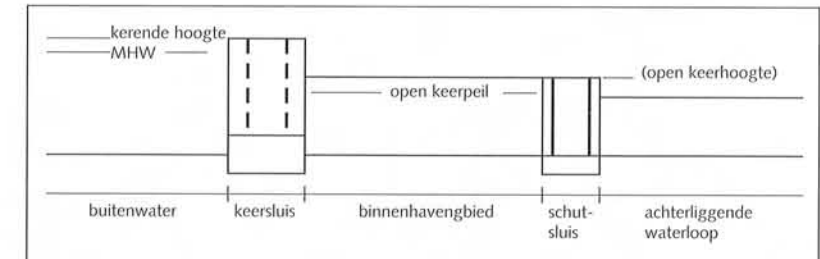


Fig. 3.3b In deze situatie is de kadehoogte achter de keersluis de open keerhoogte.

Merk op dat de open keerhoogte bij geopend afsluitmiddel niet altijd gelijk is aan de drempelhoogte van het beschouwde kunstwerk zelf. Bijvoorbeeld in het geval van een keersluis met een achterliggende binnenhaven, kan de kadehoogte van de binnenhaven als open keerhoogte worden aangehouden (zie figuur 3.3b). Immers, pas bij overstromen van de kade is sprake van falen van het waterkeringsysteem. Voorwaarde is dan wel dat bij de beoordeling van de sterkte en stabiliteit van het kunstwerk ook de achterliggende kade en een eventuele tweede kering wordt betrokken, en dat alle onderdelen van het waterkeringsysteem hun functies duurzaam zullen vervullen.

Het sluiten van de afsluitmiddelen kan beginnen wanneer op basis van voorspellingen een overschrijding van het open keerpeil wordt verwacht of wanneer een voor het kunstwerk vastgesteld sluitpeil wordt overschreden. In beide gevallen dient rekening te worden gehouden met de (mogelijke) stijgsnelheid van de buitenwaterstand en de tijd, nodig om de waterkering te sluiten.

Soortgelijke overwegingen gelden voor het signaleringspeil.

#### Buitenwaterstand

De buitenwaterstand is de waterstand die door het kunstwerk, zijnde een onderdeel van de primaire waterkering, moet worden gekeerd.

#### Dijktafelhoogte

Onder de dijktafelhoogte wordt verstaan de benodigde kerende hoogte van het gesloten kunstwerk, in verband met het mechanisme "overlopen/overslag". In de vigerende ontwerppraktijk wordt de dijktafelhoogte berekend als het Maatgevend Hoog Water vermeerderd met de benodigde waakhoogte. Voor de bepaling van de kerende hoogte van kunstwerken wordt verwezen naar Hoofdstuk 5.

*Falen*

Onder falen van het kunstwerk wordt in deze bijlage verstaan: overschrijding van het toelaatbare overloop- of overslagdebiet, onvoldoende stabiliteit of niet sluiten van afsluitmiddelen bij overschrijding van het sluitpeil.

*Kerende Hoogte*

Zie dijktafelhoogte.

*Maatgevend Hoog Water*

Dit is de buitenwaterstand met een overschrijdingsfrequentie gelijk aan de normfrequentie.

*Normfrequentie (of norm)*

De normfrequentie is de overschrijdingsfrequentie van Maatgevend Hoogwater. Deze is per dijkring vastgelegd in de Wet op de Waterkering.

*Open keerhoogte*

De kerende hoogte van een waterkering met beweegbare afsluitmiddelen bij open afsluitmiddel.

*Open keerpeil*

De waterstand welke bij open afsluitmiddel nog veilig gekeerd kan worden.

*Openingspeil*

Bij een actuele waterstands-overschrijding van het openingspeil mag de kering worden geopend.

*Overbelastingsbenadering*

Veiligheidsbeschouwing waarbij wordt uitgegaan van 2 eisen:

- (1)  $P\{\text{overbelasten}\} \leq \text{normfrequentie}$
- (2)  $P\{\text{falen zonder overbelasten}\} \leq \text{normfrequentie}/10$

De eerste eis is bedoeld als veiligstelling tegen het faalmechanisme overlopen en overslag; overbelasten wordt geacht op te treden als het debiet  $q$  over de gesloten kering groter is dan een toelaatbaar debiet  $q_c$ . De tweede eis is bedoeld als beoordelingseis voor de beveiliging tegen overige faalmechanismen, in casu: "onvoldoende sterkte/stabiliteit" en "niet sluiten beweegbare kering".

*Signaleringsmoment*

Als de voorspelling van het waterstandsverloop duidt op een overschrijding van het open keerpeil, worden waarschuwingen verzonden en het bedienend en beslissend personeel gewaarschuwd. In de sluitprocedure moet zijn opgenomen hoeveel tijd vóór het overschrijden van het open keerpeil met de mobilisatie moet worden begonnen, rekening houdend met de tijd, nodig voor de eigenlijke sluiting, en met de tijd, nodig voor de mobilisatie.

*Signaleringspeil*

Naast de waarschuwing door voorspelling zijn er systemen die waarschuwen wanneer een overschrijding van een gemeten signaleringspeil plaats vindt. Ook dan wordt het bedienend en beslissend personeel gewaarschuwd. Met andere woorden: de (paraatheid en) mobilisatiefase wordt gestart.

*Sluittijdstip*

Als de voorspelling van een overschrijding van het open keerspeil blijft gehandhaafd, moet in de sluitingsprocedure zijn opgenomen hoe lang vóór het overschrijden van de open keerhoogte met de eigenlijke sluiting moet worden begonnen, rekening houdend met de mogelijke snelheid daarvan.

*Sluitpeil*

Er kan ook voor worden gekozen de kering altijd te sluiten wanneer een vastgesteld gemeten sluitpeil wordt overschreden.

Bij de keuze van het sluitpeil dient niet alleen rekening te worden gehouden met de benodigde tijd voor de sluiting, maar ook met de omstandigheden waarbij de kering nog kan worden gesloten. Het sluitpeil is dus lager dan de open keerhoogte.

*Waakhoogte*

Onderscheid wordt gemaakt tussen de waakhoogte bij geopende kering en de waakhoogte bij gesloten kering: De vaststelling van de waakhoogte bij gesloten kering wordt behandeld in de Leidraad en Hoofdstuk 5. Onder maatgevende omstandigheden kan een zekere hoeveelheid overslag of zelfs overloop worden toegelaten, waardoor de waakhoogte kan worden beperkt. Voor de vaststelling van de waakhoogte bij geopende kering zal in het algemeen geen overslag of overloop worden toegelaten.

*Waterstandsverlooptlijn*

De waterstandsverlooptlijn geeft het verloop van de stijging, stagnatie en daling van het buitenwater bij maatgevende omstandigheden. Aanbevolen wordt om bij de vaststelling van de sluitingsprocedure zowel een representatief snel als een representatief langzaam waterstandsverloop te beschouwen.

### 3.2.4 Formulering betrouwbaarheidseis

Hoe vaker een waterkerend kunstwerk bij hoogwater moet worden gesloten des te betrouwbaarder moet de sluitingsoperatie zijn. In deze en volgende paragraaf wordt het verband tussen diverse in dit opzicht van belang zijnde peilen en de betrouwbaarheid van de sluitingsoperatie behandeld. Ter vereenvoudiging wordt in deze beschouwing geen rekening gehouden met golven en waakhogten.

De kans op falen per jaar is in principe gelijk aan de kans op sluiten van de waterkering (ofwel de sluitfrequentie) vermenigvuldigd met de kans op falen van de sluitingsoperatie per aanvraag:

$$P_{fa} = n_j P_{ns} \quad (3.1)$$

Met:

- $P_{fa}$  = faalkans kunstwerk t.g.v. een falend afsluitmiddel [faalkans/jaar]
- $n_j$  = het aantal keren per jaar dat de kering moet worden gesloten, ofwel de kans op overschrijding van het open keerpeil [sluitingen/jaar] (zie ook onderstaande nuancering en vergelijking (3.2))
- $P_{ns}$  = kans op niet sluiten wanneer de kering gesloten moet worden [faalkans/vraag]

Omdat de gesloten waterkering in theorie geacht wordt slechts waterstanden lager dan MHW te keren en omdat de eis bij de overbelastingbenadering min of meer kan worden vertaald in de eis dat de kans op niet sluiten bij waterstanden lager dan MHW een factor  $\xi_{ns}$  keer de norm is, mag bovenstaande definitie voor  $n_j$  genuanceerd worden door hem te verminderen met de overschrijdingsfrequentie van MHW. Dus:

$$n_j = N\{h_{ok} \leq h \leq MHW\} \quad [vragen/jaar] \quad (3.2)$$

met

- $h$  = buitenwaterstand [m t.o.v. NAP]
- $h_{ok}$  = open keerpeil [m t.o.v. NAP]
- $N$  = de functie die aangeeft hoe de sluitfrequentie varieert als  $h_{ok}$  en MHW veranderen

De kans op het niet tijdig sluiten van de afsluitmiddelen  $P_{ns}$  volgt uit

een betrouwbaarheidsanalyse van:

- het hoogwateralarmeringssysteem;
- de mobilisatie;
- de bedieningsprocedure voor de sluiting;
- de bedrijfszekerheid van de afsluitmiddelen.

Voor (3.2) is te schrijven:

$$n_j = N\{h > h_{ok}\} - f_{norm} \quad (3.3)$$

zodat (3.1) luidt:

$$P_{fa} = (N\{h > h_{ok}\} - f_{norm}) P_{ns} \quad (3.4)$$

Vergelijking (3.4) geeft de faalkans die een waterkerend kunstwerk of bijzondere constructie heeft.

De eis die aan de faalkans  $P_{fa}$  gesteld wordt is dat hij kleiner dan of gelijk moet zijn aan de toelaatbare faalkans ofwel:

$$P_{fa} \leq \xi_{ns} f_{norm} \quad (3.5)$$

Voor de *faalruimtefactor*  $\xi_{ns}$  mag volgens de Leidraad maximaal een waarde van  $\xi_{ns} = 0,10$  worden gehanteerd.

Uit (3.4) en (3.5) volgt:

$$N\{h > h_{ok}\} \leq (1 + \xi_{ns}/P_{ns}) f_{norm} \quad (3.6)$$

Bij bekende overschrijdingsfrequentielijn voor  $h$  liggen met vergelijking (3.6) alle mogelijke combinaties van open keerpeil  $h_{ok}$  en faalkans afsluitmiddel  $P_{ns}$  vast.

### 3.2.5 Vereenvoudigde numerieke uitwerking

De afsluitmiddelen zijn voldoende betrouwbaar als de open keerhoogte voldoet aan de voorwaarde uit vergelijking (3.6). Om enig kwantitatief inzicht te krijgen in de invloed van de faalruimtefactor  $\xi_{ns}$  op het minimale open keerpeil  $h_{ok}$  wordt vergelijking (3.6) uitgewerkt met een overschrijdingsfrequentielijn met een exponentiële verdeling, volgens:



$$N\{h > H\} = 10^{-(H-A)/B} \quad (3.7)$$

met:

A = buitenwaterstand die gemiddeld eens per jaar wordt overschreden [m]

B = decimeringshoogte [m]

Substitutie in (3.7) van  $H = h_{ok}$  levert:

$$N\{h > h_{ok}\} = 10^{-(h_{ok}-A)/B} \quad (3.8)$$

Substitutie in (3.7) van  $H = MHW$  levert:

$$f_{norm} = 10^{-(MHW-A)/B} \quad (3.9)$$

Substitutie van (3.8) en (3.9) in (3.6) resulteert in

$$10^{-(h_{ok}-A)/B} \leq (1 + \xi_{ns}/P_{ns}) 10^{-(MHW-A)/B} \quad (3.10)$$

waaruit volgt:

$$h_{ok} \geq MHW - B \log(1 + \xi_{ns}/P_{ns}) \quad (3.11)$$

met:

log = logaritme met grondtal 10

Merk op dat voorwaarde (3.11) inderdaad altijd leidt tot een vereiste open keerpeil lager dan MHW, hoe klein de faalruimtefactor ook genomen wordt. Tevens drukt formule (3.11) uit dat bij grote faalkans bij aanvraag ( $P_{ns} = 1$ ) en kleine faalruimtefactor, het open keerpeil gelijk wordt aan MHW.

In tabel 3.2 is, uitgaande van vergelijking (3.11) voor enkele waarden van de faalruimte-factor  $\xi_{ns}$  en de decimeringshoogte B het minimaal vereiste open keerpeil als functie van de kans op niet tijdig sluiten gegeven.

Tabel 3.2 Minimaal vereist open keerpeil bij gegeven faalkans afsluitmiddel  $P_{ns}$ , gegeven decimeringshoogte B, gegeven faalruimte-factor  $\xi_{ns}$ .

faalruimte-factor $\xi_{ns}$	$P_{ns}$ (per vraag)	$h_{ok}$ in m beneden MHW		
		B = 0,5 m	B = 1,0 m	B = 1,5 m
0,1	$10^{-1}$	0,15	0,30	0,45
	$10^{-2}$	0,52	1,04	1,56
	$10^{-3}$	1,00	2,00	3,01
	$10^{-4}$	1,50	3,00	4,50
0,01	$10^{-1}$	0,02	0,04	0,06
	$10^{-2}$	0,15	0,30	0,45
	$10^{-3}$	0,52	1,04	1,56
	$10^{-4}$	1,00	2,00	3,01
0,001	$10^{-1}$	0,00	0,00	0,01
	$10^{-2}$	0,02	0,04	0,06
	$10^{-3}$	0,15	0,30	0,45
	$10^{-4}$	0,52	1,04	1,56

Uit tabel 3.2 blijkt (logisch) dat bij kleiner faalruimtefactor (hogere eis) het open keerpeil hoger moet en bij toenemende decimeringshoogte geldt hetzelfde. Ook blijkt dat bij een grotere betrouwbaarheid van de sluitingsoperatie (kleine  $P_{ns}$ ) het open keerpeil lager kan worden gekozen.

NB: Volledigheidshalve wordt de betrouwbaarheidseis ook geformuleerd voor het geval dat niet wordt uitgegaan van "aftoppen", d.w.z. dat voor  $n_j$  geldt:

$$n_j = N\{h > h_{ok}\} \quad (3.3a)$$

Voor vergelijking (3.6) wordt dan gevonden:

$$N\{h > h_{ok}\} \leq (\xi_{ns}/P_{ns}) f_{norm} \quad (3.6a)$$

en voor vergelijking (3.11):

$$h_{ok} \geq h_{dk} - B \log(\xi_{ns}/P_{ns}) \quad (3.11a)$$

Volgens vergelijking (3.11a) kan nu bij een kleine faalruimtefactor een open keerpeil berekend worden dat hoger is dan MHW. De benaderingen (3.3a), (3.6a) en (3.11a) kunnen alleen worden gebruikt als  $\xi_{ns}/P_{ns} \gg 1$ .

### 3.3 Standaard beoordelingsmethode

#### 3.3.1 Algemeen

De actuele faalkans van de kering wordt bepaald door (zie vergelijking (3.1)):

- Het aantal keren per jaar dat de kering moet worden gesloten ( $n_j$ ); dit volgt bij bekend open keerpeil direct uit de overschrijdingsfrequentielijn, volgens vergelijking (3.3).
- De kans op niet sluiten, gegeven noodzaak ( $P_{ns}$ ); deze kans volgt uit de analyse van de vier in Hoofdstuk 2.2 onderscheiden sub-systemen voor de gebeurtenis "kering niet gesloten". Deze vier sub-systemen zijn:

- 1) falen hoogwater-alarmeringssysteem (HAS)
- 2) falen van de mobilisatie (MOB)
- 3) het maken van een bedieningsfout (BED)
- 4) falen door een technische storing (STO)

Voor elk van de vier subsystemen wordt in dit Hoofdstuk een standaard-foutenboom opgesteld. Aan elk van de vier foutenbomen wordt vervolgens een vragenlijst gekoppeld. Via beantwoording van de vragen en het bijhouden van een daarmee samenhangende score, wordt een maat voor de betrouwbaarheid van dat onderdeel van de sluitprocedure voor de kering verkregen. Op basis van de vier eindscores  $E_i$  wordt de kans geschat dat het afsluitmiddel niet gesloten is als dat nodig is. Deze kansschatting wordt gegeven door:

$$P_{ns} = 10^{-E} \quad (3.12)$$

- $P_{ns}$  = kans op niet sluiten, gegeven noodzaak  
 $E$  = de laagste waarde van  $E_i$  ( $i=1$  tot en met 4)  
 $E_i$  = eindscore volgend uit de beantwoording van de vragenlijst voor sub-systeem  $i$

#### Opmerking:

In beginsel komt de score gedurende de gehele beoordelingsprocedure steeds in grote lijnen en voor zover mogelijk overeen met de negatieve logaritme van de overeenkomstige faalkans. Een "EN-poort" in de foutenboom correspondeert bij onafhankelijke gebeurtenissen derhalve met een optelling in de scoretabel (bijvoorbeeld  $c = a+b$ ). In het geval van

een "OF-poort" wordt de kleinste van de deelscores genomen (bijvoorbeeld  $c = \min(a,b)$ ). Dit is weliswaar een benadering aan de niet-conservatieve kant, maar voor de grote lijn is dit voorlopig geen echt bezwaar.

In Appendix III wordt een alternatieve lay-out van de scoretabellen gepresenteerd.

#### 3.3.2 Hoogwateralarmeringssysteem

De alarmering is de eerste fase in de totale sluitingsoperatie. Het doel van deze fase is het geven van het startsein voor de mobilisatiefase waarin alles voor de feitelijke sluiting in gereedheid wordt gebracht. In figuur 3.5 is de tak "hoogwateralarmeringssysteem faalt" uit figuur 3.2 nader uitgewerkt. Op basis van deze foutenboom is de scoretabel volgens tabel 3.3 opgesteld.

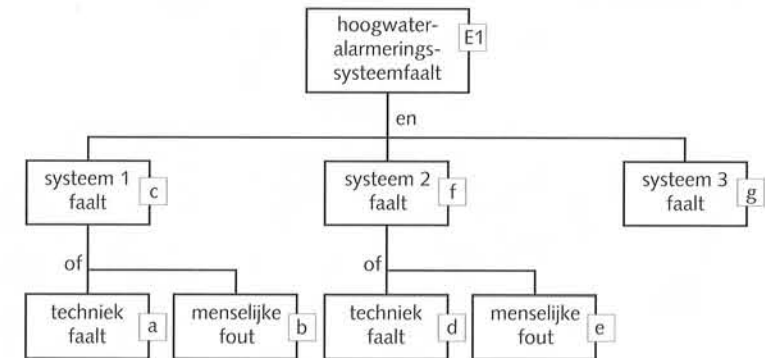


Fig. 3.5 Uitwerking tak "hoogwateralarmeringssysteem faalt"

Tabel 3.3 Scoretabel Falen Hoogwater Alarmerings Systeem (HAS)

nr.	vraag	score
a1	is het primaire alarmsysteem gebaseerd op: - een af te lezen peilstok - een automatische niveaumeting - een automatische niveaumeting met minimaal één controle per maand - een voorspelling	ja: a = 1 ja: a = 2 ja: a = 3  ja: a = 1
a2	gebeurt de registratie/voorspelling gewoonlijk minimaal tweemaal per dag bij een getijregime of eenmaal per dag bij een rivierregime	ja: a = a+1
a3	is er een controle of back-up registratiesysteem	ja: a = a+1
b1	moeten in geval van hoogwater via menselijke handelingen andere personen worden gewaarschuwd indien antwoord "nee", ga door met c	nee: b = 5 ja : b = 2
b2	is er een schriftelijke procedure voor meting en waarschuwing	ja: b = b+1
b3	wordt deze procedure minstens eenmaal per jaar uitgevoerd of geoefend	ja: b = b+1
b4	is er een terugmeldingsprocedure (n = aantal schakels in de waarschuwingsketen)	ja : b = b-n/2 nee: b = b-n
c	tussenscore	c = min(a,b)
d1-d3	alle vragen a voor een eventueel tweede systeem	d
e1-e4	alle vragen b voor een eventueel tweede systeem	e
f	tussenscore als er geen tweede systeem is	f = min(d,e)-1 f = 0
g	kan in geval van falend alarm de bevolking op tijd waarschuwen	ja : g = 1 mog: g = 0,5 nee: g = 0
h	eindscore falen hoogwateralarmeringssysteem (HAS)	$E_1 = c+f+g$

### Toelichting op tabel 3.3

#### Vraag a1

Het hoogwateralarmeringssysteem (HAS) valt globaal uiteen in een "meting" en een "waarschuwing". De vragen a1-a3 hebben betrekking

op de meting. Dit meet- of voorspelgedeelte kan gebaseerd zijn op:

- een meting van de actuele overschrijding van het signaleringspeil via visuele (peilschaal) waarnemingen (bijvoorbeeld het aflezen van een peilstok);
- een meting van actuele overschrijdingen van het signaleringspeil via een zelfregistrerend systeem; indien standaard MSW wordt gebruikt, wordt dat ook tot deze categorie gerekend;
- idem, met minimaal eenmaal per maand controle op correcte werking;
- een voorspelling van overschrijding van een vooraf vastgesteld signaleringspeil, meestal via een telefonisch waarschuwingssysteem, zoals bijvoorbeeld RIZA of SVSD;

Welk type aanwezig is, bepaalt het antwoord bij vraag a1.

#### Vraag a2

Hier wordt ingegaan op de vraag of er een zekere routine is in het aflezen van de waterstanden. Als dit het geval is wordt de waarde van a (zoals volgend uit vraag a1) met 1 verhoogd. Indien dit ter plaatse niet dagelijks gebeurt, maar in bijzondere gevallen de betrokken functionaris wordt gewaarschuwd door andere waarnemers die wel dagelijks waarnemen (RIZA, MSW), dan kan dit als voldoende worden beschouwd. Wel dienen de tussenschakels dan bij vraag b2 te worden meegenomen.

#### Vraag a3

Het is ook mogelijk dat er twee systemen actief zijn, al dan niet van verschillend type. Het meest betrouwbare systeem dient dan als "primair" systeem te worden gezien en het andere als de back-up of controle-systeem, waarnaar in a3 wordt gevraagd. Als dit het geval is wordt a met 1 opgehoogd.

#### Vragen b1-b3

Er is sprake van een waarschuwingsketen als de waarnemer van de voor verdere handelingen bepalende waterstand niet zelf verantwoordelijk is voor de mobilisatie, maar andere personen daarvoor moet waarschuwen. Dit bepaalt het antwoord op vraag b1. Als dit niet het geval is, wordt b = 5 en kan worden doorgegaan met vraag c. Als het wel het geval is, dan is het van belang of de te volgen procedure op schrift is vastgelegd, inclusief de mogelijke alternatieve acties voor het geval bepaalde personen niet bereikbaar of verhinderd zijn (vragen b2 en b3). Op grond van de antwoorden wordt de score van b aangepast.

*Vraag b4*

De score bij vraag b4 hangt samen met de lengte van de waarschuwingketen. Algemeen geldt: hoe meer schakels, hoe groter de kans dat er ergens iets mis gaat. Indien er sprake is van een enkele andere persoon die gewaarschuwd moet worden, geldt  $n = 1$ , bij 2 andere personen  $n = 2$ , enz. Het gaat dus om personen of instanties en niet om (onderdelen) van systemen. Let op dat bij vraag b4 ook de schakels moeten worden meegenomen van een algemene waarschuwingdienst die een waarnemer van een lokale waterstand moet waarschuwen (zie toelichting bij vraag a5). De reductie in de score is verder afhankelijk gemaakt van het al dan niet bestaan van een terugmeldingssysteem: indien terugmelding van iedere actie geregeld is, is de reductie in de betrouwbaarheidsscore geringer. De terugmelding moet plaats vinden na het uitvoeren van de gewenste actie.

*Vraag d/e/f*

Indien er een volledig en vrijwel onafhankelijk reserve-systeem bestaat voor het gehele signalerings- en waarschuwingssysteem, kan dat bij de vragen d, e en f worden geëvalueerd en bij g worden meegenomen in de totale beoordeling. Als er geen tweede systeem is geldt  $f = 0$ .

*Vraag g*

Het is in principe mogelijk dat bij een falend alarmeringssysteem de bevolking alarm slaat. Meestal zal dit pas gebeuren als het water in de buurt komt van het faalpeil bij geopende kering, of dit al heeft overschreden. Het is dus een grote vraag of na een dergelijk alarm nog tot een succesvolle sluiting kan worden overgegaan. Beantwoording van deze vraag vereist een goede kennis van de plaatselijke omstandigheden en zal onvermijdelijk subjectief zijn. In de scoretabel staat "mog" voor "mogelijk".

*3.3.3 Mobilisatie*

Bij een voorspelde dan wel een actuele waterstandoverschrijding van het signaleringspeil wordt het bedienend en beslissingsbevoegd personeel gewaarschuwd. Bij een actuele waterstandoverschrijding van het sluitpeil wordt de kering gesloten.

De tijd tussen de overschrijding van het signaleringspeil en overschrijding van het sluitpeil dient voldoende groot te zijn. De tijd tussen de over-

schrijding van het sluitpeil en overschrijding van de drempelhoogte dient voldoende groot te zijn om de kering te kunnen sluiten. In sommige gevallen dient de kering zelfs al eerder gesloten te zijn om overmatige golfoverslag tijdens het sluiten te voorkomen. Merk op dat in het kust- en benedenrivierengebied rekening moet worden gehouden met een significant grotere stijgsnelheid van het buitenwater dan in het bovenrivierengebied.

Het doel van de mobilisatiefase is derhalve ervoor te zorgen dat de functionaris of de groep van functionarissen die de feitelijke sluiting moet voltrekken tijdig aanwezig is op de plaats waar de werkzaamheden moeten worden verricht indien het sluitingspeil wordt overschreden. De foutenboom voor deze fase is weergegeven in figuur 3.6. In tabel 3.4 is de op deze foutenboom gebaseerde scoretabel weergegeven.

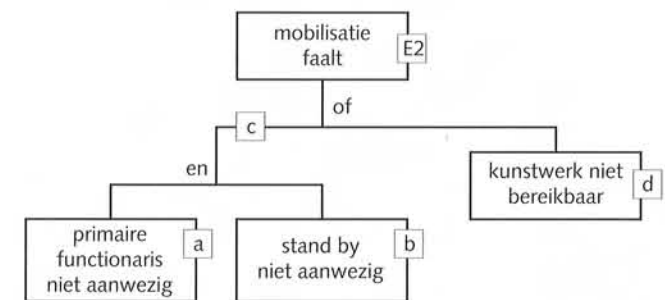


Fig. 3.6 Uitwerking tak "mobilisatie faalt"

Tabel 3.4 Scoretabel Falen Mobilisatie (MOB)

nr.	vraag	score
a1	is een volledige bemanning permanent aanwezig (indien ja, sla a2/a3/a4/a5 over)	nee: a = 1 ja: a = 1
a2	is er een schriftelijk vastgelegde up-to-date mobilisatieregeling	ja: a = a+0,5
a3	is er een voorwaarschuwingssysteem	ja: a = a+0,5
a4	is er een terugmeldingssysteem voor mobilisatie	ja: a = a+0,5
a5	wordt de mobilisatie minstens eenmaal per jaar uitgevoerd of geoefend	ja: a = a+0,5
b1	bevat het mobilisatieplan een schriftelijk vastgelegde stand-by regeling	ja : b = 1 nee: b = 0
b2	is er een voorwaarschuwingssysteem voor de stand-by	ja: b = b+0,5
c	tussenscore	c = a+b
d1	is er een volledige bemanning permanent aanwezig indien ja, ga naar e	ja : d = 4 nee: d = 1
d2	is het kunstwerk onder alle omstandigheden bereikbaar	meestal d = d+1 vrijwel d = d+2 altijd d = d+3
e	eindscore falen mobilisatie (MOB)	$E_2 = \min(c,d)$

#### Toelichting op tabel 3.4

##### Vraag a1

De permanente (dag en nacht) aanwezigheid van een volledige bemanning is alleen te verwachten bij de grotere kunstwerken of bij volledig automatische systemen waar geen mensen nodig zijn. In de meeste gevallen zullen een of meerdere personen dienen te worden opgeroepen om naar de betreffende kering toe te gaan. Indien het antwoord ja is volgt a = 4 en kunnen de vragen a2-a5 worden overgeslagen. Als het antwoord nee is volgt a = 1; deze score kan bij positief antwoord op de vragen a2-a5 verder worden verhoogd.

##### Vraag a2

Een mobilisatieregeling dient op schrift vast te liggen, volledige en up-to-date te zijn en bij alle betrokkenen bekend te zijn.

##### Vraag a3

Een voorwaarschuwingssysteem houdt in dat op basis van een verwachting minstens 12 uur voor de overschrijding van het alarmpeil alle te mobiliseren werknemers en het stand-by personeel worden gewaarschuwd dat hoogwater op komst is.

##### Vraag a4

Bedoeld wordt de terugmelding naar de alarmeringspost.

##### Vraag a5

Geen toelichting

##### Vragen b1/b2

Gevraagd wordt of de mobilisatieregeling een volledige beschrijving geeft van personen die bij verhindering van de primair aangewezen functionarissen de taken kunnen overnemen en of voor deze stand-by personen een voorwaarschuwingssysteem bestaat.

##### Vraag d1

Dit is dezelfde vraag als bij a1; indien ja, dan kan vraag d2 worden overgeslagen.

##### Vraag d2

De bereikbaarheid van een kunstwerk hangt af van de plaats en de kwaliteit van de toevoerwegen. Indien het kunstwerk alleen via onverharde wegen of via een dijk die mogelijk onderhevig is aan golfoverslag kan niet altijd op volledige bereikbaarheid worden gerekend. Beantwoording van de vraag vereist kennis van de lokale omstandigheden en procedures.

#### 3.3.4 Bedieningsprocedure voor de sluiting

De derde fase van de sluitingsoperatie is de sluiting zelf, gegeven dat de waarschuwing van "overschrijden" signaleringspeil is gegeven en de mobilisatie is geslaagd. In deze fase zijn er twee hoofdfaalmogelijkheden: technisch falen en menselijk falen. In figuur 3.7 is de tak "bedienings-

procedure voor de sluiting faalt" uit figuur 3.2 nader uitgewerkt. Figuur 3.7 heeft dus betrekking op het menselijke faal-aspect. De op basis van figuur 3.7 opgestelde scoretabel is weergegeven in tabel 3.5.

Tabel 3.5    Scoretabel Bedieningsfout (BED)

nr.	vraag	score
a1	De bediening is (1) volledig automatisch (2) niet automatisch, sluitprocedure aanwezig (3) niet automatisch, geen sluitprocedure aanwezig Bij (1) kan in principe worden doorgegaan naar e, met $E_3=4$ Bij (3) zijn de vragen a2-a4 niet relevant	a = 4 a = 2 a = 1
a2	Bevat de sluitingsprocedure een terugmeldingsplicht	ja: a = a+0,5
a3	Is de procedure bekend bij alle bij de sluiting betrokken personen?	ja: a = a+0,5
a4	Wordt de sluitingsprocedure minstens eenmaal per jaar uitgevoerd of geoefend?	ja: a = a+0,5
b	Zijn er bij bedieningsfouten mogelijkheden tot herstel	ja : b = 1 mog: b = 0,5 nee: b = 0
c1	Zijn alle ruimten en toegangen verlicht en wordt dit minstens tweemaal per jaar gecontroleerd?	ja : c = 1 nee: c = 0
c2	Wordt minstens eenmaal per jaar gecontroleerd of iedereen beschikt over de benodigde sleutels voor toegang of bediening?	ja: c=c+1
c3	Zijn er communicatie-middelen (portofoons) of zijn deze niet nodig?	ja: c = c+0,5
d	Is er bij problemen genoemd bij c een realistische mogelijkheid tot herstel	ja : d = 1 mog: d = 0,5 nee: d = 0
e	Eindscore bedieningsfout (BED)	$E_3 = \min(a+b,c+d)$

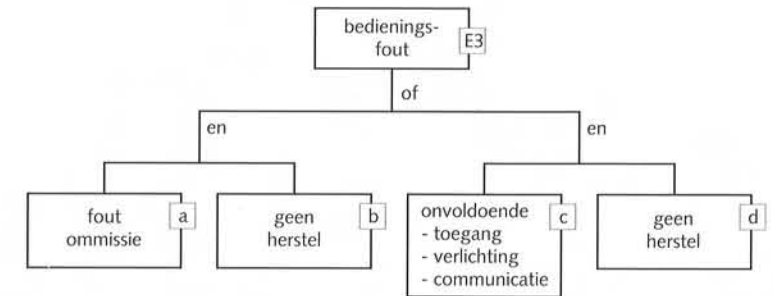


Fig. 3.7    Uitwerking tak "bedieningsprocedure voor de sluiting faalt"

#### Toelichting op tabel 3.5

##### Vragen a1-a4

Deze vragen zijn overeenkomstig die bij de mobilisatie.

##### Vraag b

In sommige gevallen kunnen gemaakte bedieningsfouten gemakkelijk worden opgemerkt en kan de betreffende functionaris de gemaakte bedieningsfout vervolgens herstellen. Het gaat hier dus om zaken als het indrukken van de verkeerde knop, het vergeten van een handeling, het omdraaien van de juiste volgorde, enz. De beoordeling van deze vraag hangt sterk af van de lokale omstandigheden en zal meestal een subjectief karakter dragen. In de score kolom is "mog" de afkorting van "mogelijk".

##### Vragen c1-c3

Onverwacht uitvallen van de verlichting, het niet in bezit hebben van de juiste sleutels of onvoldoende communicatie zijn uitermate praktische problemen die vaak voorkomen en tot de vertraging van de mobilisatie kunnen leiden. De genoemde controles hebben tot doel de kansen op deze gebeurtenissen te verkleinen.

##### Vraag d

Ook de beantwoording van deze vraag vereist net als vraag b grondige kennis van de situatie en procedure voor het betreffende kunstwerk.

3.3.5 Bedrijfszekerheid van de afsluitmiddelen

In figuur 3.8 is de tak "bedrijfszekerheid afsluitmiddelen onvoldoende" uit figuur 3.2 nader uitgewerkt. De op basis van figuur 3.8 opgestelde scoretabel is weergegeven in tabel 3.6.

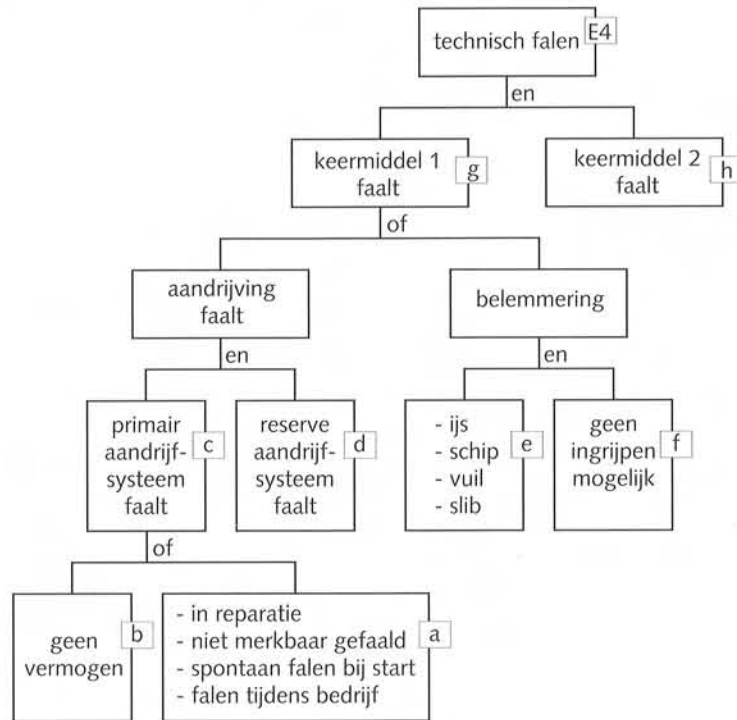


Fig. 3.8 Uitwerking tak "technisch falen"

Tabel 3.6 Scoretabel Falen als gevolg van Technische Storing (STO)

nr.	vraag	score
a1	is het primaire keermiddel een permanent middel (dus geen schotbalken, zandzakken of dergelijke)	ja : a = 2 nee: a = 1
a2	wordt het primaire keermiddel minstens tweemaal per jaar gecontroleerd en minstens eenmaal per jaar volledig getest	ja: a = a+1
a3	is er aanvarings- of aanrijdingsrisico van betekenis	ja: a = a-1
b	Is de aandrijving van het keermiddel - elektrisch via het GEB, met noodaggregaat - elektrisch via het GEB, zonder noodaggregaat - via handkracht - via een diesel- of benzinemotor	b = 4 b = 3 b = 3 b = 2
c	tussenscore	c = min(a,b)
d	is er een volledig en onafhankelijk reserve-aandrijvingssysteem	ja : d = 1 nee: d = 0
e	zijn er meer dan normale belemmeringen te verwachten	ja : e = 1 nee: e = 2
f	is ingrijpen mogelijk bij fysieke belemmering	ja : f = 0,5 nee: f = 0
g	tussenscore	g = min(c+d,e+f)
h	is er een tweede keermiddel indien ja: beantwoordt vragen a, b, c, e voor het tweede keermiddel	nee: h = 0 ja: a = a+1
i	Eindscore falen als gevolg van technische storing (STO)	$E_4 = g+h$

Toelichting op tabel 3.6

Vraag a3

Er is sprake van een aanrijdingsrisico van betekenis indien het te sluiten keermiddel zonder bescherming op een afstand van minder dan 5 m van een rijbaan ligt. Er is sprake van een aanvaarrisico van betekenis indien het middel zonder enige bescherming in de vaargeul of maximaal 10 m daarbuiten ligt, tenzij het scheepvaartverkeer minimaal is.

*Vragen b1-b4*

Veel kleine keermiddelen zijn handbediend, hetgeen, afgezien van blokkeringen of belemmeringen, als een uitermate betrouwbare krachtbron wordt gezien. De score voor aandrijvingen op basis van een benzine- of dieselmotor gelden als iets minder betrouwbaar. Voor de energielevering via het GEB geldt een faalkans van 0,4 per jaar met een gemiddelde storingsduur van 1 uur. De kans dat op een willekeurig tijdstip geen energie kan worden aangeleverd, ligt zodoende in de orde van  $10^{-4}$ . De score  $b = 3$  is derhalve conservatief. Via een nood-aggregaat kan de score tot  $b = 4$  worden verhoogd.

*Vragen e/f*

Voorbeelden van een belemmering zijn: een geparkeerde auto, het vastlopen van een deur in zand of wegdek, ijsgang, schepen in de deuropening, voorwerpen op de bodem. Ingrijpen wordt bijvoorbeeld geacht relatief goed mogelijk te zijn bij een sluiting van een coupure in een bebouwde omgeving bij voldoende tijd. Verder verwijderd van de bewoonde centra kan het al lastiger worden. Obstakels in den natte vergen weer meer tijd en voorzieningen, zeker naarmate de schaal van het keermiddel toeneemt. De score is hier afhankelijk van een goede kennis van de plaatselijke omstandigheden en heeft altijd een subjectief karakter.

*Vraag h*

Een tweede keermiddel kan zijn een tweede deur of een schotbalkkering, maar bijvoorbeeld ook zandzakken indien deze in voldoende mate en op gecontroleerde wijze aanwezig zijn. Het voldoen van de zandzakken dient op overtuigende wijze te zijn aangetoond. Verder moet het tweede keermiddel altijd in voldoende mate onafhankelijk zijn en dus een voldoende grote onderlinge afstand hebben en/of gebaseerd zijn op een ander principe.

*3.3.6 Kwantitatieve beschouwing scoretabellen*

Bij de voorgestelde score-toekenningen ligt de volgens de voorgestelde methode maximaal toe te kennen betrouwbaarheid vast. Immers, per tabel gelden de volgende maximale scores:

- falen hoogwater-alarmeringssysteem (HAS):  $E_1 \leq 10$
- falen van de mobilisatie (MOB):  $E_2 \leq 4$
- het maken van een bedieningsfout (BED):  $E_3 \leq 4$
- falen door een technische storing (STO):  $E_4 \leq 4$

De maximaal toe te kennen betrouwbaarheid is hiermee  $P_{ns} = 10^{-4}$  kans/vraag.

Deze maximale betrouwbaarheid is overigens uitsluitend haalbaar bij toepassing van een *dubbel keermiddel*. Bij een enkel keermiddel wordt  $E_4 \leq 2,5$  zodat de maximaal toe te kennen betrouwbaarheid afneemt tot  $P_{ns} = 3 \cdot 10^{-3}$  kans/vraag.

De toelaatbare faalruimtefactor  $\xi_{ns}$  is afhankelijk van o.a. de verdeling van de totaal beschikbare faalruimte per kunstwerk over falen van de sluiting en constructief falen. In de Leidraad is gesteld, dat de totaal beschikbare faalruimte 0,1 maal de normfrequentie moet zijn. Voorts is gesteld dat het grootste deel van deze faalruimte beschikbaar gesteld moet worden voor falen van de sluiting. Daarom is besloten  $\xi_{ns} = 0,1$  te stellen.

Stel voor een dijkkringgebied is  $f_{norm} = 1/2000$ .

Uit voorwaarden (3.1) en (3.5) volgt dan:  $n_j = P_{fa}/P_{ns} = \xi_{ns} \cdot f_{norm}/P_{ns} = (0,1 \cdot 1/2000)/P_{ns}$  en dus:

- voor een dubbel keermiddel ( $P_{ns} = 10^{-4}$ )  $\Rightarrow n_j \leq 0,5$  vragen/jaar ofwel: indien het open keerpeil een overschrijdingsfrequentie heeft groter dan 0,5 per jaar is een dubbel keermiddel volgens de standaard beoordelingsmethode niet voldoende betrouwbaar. Aanbevolen wordt om in dat geval het open keerpeil te verhogen of een uitgebreidere analyse te (laten) maken.
- voor een enkel keermiddel ( $P_{ns} = 3 \cdot 10^{-3}$ )  $\Rightarrow n_j \leq 1,6 \cdot 10^{-2}$  vragen/jaar In het laatste geval moet de overschrijdingsfrequentie van het open keerpeil dus veel lager zijn dan in het eerste geval (het open keerpeil dus hoger zijn).

**3.4 Conclusies**

De betrouwbaarheid van de sluiting van een beweegbare kering wordt enerzijds bepaald door het open keerpeil en anderzijds door de betrouwbaarheid van de sluitingsoperatie.

De keuze van het open keerpeil is afhankelijk van de open keerhoogte en de bij de geopende kering benodigde waakhoogte. Deze waakhoogte is afhankelijk van de bij geopende kering acceptabele overslag- of overstrooming. Deze zal over het algemeen uit psychologische overwegingen zeer gering worden gesteld (bijvoorbeeld  $q_t = 0,1$  l/s).



Als praktische methode voor de bepaling van de betrouwbaarheid van de sluitingsoperatie zijn vier scoretabellen opgesteld (één voor elk faalmechanisme te weten: falen hoogwateralarmeringssysteem, falen mobilisatie, bedieningsfout en falen door een technische storing).

Hieruit kan op een relatief eenvoudige en uniforme wijze een oordeel worden gevormd over de betrouwbaarheid van de sluiting van een beweegbare kering.

De hier gepresenteerde methode is getoetst aan een aantal praktijksituaties. De methode kan in ieder geval worden gebruikt om verschillende ontwerpen met elkaar te vergelijken. Voor een definitieve beslissing wordt aanbevolen een uitgebreide analyse te laten maken.

Indien bovenstaande methode niet tot bruikbare resultaten leidt, kan altijd nog een "echte" betrouwbaarheids-analyse worden uitgevoerd. Door optimaal rekening te houden met de lokatie-specifieke omstandigheden, kan dit leiden tot een "scherper" ontwerp. Aanbevolen wordt om bij de uitvoering van de betrouwbaarheidsanalyse zoveel mogelijk de systematiek van de gepresenteerde methode te volgen.

## 4 GOLFBELASTING OP EEN VERTIKALE WAND

### 4.1. Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van diverse factoren die de maatgevende krachten ten gevolge van windgolven bepalen. De opzet van dit hoofdstuk is ontleend aan [4.1] en [4.2]. In dit hoofdstuk worden alleen krachten op constructies behandeld die het gevolg zijn van staande golven tegen gladde, verticale wanden. De periode van deze krachten is van dezelfde orde als de periode van de windgolven. Als de golven breken of tegen uitsteeksels op de wand kunnen slaan is er sprake van golfklappen. De drukken kunnen dan veel groter zijn dan bij niet-gebroken staande golven, maar zij duren veel korter. Hun effect is afhankelijk van de vorm, massa en stijfheid van de wand. Deze golfklappen moeten worden vermeden. Als dat onmogelijk is kunnen de krachten worden bepaald uit specialistische literatuur [4.7] of model-onderzoek.

### 4.2 Inkomende golven.

Waterkerende kunstwerken en bijzondere constructies kunnen worden belast door windgolven. De golven worden ofwel opgewekt door de wind, die strijkt over het water vòòr het kunstwerk (bijvoorbeeld een riviergedeelte voor een keermuur) ofwel zijn afkomstig van een verder weg gelegen windveld. In het laatste geval kunnen de golven vervormd worden door bodemwrijving, refractie en door het passeren van golfbrekers of havendammen.

Als de golven het kunstwerk of de constructie bereiken, worden ze geheel of gedeeltelijk gereflecteerd, waarbij de golfhoogte vóór het kunstwerk toeneemt. De golfkrachten op de constructie worden bepaald door deze golfhoogte maar ook door de golfperiode. Het is dus gewenst aan te geven hoe de maatgevende golven bepaald kunnen worden.

N.B.: Als de golfperiode en de waterdiepte bekend zijn, is de bijbehorende golflengte te bepalen, bijvoorbeeld met behulp van figuur 4.1.

#### *Directe golfaanval*

Wanneer de constructie blootstaat aan directe golfaanval (d.w.z. zonder bescherming door golfbreker of voorhaven) zijn de gegevens van de inkomende golven te bepalen afhankelijk van de lokatie:

*Langs de kust:* In het Randvoorwaardenboek [4.3] worden de significante golfhoogte  $H_s$  en golfperiode gegeven voor de golven ter hoogte van de teen van de dijk.

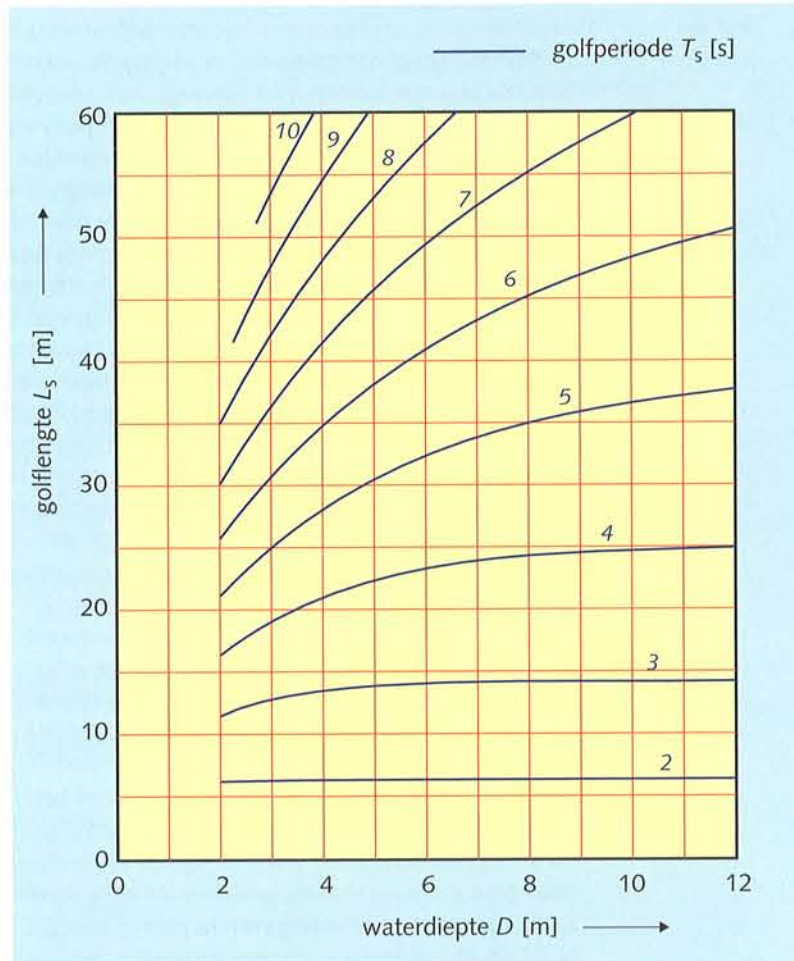


Fig. 4.1 Golfte als functie van waterdiepte en golfperiode.

*Rivierengebied:* In de Leidraad Benedenrivieren is een methode beschreven om de significante golfhoogte  $H_s$  en de piekperiode  $T_p$  voor de golven ter plaatse van het buitentalud van de dijk te bepalen.

Als de dijk vervangen is door een waterkerende constructie kan dezelfde methode worden gehanteerd.

*Langs het IJsselmeer:* Hier wordt geadviseerd contact op te nemen met het RIZA.

#### Indirecte golfaanval

Wanneer het kunstwerk wordt beschermd met golfbrekers of door een voorhaven kunnen bij hoge waterstanden golven van buiten over of door de golfbrekers of dam verzwakt in het voorhavengebied worden doorgegeven. Er kan dan gebruik worden gemaakt van formules of grafieken voor transmissiecoëfficiënten [4.4].

Wanneer de golven alleen door de havenmonding binnen kunnen dringen zal diffractie optreden. Deze en andere effecten (refractie, bodemwrijving) kunnen met behulp van speciale rekenprogramma's zoals PHAROS [4.5] worden onderzocht.

Afhankelijk van de vormgeving en afmetingen van de voorhaven kunnen de getransmitteerde golven worden versterkt door de plaatselijk optredende wind of kunnen andere golven ontstaan. Aanbevolen wordt in deze gevallen advies van specialisten in te winnen.

#### 4.3 Bepaling ontwerp golf.

Als bij relatief lage golfhoogte ondiep-water effecten kunnen worden verwaarloosd, kan een Rayleigh-verdeling worden aangenomen. De kans dat tijdens een stormpiek met  $N$  golven de ontwerp golfhoogte  $H_d$  wordt overschreden is:

$$\Pr (H > H_d) = 1 - e^{-N \cdot e^{-2(H_d/H_s)^2}}$$

Met:

$N$  = aantal golven tijdens de maatgevende periode van de storm.

$H$  = de stochast "golfhoogte"

$H_s$  = significante golfhoogte

$H_d$  = ontwerp golfhoogte.

De ontwerp golfhoogte  $H_d$  wordt nu zodanig bepaald dat de kans op overschrijding tijdens een stormpiek minder is dan 10%. Dit betekent dus dat in 10% van de stormpieken een golf met een golfhoogte  $H_d$  of groter wordt overschreden.

Voor de maatgevende duur van de storm kan in de kustgebieden 2 uur worden aangehouden. In het bovenrivierengebied en voor het IJsselmeer kan 4 uur worden aangehouden.

Het aantal golven wordt dan bepaald door:

$$N = T_{\text{stormpiek}}/T_{\text{gem}} = 2 * 3600/T_{\text{gem}}$$

waarin

$T_{\text{gem}}$  = de gemiddelde golfperiode.

Als bijvoorbeeld  $T_{\text{stormpiek}} = 2$  uur en  $T_{\text{gem}} = 3$  sec is  $N = 2400$ . Voor de overschrijdingskansen van golven met golfhoogte  $H_d$  geldt dan :

Tabel 4.1 ontwerp golf volgens Rayleigh-verdeling

$H_d/H_s$	$\Pr\{H > H_d\}$
2	0,6
2,25	0,1
2,5	0,01

Conform paragraaf 3.2.3 van de Leidraad zal dus als ontwerp golf gekozen moeten worden die golf waarvoor  $\Pr\{H > H_d\} = 0,1$  ofwel:

$$H_d = 2,25 H_s$$

Bij andere golfperiodes en andere duur van de stormpiek wijzigt de vermenigvuldigingsfactor.

#### 4.4 Reflectie en overslag.

Als gevolg van reflectie zal de golfhoogte ter plaatse van het kunstwerk,  $H_{kw}$ , vergroot worden met de reflectiecoëfficiënt  $K_r$  :

$$H_{kw} = (1 + K_r) H_d \quad (4.2)$$

De amplitude ter plaatse van het kunstwerk is:

$$a_{kw} = 1/2 H_{kw} \quad (4.3)$$

De reflectiecoëfficiënt is afhankelijk van de waterstand ten opzichte van de kruinhoogte en van de waterdiepte, alsmede van de golflengte.

Bij grote kerende hoogte is  $K_r = 1$ . Bij ondiep water ( $D/L < 0,5$ ) is de reflectiecoëfficiënt  $K_r$  afhankelijk van de golfsteilheid  $H/L$ , in ieder geval  $< 1$ .

Als de waterstand (veel) hoger is dan bovenkant deur is  $K_r = 0$  ; als de waterstand ongeveer gelijk is aan bovenkant deur is  $K_r = 0,5$  (zie fig. 4.2).

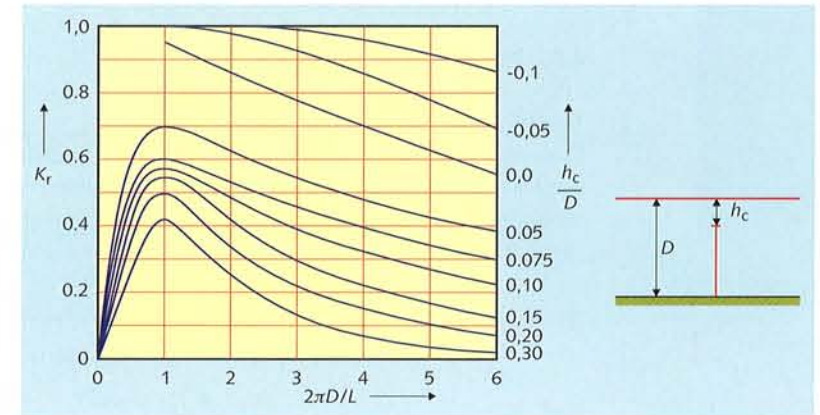


Fig. 4.2 Reflectiecoëfficiënt (Bron: Sylvester [4.9])

#### 4.5 Golfbreking

Steilheids- en diepte-effecten geven een maximum aan de golfhoogte in een bepaalde situatie. Als de inkomende golf hoger is dan mogelijk in die situatie, breekt de gereflecteerde golf tot de golfhoogte weer gelijk is aan het maximum. Om te controleren of de golven zullen breken of niet gelden de volgende formules voor lopende c.q. staande golven:

$$H_{d,max} = (0,14 \text{ resp. } 0,2) L \tanh(2\pi D/L) \quad (4.4)$$

In diep water ( $D/L > 0,5$ ) reduceren deze niet-breken voorwaarden tot:

$$H_{d,max} = (0,14 \text{ resp. } 0,2) L \quad (4.5)$$

In ondiep water ( $D/L < 0,05$ ) tot:

$$H_{d,max} = (0,88 \text{ resp. } 1,25) D \quad (4.6)$$

met:

$$H_{d,max} = \text{maximum ontwerp golfhoogte van de invallende golven [m]}$$

D = waterdiepte [m]  
L = lokale golflengte [m]

#### 4.6 Krachten door golven.

##### Verhoging middenstand.

Door de reflectie van de golven ontstaat een zodanige waterbeweging voor het kunstwerk dat de maximale c.q. de minimale, uitwijking van de waterstand ten opzichte van de gemiddelde waterstand gelijk is aan (zie figuur 4.3):

$$\eta_{\max} = \eta_0 + a_{kw} \quad (4.7a)$$

$$\eta_{\min} = \eta_0 - a_{kw} \quad (4.7b)$$

met

$\eta_0$  = de middenstandsverhoging [m]

De middenstandsverhoging is een functie van H, T of L en de waterdiepte. Bij volledige reflectie geldt:

$$\eta_0 = f \pi \frac{H^2}{L} \coth\left(2\pi \frac{D}{L}\right)$$

met voor f de waarde:

$$f = 1 + \frac{3}{4 \sinh^2\left(2\pi \frac{D}{L}\right)} - \frac{1}{4 \cosh^2\left(2\pi \frac{D}{L}\right)}$$

Voor diep water gaat  $f \Rightarrow 1$ .

N.B. De middenstandsverhoging is dus niets anders dan het gemiddelde van de hoogste en de laagste uitwijking. Dat de middenstandsverhoging niet nul is, is het gevolg van het feit dat de uitwijking van het wateroppervlak  $\eta$  niet zuiver sinusvormig is. De gemiddelde uitwijking van de waterstand is uiteraard wel gelijk aan nul.

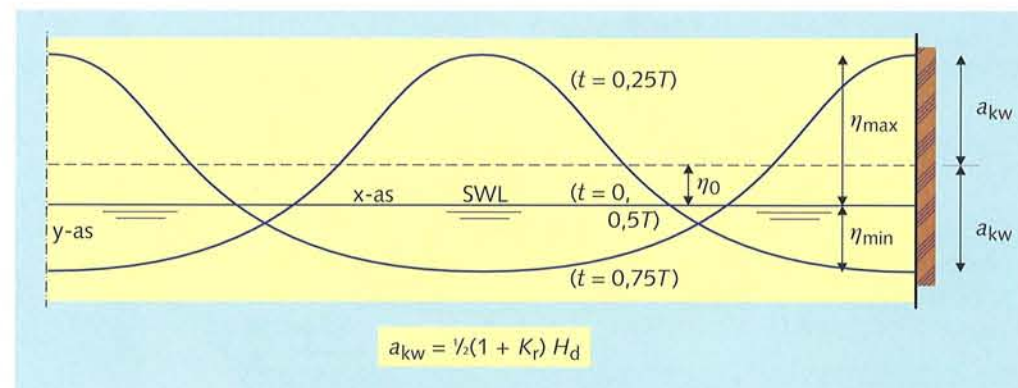


Fig. 4.3 Golfvorm op verschillende tijdstippen in een golfperiode

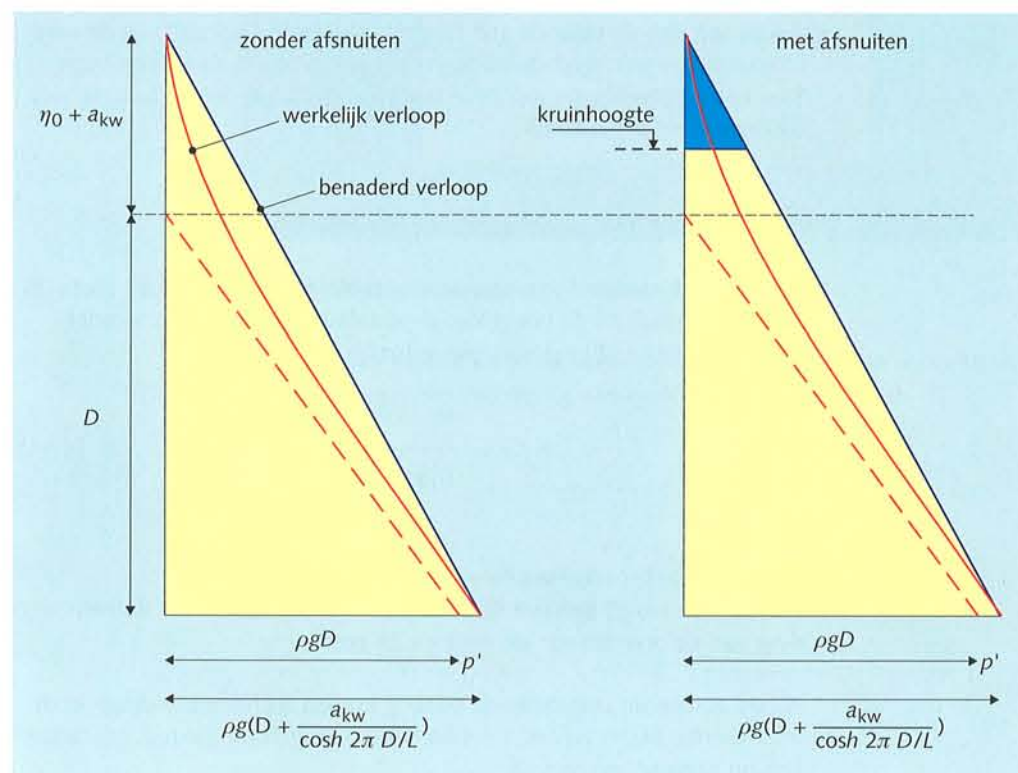


Fig. 4.4 Drukverdeling op vertikaal vlak, zonder en met afsnuiten.

*Golfdrukken.*

Op het moment van de maximale uitwijking van de golf vóór het kunstwerk is de drukverdeling niet-hydrostatisch. Volgens Battjes [4.6] kan deze (veilig) worden benaderd met een lineair verloop tussen de maximale uitwijking waarvoor geldt:

voor  $z = \eta_{\max}$  :  $p = 0$

en de druk op de bodem ( $z = -h$ ), waarvoor geldt:

$$P_r = \rho g \left[ D + a_{kw} \frac{1}{\cosh(2\pi \frac{D}{L})} \right]$$

*Afsnuiten*

Als de top van de staande golf hoger is dan de bovenrand van de verticale wand, wordt eerst dezelfde drukfiguur gebruikt als bij een hoge bovenrand; vervolgens wordt de top van de drukfiguur ter hoogte van de bovenrand afgesnoten.

**4.7 Reductie door scheve golfinval en kortkammigheid.**

Voor scheef invallende golven uit één richting onder een hoek  $\theta$  met de normaal op de wand kan de amplitude gereduceerd worden door vermenigvuldiging met een reductiecoëfficiënt  $C_\theta$  :

$$C_\theta = \frac{\sin(\pi \frac{B \sin \theta}{L_s})}{\pi \frac{B \sin \theta}{L_s}} \quad (4.11)$$

Hierin is  $B$  de breedte van de wand of deur. De reductie wordt behalve door de hoek ook bepaald door de verhouding van de breedte van de deur en de golflengte.

Als de golven uit verschillende richting komen (richtingspreiding) vindt interferentie plaats en ontstaan kortkammige golven. De reductiefactor kan nu bepaald worden als

$$C = \sqrt{\int \frac{\sin(\pi \frac{B \sin \theta}{L_s})}{(\pi \frac{B \sin \theta}{L_s})^2} E(\theta) d\theta} \quad (4.12)$$

waarin

$E(\theta)$  = de richtingspreidingsfunctie.

Vaak wordt aangenomen:  $E = \cos^2 \theta$ . Het resultaat voor de reductiecoëfficiënt ( $C$ ) is als functie van de verhouding  $B/L$  weergegeven in figuur 4.5.

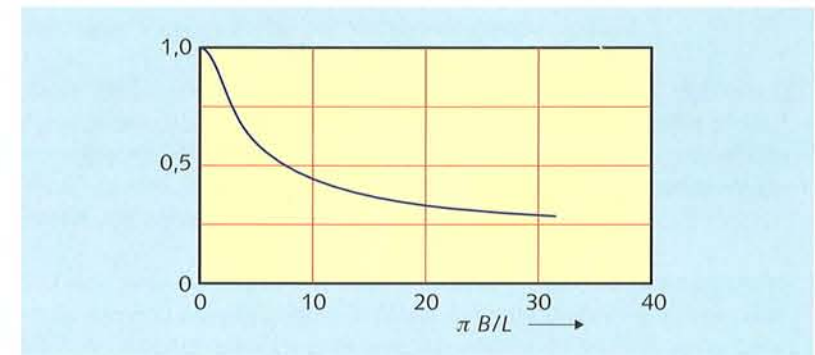


Fig. 4.5 Reductiefactor voor kortkammigheid (bron: Battjes [4.9])

Bij puntdeuren ontstaat in de hoeken nabij de wanden een concentratie van energie en een verhoging van de krachten (zie lit. [4.2]).

## 5 BEPALING KERENDE HOOGTE

### 5.1 Inleiding

Bij het bepalen van de toelaatbare hoeveelheid overloop en overslag bij waterkerende kunstwerken en bijzondere constructies mag in het algemeen rekening worden gehouden met grote overslagdebieten. Dit wijkt af van de benadering bij dijken, waar de hoeveelheid golfoverslag veelal beperkt wordt door eisen ten aanzien van erosiebestendigheid of bereikbaarheid van de dijk. Kunstwerken zijn in de regel beter bestand tegen grote hoeveelheden overslaand en overlopend water dan dijken. In dit hoofdstuk worden twee methoden behandeld om de kerende hoogte van kunstwerken te bepalen. Eén, die gebaseerd is op een *toelaatbaar maximaal debiet* tijdens MHW en één, die gebaseerd is op het *bergend vermogen* van het achter het kunstwerk gelegen gebied.

Beide methoden zijn complementair: Bij toepassing van de methode "maximum debiet tijdens MHW" moet worden gecontroleerd of de komberging voldoende is; bij toepassing van de kombergingsmethode moet worden gecontroleerd of het maximum debiet tijdens MHW geen erosie veroorzaakt.

In beide gevallen wordt een veiligheidsmarge van 0,30 m en een minimale kerende hoogte gelijk aan MHW (+ verhogingen als gevolg van zeespiegelrijzing, klink en zettingen, opwaaiing en seiches) gehanteerd. Het bergend vermogen van de grond (tussen de freatische lijn en het maaiveld) wordt niet in rekening gebracht en fungeert daarom als extra veiligheid.

Bij de formulering van dit hoofdstuk heeft de studie [5.1] een grote rol gespeeld.

### 5.2 Ontwerpeis voor de kerende hoogte

#### 5.2.1 Algemeen

De aanleghoogte van het kunstwerk wordt als volgt bepaald:

$$h_{kr} = MHW + h_{zsr} + h_{zkl} + h_{opw} + h_{sbb} + w \quad (5.1)$$

met:

- $h_{kr}$  = de aanleghoogte van het kunstwerk
- MHW = Maatgevend Hoog Water, dit is de ontwerpwaterstand behorende bij de in de Wet op de Waterkering vastgestelde ontwerprequentie (norm)
- $h_{zsr}$  = zeespiegelrijzing en verhoging van de waterstand door morfologische ontwikkelingen gedurende de planperiode, voorzover deze niet in het MHW zijn verdisconteerd
- $h_{zkl}$  = verhoging in verband met verwachte klink en primaire - en seculaire zettingen gedurende de planperiode
- $h_{opw}$  = verhoging van de waterstand door lokale opwaaiing
- $h_{sbb}$  = verhoging van de waterstand door seiches, bui-oscillaties en buistoten
- $w$  = waakhoogte in verband met golfoverslag en overloop

Voor de bepaling van de verhoging van de waterstand door lokale opwaaiing, seiches, bui-oscillaties en buistoten ( $h_{opw}$  en  $h_{sbb}$ ) wordt verwezen naar de TAW Leidraad voor het Ontwerpen van Rivierdijken [5.2]. In de volgende paragrafen wordt aangegeven hoe de waakhoogte in verband met golfoverslag en overloop kan worden bepaald.

### 5.2.2 Maximum toelaatbaar debiet tijdens MHW

Bij deze methode wordt verondersteld dat het kunstwerk en de aansluitconstructies (boderverdediging) bestand zijn tegen een door de beheerder en de ontwerper vast te stellen maximum overslagdebiet  $q_t$  (in l/m/s). Ook is verondersteld dat de golven loodrecht op de waterkering staan en dat de waterkering vertikaal is. Voor scheve golfaanval en afwijkende constructievormen moeten andere grafieken of formules gebruikt worden en eventueel modelonderzoek worden verricht.

De bepaling van de waakhoogte ( $w$ ) verloopt als volgt:

Als tijdens het optreden van de maximale waterstand (te vinden door in vergelijking (1) te stellen  $w = 0$  en  $h_{zkl} = 0$ ) een bepaald golf-klimaat aanwezig is, wordt het gemiddelde overslagdebiet ( $q$ ) bepaald door de significante golfhoogte ( $H_s$ ), de piekperiode ( $T_p$ ) van de golven, de windsterkte en windrichting en de waakhoogte  $w$ .

Als gesteld wordt  $w = \alpha H_s$ , is dit gemiddelde debiet een functie van de overslagparameter  $\alpha$ . In de grafieken van de figuren 5.1.1 en 5.1.2 is dit verband voor loodrechte golfaanval en voor verticale constructies weergegeven voor de kust en voor het rivierengebied. Bij een bepaalde keuze voor het maximale debiet is uit deze grafieken de toelaatbare waarde van  $\alpha$  te kiezen. In verband met de onzekerheden in deze grafieken (en overslagberekeningen in het algemeen) wordt een algemene veiligheidsmarge van 0,30 m aanbevolen. De waarde van  $w$  wordt dan:

$$w = \alpha H_s + 0,30 \quad [\text{m}] \quad (5.2)$$

Indien overslaand water terecht zou komen op een onverdedigd binnentalud is het toelaatbare overslagdebiet gering (orde  $q_t = 1$  á 10 l/m/s).

Langs *de kust* zou dit voor  $H_s > 1,00$  m leiden tot zeer grote waakhoogten. Daarom wordt aanbevolen langs de kust het binnentalud van waterkeringen met coupures altijd voldoende erosiebestendig te maken zodat voor  $\alpha$  de maximale waarde geldt:  $\alpha = 1,2$ .

De bodembescherming moet dan bestand zijn tegen debieten van  $q = 50$  à 200 l/m/s.

Dit wordt ook aanbevolen in gebieden met *riverregime* omdat de grafieken voor kleine debieten onnauwkeurig zijn.

De bodembescherming moet nu bestand zijn tegen debieten van  $q = 10$  à 30 l/m/s.

Bovenstaande leidt bij erosiegevaar tot :

$$w_{\max} = 1,2 H_s + 0,30 \quad [\text{m}] \quad (5.3)$$

De grafieken uit figuren 5.1.1 en 5.1.2 zijn bepaald op basis van benaderende overslagformules, vermeld in paragraaf 5.3.

### 5.2.3 Toelaatbare overslag in verband met komberging

In principe geldt de hier beschreven methode voor kunstwerken waarachter een gebied ligt met een aanzienlijke komberging. Daardoor kan het tijdens MHW optredende overslagdebiet aanzienlijk zijn. De ontwerper dient er rekening mee te houden dat ook het kunstwerk zelf en

de aansluitende bodemverdediging bestand zijn tegen deze debieten. De methode is met name bedoeld voor kunstwerken die twee watersystemen scheiden. De methode is ook goed toepasbaar om de waakhogte te bepalen als de komberging te beperkt is om de methode met maximum debiet tijdens MHW (par. 5.2.2) toe te passen. In de beschrijving in de volgende paragrafen wordt verwezen naar de figuren 5.2.1 t/m 5.2.4. De grafieken in deze figuren gelden slechts voor loodrechte golfaanval en verticale constructies. Voor sterk afwijkende situaties zullen de grafieken aangepast moeten worden. Hierbij wordt dus voor  $\alpha$  een gereduceerde waarde ( $\alpha_{\text{komb}}$ ) bepaald. De bepaling van de waakhogte ( $w$ ) verloopt dan als volgt:

#### 1. bepaling toelaatbare komberging

Het toelaatbare volume water dat gedurende de hoogwaterperiode over het kunstwerk mag stromen is gelijk aan het kombergend vermogen van het achter het kunstwerk gelegen open water. Indien meerdere kunstwerken op hetzelfde open water lozen, dient het toelaatbare volume per kunstwerk evenredig te worden vermindert. Het kombergend vermogen is gelijk aan het oppervlak van het open water vermenigvuldigd met de *toelaatbare peilverhoging*:

$$K = A \cdot h_{\text{pvh}} \quad (5.4)$$

met:

- K = het kombergend vermogen [m<sup>3</sup>]
- A = het oppervlak van het open water dat aan het kunstwerk grenst [m<sup>2</sup>]
- $h_{\text{pvh}}$  = de toelaatbare peilverhoging op het open water [m]

De toelaatbare peilverhoging moet in principe door de beheerder worden vastgesteld, bijvoorbeeld gelijk aan de maaiveldhoogte vermindert met een rekenwaarde voor het winterpeil in het open water. Bij het vaststellen van de rekenwaarde voor het winterpeil dient rekening te worden gehouden met een mogelijk regenachtige periode voorafgaand aan het hoogwater. Veelal zal dit peil hoger zijn dan het gemiddelde - of streefpeil. Deze rekenwaarde dient te worden bepaald aan de hand van beheersgegevens. In principe kan hiervoor het peil met een overschrijdingsfrequentie van 1/10 per jaar worden genomen.

Vervolgens wordt het *toelaatbare overslagvolume* per breedte eenheid van het kunstwerk of de constructie bepaald:

$$V_B = K/B \quad (5.5)$$

met:

- $V_B$  = het totale toelaatbare volume water gedurende een hoogwaterperiode per breedte-eenheid van het kunstwerk [m<sup>3</sup>/m]
- B = De totale breedte van alle kunstwerken die bij overslag of overlopen op hetzelfde open water lozen [m]

#### 2. bepaling overslagparameter voor komberging $\alpha_{\text{komb}}$

Met de figuren 5.2.1 t/m 5.2.4 kan voor verschillende regiems een waarde voor de overslagparameter  $\alpha_{\text{komb}}$  worden bepaald. In de grafieken is de invloed van de duur van het hoogwater verwerkt. Voor het opstellen van grafieken voor specifieke lokaties wordt verwezen naar het stappenplan voor de berekening van de waakhogte voor overslag op basis van komberging (paragraaf 5.3.)

#### 3. bepaling waakhogte; deze volgt uit:

$$w = \alpha_{\text{komb}} H_s + 0,30 \quad [\text{m}] \quad (5.6)$$

#### 4. controle maximum overslagdebiet tijdens MHW

Door in de figuren 5.1.1 c.q. 5.1.2 op de verticale as uit te zetten  $\alpha = \alpha_{\text{komb}}$  kan het maximale debiet tijdens MHW worden afgelezen.

Voorbeeld 1:

Stel kunstwerk aan zee met  $H_s = 2,00$  m en  $V_B = 4000$  m<sup>3</sup>/m. Uit de bovenste grafiek van figuur 5.2.3 volgt dan  $\alpha_{\text{komb}} = 0,60$ . Uit figuur 5.1.1 volgt voor  $\alpha = 0,60$  en  $H_s = 2,00$  m  $\Rightarrow q = 135$  l/m/s.

Voorbeeld 2:

Stel kunstwerk in bovenrivierengebied en  $V_B = 4000$  m<sup>3</sup>/m. Uit de bovenste grafiek van figuur 5.2.1 volgt dan  $\alpha_{\text{komb}} = 0,56$ . Uit figuur 5.1.2 volgt met  $\alpha = 0,56$  voor bovenrivieren  $\Rightarrow q = 30$  l/m/s.



### 5.2.4 Reductie waakhoogte wegens toelaatbare overloop (komberging)

De grafieken van de figuren 5.2 geven allen een maximum komberging per m voor  $\alpha_{komb} = 0$ . Als de beschikbare komberging groter is kan de kerende hoogte verder worden verminderd door overloop toe te staan. De reductie wordt als volgt bepaald:

1. Stel met de grafieken van de figuren 5.2.1 t/m 5.2.4 het overslagvolume vast dat bij de waarde  $\alpha_{komb} = 0$  hoort. Noem dit volume  $V(\alpha 0)$
2. Bereken het toelaatbare (extra) overloopvolume  $V_{ovl}$  per m breedte uit:

$$V_{ovl} = V_B - V(\alpha 0) \quad (5.7)$$

3. Lees uit figuur 5.3 de grootte van de peilverhoging door overslag ( $h_{ovl}$ ) af en bepaal:

$$w = -h_{ovl} + 0,30 \quad (5.8)$$

met als ondergrens:

$$w = 0 \quad (5.9)$$

## 5.3 Bepaling van de overslagfactoren $\alpha$ (Figuren 5.1.1. t/m 5.2.4)

### 5.3.1 Algemeen

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de wijze waarop de figuren 5.1.1 t/m 5.2.4 zijn verkregen. Uitgegaan is van benaderende formules voor verticale wanden en rechte golfval. Daarnaast wordt de golfoverslag in de meeste gevallen beïnvloed door de plaatselijke omstandigheden. Bij kritische ontwerpen is nader onderzoek noodzakelijk.

### 5.3.2 Berekening van $\alpha$ als functie van het gemiddelde overslagdebiet (figuren 5.1.1 en 5.1.2)

Het gemiddelde debiet tijdens MHW wordt bepaald met een formule gebaseerd op empirische gegevens van het Hydraulics Research Station in Wallingford (U.K.).

$$q_{gem} = 5,013 \cdot 10^{-3} K_w k_A g H_s T_z e^c \quad (5.10)$$

met:

$$c = -20,12 k_B w / (T_z \sqrt{g H_s}) \quad (5.11)$$

en:

$$\begin{aligned} q_{gem} &= \text{gemiddeld overslagdebiet} \quad [\text{m}^3/\text{s}/\text{m}] \\ K_w &= \text{toeslagfactor voor wind} \quad [-] \\ T_z &= \text{gemiddelde golfperiode} = T_s / 1,15 \quad [\text{s}] \\ H_s &= \text{significante golfhoogte} \quad [\text{m}] \\ k_A, k_B &= \text{factoren voor scheve golfval} \quad [-] \\ w &= \text{de waakhoogte voor golfoverslag} \quad [\text{m}] \end{aligned}$$

met voor:

- factoren scheve golfval (hoek  $\beta$  t.o.v. de normaal):

$$k_A = 1 + 8,0 \cdot 10^{-2} \beta - 3,2 \cdot 10^{-3} \beta^2 + 2,9 \cdot 10^{-5} \beta^3 \quad (5.12a)$$

$$k_B = 1 + 1,6 \cdot 10^{-4} \beta - 2,1 \cdot 10^{-5} \beta^2 + 2,0 \cdot 10^{-6} \beta^3 \quad (5.12b)$$

- toeslagfactor voor wind:

$$K_w = 1 + (0,6 \times W_f) \quad (5.13)$$

met  $W_f$  = een factor, die afhangt van de windsnelheid ( $V_w$ ) volgens:

$$W_f = 2,959 \cdot 10^{-3} V_w^2 \quad \text{voor } V_w < 26 \text{ m/s} \quad (5.14a)$$

$$W_f = 2 \quad \text{voor } V_w > 26 \text{ m/s} \quad (5.14b)$$

Door voor verschillende regimes de relevante gegevens in te voeren kan voor elke  $w$  een debiet berekend worden. Door te stellen  $w = \alpha H_s$  zijn de grafieken van figuren 5.1.1 en 5.1.2 bepaald.

### 5.3.3 Berekening van $\alpha_{komb}$ als functie van het kombergend vermogen (figuren 5.2.1 t/m 5.2.4)

Voor het berekenen van de totale hoeveelheid overlopend - en overslaand water is het verloop van de waterstand gedurende een maatgevend hoogwaterperiode nodig en zijn golfbrandvoorwaarden nodig.

Deze verschillen van locatie tot locatie. Voor de globale beoordeling zijn maatgevende randvoorwaarden voor een gebied opgesteld.

Het waterstandsverloop is voor diverse locaties berekend door RIZA met de modellen ZWENDL en WAQUA. De resultaten hiervan zijn gebruikt in deze studie.

Voor het getijregime en overgangsgebied is het waterstandsverloop afhankelijk van de belastingscombinatie van Rijnafvoer en hoogwaterstand te Hoek van Holland. Het waterstandsverloop waarmee is gerekend, is bij maatgevende belastingscombinaties, dat wil zeggen belastingscombinaties die een grote bijdrage aan MHW leveren. In de onderstaande tabel zijn deze belastingscombinaties weergegeven. Voor het rivierengebied is er slechts één belasting: de maatgevende Rijnafvoer.

Tabel 5.1 Maatgevende belastingscombinaties voor het waterstandsverloop

hydraulisch regime	lokatie	belastingscombinatie		SVKW
		Rijnafvoer [m <sup>3</sup> /s]	waterstand te Hoek van Holland [m+NAP]	
getijregime	Krimpen aan de Lek	6000	3,00	open
overgangsregime	Dordrecht	10000	4,00	gesloten
rivierregime	Schoonhoven	18000	1,00	open

Voor de golfrandvoorwaarden zijn eveneens per gebied maatgevende veilige waarden gekozen, op basis van de kruinhoogteberekeningen die voor de verschillende gebieden uitgevoerd zijn. In tabel 5.2 zijn deze weergegeven.

Tabel 5.2 Golfrandvoorwaarden voor het rivierengebied

hydraulisch regime	significante golfhoogte [m]	gemiddelde golfperiode [s]
getijregime	0,90	2,8
overgangsregime	0,80	2,6
benedenrivieren	0,70	2,6
bovenrivieren	0,70	2,0

Aan de kust gelden aanzienlijk afwijkende randvoorwaarden. In tabel 5.3 zijn de randvoorwaarden weergegeven. Afhankelijk van de lokale situatie kan één van de vermelde typen golven worden gekozen.

Tabel 5.3 Golfrandvoorwaarden aan de kust

significante golfhoogte [m]	gemiddelde periode [s]
2,0	3
4,0	6
6,0	9
8,0	12

#### 5.3.4 Stappenplan voor figuren 5.2.1 t/m 5.2.4:

1. Ga uit van het waterstandsverloop, zoals gevonden in voorgaande beschrijving. Verdeel deze hoogwaterlijn in intervallen van bijvoorbeeld 10 cm.
2. Kies een waakhogte  $w$  ten opzichte van de top van de hoogwaterlijn.
3. Voor en na MHW is de waakhogte dus op elk tijdstip verschillend. Bereken per waterstandsinterval en per  $m$  kerende hoogte van het kunstwerk het overslaand debiet met behulp van formule (5.10). Van belang is dus dat aannamen worden gedaan voor de windsnelheid  $V_w$ , de significante golfhoogte  $H_s$ , de gemiddelde golfperiode  $T_z$  en de invalshoek  $\beta$  van de golven. In geval meerdere combinaties mogelijk zijn dienen deze ook te worden doorberekend om te kunnen beoordelen welke combinatie voor de grootste overslag zorgt.
4. Sommeer de overslagdebieten per tijdsinterval. Dit geeft de totale hoeveelheid overslag  $V_B$  tijdens de hoogwaterperiode. De bijbehorende factor  $\alpha = w_{MHW}/H_s$
5. Herhaal de stappen 2 t/m 4 voor een andere  $w_{MHW}$  en zet  $\alpha$  uit tegen  $V_B$ .

#### 5.4 Bepaling van de reductie $h_{ovl}$ in geval golfverloop (Figuur 5.3)

De hoeveelheid overstromend water wordt berekend met de formule voor een volkomen overlaat:

$$q = m h_b \sqrt{gh_b} \quad (5.15)$$

waarin:

- $q$  = het debiet per eenheid van breedte [m<sup>3</sup>/s/m]
- $m$  = de contractiecoëfficiënt, gesteld op  $m = 0,6$  [-]
- $h_b$  = de momentane waterstand t.o.v de kerende hoogte [m]

Door integratie van bovenstaande formule in de tijd wordt de totale hoeveelheid overlopend water tijdens een hoogwaterperiode berekend. Per hydraulisch regime wordt een representatief waterstandsverloop vastgesteld. De maximum waterstand is gelijk aan de ontwerpwaterstand. De integratie wordt voor diverse waarden van de maximale waterstand t.o.v. de kerende hoogte ( $h_b$ ) uitgevoerd. Op deze wijze wordt een relatie gevonden tussen  $h_b$  en de hoeveelheid overlopend water per eenheid van breedte.

#### Hydraulische randvoorwaarden

Het verloop van de waterstand tijdens de hoogwaterperiode is hetzelfde als bij de berekening van de overslag is gebruikt.

### 5.5 Voorbeeld

Bepaling van de aanleghoogte van de schutsluis tussen de Rijn en het Betuwepand van het Amsterdam-Rijnkanaal (de getallen zijn fictief, echter wel reëel). De sluis ligt in het *bovenrivierengebied*.

1. bepaling toelaatbaar overslagvolume:
  - lengte kanaal = 30 km
  - breedte kanaal = 62,5 m
  - maximaal winterpeil = NAP + 4,00 m
  - hoogte kade = NAP + 4,80 m
  - maximaal toelaatbaar peil i.v.m. met waakhoogte van 0,50 m voor kade: NAP + 4,30 m
  - Het bergend vermogen is:  $30.000 * 62,5 * (4,30 - 4,00) = 562.500 \text{ m}^3$
  - In de sluis bevinden zich 2 sluisdeuren van ieder 15 m breed. Bovendien is aan de andere kant van het kanaal, bij de aansluiting op de Waal, eveneens een sluis met 2 deuren van ieder 15 m

breed. De overige waterkerende elementen van het sluiscomplex spelen geen rol, deze hebben ruim voldoende hoogte. Het toelaatbare overslagvolume per breedte eenheid wordt hiermee:  $V_B = 562.500 / (4 * 15) = 9.375 \text{ m}^3/\text{m}^1$ . Opgemerkt wordt dat hierbij aangenomen is dat beide sluisen gelijktijdig op dezelfde wijze belast worden. Dit is dus een ongunstig scenario.

2. bepaling van de toeslag voor overslag:
  - Uit de grafiek voor het bovenrivierengebied (Fig. 5.5.2) kan worden afgelezen:  $\alpha = 0$  en  $V(\alpha 0) = 6.800 \text{ m}^3/\text{m}^1$

Door overslag komt dus  $6.800 \text{ m}^3/\text{m}^1$  in het kanaal terecht. Er kan overloop worden toegelaten. Het toelaatbare volume voor overloop is:  $V_{ovl} = V_B - V(\alpha 0) = 9.375 - 6.800 = 2.575 \text{ m}^3/\text{m}^1$ . Uit figuur 5.3 kan worden afgelezen:  $h_{ovl} = 0,10 \text{ m}$ .

3. bepaling van de vereiste kruinhoogte:
  - Overige gegevens:
    - MHW = NAP + 8,30 m, hierin zijn morfologische effecten verwerkt. Er komt geen lokale opwaaiing of seiches e.d. voor.
    - Klink en zetting spelen geen rol, de sluis is diep gefundeerd.
    - Aangenomen is dat de zeespiegelrijzing in het MHW is verdisconterd.

Er geldt in dit geval:

$$w = - h_{ovl} + 0,30 = - 0,10 + 0,30 = 0,20$$

$$h_{kr} = \text{MHW} + w = 8,30 + 0,20 = \text{NAP} + 8,50 \text{ m}.$$

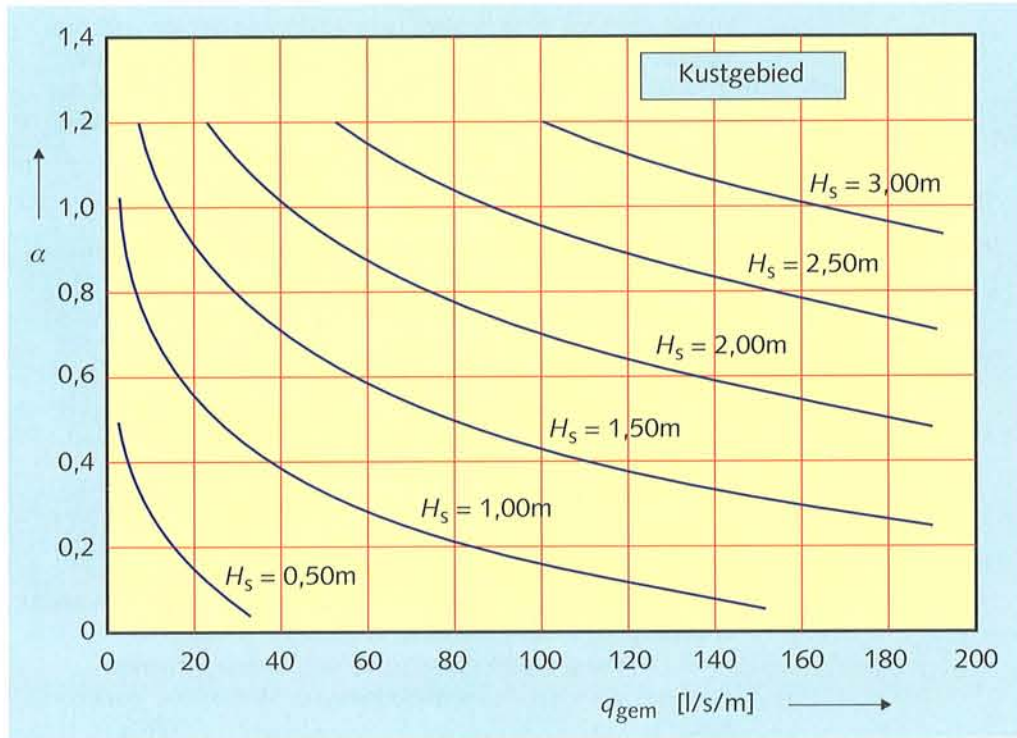


Fig. 5.1.1 Overslagfactor  $\alpha$  voor kustregimes.

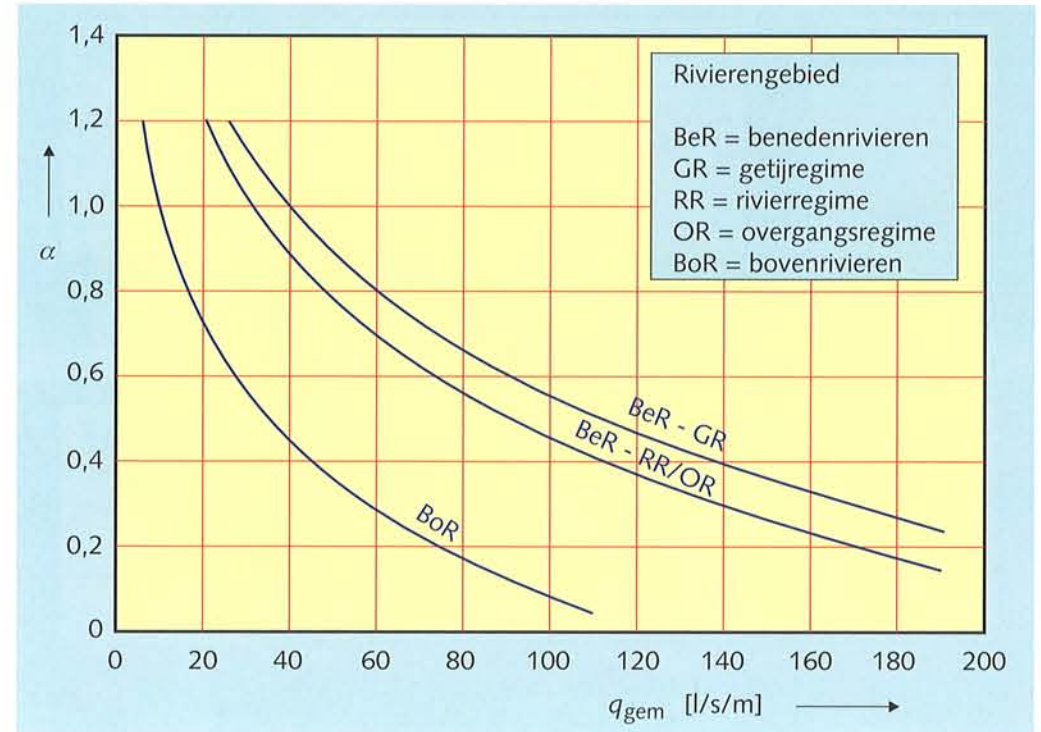


Fig. 5.1.2 Overslagfactor  $\alpha$  voor rivierenregimes.

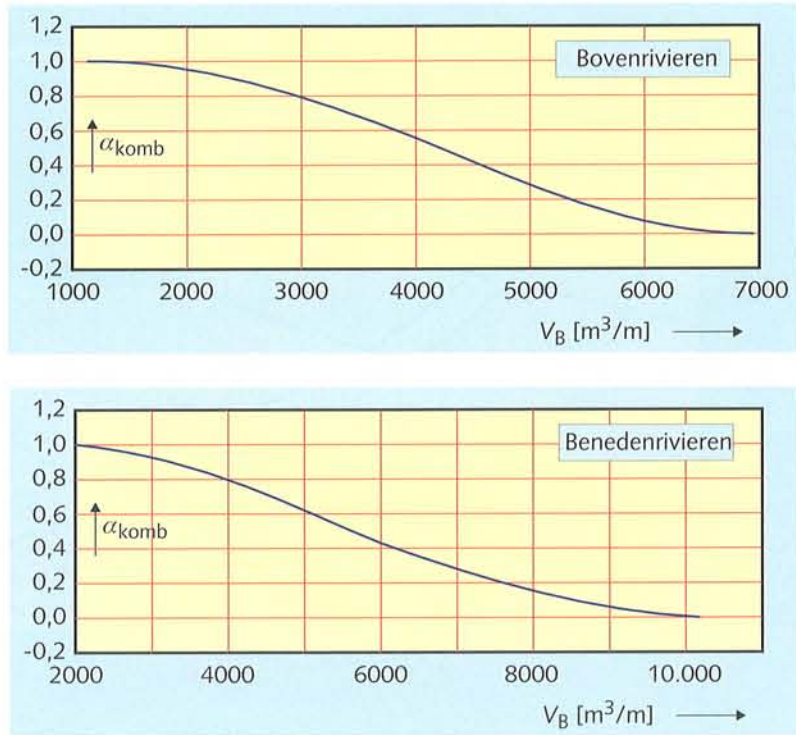


Fig. 5.2.1 Overslagfactor  $\alpha_{komb}$  als functie van de hoeveelheid instromend water,  $V_B$  voor boven- en benedenrivierenregimes.

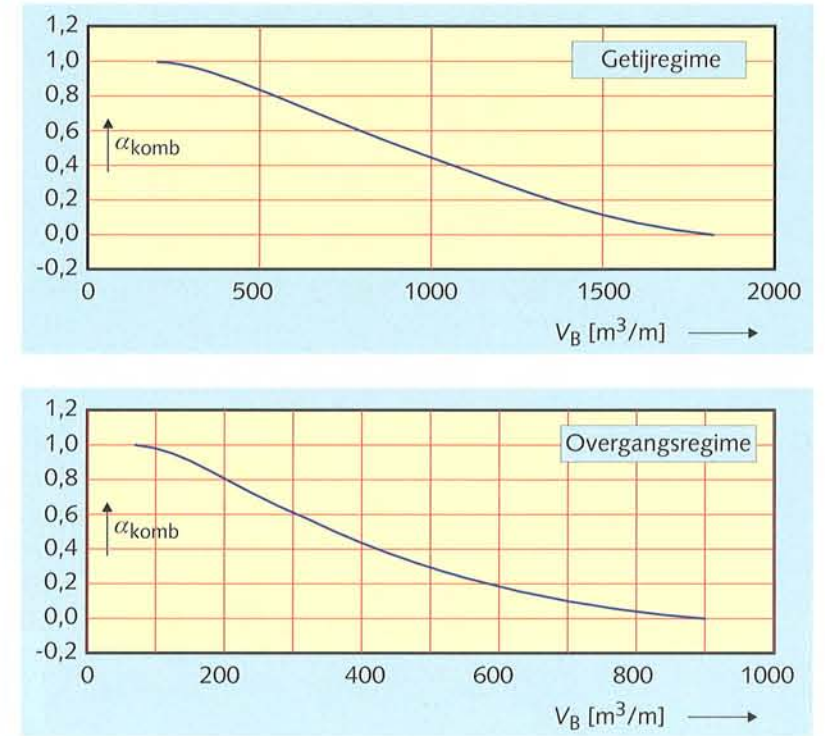


Fig. 5.2.2 Overslagfactor  $\alpha_{komb}$  als functie van de hoeveelheid instromend water,  $V_B$  voor getij en overgangsregimes.

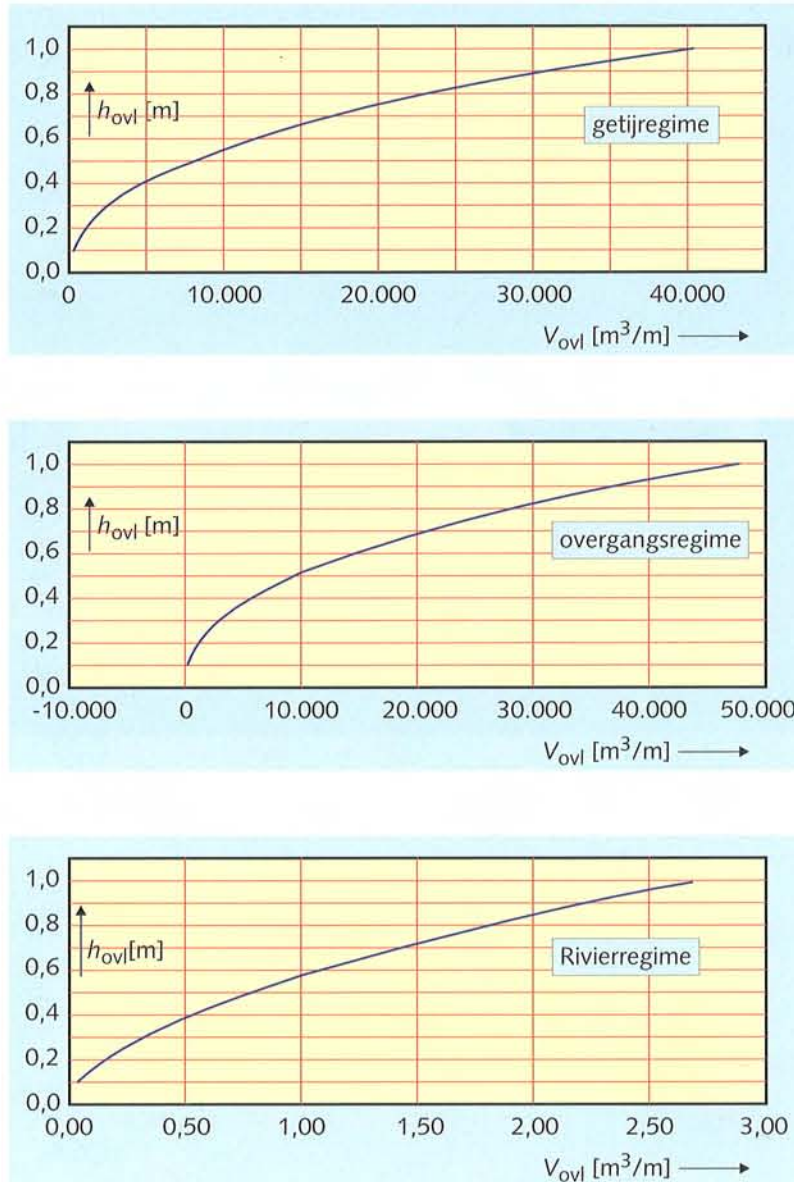


Fig. 5.3 Verlaging van de kruinhoogte in verband met toelaatbare overloop.

## 6 ONDER- EN ACHTERLOOPSHEID

### 6.1 Inleiding

Deze bijlage geeft eerst een korte beschrijving van de belangrijkste mechanismen die een rol spelen bij de verschijnselen onder- en achterloopsheid. Vervolgens worden enige aandachtspunten voor het ontwerp gegeven.

### 6.2 Begrippen en definities

Bij het ontwerpen van een kunstwerk op onder- en achterloopsheid spelen de volgende begrippen een rol:

#### *Onderloopsheid*

Een waterkering is onderloops indien t.g.v. een waterstandsverschil tussen de buitenwaterstand (b.v. rivierzijde) en de binnenwaterstand (achterland) water in het verticale vlak onder de waterkering door stroomt en daarbij zand wordt meegevoerd.

#### *Achterloopsheid*

Een waterkering is achterloops indien t.g.v. een waterstandsverschil tussen de buitenwaterstand (b.v. rivierzijde) en de binnenwaterstand (achterland) water in het horizontale vlak langs de waterkering door stroomt en daarbij zand wordt meegevoerd.

#### *Zandmeevoerende wellen, piping*

Bij een verval over een waterkering op een goed waterdoorlatend pakket kunnen er wellen aan de benedenstroomse zijde (daar waar de waterstand laag is) van de waterkering optreden. Er kan zand worden meegevoerd indien de snelheid van het water dat uit de wel, langs en/of onder de waterkering stroomt voldoende groot is. Er is dan sprake van een zandmeevoerende wel. Door dit zandtransport ontstaat er een gang onder of langs de waterkering. Er kunnen ook meer gangen ontstaan. Het beginpunt van een gang ligt altijd in de wel. Een gang, ontstaan t.g.v. zandmeevoerende wellen onder of langs de waterkering, wordt ook wel een "pipe" genoemd. Het ontstaan van een pipe t.g.v. het afvoeren van zand door een te grote stroomsnelheid van het grondwater op het grensvlak van een zandlaag en de waterkering (in horizontaal of verticaal vlak) wordt piping genoemd. Het al dan niet meevoeren van gronddeeltjes is afhankelijk van de grondsoort. Zand is het meest

gevoelig voor piping gebleken. Dit omdat in vergelijking met grind de diameter van de korrels kleiner is; terwijl klei en veen in tegenstelling tot zand cohesief zijn en daarom meer weerstand bieden aan erosie.

*Heaving*

Bij een goed doorlatende ondergrond worden ter voorkoming van onderloopsheid damwandschermen toegepast. Deze verlengen de afstand, die het water moet afleggen, waardoor de snelheid van het water langs het grensvlak van de zandlaag en het kunstwerk afneemt. Een benedenstrooms geplaatst scherm heeft echter nog een bijkomend voordeel. Het water zal verticaal stromen (langs het scherm) terwijl bij het ontbreken van dit scherm het water horizontaal zal uitstromen (langs de bodem van het kunstwerk behoudens het feitelijke uitstroompunt waar fysisch gezien een discontinuïteit optreedt). Dit levert een positieve bijdrage aan het voorkomen van zandmeevoerende wellen omdat de zandkorrels bij verticale stroming met het gehele eigen gewicht weerstand tegen uitspoeling bieden. Bij horizontale stroming is de weerstand gerelateerd aan slechts een deel van het eigen gewicht van de zandkorrels. Het principe van het optillen van grondeeltjes wordt heaving genoemd. Ter plaatse van een benedenstrooms geplaatste wand kan echter een drijfzandsituatie optreden indien het verticale verhang zo groot wordt dat de korrelspanningen gelijk aan nul worden. Als eerste criterium voor een toelaatbaar verticaal uitstroomverhang is een, over de lengte van de benedenstrooms geplaatste wand, gemiddeld verhang (l) gekozen. Als richtwaarde moet hiervoor  $l = 0,5$  worden aangehouden. De afleiding van dit criterium is opgenomen in figuur 6.5.

**6.3 Aandachtspunten bij het ontwerp**

*Onderloopsheid*

*Goed waterdoorlatende ondergrond.*

Voor het ontwerp van voorzieningen tegen onderloopsheid bij een goed doorlatende ondergrond kunnen de volgende stappen worden doorlopen (zie ook ontwerpschema in figuur 6.1):

- a. Ga met de "black-box" benadering van *Bligh* na of het kunstwerk zonder speciale voorzieningen gevoelig is voor piping ( $H_{cr} < H$ ?). De regel van *Bligh* is te vinden in tabel 6.1. In figuur 6.2 is voor een drie gevallen de kwellingte (ook wel kwelweg genoemd) aangegeven.

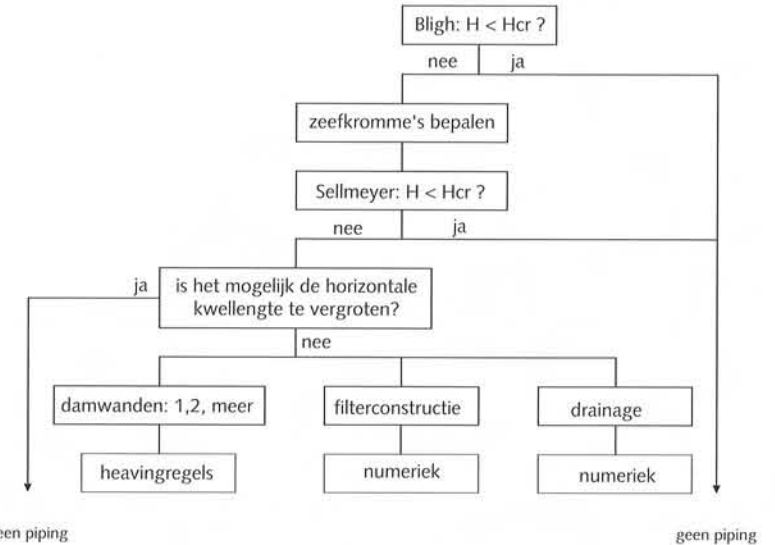


Fig. 6.1 Ontwerpschema Onder- en achterloopsheid

Tabel 6.1 De black box benadering van *Bligh*

<p><b>Bligh:</b></p> $H_{cr} = \frac{L}{c_{creep}} \quad (6.1)$ <p>L = de kwellingte; meestal de lengte van het kunstwerk [m]                  H<sub>cr</sub> = het toelaatbare verval over het kunstwerk [m]                  c<sub>creep</sub> = de creep-coëfficiënt van <i>Bligh</i> [-]</p>	
<b>Grondsoort:</b>	<b>c<sub>creep</sub>:</b>
Zeer fijn zand of silt	-
Fijn zand of silt	18
Fijn zand (Micr)	18
Fijn zand (Kwarts)	15
Middelkorrelig zand	-
Grof zand	12
Fijn grind	9
Middelkorrelig grind	-
Grof grind	-
Zeer grof grind	4

- b. De ontwerpregel van *Sellmeijer* kan worden toegepast indien er moet worden gevreesd voor piping ( $H > H_{cr, Bligh}$ ). Deze extra stap is alleen zinvol indien de verhouding tussen de dikte van het watervoerend pakket (de aquifer) en de kwallengte van het kunstwerk ( $D/L$ ) kleiner is dan 1. Om de regel van Sellmeijer te kunnen toepassen zijn meer invoergegevens nodig. Er zal een grondonderzoek, waarbij van een aantal zandmonsters een zeefkromme wordt bepaald, moeten worden uitgevoerd. De regel doet een meer gedetailleerde uitspraak dan de black box benadering van Bligh. In de praktijk is gebleken dat de regel van Bligh een bovengrensbepaling geeft. De regel van Sellmeijer is beschreven in tabel 6.2. Voor een goede toepassing van deze ontwerpregel is het onontbeerlijk dat [lit 6.1] wordt begrepen.

Fig. 6.2 Bepaling van de kwallengte

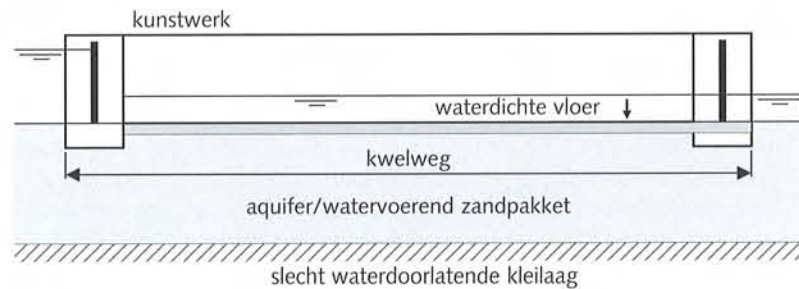


Fig. 6.2a Het bepalen van de kwallengte I.

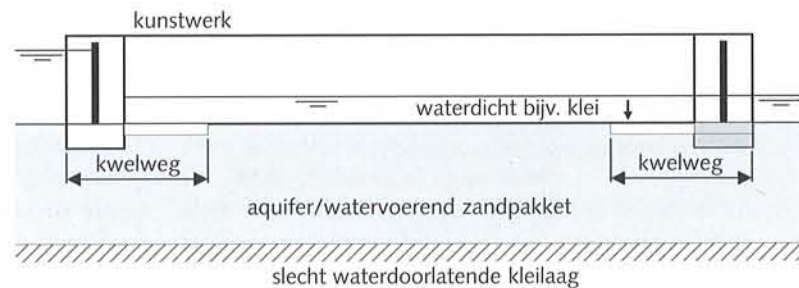


Fig. 6.2b Het bepalen van de kwallengte II.

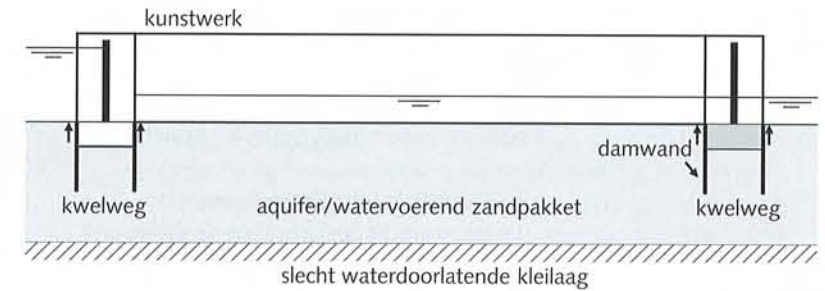


Fig. 6.2c Het bepalen van de kwallengte III.

Tabel 6.2 De ontwerpregel van Sellmeijer

<b>Sellmeijer:</b>	
$H_{cr} = \alpha c \frac{\rho_p}{\rho_w} \tan \Phi (0.68 - 0.10 \ln c) L \quad (6.2)$	
$\alpha = \left[ \frac{D}{L} \right]^{\frac{0.28}{\left( \frac{D}{L} \right)^{2.8} - 1}} \quad (6.3)$	
$c = \eta d_{70} \left[ \frac{1}{\kappa L} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (6.4)$	
<b>Parameter:</b>	<b>Waarde:</b>
$\rho_w$ = de massa-dichtheid van water [kg/m <sup>3</sup> ]	spreekt voor zich
$\rho_p$ = de massa-dichtheid van zandkorrels onder water [kg/m <sup>3</sup> ]	spreekt voor zich
$\Phi$ = de rolweerstandshoek [graden]	41 graden
$\eta$ = sleepkrachtfactor (coëfficiënt van White) [-]	0,25
$d_{70}$ = 70 percentiel waarde in de korrelverdeling [m]	zie [lit 1]
$\kappa$ = intrinsieke doorlatendheid van de zandlaag, die aan erosie blootstaat [m]	zie [lit 1]
D = de dikte van de zandlaag [m]	spreekt voor zich*
L = de lengte van de kwelweg, horizontaal gemeten = meestal de lengte van het kunstwerk [m]	spreekt voor zich

\* Onzekerheid ten aanzien van de parameter D is alleen interessant indien  $D < L$  [lit 1].

- c. In het ontwerpschema in figuur 6.1 worden twee oplossingen uitgewerkt voor het geval dat ook uit de regel van Sellmeijer blijkt dat piping ( $H > H_{cr, Sellmeijer}$ ) kan optreden:



1. Vergroten van de kwelengte van het kunstwerk.  
Het optreden van piping controleert men weer met de stappen (a) en (b).
2. Het treffen van speciale voorzieningen, waarvan er hier onder twee nader worden uitgewerkt en er één alleen zal worden genoemd:

*I. toepassen van damwanden*

Het meest effectief is om de damwand aan de benedenstroomse zijde van het kunstwerk aan te brengen. Het water zal hier nu verticaal uitstromen zodat het heavingcriterium van toepassing is. Aan de hand van de ontwerpgrafiek in figuur 6.4a kan de benodigde damwandlengte worden bepaald. De hier gepresenteerde figuur is slechts toepasbaar voor de verhouding  $L/D = 2$ .

Er kan gekozen worden voor een tweede damwand aan de bovenstroomse zijde van het kunstwerk indien de vereiste lengte van de benedenstrooms te plaatsen damwand te groot wordt. De tweede ontwerpgrafiek van figuur 6.4b kan worden gebruikt indien de lengte van beide damwanden gelijk gekozen wordt en  $L/D = 2$ .

Voor andere lengten en/of voor meerdere damwanden (tot een maximum aantal van 6) wordt aanbevolen het spreadsheetprogramma: "Heaving bij kunstwerken" toe te passen. Dit programma inclusief een beknopte handleiding is te verkrijgen bij de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van de Rijkswaterstaat (secretariaat TAW).

Bij een "gecompliceerde ondergrond" kan men het beste een berekening maken met een numeriek (stationair) grondwaterstromingsprogramma.

Het pc-programma MSEEP is hier een voorbeeld van. Het heavingcriterium blijft bij deze berekeningen onverminderd van toepassing.

Opmerkingen:

1. Een alternatief voor de heaving-berekeningen is de black-box benadering van Lane. Echter het toepassen van deze regel zal over het algemeen tot overdimensionering van de lengte van de damwanden leiden. Ook deze black-box benadering is opgenomen in tabel 6.3.

2. Indien benedenstrooms een bodembescherming wordt aangebracht zal deze een grotere doorlatendheid hebben dan het watervoerende pakket. Het verticale verhang zal zich daardoor vrijwel volledig over de grondlagen concentreren. Wel is het toegestaan het gewicht van deze bodembescherming bij het heavingmechanisme in rekening te brengen. Daarnaast kan de bodembescherming, mits gedimensioneerd volgens de filtercriteria, uitspoeling van zand/grinddeeltjes beperken.

*II. aanbrengen van een filterconstructie benedenstrooms van het kunstwerk*

Er kan een filterconstructie worden toegepast om te voorkomen dat er zand- of grinddeeltjes uitspoelen (filter is gronddicht). Om te voorkomen dat wateroverspanningen onder de bodembescherming optreden moet de doorlatendheid van het filter groter zijn dan de doorlatendheid van de aquifer. Dit moet worden gegarandeerd gedurende de gehele levensduur van het kunstwerk. De eisen aan de kritieke verhangen in het filter ten aanzien van gronddichtheid worden berekend met behulp van filterregels. Hiervoor wordt verwezen naar [lit 6.7]. De verhangen kunnen worden berekend met bijvoorbeeld MSEEP.

*III. toepassen van drainage*

Het effect van drainage kan het beste met een numeriek grondwaterstromingsprogramma worden ingeschat. Het valt buiten het kader van deze bijlage om hier uitgebreid op in te gaan.

*Slecht waterdoorlatende ondergrond.*

Bij een slecht doorlatende ondergrond kan onderloopsheid worden tegen gegaan met korte damwanden. De damwanden dienen in de fundering te worden vastgezet om te voorkomen dat ze met de zetting van de ondergrond meegaan en er alsnog een spleet ontstaat.

*Achterloopsheid*

Achterloopsheid kan worden bestreden met één of meer damwand-schermen, die naadloos aansluiten op de zijkant van het kunstwerk. Bij slecht doorlatende ondergrond kan de breedte van de schermen

bepikt zijn. Een praktische richtlijn is de breedte van de schermen in ieder geval gelijk te nemen aan de breedte van het (ongestoorde niet door bemaling beïnvloede vlak) ter plaatse van de bouwput. Voor elke dwarsdoorsnede kan aan de hand van een berekening van de lokale verhangen worden vastgesteld of piping zal optreden.

#### Aansluiting

Ook moet worden gezorgd voor een flexibele aansluiting van voldoende sterkte tussen het kunstwerk en de bekleding van de dijk. In het "Handboek voor de dimensionering van gezette dijkbekledingen" [lit 6.4] en in "Overgangsconstructies" [lit 6.5] zijn voorbeelden gegeven.

Tabel 6.3 De black box benadering van Lane

Lane:	
$H_{cr} = \frac{L_v + \frac{L_h}{3}}{c_{w,creep}} \quad (6.5)$	
$L_h$	= de horizontale component van de lek lengte; meestal de lengte van het kunstwerk [m]
$L_v$	= de verticale component van de lek lengte [m]
$H_{cr}$	= het toelaatbare verval over het kunstwerk [m]
$c_{w,creep}$	= de "gewogen" creep-coëfficiënt van Lane [-]
<b>Grondsoort:</b>	<b><math>c_{w,creep}</math>:</b>
Zeer fijn zand of silt	8.5
Fijn zand of silt	-
Fijn zand (Micr)	7
Fijn zand (Kwarts)	7
Middelkorrelig zand	6
Grof zand	5
Fijn grind	4
Middelkorrelig grind	3.5
Grof grind	3
Zeer grof grind	-

Fig. 6.3 Bepaling van de heavingparameters

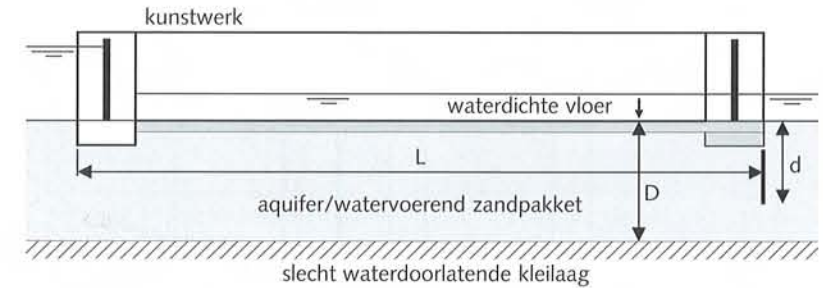


Fig. 6.3a Definitie van een benedenstrooms geplaatst scherm I

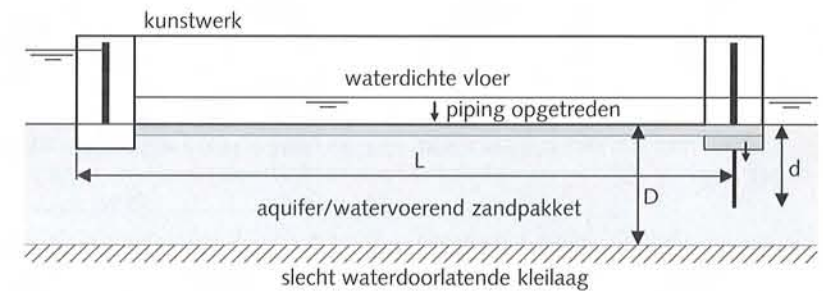


Fig. 6.3b Definitie van een benedenstrooms geplaatst scherm II

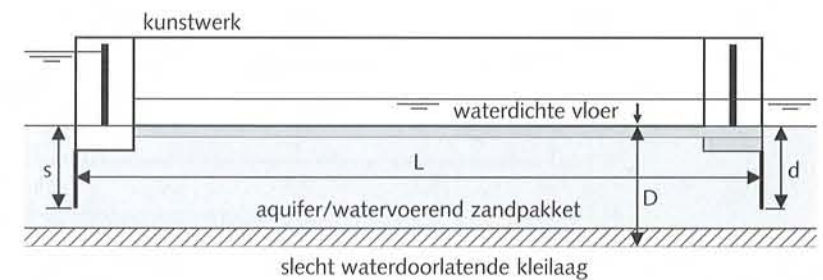


Fig. 6.3c Boven- en benedenstrooms een damwand

Fig. 6.4 Afleesgrafieken Heaving

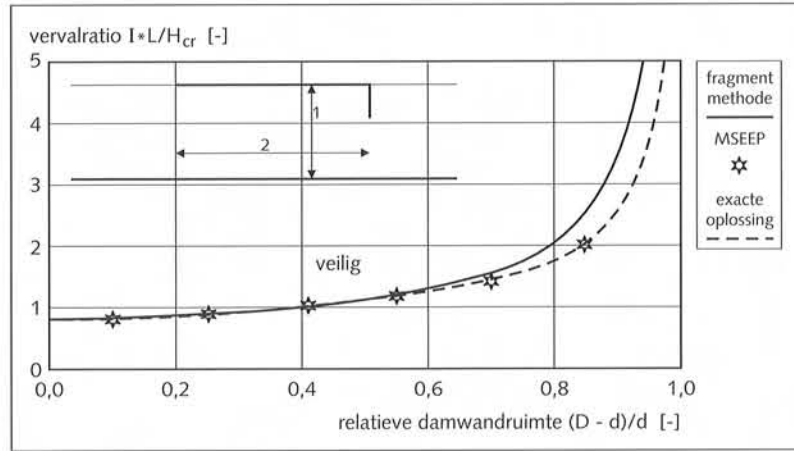


Fig. 6.4a  
Op de horizontale as staat (D-d)/d (d is de benodigde damwandlengte en D is de aquiferdikte) en op de verticale as staat  $I \cdot L/H_{cr}$ . Voor I moet 0,5 worden aangehouden (heaving-criterium). L is de lengte van het kunstwerk en  $H_{cr}$  is het kritieke verval over het kunstwerk. Deze grafiek is geldig voor  $L/D = 2$ . Tevens is met sterren een berekening met MSEEP aangegeven. Voor andere verhoudingen dan  $D/L = 2$  moet het spreadsheetprogramma worden toegepast.

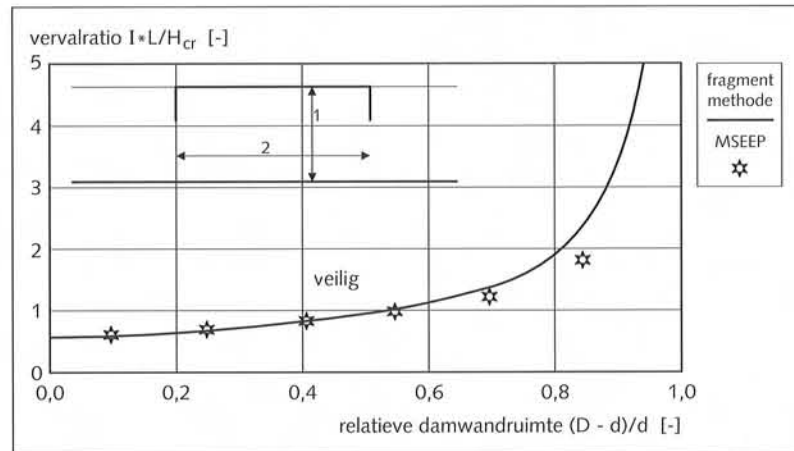


Fig. 6.4b  
Op de horizontale as staat (D-d)/d (d is de benodigde damwandlengte en D is de

aquiferdikte) en op de verticale as staat  $I \cdot L/H_{cr}$ . Voor I moet 0,5 worden aangehouden (heavingcriterium). L is de lengte van het kunstwerk en  $H_{cr}$  is het kritieke verval over het kunstwerk. Deze grafiek is geldig voor  $L/D = 2$ . Tevens is met sterren een berekening met MSEEP aangegeven. Voor andere verhoudingen dan  $D/L = 2$  moet het spreadsheetprogramma worden toegepast. De damwand aan de bovenstroomse zijde is steeds even groot als de damwand aan de benedenstroomse zijde.

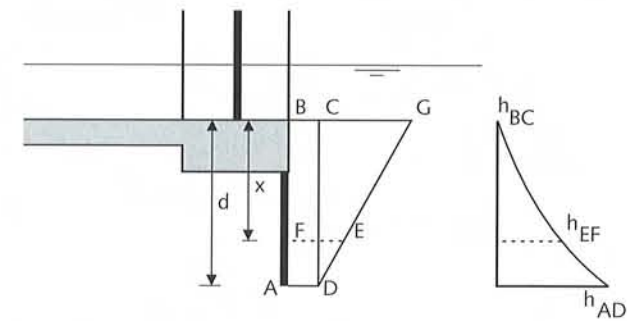


Fig. 6.5 Afleiding van het heavingcriterium

Het heavingcriterium volgt uit een beschouwing van het evenwicht langs een wand geplaatst aan de benedenstroomse zijde van een kunstwerk [lit 6].

Het grondmassief BCEF verkeert in evenwicht indien de overdruk op EF even groot is als het gewicht onder water van het grondprisma. De schuifkracht in het vlak EG en de wrijving langs de damwand worden hierbij buiten beschouwing gelaten.

De overdruk op EF is gelijk aan  $g_w \cdot h_{EF}$ . Het gewicht van het grondmassief BCEF is gelijk aan  $x \cdot 1 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (\gamma_k - \gamma_w)$ . Hierin is  $\varepsilon$  het poriënvolume en zijn  $\gamma_k$  en  $\gamma_w$  de soortelijke gewichten van het korrelmateriaal en het water. Uit het gelijkstellen volgt dat:

$$h_{kritiek} = \frac{x \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (\gamma_k - \gamma_w)}{\gamma_w} \quad (6.6)$$

Of dat:

$$\frac{h_{x \text{ kritiek}}}{x} = \frac{(1 - \varepsilon) \cdot (\gamma_k - \gamma_w)}{\gamma_w} \quad (6.7)$$

Voor alle waarden tussen 0 en  $x$  zou een kritieke situatie optreden als  $h_x$  evenredig met  $x$  zou toenemen. Dit is echter niet het geval. Uit grondwaterstromingsberekeningen blijkt  $h_x$  sterker toe te nemen bij een grotere waarde van  $x$ . Hieruit volgt dat voor  $x = t$  het verhang het grootste zal zijn en daar de kritieke situatie het eerste zal optreden.

$$h_{\text{kritiek}} = \frac{t (1 - \varepsilon) (\gamma_k - \gamma_w)}{\gamma_w} \quad (6.8)$$

Voor  $\gamma_k = 2,65 \text{ kN/m}^3$  en  $\gamma_w = 1 \text{ kN/m}^3$  vindt men bij  $\varepsilon = 0,3$  dat  $h_{t \text{ kritiek}} = 1,155 t$ , bij  $\varepsilon = 0,4$  dat  $h_{t \text{ kritiek}} = 0,990 t$  en bij  $\varepsilon = 0,5$  dat  $h_{t \text{ kritiek}} = 0,825 t$ .

Hieruit volgt dat een veilige waarde voor  $h_{t \text{ kritiek}} / t = 0,5$  zal zijn. De waarde  $h_{t \text{ kritiek}} / t$  wordt verder aangeduid met het de over de lengte van de wand gemiddelde verhang.

## 7 KRUISINGEN VAN PIJPLEIDINGEN MET WATERKERINGEN

### 7.1 Inleiding

Om verschillende redenen kan het noodzakelijk zijn, dat de waterkering wordt gekruist door pijpleidingen. De pijpleidingen worden onderverdeeld in:

- A. Hogedrukleidingen (inwendige overdruk 10 bar en hoger); b.v. leidingen voor aardgas, aardolie en petrochemische produkten.
- B. Lagedrukleidingen (inwendige overdruk lager dan 10 bar); b.v. leidingen voor aardgas, drink-, industrie- en afvalwater en persleidingen van gemalen
- C. Leidingen onder natuurlijk verval (geen inwendige overdruk van betekenis); b.v. rioolleidingen, duikers en syphons.
- D. Hevelleidingen (inwendige onderdruk); b.v. inlaat- en lozingshevels.

Voorbeelden van combinaties van B en D zijn hevelpersleidingen van gemalen (gedeeltelijk overdruk, gedeeltelijk onderdruk).

Kruisende leidingen kunnen als gevolg van lekkage, breuk, explosie, of door krachtwerking en kwelbevordering een ongunstige invloed uitoefenen op het functioneren van de waterkering.

In het algemeen zal de leidingbeheerder vergunning of goedkeuring nodig hebben om de waterkering te mogen kruisen (soms is echter de waterkeringbeheerder ook leidingbeheerder b.v. bij persleidingen van gemalen).

Bij de aanvraag om vergunning of goedkeuring zullen ten laste van de leiding en ten gunste van de waterkering administratieve- en technische voorwaarden worden gesteld.

De technische voorwaarden zullen normaliter eisen inhouden ten aanzien van de minimale sterkte van de leiding, welke aangetoond dient te worden (grondmechanisch rapport, berekening en schadefactor), alsmede ter zake van constructieve voorzieningen, welke nodig zijn om de uitvoering te kunnen realiseren en ongunstige effecten van de leidingkruising te beperken (b.v. verlenging van de kwelwegen, beperking van erosie, middelen om de leiding onder bepaalde omstandigheden te kunnen afsluiten, een zo hoog mogelijk verticaal verloop in de eventueel plaatselijk verhoogde dijk). Tenslotte zullen eisen worden gesteld in verband met het beheer (zoals controlemetingen van de kathodische bescherming, zetting en zakking, eventuele corrosie e.d.)

De kruising van doorgaande leidingen moet zijn ontworpen, berekend en uitgevoerd volgens de Pijpleidingcode, welke te zijner tijd wordt vervangen door de normen NEN 3650, NEN 3651 en NEN 3652 en door de Nederlandse Praktijkrichtlijn NPR 3659.

In dit hoofdstuk wordt aangegeven, welke aanvullende voorzieningen nodig worden geacht, teneinde de leiding in geval van nood onmiddellijk te kunnen afsluiten, om zo aantasting van de waterkering te kunnen beperken.

## 7.2 Aanvullende voorzieningen bij kruisingen van (pijp)leidingen met waterkeringen

Deze voorzieningen gelden niet alleen voor kruisingen van waterkeringen met doorgaande pijpleidingen, maar ook voor leidingen direct in verbinding staande met het buitenwater zoals persleidingen van gemalen, hevelleidingen en duikers. De voorzieningen betreffen met name diverse afsluitmiddelen. In onderstaande tabel zijn de eisen met betrekking tot de lokatie van de afsluitmiddelen samengevat.

Als algemene eis geldt dat de afsluitmiddelen te allen tijde over land bereikbaar moeten zijn.

Tabel 7.1 Locatie van afsluitmiddelen (staat van eisen) bij kruisingen van pijpleidingen met een primaire waterkering

Type pijpleiding	Locatie van afsluitmiddelen		
	boven dijktafelhoogte	tussen ontwerppeil en dijktafelhoogte	onder ontwerppeil
I Doorgaande leiding - drukleiding	afsluiter buiten veiligheidszone	idem	idem
- vrij vervalleiding	afsluiter buiten veiligheidszone	idem	idem
- syphon	afsluiter in hoofden	idem	idem
II Persleiding en hevelpersleiding	eventueel afsluiter buiten veiligheidszone	idem; + terugslagklep in hoofd	idem; + terugslagklep in hoofd
III Hevel	vacuümverbreker	afsluiter in hoofd	afsluiters in hoofden
IV Duiker	geen afsluiter n.v.t.	n.v.t.	twee afsl. aan kerende zijde

### N.B.1 (betreft leidingtypen II t/m IV):

Teneinde te voorkomen dat na leidingbreuk terugstromen of terughevelen van buitenwater via de breuk optreedt, verdient het aanbeveling in het buitenhoofd altijd een afsluitmiddel aan te brengen, indien dit uit anderen hoofde al niet zo is. Gezien de lage coïncidentiekans van leidingbreuk en falen van het afsluitmiddel is een dubbele uitvoering niet nodig. Voor lozingswerken is een terugslagklep adequaat, voor inlaatwerken een afsluiter met verlengde spindel. Alleen voor kruisingen boven dijktafelhoogte (kolom 1) komt als alternatief een vacuümverbreker in aanmerking.

### N.B.2 (betreft leidingtypen II t/m IV):

Indien de kruising is gelegen in een primaire waterkering die niet direct buitenwater keert, maar de scheiding vormt tussen twee dijkkringgebieden (compartimentering), dienen de afsluiters 2-zijdig kerend te worden uitgevoerd (dubbele aanslagen), terwijl terugslagkleppen niet kunnen worden toegepast.

## 7.3 Doorgaande pijpleidingen

Wanneer een leiding niet in verbinding staat met het buitenwater maar ondergronds doorgaat, is in principe steeds een gesloten geheel aanwezig ten opzichte van dat buitenwater. Bij een breuk in de leiding fungeert de leiding zelf immers als waterkering.

Indien echter de doorgaande pijpleiding een drukleiding is en daardoor bij bezwijken gevaar oplevert voor de waterkering, wordt de eis gesteld dat bovenstrooms van de waterkering, doch buiten de veiligheidszone<sup>1</sup> in de leiding een afsluiter wordt aangebracht, teneinde bij breuk de leiding drukloos te kunnen maken. Deze afsluiter zal niet te ver van de waterkering gesitueerd mogen zijn. De eis geldt in principe voor hoge- en lagedrukleidingen.

Hulpstukken en appendages zoals afsluiters, spuitstukken, ventielen, speciale flexibele koppelingen en dergelijke kunnen een zwakke plaats in de leiding vormen en mogen dan ook niet worden aangebracht in

<sup>1</sup> De breedte van de veiligheidszone, gemeten vanuit de teenlijn van de waterkering, is gelijk aan de afstand tot de leiding waarbinnen ontgrondingen en verstoringen ten gevolge van lekkage, breuk of explosie kunnen optreden, vermeerderd met de breedte van de langs de waterkering gelegen terreinstrook die in verband met de stabiliteit van de waterkering ongestoord moet blijven.

dat deel van de leiding, dat tot de kruising behoort (inclusief het deel in de veiligheidszone).

Het kan echter bij vloeistofleidingen in bepaalde gevallen tot bijvoorbeeld 0,5 N/mm<sup>2</sup> (5 bar), zijn nut hebben op het hoogste punt van een kruising beluchtingsventielen of ontluchters aan te brengen.

Indien de doorgaande leiding geen drukleiding is (vrij verval rioolleiding) is een afsluiter alleen nodig om de aanvoer van vloeistof te stoppen. Dit geldt niet voor een syphon. Dit is een tussenvorm. Er is hier weliswaar geen directe verbinding met het buitenwater, maar het betreft geen doorgaande leiding. Bij breuk van de syphon kan inundatie optreden (vergelijk tunnel problematiek). Zowel het in- als het uitstroomhoofd van de syphon dient van een afsluitmiddel te worden voorzien.

#### 7.4 Leidingen, direct in verbinding staande met het buitenwater.

Wanneer een leiding direct in verbinding staat met het buitenwater, wordt onderscheid gemaakt aan de hand van de hoogteligging in de dijk en de aard van de leiding (persleidingen van gemalen, hevelleidingen, duikers, en hevelpersleidingen van gemalen).

- Wanneer de leiding over de dijktafelhoogte wordt gevoerd, bestaat er alleen bij een drukleiding behoefte aan een afsluiter (aangezien de waterkering dan tot de volledige hoogte ononderbroken aanwezig is), om de leiding bij breuk snel drukloos te kunnen maken. Ook de positie van deze afsluiter moet voldoen aan de drie randvoorwaarden:
  - bovenstrooms van de waterkering;
  - buiten de veiligheidszone;
  - niet te ver van de waterkering verwijderd.
 Het betreft hier persleidingen en hevelpersleidingen voor effluent. Bij polder- en boezemgemalen bevindt het gemaal zich in of nabij de waterkering. Bij breuk van de hevelpersleiding wordt de leiding het snelst drukloos gemaakt door de pompen uit te schakelen, ook al is er in het gemaal altijd een afsluiter aanwezig. Indien de leiding een zuivere hevelleiding is, biedt de normale vacuümverbreker voldoende zekerheid.
- Wanneer de leiding onder het ontwerppeil is gelegen, kan bij een bepaalde waterstand water door de open buis naar binnen stromen.

Voor het geval hierbij sprake is van een persleiding of hevelpersleiding van een polder- of boezemgemaal leidt dit nog niet direct tot inundatie. Er is immers altijd een afsluiter in het gemaal aanwezig. Omdat deze afsluiter een enkele kering vormt, vereist dit bij intacte leiding een tweede kering in de vorm van een afsluitmiddel, bijvoorbeeld een terugslagklep in het buitenhoofd. Deze vormt dan de eerste kering, de afsluiter de tweede. Bij breuk van de leiding wordt deze drukloos gemaakt door het gemaal stil te zetten.

Bij een effluentleiding is een afsluiter nodig om de drukleiding snel drukloos te kunnen maken. Deze dient weer te worden geplaatst:

- bovenstrooms van de waterkering;
- buiten de veiligheidszone;
- niet te ver van de waterkering verwijderd.

Indien het een zuivere hevelleiding betreft, biedt de normale vacuümverbreker onder maatgevende omstandigheden geen enkele zekerheid. Een tweetal afsluiters is nodig. Daar deze niet luchtdicht zijn uit te voeren, zou men hen niet moeten plaatsen in het leidinggedeelte, dat bij normaal gebruik onder onderdruk staat. Aangezien deze afsluiters altijd toegankelijk moeten zijn, komt plaatsing in het in- en uitstroomhoofd, aan de buitenzijde van de waterkering met verlengde spindel, in aanmerking.

Bij een lozingshevel zou een terugslagklep de afsluiter in het uitstroomhoofd kunnen vervangen.

Indien het gaat om een duiker wordt, evenals bij een hevel, in het algemeen geëist, dat twee keermiddelen aanwezig zijn, waarbij de één de reserve is van de ander, ingeval een van de keermiddelen is geblokkeerd door vuil of is verwijderd voor onderhoud.

De afsluitmiddelen zullen bij voorkeur aan de kerende zijde van de waterkering worden geprojecteerd. Eén van de beide keermiddelen kan bestaan uit een terugslagklep in het buitenhoofd, indien het een lozingsduiker betreft. Bij inlaatduikers is dit bezwaarlijk. De tweede kering kan bestaan uit een afsluiter in de kruin van de waterkering.

- Wanneer een leidingdoorvoer is gelegen tussen de hoogte van het ontwerppeil en de dijktafelhoogte, kan als gevolg van de golfbeweging van het water, door de buis water naar binnen stromen. Bij een hevelpersleiding van een gemaal vormt de afsluiter in het gemaal de eerste kering. Het is discutabel of de golfdoorslag een tweede kering vereist. Bovendien zal men vaak een terugslagklep in

het uitstroomhoofd installeren om het vacuüm in stand te kunnen houden bij tijdelijke onderbreking van de bemaling. Daarnaast is er bij een effluentleiding een afsluiter nodig om de leiding bij breuk snel drukloos te kunnen maken. Deze dient wederom te worden geplaatst:

- bovenstrooms van de waterkering;
- buiten de veiligheidszone;
- niet te ver van de waterkering.

Bij een zuivere hevel biedt de normale vacuümverbreker onvoldoende veiligheid. Een extra afsluitmiddel is nodig, hetzij in de vorm van een terugslagklep in het uitstroomhoofd bij een lozingshevel, hetzij als afsluiter in het instroomhoofd bij een inlaathevel.

## 8 ONDERHOUDSCONCEPT EN ONDERHOUDSPLAN

### 8.1 Inleiding

#### 8.1.1 Doel van dit hoofdstuk

Voorliggend hoofdstuk is bedoeld voor zowel de ontwerpers als de beheerders van waterkerende kunstwerken en bijzondere constructies.

De ontwerper zal bij nieuwbouw of reconstructie van een waterkerend kunstwerk een onderbouwd onderhoudsconcept opstellen, met daarin zijn visie op het onderhoud die het kunstwerk behoeft, de hiervoor benodigde onderhoudsacties en de daaraan verbonden kosten. Hierbij is het van belang dat tijdens het ontwerp onderhoudsbewuste keuzes worden gemaakt en dat de onderhoudsaspecten in het ontwerpproces goed zichtbaar en beïnvloedbaar worden gemaakt voor de beheerder. Het onderhoudsconcept dient de beheerder te laten zien met welke consequenties het niet volgen van de aanbevelingen uit het onderhoudsconcept kan hebben, door bijvoorbeeld herkenbaar te maken welke onderhoudshandelingen een grote invloed hebben op de betrouwbaarheid. Dit geldt voor kritische onderhoudsritmes, maar ook voor unieke componenten en/of onderdelen, smeermiddelen etc.

De beheerder zal, op basis van dit onderhoudsconcept, een onderhoudsplan opstellen. Hierin worden de specifieke onderhoudsactiviteiten vastgelegd. De in het onderhoudsconcept gegeven algemene onderhoudsregels worden nader afgestemd en ingepland, rekening houdend met locatie-specifieke omstandigheden.

Gewezen wordt op het belang van terugkoppeling van informatie van beheerder naar ontwerper. De beheerder krijgt door monitoring en registratie van relevante gegevens een beter zicht op de diverse verouderingsprocessen en de wijze waarop zijn kunstwerk moet worden onderhouden. Voor de ontwerper zijn deze gegevens echter ook van groot belang, om voor volgende projecten de in de ontwerpfase veronderstelde onderhoudsverwachting te kunnen aanscherpen of om aanpassingen aan te brengen om het onderhoud efficiënter te laten verlopen. Daarnaast dient de beheerder bij het afwegen van onderhoudsalternatieven rekening te houden met mogelijk voor het onderhoud kritische onderdelen (met bijbehorend door de ontwerper gegeven onderhoudsadvies en eventuele onderhoudsalternatieven). In deze gevallen zullen wijzigingen in het onderhoud vrijwel altijd consequenties

hebben voor de betrouwbaarheid van het onderdeel.

### 8.1.2 Ontwerp- en onderhoudsstrategieën

Om aan een bepaalde betrouwbaarheidseis te kunnen voldoen, kunnen verschillende ontwerp- en onderhoudsstrategieën worden gevolgd. Men kan bijvoorbeeld een overgedimensioneerd ontwerp maken, zodat de onderhoudsinspanningen minimaal kunnen zijn. Men kan echter ook kiezen voor een "scherp" ontwerp, waarbij de kans op niet-functioneren van het betreffende onderdeel voor een groot deel door het onderhoud wordt bepaald.

Het vereiste betrouwbaarheidsniveau impliceert een zodanig niveau van onderhoud aan een kunstwerk en delen ervan, dat voldoende zekerheid bestaat, dat het kunstwerk tot op het volgende moment van gepland onderhoud blijft voldoen aan de gestelde eisen. Deze eisen zullen veelal niet alleen betrekking hebben op het waterkerend vermogen, maar ook op de beschikbaarheid van de constructie voor de functies schutten, spuien of oeververbinding en op de operationele eisen van voldoende vlot schut- en spuiedrijf.

Binnen het onderhoud worden drie basisstrategieën onderscheiden:

- **Storingsafhankelijk onderhoud (SAO):**  
Hierbij worden onderhoudsmaatregelen getroffen nadat de storing ofwel falen is opgetreden en geconstateerd. Dit betekent, dat onderhoudsmaatregelen worden uitgevoerd, wanneer bij inspectie blijkt dat de constructie, of een bepaald onderdeel van de constructie, zijn beoogde functie(s) niet meer kan vervullen (dat wil zeggen dat een toestandsparameter de waarde van de faalgrens heeft bereikt). Dit is dus correctief onderhoud.
- **Gebruiksafhankelijk onderhoud (GAO):**  
Hierbij worden na een vooraf vastgesteld aantal gebruikseenheden (bijvoorbeeld jaren, stormvloed, openstellingen en dergelijke) onderhoudsmaatregelen getroffen. De tijdsperiode of de andere gebruiksgrootheid wordt hierbij zo geoptimaliseerd, dat de kostenbesparing ten gevolge van uitgestelde onderhoudsmaatregelen gelijk is aan de extra kosten die voortvloeien uit de toename van het risico van eventuele gevolgschade. Eén en ander is gebaseerd op in het verleden uitgevoerde inspecties voor vergelijkbare omstandigheden.

- **Toestandsafhankelijk onderhoud (TAO):**  
Hierbij wordt de toestand van een constructie na een zeker tijdsinterval door middel van inspectie opnieuw vastgesteld. Tot het treffen van onderhoudsmaatregelen wordt besloten, wanneer een toestandsparameter een bepaalde normwaarde (de interventiegrens) overschrijdt. De te optimaliseren grootheden zijn hier het inspectieinterval en de interventiegrens; deze vormen samen een filter waarmee het mogelijk is de faalkans te reduceren. Het inspectieinterval kan weer gebruiks- of toestandsafhankelijk zijn.

De twee laatstgenoemde onderhoudsstrategieën, GAO en TAO, betekenen in de meeste gevallen preventief onderhoud. Ook bij deze strategieën is het echter niet geheel uit te sluiten dat functieverlies optreedt, leidend tot gevolgschade en correctief onderhoud.

De keuze voor één van de drie onderhoudsstrategieën kan worden gemaakt door de beslisboom in figuur 8.1 te doorlopen. In grote lijnen kan worden gesteld dat

- Wanneer het risico van falen (risico = kans op falen x gevolgschade) klein is ten opzichte van de kosten van inspectie en onderhoud wordt SAO gekozen: er wordt dus gewacht op functieverlies.
- Wanneer het risico van falen relatief groot is ten opzichte van de kosten voor inspectie en onderhoud, en het tijdstip van functieverlies is goed voorspelbaar, wordt gekozen voor GAO. Afhankelijk van de gebruikintensiteit wordt dus tijdig preventief onderhoud gepleegd.
- Wanneer aan de beide bovenstaande voorwaarden niet wordt voldaan, maar de constructie is goed inspecteerbaar, ofwel de toestand van de constructie is goed meetbaar, dan wordt gekozen voor TAO, dus tijdig preventief onderhoud wanneer de inspecties hier aanleiding toe geven.

Wanneer aan geen van de drie bovengenoemde voorwaarden wordt voldaan, is er sprake van een constructie-ontwerp waarbij het risico bij functieverlies groot is, terwijl dit functieverlies niet te voorspellen is door middel van inspecties of metingen. Verbetering van het ontwerp en/of methoden om het gedrag vast te stellen c.q. te voorspellen zijn de overblijvende opties.



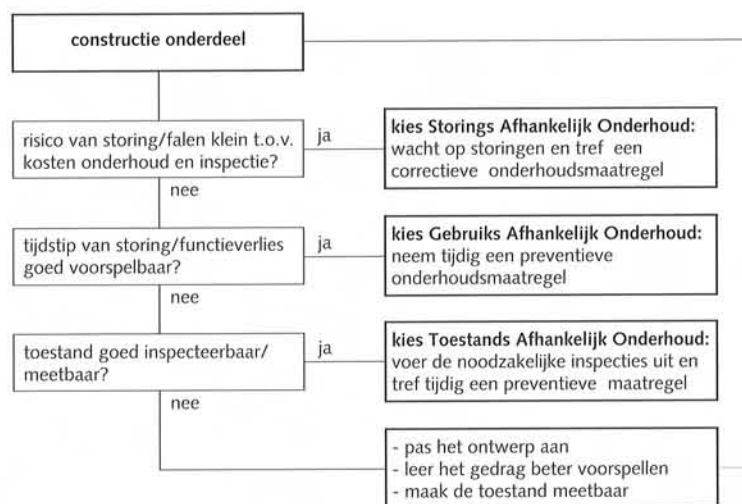


Fig. 8.1 Beslisboom voor de keuze van een onderhoudsstrategie.

De bovengenoemde basis-strategieën hebben een werktuigbouwkundige achtergrond en gaan ervan uit, dat een component of technisch systeem een duidelijke omslag heeft van wel naar niet functioneren. Deze basis-strategieën zijn vooral nuttig voor de gedachtenvorming. In de praktijk komen echter veelal mengvormen voor op basis van de volgende overwegingen:

- Doordat bij TAO de niet-gewenste toestand nooit volledig bekend is en de conditie nooit tot in alle details te meten is, wordt ook bij TAO mede op grond van het aantal bereikte gebruikseenheden besloten tot onderhoud. Dit leidt dus tot een mengvorm van TAO en GAO.
- Doordat het functieverlies vaak niet plotseling optreedt, maar geleidelijk, kan de verminderde functie aanleiding geven tot onderhoud, zonder dat in feite functieverlies optreedt. Dit leidt dus tot een mengvorm van SAO en TAO.
- Veel civieltechnische onderdelen kennen een zogenaamde tweetraps veroudering. Hierbij leidt functieverlies op onderdeelniveau tot correctief onderhoud, zonder dat de functie van de constructie als geheel in gevaar komt. Op onderdeelniveau is dus sprake van SAO, hetgeen voor de constructie als geheel gezien kan worden als TAO.

- Het inspecteren en/of onderhouden van afzonderlijke onderdelen volgens verschillende strategieën vraagt vaak zodanige mobilisatiekosten, dat afstemming tussen onderdelen aantrekkelijk is. Dit betekent dat een bepaald onderhoudsritme wordt aangehouden, dat veelal wordt bepaald door de kritieke onderdelen en waarbij wellicht minder vitale of nog niet zo sterk verouderde onderdelen intensiever geïnspecteerd of onderhouden worden dan strikt noodzakelijk.

In de praktijk blijkt dat bij kunstwerken een splitsing kan worden gemaakt tussen Civiel en Staal (C+S) onderdelen en Werktuigbouw en Installatie (W+I) onderdelen, met voor elke groep een eigen kenmerkende ontwerp- en onderhoudsstrategie:

- **Werktuigbouw en Installatie:**  
W+I onderdelen hebben meestal een kortere (economische) levensduur dan het kunstwerk waarin zij zijn opgenomen en zijn onderhoudsgevoelig. De beschikbaarheidseisen zijn voor deze componenten vaak maatgevend ten opzichte van de eisen met betrekking tot het waterkerend vermogen. Dientengevolge heeft onderhoud niet alleen betrekking op het reduceren van de *faalkans*, maar ook op de "down-time" in het geval van falen van een component. Elektrische onderdelen worden voldoende bedrijfszeker ontworpen, en veelal storingsafhankelijk onderhouden (SAO). Voor elektronische onderdelen geldt hetzelfde, met dit verschil dat die systemen vaak "self-diagnostic" zijn en dus (tijdig) waarschuwen. Werktuigbouwkundige onderdelen, voor zover samengesteld uit standaard componenten, kennen vaak een onderhoudsvoorschrift gekoppeld aan de fabrieksgarantie. De genoemde onderhoudstermijnen worden daarom vaak aangehouden, los van hun plaats binnen het systeem (GAO).
- **Civiel en Staal:**  
Civieltechnische onderdelen zijn vaak moeilijk vervangbaar en bezitten door hun vrijwel unieke ontwerp en zwak geborgde uitvoeringskwaliteit een zeer uiteenlopend verouderingsgedrag. Omdat veelal sprake is van grote gevolgschade worden deze onderdelen veelal onderhoudsarm ontworpen en toestandsafhankelijk onderhouden (TAO). Hierdoor zullen deze onderdelen slechts een zeer kleine faalkans hebben. Het meten van de conditie zelf is vaak moeilijk en kostbaar, zodat men meestal visueel inspecteert op schade en andere afwijkingen met als achterliggende gedachte dat door het incasseringsvermogen van het systeem, onderhoud

nog tijdig kan worden uitgevoerd.

De *beweegbare stalen onderdelen* (deuren, schuiven) nemen een aparte plaats in. In tegenstelling tot de civiele onderdelen en het "vaste" staal kunnen deze wel worden vervangen. Toch worden ook deze onderdelen onderhoudsarm ontworpen en toestandafhankelijk onderhouden (TAO). Enerzijds is dit, omdat de veroudering na een bepaalde interventiegrens exponentieel toeneemt, en dus ook de meerkosten voor herstel sterk zullen stijgen. Anderzijds zullen onderhoudswerkzaamheden bij voorkeur binnen het "geplande onderhoud" moeten plaatsvinden, en zal de veroudering dus voorspelbaar moeten zijn.

### 8.1.3 Inspectie en onderhoud

#### *Inspectie*

Onder inspectie wordt verstaan het inwinnen, verwerken en interpreteren van informatie met het doel om de momentane toestand van de waterkering vast te stellen. De momentane toestand wordt vastgelegd in een overzicht van al dan niet merkbaar gefaalde componenten en van de waarden van de meetbare toestandsparementen. Inspectie kan variëren van een globale, meest visuele waarneming tot het al dan niet continu uitvoeren van kwantitatieve metingen. Globale inspectie is meestal snel en goedkoop en wordt om die reden vaak als eerste uitgevoerd.

Onder een inspectiesysteem wordt verstaan een systematische weergave van wat, door wie, waarom, waar, met welke methode en met welke frequentie de gegevens worden ingewonnen, opgeslagen, verwerkt en geïnterpreteerd.

Op grond van de verkregen informatie kan men:

- de kennis over de verouderingsprocessen vergroten,
- beslissen om tot een meer gedetailleerde inspectie over te gaan,
- beslissen om onderhoudsmaatregelen te treffen,
- een volgend inspectie-tijdstip vaststellen.

Het kan efficiënt zijn om de inspecties en onderhoudsmaatregelen voor meerdere onderdelen van de waterkering te combineren.

In het algemeen zal de onderhoudsstrategie afhankelijk zijn van de technische mogelijkheden om op snelle en goedkope wijze globale inspecties uit te voeren en van speciale meettechnieken om verborgen

schadebeelden tijdig te kunnen detecteren. Voor onderdelen waarbij falen direct betrekking kan hebben op het waterkerend vermogen wordt veelal een "getrapt" inspectiesysteem toegepast:

1. Globale visuele inspectie: waarnemen van bijzonderheden en deformaties, meestal voornamelijk van de bovenbouw.
2. Gedetailleerde inspectie: periodiek meten van scheurvorming en deformaties; uitvoeren peilingen bij de bodemverdediging etc.
3. Uitvoeren van bijzondere inspecties: funderingsinspecties etc.

Bij de keuze van een inspectiesysteem is belangrijk dat de meetresultaten direct te relateren zijn aan vooraf geformuleerde criteria op basis waarvan beslissingen over te nemen *maatregelen* (tijdstip volgende inspectie, nader onderzoek, onderhoudsmaatregelen) kunnen worden genomen. Indien geen vooraf gestelde criteria zijn geformuleerd op het niveau van meetresultaten kan een nieuwe schatting van de betrouwbaarheid worden gemaakt.

De tijdens de inspectie vastgestelde toestand wordt vergeleken met de verwachting. Indien de afwijking significant groot is, kan dit betekenen dat er een aanpassing nodig is van het gedragsmodel of belastingaannamen. Afhankelijk van de grootte en de oorzaak van de afwijking, en de belangrijkheid van de beschouwde toestandsparement voor de veiligheidsbeoordeling, kan overwogen worden om het vigerende onderhoudsplan aan te passen.

#### *Onderhoudsmaatregelen*

Onderhoudsmaatregelen hebben als doel om de kwaliteit van de waterkering te verbeteren. Hierbij heeft de beheerder drie opties:

- Herstel tot de oorspronkelijke sterkte.
- Herstel tot een kleinere dan de oorspronkelijke sterkte.
- Herstel tot een grotere dan de oorspronkelijke sterkte.

Het kostenaspect speelt bij deze afweging een belangrijke rol. Het kan efficiënt zijn om onderhoudsmaatregelen gecombineerd uit te voeren.

Onderhoudsmaatregelen worden bij voorkeur buiten het gesloten (storm) seizoen uitgevoerd, omdat door de kleinere kans op extreme belastingomstandigheden de faalkans van de waterkering kleiner zal zijn dan in het gesloten seizoen.

## 8.2 Onderhoudsconcept

### 8.2.1 Kenmerken van het onderhoudsconcept

Het onderhoudsconcept bevat een samenstel van onderhoudsregels (opgesteld per onderdeel) welke een afgewogen geheel vormen, en aan de hand waarvan onderhoud gepleegd kan worden. Het onderhoudsconcept wordt bij de overdracht van het kunstwerk aan de beheerder overhandigd, zodat naast een beschrijving van het kunstwerk ook de visie op het onderhoud, zoals deze tijdens het ontwerp is gedacht, bij de beheerder bekend is.

Het onderhoudsconcept wordt vanaf het Programma van Eisen tot en met de uitvoering van het kunstwerk stap voor stap opgebouwd.

Het onderhoudsconcept is gebaseerd op:

- het beleid van de beheerder dat is vastgelegd in het Programma van Eisen;
- de kennis van de ontwerper;
- de resultaten van de uitvoering (afwijkingen, geconstateerde gebreken, het gebruik van hulpconstructies etc.);
- de algemene ervaring van de beheerder met gelijksoortige constructies.

Het bevat informatie in termen van wenselijk of noodzakelijk geachte onderhoudsacties, en is gebaseerd op *functionele specificaties* (eisen waaraan componenten op het punt van faalkans, beschikbaarheid en betrouwbaarheid moeten voldoen), *produktspecificaties*, *meetgegevens* uit afnametesten en nulinspecties (vormen referentiewaarde voor latere onderhoudsmetingen), en aanwijzingen met betrekking tot de planning van onderhoud en de verwachte *budgetstroom* (per systeem/onderdeel, gesplitst naar gemiddeld jaarlijks onderhoud en z.g. "kostenolifanten"). Het onderhoudsconcept dient als basis voor het concrete door de beheerder op te stellen onderhoudsplan waarin inspecties en onderhoudsacties zijn gepland.

### 8.2.2 Onderhoud en het Programma van Eisen

De eisen ten aanzien van het onderhoud kunnen worden afgeleid uit het Programma van Eisen. Dit bevat:

- randvoorwaarden, bijvoorbeeld hydraulische randvoorwaarden, bodemgesteldheid, vaarwegklasse, vigerende wetten/normen/regelingen;

- functionele eisen, in het bijzonder ten aanzien van het waterkerend vermogen;
- operationele eisen, bijvoorbeeld ten aanzien van esthetica, levensduur, of ten aanzien van het gebruik van het kunstwerk;
- ontwerp- en uitvoeringsbeperkingen, bijvoorbeeld ten aanzien van het (onderhouds)budget, beschikbaar personeel, te gebruiken materialen of systemen.

Belangrijk is dat in het Programma van Eisen die onderhoudsaspecten worden belicht, die de ontwerper de randvoorwaarden geven om goede onderhoudsbewuste ontwerpbeslissingen te kunnen nemen en die in het gebruiksstadium door de beheerder kunnen worden gebruikt om zijn onderhoudsplan op te stellen.

### 8.2.3 Onderdelen van het onderhoudsconcept

Voor de overdracht naar de beheerder zal de ontwerper zijn onderhoudsvisie moeten vastleggen in een "onderhoudsconcept" [lit. 8.1]. Dit kan de volgende inhoud hebben:

1. Inleiding
  - toelichting op het doel en gebruik van het onderhoudsconcept
2. Beheersaspecten
  - omschrijving complex
  - functies van het complex (keren, schutten, spuien, oeververbinding)
  - voor elke functie de (maatgevende) peilen en capaciteiten
3. Randvoorwaarden en uitgangspunten:
  - Randvoorwaarden
    - peilen, waterkwaliteit
    - vaarwegklasse
    - veiligheidseisen tijdens onderhoudsacties (t.a.v. keerfunctie, t.a.v. personeel)
  - Functionele eisen / uitgangspunten voor het ontwerp:
    - toelaatbare belastingen
    - betrouwbaarheid sluiting, procedures
    - veiligheidsmarges / partiële factoren in de gebruikssituatie en tijdens onderhoud aan b.v. de sluiscolk
  - Operationele eisen
    - peilen, beperkingen, bedieningstijden (voor schutbedrijf, spuibedrijf, oeververbinding)
    - betrouwbaarheid en levensduur
    - beschikbaarheid voor functievervulling

De onderdelen 1, 2 en 3 zijn in principe opgenomen in het Programma van Eisen. Bij de operationele eisen dient tevens te worden aangegeven op welke intensiteiten het onderhoudsconcept is gebaseerd. Voorts is van belang dat wijzigingen in randvoorwaarden en uitgangspunten tijdens de levensduur van het kunstwerk kunnen leiden tot wijzigingen in het onderhoud. Overige onderdelen hebben betrekking op:

4. Systeem-analyse
    - functienormen, decompositie in onderhoudselementen (fouten-bomen)
    - verschil in onderhoud per discipline
    - gekozen strategieën per onderdeel (TAO, GAO, SAO)
  5. Kritieke onderdelen t.a.v. onderhoud
    - onderhoudsadvies kritieke onderdelen. Met verwacht verouderingsgedrag en levensduur, en met motivering ontwerpkeuzes m.b.t. uitvoering, smeermiddel, conservering etc.
    - onderdelen die onderhoudsvrij worden geacht
  6. Onderhoudsregels en -kosten
    - afstemming onderhoudsritmen
    - inspectiemethoden (wat, hoe vaak en hoe)
      - resultaten nulinspectie en afnametesten (geboortetoestand kunstwerk, bepaald tijdens de uitvoering)
      - functioneringsinspecties (met interventie- en afkeurgrenzen)
      - technische inspecties (met interventie- en afkeurgrenzen)
      - storingswacht (storingsrapportageplan)
    - globale jaarlijkse onderhoudskosten (benodigd onderhoudsbudget)
      - klein onderhoud
      - groot onderhoud
    - te verwachten kostenolifanten
  7. Beschrijving van de geleverde componenten
    - specificatie
    - garantie- en onderhoudsbepalingen
    - beschikbare (onderhouds)handleidingen
  8. Draaiboek voor het verrichten van groot onderhoud
    - bereikbaarheid en berijdbaarheid van diverse constructies door voertuigen
    - in- en uitbouwprocedures onderdelen
    - benodigde hulpconstructies
    - plaatsing van kranen
- In dit verband is het belangrijk dat de ervaring uit de bouwfase

wordt vastgelegd (bv. hoe zijn de sluisdeuren geplaatst, welke hulpconstructies zijn gebruikt).

### 8.3 Onderhoudsplan

#### 8.3.1 Kenmerken van het onderhoudsplan

Het onderhoudsplan, op te stellen door of in opdracht van de beheerder op basis van het onderhoudsconcept en alle beschikbare onderhoudshandleidingen, bevat de concrete planning voor inspectie- en onderhoudsacties. Per component wordt het inspectie- en/of onderhoudsritme aangegeven met de bijbehorende kosten.

Daarnaast dienen onderhoudsplannen om onderhoud beter te kunnen plannen, en kostenolifanten beter te kunnen signaleren. De beheerder zal in zijn planning streven naar een gelijkmatige verdeling van de onderhoudsbudgetten in de tijd. Dit kan door spreiding van groot onderhoud binnen het betreffende kunstwerk, maar ook tussen meerdere kunstwerken die hij onder zijn beheer heeft.

Onderhoudsplannen worden meestal opgesteld voor de middellange termijn (ca. 5 à 10 jaar). Bij de periodieke bijstelling van het onderhoudsplan dient men alert te zijn op:

- wijzigingen in randvoorwaarden en uitgangspunten;
- vergroot inzicht in de betrouwbaarheid van componenten (dit kan b.v. betekenen dat de inspectiefrequentie moet worden gewijzigd);
- jaarritmes van kostenolifanten (veelal vervangingskosten) die de termijn van het onderhoudsplan overschrijden.

#### 8.3.2 Analyse van de onderhouds- en inspectieplanning

Bij het genereren van onderhoudsplannen zijn de te variëren elementen binnen de onderhoudsstrategie:

- De *onderhoudsvorm*: storingsafhankelijk, toestandsafhankelijk of gebruiksafhankelijk onderhoud.
- De *onderhoudsplanperiode*, en bij toestandsafhankelijk onderhoud ook de inspectiemethode, het inspectie-interval en de interventiegrens.
- De *onderhoudsmaatregelen*: geheel of gedeeltelijk herstel door vervanging of reparatie.

Aan de hand van een gekozen onderhoudsstrategie en een aangenomen belasting (scenario) kan op basis van gedrags- en inspectiemodellen de toestand van de waterkering in probabilistische termen worden voorspeld.

Een hulpmiddel bij de analyse van onderhouds- en inspectieplanning is een analyse-schema als weergegeven in figuur 8.2. Op  $t = 0$  wordt de constructie opgeleverd. Daarna wordt de constructie op gefixeerde of toestandsafhankelijke tijdstippen geïnspecteerd. Bij een inspectie kan men beslissen al dan niet onderhoud te plegen. Ondanks inspectie en onderhoud is het toch nog altijd mogelijk dat de constructie of het onderdeel faalt.

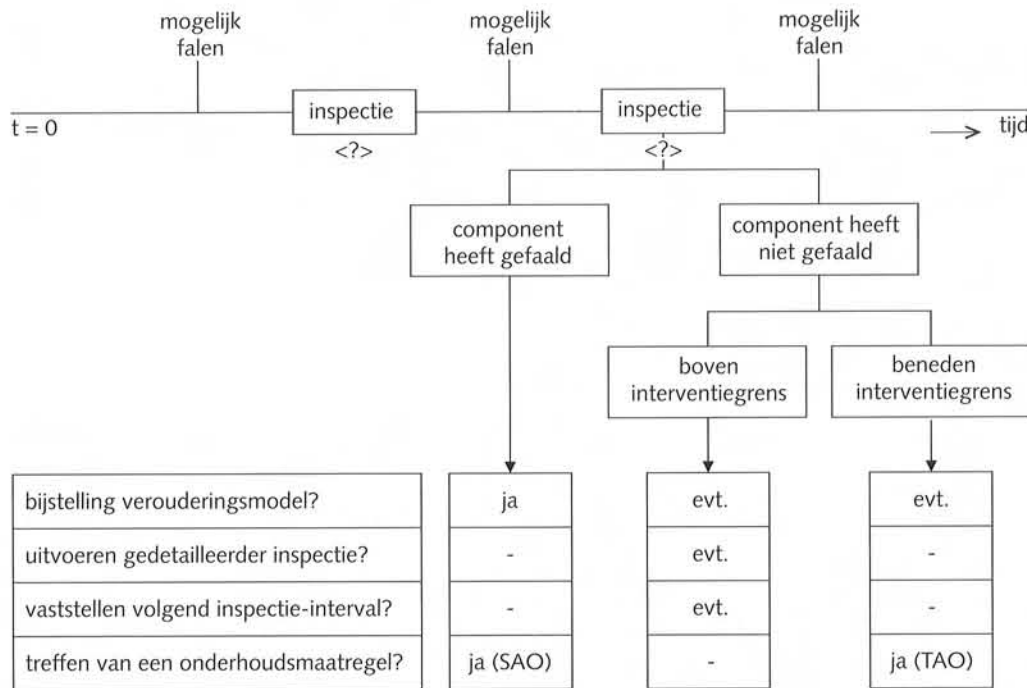


Fig. 8.2 Analyse-schema voor inspectie en onderhoud

Aan iedere gebeurtenis in het schema kan men kansen en kosten (inspectie, onderhoud, schade) toekennen. Op basis daarvan kan een verwachting van de kosten voor de beschouwde strategie worden bepaald, kunnen verschillende strategieën worden vergeleken en een optimale strategie

worden vastgesteld. Meestal kiest men een kostenverwachting (bedrijfsrisico) per tijdseenheid door de kostenverwachting voor een component te delen door de (gemiddelde) cyclusduur. Van belang is daarbij de keuze van de *onderhoudsplanperiode* bij gebruikafhankelijk onderhoud, en van de *interventiegrens* en de *inspectie-intervallen* bij toestandsafhankelijk onderhoud. Dit leidt tot een bijzonder groot aantal te onderzoeken combinaties.

Een eerste selectie kan worden gemaakt met behulp van het beslisschema van figuur 8.1. Bij waterkeringen zal het risico van falen doorgaans groot en de zekerheid van het faaltijdstip relatief klein zijn, zodat het accent zal liggen op toestandsafhankelijk onderhoud.

Bij verschillende instanties (TNO, KEMA, RWS) zijn modellen en bijbehorende computerprogramma's in ontwikkeling om onderhouds- en inspectie-intervallen te bepalen op basis van minimale kosten. Uitgangspunt van de meeste modellen die zijn ontwikkeld om het onderhoud te structureren, is een (beperkte) definitie van het begrip onderhoud: nadat onderhoud aan een component is gepleegd, is de component weer zo goed als nieuw. Gedeeltelijk herstel is slechts in sommige modellen meegenomen. Het minimaliseren van de kosten kan gebaseerd zijn op "trial and error", op bepaalde zoekstrategieën en soms op directe oplostechieken. Globaal kunnen de volgende modellen worden onderscheiden:

- **Het bedrijfsmodel:**  
Tot de systemen die met dit model geanalyseerd kunnen worden, behoren de systemen die permanent (continu) gebruikt worden en *merkbaar falen*. Ook systemen die periodiek (discontinu) in bedrijf zijn, kunnen met dit model geanalyseerd worden. Het verdient de voorkeur om in dit geval het preventief onderhoud in de tijd tussen 2 bedrijfsperioden te plannen. Belangrijk voor de toepasbaarheid van het model is het feit dat wanneer een component faalt, dit op één of andere manier direct geconstateerd wordt.
- **Het stand-by model:**  
Dit model maakt het mogelijk om het onderhoud aan systemen die relatief weinig in bedrijf zijn te optimaliseren. Dit soort systemen wordt aangesproken om een vervangende of beveiligende taak te verrichten. Het hoofdkenmerk van deze systemen is dat ze *niet merkbaar falen*. Het falen wordt pas merkbaar wanneer een beroep op het betreffende systeem wordt gedaan. Een en ander betekent dat de systemen moeten worden getest. Dit model optimaliseert

niet alleen het interval voor vervangend onderhoud, maar ook het testinterval.

- **Het preserveringsmodel:**  
Met dit model kunnen de kosten en baten van preserverend onderhoud tegen elkaar worden afgewogen. Met preserverend onderhoud wordt bedoeld: die onderhoudshandelingen, waarmee het verouderingsproces van de component wordt vertraagd, waardoor het interval voor vervangend onderhoud (te bepalen met het bedrijfsmodel of het stand-by model) wordt vergroot.
- **Het inspectiemodel:**  
Met dit model is het mogelijk een optimaal inspectie-interval te bepalen voor technische systemen. Hierbij bepaalt het faalgedrag van het betreffende systeem hoe de correctieve en preventieve onderhoudskosten worden gewogen met de inspectiekosten. Het faalgedrag wordt gekarakteriseerd door de conditionele kans dat een vooraf gestelde grenswaarde van een of meer te meten parameters wordt overschreden. Het model kan dus alleen toegepast worden wanneer het mogelijk is om de conditie van de component vast te stellen. Een belangrijke eigenschap van het model is dat zowel een objectieve (meetresultaten) als subjectieve (expertmeningen) toestandsbeoordeling in het model meegenomen kan worden bij de beschrijving van het faalgedrag.
- **Het harmonisatiemodel:**  
Zodra de optimale onderhoudsintervallen van de afzonderlijke componenten bekend zijn, is het mogelijk een verlaging van de totale onderhoudskosten te bewerkstelligen door harmonisatie. Dit is het zo goed mogelijk op elkaar afstemmen van de diverse onderhoudstijdstippen. Ten eerste leidt harmonisatie tot een verlaging van de totale kosten per tijdseenheid indien de verhoging van de kosten doordat op het niet optimale tijdstip onderhoud wordt gepleegd lager is dan de besparing die optreedt doordat verschillende onderhoudswerkzaamheden worden samengevoegd. Een tweede doel van het harmoniseren is het verkrijgen van een werkbaar onderhoudsprogramma. Het harmonisatie model kan ook worden gebruikt om te bepalen of het opportuun onderhoud wel of niet moet worden uitgevoerd. Opportuun onderhoud is preventief onderhoud dat op een, weliswaar niet gepland maar wel door omstandigheden (bijvoorbeeld andere onderhoudsactiviteiten) geschikt moment, wordt uitgevoerd.

In theorie moet voor elke component waaraan onderhoud wordt gepleegd het optimale onderhoudsinterval worden vastgesteld, door het minimaliseren van de totale onderhoudskosten over de gehele planperiode van het kunstwerk. Deze onderhoudskosten worden bepaald door de som van de kosten van correctief onderhoud vermenigvuldigd met de kans dat de component faalt en de kosten van preventief onderhoud vermenigvuldigd met de kans dat de component niet faalt. Dit wordt schematisch weergegeven in figuur 8.3. In de praktijk zal het optimaliseren van het onderhoudsinterval voor elke component een utopie zijn gezien het grote aantal systeemonderdelen van bijvoorbeeld een waterkering.

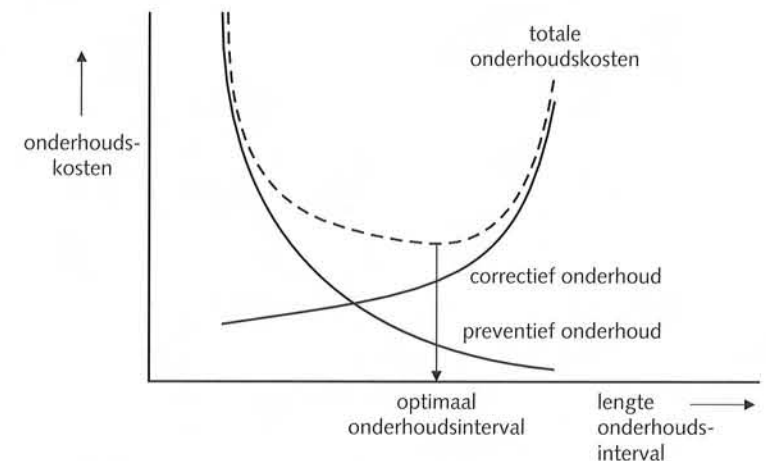


Fig. 8.3 Optimalisatie van het onderhoudsinterval

Om de toepasbaarheid te vergroten kan een methode gebruikt worden om het aantal componenten waarop de modellen toegepast moeten worden te reduceren. De methode om te komen tot een werkbaar onderhoudsplan bestaat uit 7 verschillende stappen:

1. Splitsen van het systeem in sub-systemen. De splitsing is gebaseerd op een verdeling naar functies. Een sub-systeem van de kering is het elektro-mechanische deel. Vervolgens worden de sub-systemen in componenten onderverdeeld op basis van onderhoudshandelingen. Een component kan dus uit verschillende systeemonderdelen bestaan die als geheel worden onderhouden.

2. Formeren van groepen van componenten met gelijke gevolgen bij falen. De mogelijke gevolgen zijn in 5 categorieën onder te brengen:
  1. volledig falen van het systeem veroorzaakt door 1 component.
  2. volledig falen van het systeem veroorzaakt door meer dan 1 component.
  3. onveilige situatie of schade aan het systeem.
  4. geen effect op het systeem.
  5. falen van een sub-systeem.
 De componenten met de gevolgen 4 of 5 zullen in het algemeen correctief kunnen worden onderhouden.
3. In de derde stap, die wordt uitgevoerd voor elk van de sub-systemen, wordt van elke component eerst de faalmanier vastgesteld. Met andere woorden faalt de component merkbaar of niet merkbaar. Tevens wordt bekeken of inspectie en/of preservering tot de onderhoudsmogelijkheden behoort. In combinatie met stap 2 is nu een eerste selectie gemaakt in de onderhoudsvorm en ligt vast welke modellen van toepassing zijn om de onderhouds- of inspectieintervallen van de verschillende groepen te bepalen.
4. Bepalen van de dominerende componenten binnen een groep (met gelijke gevolgen). Hierbij wordt gebruik gemaakt van twee representatieve grootheden voor enerzijds het faalgedrag en anderzijds de kosten. Het al dan niet dominerend zijn van een component hangt af van de gemiddelde levensduur (faalgedrag) en het verschil tussen geplande en niet geplande reparatietijd (kosten). Een rangorde kan worden vast gesteld door het verschil in reparatietijd te delen door de gemiddelde levensduur. In deze stap vindt een aanzienlijke reductie in het aantal te berekenen onderhoudsintervallen plaats.
5. Stap 5 is het bepalen van de intervallen voor vervangend onderhoud van de dominerende componenten (merkbaar falend en niet-merkbaar falend), of het vaststellen van de inspectiefrequentie of de preserveringfrequentie.
- 6) Stap 6 behelst het toekennen van onderhoudsintervallen aan niet dominerende componenten.
- 7) In stap zeven tenslotte moeten de onderhoudsintervallen van de verschillende componenten geharmoniseerd worden. Verder moet uit praktische overwegingen gezorgd worden voor min of meer constante onderhoudsbudgetten per jaar.

### 8.3.3 Onderdelen van het onderhoudsplan

In het onderhoudsplan dient minimaal te zijn opgenomen:

- De inspectie-tijdstippen met de bijbehorende inspanning, interventie- en afkeurgrenzen, gesplitst in:
  - functioneringsinspecties: veelal door de beheerder zelf uit te voeren eenvoudige (visuele) inspecties, gericht op het direct functioneren van onderdelen van het kunstwerk en op het constateren van calamiteiten.
  - technische inspecties: specialistische inspecties, gericht op het constateren van gebreken ten gevolge van verschillende verouderingsprocessen. Aan de hand hiervan kunnen onderhoudsbestekken worden opgesteld en kan het onderhoudsplan worden aangepast.
- De thans reeds planbare preventieve onderhoudsacties (met name de tijdsafhankelijke en periodieke).
- De verwachte, doch pas via latere inspecties exact vast te stellen preventieve onderhoudsacties.
- De correctieve onderhoudsacties, die weliswaar in de tijd moeilijk planbaar zijn, maar qua omvang wel in te schatten.

---

## 9 KWALITEITSBORGING ONTWERPPROCES

---

### 9.1 Inleiding

Verbetering van de kwaliteit moet plaatsvinden via twee sporen. Het eerste betreft de verhoging van de kwaliteit van inhoudelijke activiteiten door verbetering van rekentechnieken en vergroting van het inzicht in belastingen, materiaal-eigenschappen en faalmechanismen. Het tweede spoor is de verbetering van de beheersactiviteiten, zoals het beter afstemmen van de activiteiten, vastleggen van handelingen, archivering, e.d. Onderstaand wordt aandacht besteed aan de kwaliteitszorg volgens het tweede spoor, namelijk het doelmatig en doelgericht beheersen en sturen van de inhoudelijke activiteiten. Daarbij dient onderscheid te worden gemaakt in:

- de fasering van het ontwerpproces;
- de beheersing van het ontwerpproces.

### 9.2 Fasering ontwerpproces

Voor een systematische projectaanpak is een fasering van het ontwerpproces noodzakelijk. Dat leidt ertoe dat van "grof" naar "fijn" kan worden gewerkt waardoor overzicht wordt gehouden over het totale project en onnodige detailleringen achterwege blijven. Bovendien kan dan te allen tijde sturing plaatsvinden door de diverse betrokkenen omdat de fasering zodanig moet zijn dat elke fase afgesloten wordt met het nemen van een beslissing welke wordt vastgelegd in een document. De volgende hoofdfasen van het ontwerpproces kunnen (bijvoorbeeld) worden onderscheiden:

- I Initiatief-fase
- II Pre-definitie-fase
- III Definitie-fase
- IV Ontwerp-fase
- V Voorbereidings-fase
- VI Realisatie-fase
- VII Nazorg-fase
- VIII Gebruiks-fase
- IX Sloop of hergebruik na planperiode

Deze fasen worden in de navolgende paragrafen beschreven. In het algemeen worden alle fasen doorlopen waarbij de uitgebreidheid van elke



fase afhankelijk is van het soort project. De inbreng van de diverse betrokkenen zal eveneens verschillen per project en per fase.

In de hier aangegeven fasering is een scheiding aangebracht tussen de pre-definitie en de definitie-fase vanwege verschil in inbreng van de diverse betrokkenen in deze fasen. Afhankelijk van het soort project is samenvoeging natuurlijk mogelijk. Dat geldt eveneens voor de definitie-fase en het eerste gedeelte van de ontwerpfase (tijdens het voorontwerp).

Tijdens het ontwerpproces zijn steeds beslismomenten opgenomen; meestal ter afsluiting van een fase. Er moeten bijvoorbeeld beslissingen genomen worden over de realiseerbaarheid van een oplossing, een uit te werken alternatief, etc. Op de beslismomenten moeten dus keuzen gedaan worden op grond van informatie en adviezen. De beslissingen die worden genomen, dienen in documenten te worden vastgelegd.

Gedurende het ontwerpproces zullen diverse informatiestromen nodig zijn om de verschillende partijen te informeren (eisen/wensen, randvoorwaarden, tekeningen, rapporten/notities, e.d.). In het schema is daarom tevens aangegeven welke partijen bij het ontwerpproces betrokken zijn en wanneer overdracht van informatie plaatsvindt. De beleidsanalyse zal voornamelijk in de fasen II en III gebruikt kunnen worden als hulpmiddel bij het besluitvormingsproces.

De verschillende fasen zullen nu nader worden toegelicht.

#### *I Initiatief-fase*

In deze fase gaat het om de signalering van een probleem of een behoefte, en de beslissing dat een studie naar eventuele maatregelen zinvol is. Hier wordt dus het initiatief genomen een studie te verrichten om het probleem te pareren of op te lossen. In het algemeen zullen in deze fase alleen de direct belanghebbenden (beheerder, eigenaar, gebruikers) betrokken zijn bij het (potentiële) project.

#### *II & III Pre-definitie-fase en Definitie-fase*

De pre-definitie-fase beoogt het duidelijk omschrijven van het gesignaleerde probleem en het opstellen van het voorlopige eisen- en wensen pakket met betrekking tot een eventuele oplossing. Dit leidt dan tot een Voorlopig Programma van Eisen dat de basis zal vormen voor een globale haalbaarheidsstudie naar mogelijke oplossingen. In de pre-definitie-fase

zullen in het algemeen alleen de direct belanghebbenden bij het proces betrokken zijn. In de definitie-fase wordt nagegaan of, gelet op de randvoorwaarden en de geformuleerde eisen en wensen, een oplossing van het probleem technisch, esthetisch, sociaal-economisch en financieel haalbaar is en wat, in hoofdlijnen, de maatschappelijke effecten van een bepaalde oplossing zijn. Daarbij worden tevens andere, meestal niet direct bij het probleem betrokken, instanties geraadpleegd. Bovendien zullen veelal specialisten en adviseurs ingeschakeld worden om een bijdrage te leveren. Deze fase resulteert in het definitieve Programma van Eisen. In deze fasen zijn de volgende inhoudelijke activiteiten van belang:

#### *1. Vastlegging huidige situatie*

Een belangrijke basis voor het ontwerp van een (niet-)waterkerende constructie is de situatie ter plaatse van en in de omgeving van de beoogde locatie. De verkenning hiervan bestaat voornamelijk uit literatuurstudie en eventueel enig veldonderzoek. Ze dient zich te richten op technische, natuurwetenschappelijke, landschappelijke, stedenbouwkundige en cultuurhistorische aspecten. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat in deze fase uitgebreide veldonderzoeken in het algemeen niet zinvol zijn. Veel informatie is te vinden in bestaande archieven (publicaties, tekeningen, foto's, oude onderzoeksresultaten, etc.). Onmisbaar bij de verkenning en later bij de verwerking van de gegevens, zijn goede situatietekeningen op schaal 1:500 of 1:1000, en actuele dwarsprofielen van de dijk op schaal 1:100 of 1:200. Foto's van karakteristieke punten van de bestaande situatie kunnen eveneens van nut zijn bij het ontwikkelen van de plannen.

Belangrijke aspecten bij de verkenning van het gebied zijn:

- de situatie van het gebied (met zee, bekken, rivier, uiterwaard, dijk en binnendijks gebied);
- dwarsprofielen met hoogtematen van de bestaande dijk ter plaatse van en genummerd volgens de aanwezige hectometer- of dijkpalen; daarnaast eveneens de hoogtematen van bijzondere profielen;
- de hoogteligging van het binnen- en buitendijkse maaiveld (incl. zomerkaden, oeverwallen, veerdammen en kwelkaden);
- de samenstelling van het dijklichaam en de geologische opbouw van de ondergrond in voor- en achterland; vooral de dikte en uitgestrektheid van een afdekkend, slecht doorlatend pakket is hierbij van belang;

- gegevens over opgetreden vervormingen en zettingen van de bestaande kruin en horizontale verplaatsingen na eventuele verhogingen van de dijk;
- de hydrologie van het gebied, met informatie over gemiddelde grondwaterstanden, kwelgebieden, peilbuiswaarnemingen bij hoge en lage buitenwaterstanden, het doorlatende vermogen van zandige ondergrond en de weerstand van afdekkende pakketten;
- historische gegevens over situatie, hoogten, hydrologie, e.d.;
- de aanwezige constructies in, op of nabij de waterkering ter plaatse van de beoogde locatie (sluizen, gemalen, schermen, bebouwing, kabels en leidingen, etc.). Belangrijk hierbij zijn constructievorm, afmetingen, hoogtematen, e.d.;
- ingeval van constructies die naast een waterkerende tevens andere functies hebben (zoals sluizen, kademuren en gemalen): specifieke gegevens over die betreffende additionele functie (bijv. gegevens over scheepvaart, afvoerdebieten, e.d.);
- een inventarisatie van eventuele landschappelijke, cultuurhistorische en natuurwetenschappelijke waarden ter plaatse van de beoogde locatie.

## 2. Definiëring probleem

Bij de definiëring van het gesignaleerde probleem gaat het om het duidelijk omschrijven ervan, zodat een goed inzicht wordt verkregen in de oorzaken en vastgesteld kan worden in welke richting eventuele oplossingen moeten worden gezocht. Wanneer bijvoorbeeld wordt geconstateerd dat een sluis niet voldoet, kan dit een gevolg zijn van een te geringe capaciteit, een slechte werking van de sluis door achterstallig onderhoud of verkeerd gehanteerde schutprocedures. De probleemdefinitie "de sluis voldoet niet" is dus niet voldoende. Een goede definitie zou kunnen zijn "de capaciteit is te gering door te kleine kolkafmetingen".

## 3. Inventarisatie eisen en wensen

Bij het inventariseren van de eisen en wensen dienen alle betrokkenen hun inbreng te kunnen leveren. In het algemeen zullen bij het ontwerpen van constructies in, op en nabij waterkeringen de volgende instanties c.q. belanghebbenden een rol spelen: het Rijk, de Provincie, gemeenten, waterschappen, zuiveringschappen, scheepvaartorganisaties, (water)recreatie organisaties en omwonenden.

De te inventariseren eisen en wensen kunnen in de volgende hoofdgroepen worden ingedeeld:

- Functionele eisen/wensen: Dit betreffen eisen en wensen die te maken hebben met de functie en het doel van het projectresultaat. Enkele voorbeelden zijn: maximaal toelaatbare kwel en lekkage, gemiddelde schutcapaciteit, maximaal spuidebiet, e.d.
- Operationele eisen/wensen: Hierbij gaat het om het gebruik, beheer en onderhoud van het projectresultaat. Voorbeelden zijn: wijze van openen deuren, levensduur, etc.
- Ruimtelijke en esthetische eisen/wensen: Dit betreffen de eisen en wensen met betrekking tot de vormgeving van het projectresultaat en de inpassing ervan in zijn omgeving.

## 4. Studie naar haalbaarheid

De in de definitiefase uit te voeren haalbaarheidsstudie dient inzicht te geven in de mogelijkheden en onmogelijkheden van het oplossen van het gesignaleerde probleem. Het betreft een onderzoek, op hoog abstractieniveau, naar de effecten van een of meerdere oplossingen op technisch, esthetisch, sociaal-economisch en financieel gebied. Enkele voorbeelden zijn:

- Bouwen van een schutsluis of het omleiden van scheepvaart via een nieuwe scheepvaartverbinding
- Bouwen van een afsluitbare, open kering in de vorm van een keersluis of een vaste kering (dijk of dam)

Een belangrijk hulpmiddel bij de studie naar de haalbaarheid is de beleidsanalyse.

## 5. Opstellen Definitief Programma van Eisen

Nadat de bestaande situatie en de eisen en wensen van alle betrokkenen in kaart zijn gebracht en het probleem duidelijk is gedefinieerd, wordt het Definitieve Programma van Eisen opgesteld. Dit omvat:

- Het eisen- en wensenpakket dat na een haalbaarheidsstudie is overgebleven om het goed omschreven en gedefinieerde probleem op te lossen of te pareren. Een duidelijk onderscheid tussen 'eisen' en 'wensen' is essentieel. In het algemeen geldt dat 'eisen' als harde voorwaarden en 'wensen' als zachte voorwaarden worden beschouwd.
- De randvoorwaarden waaraan het project onvoorwaardelijk moet voldoen (dit zijn de eisen die vanuit het project niet te beïnvloeden zijn; o.a. de bestaande situatie).

- Het totale budget en de tijdspanne waarbinnen het project dient te worden gerealiseerd (specifieke realisatie-eisen).

#### *IV Ontwerp-fase*

De "ontwerp-fase" wordt veelal ingedeeld in een Voorontwerp-fase en een Definitief Ontwerp-fase. Centraal in de ontwerp-fase is de taak om oplossingen te vinden in termen van het uiteindelijke projectresultaat. Het gaat erom dat uit een aantal tot een redelijk niveau uitgezochte en in beginsel haalbare alternatieven, een kwalitatief goede oplossing wordt gekozen, welke daarna verder wordt uitgewerkt tot een definitief ontwerp. De voorontwerp-fase behelst het opstellen van een aantal alternatieven (binnen het kader van haalbare oplossingen) om het gedefinieerde probleem op te lossen of te pareren. Als voorbeeld kunnen genoemd worden:

- een schutsluis of een oortoom;
  - een schut/spuisluis of een schutsluis met een apart gemaal.
- De keuze van een alternatief dient plaats te vinden op basis van:

- globale berekeningen;
- globale kostenraming (alleen de belangrijkste kostendragers);
- inzicht in uitvoerbaarheid;
- invloed op de omgeving, milieu, etc.

Nadat een alternatief is gekozen, wordt het verder uitgewerkt tot een definitief ontwerp. Daarbij worden definitieve berekeningen en ontwerp-tekeningen gemaakt en wordt nagegaan op welke wijze de uitvoering kan plaatsvinden. Tevens worden nauwkeuriger ramingen gemaakt waardoor een beter inzicht wordt verkregen over de totale projectkosten. Gedurende de ontwerp-fase zullen veelal aanvullende gegevens nodig zijn. Deze worden verkregen door middel van Onderzoeken en Pre-adviezen (veelal door specialistische bureaus). Daarbij gaat het ondermeer om informatie betreffende de ondergrond, de topografie, hydraulische belastingen, e.d.

#### *V Voorbereidings-fase en realisatie-fase*

In de voorbereidingsfase wordt het definitief ontwerp vertaald in een bestek. Dit dient als contractdocument tijdens de uitvoering tussen de opdrachtgever en de aannemer(s). In het bestek komen de technische en administratieve specificaties op grond waarvan de uitvoering van het project plaatsvindt. In de realisatie-fase wordt de uitvoering van de werkzaamheden ter hand genomen. Het resultaat is een opgeleverde oplossing van het in fase I gesignaleerde probleem.

Gedurende deze fase vindt een cyclisch proces plaats:

- uitvoering projectonderdeel;
- controle uitvoering en monitoring;
- toetsing aan eisen, richtlijnen, normen, e.d.

De volledige uitvoering van het project wordt dus per onderdeel uitgevoerd waarbij continue controle, monitoring en toetsing plaatsvindt. Ten aanzien van de aanvraag van vergunning dient te worden opgemerkt dat dit is geplaatst in de Voorbereiding-fase. Soms is het echter, gezien de vaak lange proceduretijd, zinvol deze werkzaamheden reeds in de Definitieve Ontwerp-fase uit te voeren.

#### *VII Nazorg-fase*

De nazorg-fase is de laatste fase van de realisatie van een bouwproject. In deze fase worden onderdelen ingeregeld, dient er een inspectie te worden uitgevoerd, waarbij de feitelijke uitgangssituatie wordt vastgelegd en waarbij kinderziekten aan het licht kunnen komen.

### **9.3 Beheersing ontwerpproces**

Bij het beheersen van een ontwerpproces gaat het in het algemeen om vijf beheersaspecten. Dit zijn tijd, geld kwaliteit, informatie en organisatie. Deze aspecten grijpen sterk in elkaar. Met moet dan ook zorgen dat geen van de genoemde aspecten wordt veronachtzaamd.

Voor tijd- en geldbeheersing zijn reeds uitgebreide hulpmiddelen en technieken beschikbaar (resp. planningsmethodieken en budgetregistratiesystemen). Voor de beheersing van de aspecten kwaliteit, informatie en organisatie kan gebruik gemaakt worden van de normen NEN-ISO 9000 tot en met NEN-ISO 9004. Deze zijn vertalingen van de internationale ISO-normen en geven richtlijnen voor toepasbare kwaliteitssystemen gericht op het verbeteren van de projectorganisatie. Hierbij dient wel te worden opgemerkt dat kwaliteitssystemen per bedrijf c.q. organisatie verschillend zullen zijn vanwege het eigen karakter van elk bedrijf/organisatie.

Op grond van deze normen wordt aanbevolen, bij de aanpak van een project een zogenaamd kwaliteitsplan op te stellen waarin ondermeer de volgende onderdelen worden vastgelegd:

1. identificatie van het project;  
Hierbij gaat het om het begrenzen van het project, dus het vastleggen van de omvang (wat hoort erbij) en de aard van de werkzaamheden.
2. de projectorganisatie;  
Hier wordt vastgesteld wie betrokken (zullen) zijn bij het project (opdrachtgever, deskundigen, projectleider, e.d.).
3. verantwoordelijkheden en bevoegdheden van alle betrokkenen;  
Hier wordt, in relatie met punt 2, bepaald wie bijvoorbeeld verantwoordelijk is voor de constructieberekeningen, geotechnische adviezen, directe contacten met opdrachtgever en/of derden, projectkosten, e.d.
4. overlegstructuur;  
Hier wordt vastgelegd op welke wijze overleg zal plaatsvinden, data of perioden van vergaderingen, het doel van elk overleg en de aanwezigheid.
5. informatievoorziening;  
Dit punt beschrijft de wijze van rapporteren, verslaglegging, verkrijging van noodzakelijke gegevens, e.d.
6. documentenregistratie;  
Hierin wordt bepaald op welke wijze alle documenten (rapporten, gegevens, berekeningen, e.d.) worden gearhiveerd en hoe de toetsing van activiteiten en documenten wordt vastgelegd.
7. gebruikte middelen en methodieken bij het ontwerp;  
Dit punt behelst het beschrijven van de (reken)methoden en de middelen (bijvoorbeeld computerprogramma's: "bench-marking") die zullen worden gebruikt bij het ontwerp c.q. uitvoering.
8. wijze van beheersing en toetsing van de activiteiten en documenten;  
Hier wordt aangegeven op welke wijze bijvoorbeeld berekeningen en rapporten worden getoetst.

## 10 OVERZICHT WATERKERENDE KUNSTWERKEN EN BIJZONDERE CONSTRUCTIES

### 10.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een korte beschrijving gegeven van de volgende waterkerende kunstwerken en bijzondere constructies die in, op en nabij waterkeringen kunnen zijn gesitueerd:

#### *Waterkerende kunstwerken*

- schutsluizen
- spuisluisen
- inlaatsluizen
- keersluizen
- afsluitbare duikers
- stormvloedkeringen
- coupures
- gemalen
- pijpleidingkruisingen en tunnels

#### *Bijzondere constructies*

- beweegbare kering (zie coupures)
- kwelschermen
- erosieschermen
- diepwand/kistdammen
- dijkmuurtjes
- keermuren/wanden, kademuren en damwanden (onverankerd en verankerd)
- gabions/gewapende grond

Voor een uitgebreide behandeling van de bijzondere constructies wordt verwezen naar bijlage 5 "Toepassen van bijzondere constructies" van de handreiking "Constructief ontwerpen".

### 10.2 Waterkerende kunstwerken

De beschrijving van de kunstwerken is gericht op de waterkerende elementen van de kunstwerken. Daarnaast is, in het kort, aandacht besteed aan de mogelijke oorzaken van falen van die constructie. De opsomming van mogelijke oorzaken is niet uitputtend; het betreft een eerste inventarisatie.

### 10.2.1 Schutsluizen

Een schutsluis is een constructie die de scheepvaartverbinding verzorgt tussen twee wateren (panden) met verschillende waterpeilen. De sluis heeft daarbij als doel het scheepvaartverkeer van het ene pand naar het andere te laten gaan.

De schutsluis bestaat in het algemeen uit een sluiscolk, twee sluishoofden met deuren en opstellingsruimten voor een bewegingswerk en eventuele elektrische bediening.

De *sluiscolk* is het deel gelegen tussen de twee sluishoofden. De kolkwanden kunnen zijn uitgevoerd in grondtaluds (de zogenaamde groene kolk) of met gemetselde, betonnen of stalen wandkunstwerken.

Vooraf bij oudere sluisen met gemetselde of betonnen kolkmuur gaat het meestal om twee apart gefundeerde wanden. Bij stalen kolkwanden is altijd sprake van damwandkunstwerken. De vloer van de kolk is bij oudere sluisen veelal een, met een steenbestorting, verdedigde bodem. De meer recente sluisen bestaan vrijwel altijd uit een betonnen bakconstructie, al of niet op palen gefundeerd.

De *sluishoofden* (binnen- en buitenhoofd) bestaan meestal uit betonnen vloeren met gemetselde of betonnen zijwanden. Daarin zijn de draaipunten, eventuele deurkassen voor de sluisdeuren en de opstellingsruimten voor de bewegingswerken en eventuele elektrische installaties opgenomen.

De kolkomzetting of niveaureffening vindt plaats door afsluitbare openingen in de deuren, het gedeeltelijk heffen van de deuren (bij hefdeuren) of via omloopriolen in de sluishoofden. De openingen in de deuren kunnen worden afgesloten met behulp van schuiven. In de omloopriolen gebeurt dit met schuiven of kleppen.

De voor de waterkering van belang zijnde onderdelen van een schutsluis zijn de volgende:

- a. sluisdeuren
- b. schotbalken
- c. onder- en achterloopsheidschermen
- d. vleugelwanden binnen- en buitenhoofd
- e. sluishoofden
- f. schuiven, kleppen
- g. stortebedden

### Ad. a. Sluisdeuren

In het algemeen bestaan de sluisdeuren uit horizontale regels, verticale stijlen en een beplating. De deuren kunnen, afhankelijk van het type, worden uitgevoerd in staal en hout.

Er zijn verschillende soorten deuren beschikbaar, namelijk:

- enkele draaideuren
- puntdeuren
- waaierdeuren
- sectordeuren
- klepdeuren
- segmentdeuren
- roldeuren/glijdeuren
- hefdeuren

De keuze van het type deur is ondermeer afhankelijk van de afmetingen van de af te sluiten opening en het verval.

De *enkele draaideur* is opgehangen aan twee draaipunten, één onder water (de taats) en één boven water (de halsbeugel).

In gesloten toestand wordt de deur door de waterdruk tegen een aanslagdrempel en aanslagstijlen gedrukt welke zich respectievelijk in de vloer en in de wanden van het sluishoofd bevinden. De dichting vindt plaats door houten aanslaglatten of rubberprofielen die aan de deur zijn bevestigd.

De ophanging van *puntdeuren* en *waaierdeuren* bestaat eveneens uit een taats- en halsbeugelconstructie. In gesloten toestand wordt de waterdichting in beide uitvoeringen verzorgd doordat de voorharren van de deuren tegen elkaar gedrukt worden. Bij houten deuren komen de voorharren zonder afdichtingsmateriaal tegen elkaar aan. Bij stalen deuren zijn daartoe in de voorharren houten of rubber dichtingsregels aangebracht. De achterhar wordt door middel van een houten aanslaglatten of rubber profielen tegen het sluishoofd gedrukt. De onderzijde van de deur komt tegen een slagdrempel in de vloer van het sluishoofd. De waterdichting wordt ook daar verzorgd door een houten aanslaglat welke is bevestigd op de deur.

Bij sectordeuren is de ophanging eveneens gerealiseerd met behulp van taatsen en halsbeugels. De afdichting wordt voornamelijk verzorgd door zware rubber profielen. In de sluisvloer is geen aanslagdrempel aanwezig.

*Klepdeuren* bestaan uit stalen deuren die in geopende toestand in een inkassing in de vloer van het sluishoofd liggen. De (horizontale) draaipunten bevinden zich eveneens in de vloer. De bewegingswerken zijn ondergebracht in de wanden van het sluishoofd. In gesloten toestand staat de deur omhoog onder een geringe helling in de richting van het hoge pand. De dichting wordt verzorgd door houten aanslaglatten of kunststof profielen aan de onderzijde en beide zijkanten van de deur. Deze komen tegen een onderslagdrempel en slagstijlen in het sluishoofd. De nadelen zijn dat de inkassing kan vervuilen en dat de draaipunten volledig onder water blijven.

Bij *segmentdeuren* zijn de draaipunten boven het waterniveau aangebracht waardoor controle eenvoudiger is. De deur komt in geopende toestand volledig boven water. De afsluiting wordt aan de onderzijde verzorgd door een aanslaglat en aan de zijkanten door middel van rubber profielen.

Bij *roldeuren* zijn in principe twee mogelijkheden voorhanden, namelijk:

- hangende roldeuren
- staande roldeuren.

Bij hangende roldeuren is de deur, door middel van een wielstelsel, opgehangen aan een hooggelegen loopbaan. Ook hier geldt dus dat het bewegingswerk volledig boven water ligt. Bij staande roldeuren (dus met een laaggelegen loopbaan) ligt het loopwerk onder water. Daartoe is een railconstructie in de vloer van het sluishoofd aangebracht. In beide gevallen wordt de waterkering verzorgd door een aanslaglat aan de onder- en zijkanten van de deur. Deze worden tegen een slagdrempel en slagstijlen in het sluishoofd gedrukt wanneer de deur, als gevolg van de waterdruk enigszins, verschuift. Het nadeel van de staande roldeur is dat vervuiling kan optreden in de rail waardoor het sluiten van de deur wordt bemoeilijkt. Bij glijdeuren wordt door middel van hydrostatische waterdruk tussen de deur en de glijrail de deur iets opgedrukt. Daarna kan de deur over de rail glijden.

*Hefdeuren* zijn deuren die langs twee heftorens omhoog getrokken en naar beneden gelaten kunnen worden. De draaipunten, geleiderollen, e.d. bevinden zich niet blijvend onder water. In gesloten toestand zijn de geleiderollen ingetrokken en wordt de deur tegen een slagdrempel en slagstijlen gedrukt. De afdichting wordt, evenals bij de roldeuren, verzorgd door houten aanslaglatten of rubber profielen.

#### Ad.b. *Schotbalken*

De schotbalken worden gebruikt om een sluis geheel of gedeeltelijk droog te zetten. Daarnaast kunnen ze gebruikt worden in het geval dat de deuren niet meer werken (calamiteit). Schotbalken bestaan meestal uit houten of stalen balken welke in zogenaamde schotbalkspanningen worden geschoven. De schotbalken worden passend bewerkt zodat de afdichting zo goed mogelijk wordt gewaarborgd. Bij stalen schotbalken worden houten dichtingsregels toegepast. Het aanbrengen gebeurt meestal met bokken of een kraan. Om te voorkomen dat de schotbalken opdrijven of enigszins los van elkaar komen, worden ze vastgezet. Dit gebeurt met wiggen in de schotbalkspanning of door middel van een stalen schuifgrendel. Om de waterdichtheid te vergroten kunnen twee rijen schotbalken op enige afstand van elkaar worden geplaatst. De tussenruimte kan dan gevuld worden met klei.

#### Ad.c. *Onder- en achterloopsheidschermen*

Voor een beschrijving van de onder- en achterloopsheidschermen wordt verwezen naar paragraaf 10.3.1 "Kwelschermen (onder- en achterloopsheidschermen)".

#### Ad.d. *Vleugelwanden binnen- en buitenhoofd*

De vleugelwanden bij het binnen- en buitenhoofd hebben primair een grondkerende functie; zij vormen namelijk de overgang van de verticale sluiswand naar het talud naast de sluis. De vleugelwanden kunnen tevens als achterloopsheidschermen worden gebruikt. In dat geval kunnen aparte achterloopsheidschermen achterwege blijven. Ze moeten dan aangesloten worden aan het, onder het sluishoofd aanwezige, onderloopsheidscherm en hebben dan tevens een waterkerende functie.

De vleugelwanden bestaan tegenwoordig vrijwel altijd uit betonnen of stalen damwandkunstwerken. Bij oudere kunstwerken vindt men ook wel gemetselde, al of niet op palen gefundeerde, gewichtsmuren.

#### Ad.e. *Sluishoofden*

De sluishoofden hebben naast een grondkerende functie voornamelijk de functie om de belastingen uit de deuren op te nemen en af te dragen. Daarnaast bieden ze veelal de ruimten voor bewegingswerken e.d.

*Ad.f. Schuiven en kleppen*

Bij schutsluizen worden schuiven en kleppen toegepast in deuren en omloopriolen. Bij deuren hebben ze het doel om de opening in de deur, die gebruikt wordt voor het omzetten van de kolk (vullen en ledigen), te kunnen afsluiten. Omloopriolen hebben eveneens de functie water in of uit de sluis te laten. Ook daar heeft de schuif of klep de functie van afsluiting.

De schuiven en kleppen worden veelal gemaakt van hout of staal. Schuiven kunnen in een schuifspinning worden geschoven. Deze spinning bestaat meestal uit hout of staal. Op de schuif wordt, ter afdichting, een houten of kunststof dichtingsregel aangebracht. Kleppen draaien om draaipunten welke aan de bovenzijde of in het middel (tolkleppen) zijn aangebracht. Het bewegingswerk van schuiven of kleppen is veelal (electro) mechanisch of hydraulisch.

*Ad.g. Stortebedden*

De stortebedden hebben tot doel het wegspoelen van de grond aan weerszijden voor de sluishoofden te voorkomen. De vroeger algemeen toegepaste methode bestaat uit een onderlaag van riet, rijshout of puin waarop een breuksteen (bijvoorbeeld basalt) werd aangebracht. De modernere kunstwerken bestaan veelal uit een kunststof filtermat waarop of breuksteen of betonnen blokken zijn aangebracht.

De zwaarte van de breuksteen of blokken is afhankelijk van de kracht van het uitstromende water. De stortebedden worden veelal aan het einde afgesloten door een rij perkoenpalen, een houten schot of een damwand.

*FAALMECHANISMEN*

In hoofdlijnen kunnen de volgende oorzaken voor falen voor een schutsluis worden genoemd:

- Kerende hoogte onvoldoende
- Erosie onder en langs de constructie
- Sterkte van constructie-onderdelen onvoldoende
- Stabiliteit van constructie (-onderdelen) onvoldoende
- Belastingen op constructie-onderdelen te hoog
- Mechanische installatie werkt niet
- Electrotechnische installatie werkt niet
- Menselijk handelen bij bediening kunstwerk faalt

- Plaatsen noodkering faalt
- Calamiteiten
- Obstakels c.q. vervuiling voor deuren/schuiven of slagdrempels

*10.2.2 Spuisluizen*

Een spuisluis (of uitwateringssluis) heeft het doel om het overtollige water uit een gebied af te laten op een spuibecken, boezem of de zee. De sluis heeft dus voornamelijk een waterhuishoudkundige functie. Bij variërende buitenwaterstand kan de spuisluis tevens een waterkerende functie hebben.

De constructie van een spuisluis bestaat veelal uit een sluishoofd, soms met aan- en/of afvoerkokers. De sluis kan aan de bovenzijde gesloten of open zijn. In het eerste geval spreekt men van een duikersluis en kan de sluis niet gepasseerd worden door scheepvaart. In het tweede geval is dit wel mogelijk.

De sluiswanden kunnen zijn opgebouwd uit gemetselde of betonnen muren; de vloer is meestal een, al of niet op palen gefundeerde, betonnen vloer.

Ingeval van een automatisch werkende sluis is het sluishoofd voorzien van puntdeuren of zijn elektrisch bediende hefdeuren aangebracht. Puntdeuren zullen, wanneer de waterstand in het spuibecken lager ligt dan in het af te wateren pand, worden geopend door de waterdruk achter de deuren. Bij een hogere buitenwaterstand worden ze weer dichtgedrukt. Bij elektrisch bediende hefdeuren worden de waterstanden vóór en achter de schuif continu of periodiek opgenomen met behulp van niveaumeetapparatuur en wordt de hefdeur, afhankelijk van de gemeten waterstandsverschillen geopend of gesloten. Als extra (nood)kering is soms nog een schuif aanwezig.

Bij een niet automatisch werkende sluis wordt de waterkering verzorgd door schuiven die met de hand, electromechanisch of hydraulisch worden bediend.

De waterkerende elementen van een spuisluis zijn:

- a. puntdeuren of schuiven of kleppen
- b. schotbalken

- c. onder- en achterloopsheidschermen
- d. vleugelwanden sluishoofd
- e. sluishoofd
- f. stortebedden

Voor een beschrijving van deze waterkerende elementen en de mogelijke oorzaken van falen van de constructie wordt verwezen naar paragraaf 10.2.1 "Schutsluizen".

#### 10.2.3 Inlaatsluizen

Een inlaatsluis heeft het doel om water in een bepaald gebied in te laten. Deze sluis heeft naast een waterkerende, een waterhuishoudkundige functie.

De constructie van een inlaatsluis is vrijwel identiek aan een spuisluis. Voor een beschrijving wordt derhalve verwezen naar paragraaf 10.2.2. "Spuisluizen".

Omdat bij inlaatsluizen, in tegenstelling tot spuisluizen, een bewegingsinrichting voor de deuren noodzakelijk is, zal het sluishoofd echter in het algemeen groter zijn. De inlaatsluis dient te zijn voorzien van deuren die geopend kunnen worden tegen hoogwater in.

Daarvoor kunnen ondermeer schuiven, roldeuren en hefdeuren gebruikt worden. Het openen en sluiten van de deuren wordt veelal geregeld op grond van peilregistraties.

De waterkerende elementen van een inlaatsluis zijn:

- a. deuren of schuiven of kleppen
- b. schotbalken
- c. onder- en achterloopsheidschermen
- d. vleugelwanden sluishoofd
- e. sluishoofd
- f. stortebedden

Voor een beschrijving van deze waterkerende elementen en de mogelijke oorzaken van falen van de constructie wordt verwezen naar paragraaf 10.2.1 "Schutsluizen".

#### 10.2.4 Afsluitbare duikers

Een afsluitbare duiker is een constructie die evenals een spuisluis het doel heeft om het overtollige water uit een bepaald gebied af te laten op een spuibekken of boezem met variërende waterstand, of de zee. De duiker heeft dus ook een waterhuishoudkundige functie.

De constructie van een duiker is in feite identiek aan die van een gesloten spuisluis, met dien verstande dat de kering meestal alleen verzorgd wordt door een, relatief kleine, schuif; er zijn dus geen deuren aanwezig. De schuif wordt mechanisch geopend of gesloten. De duiker is veelal ook kleiner dan een spuisluis waardoor de verstoring van de doorgaande dijk geringer is.

Voor een verdere beschrijving van de waterkerende elementen en de mogelijke oorzaken van falen wordt verwezen naar paragraaf 10.2.1 "Schutsluizen".

#### 10.2.5 Stormvloedkeringen/keersluizen

Een stormvloedkering of keersluis is een constructie die, bij hoge waterstanden, bescherming biedt tegen wateroverlast in het achterliggende gebied. De constructie is in het algemeen altijd open en keert slechts in enkele situaties. De normale waterstandsverschillen zullen dan ook, in het achter de kering liggende pand doorwerken. Bij bepaalde waterstanden, ondermeer afhankelijk van de dijkhoogten in achterliggende gebied, wordt de kering gesloten.

Naast een keersluis die bij hoog water gesloten wordt, zijn er ook keersluizen die bij zeer lage waterstanden gesloten zijn. Deze worden gebruikt wanneer voorkomen moet worden, bijvoorbeeld bij een rivierhaven, dat te lage waterstanden optreden.

De constructie van een normale keersluis is vrijwel identiek aan die van een spuisluis; er is slechts één sluishoofd met, afhankelijk van de kerende functie, één of twee (stel) deuren.

Bij een stormvloedkering is er meestal sprake van meerdere en grotere openingen met deuren en daardoor een grotere constructie-omvang dan bij een keersluis. De functie is echter gelijk.



De waterkerende elementen van een keersluis zijn:

- a. deuren of schuiven
- b. schotbalken
- c. onder- en achterloopsheidschermen
- d. vleugelwanden sluishoofd
- e. sluishoofd
- f. stortebedden

Bij stormvloedkeringen zijn schotbalken meestal niet aanwezig.

Voor een beschrijving van deze waterkerende elementen en de mogelijkheden van het falen van de constructie wordt verwezen naar paragraaf 10.2.1 "Schutsluizen".

#### 10.2.6 Gemalen

Een gemaal is een kunstwerk waarmee water uit het achterliggende gebied kan worden gepompt waardoor het waterpeil tot een vastgesteld niveau wordt verlaagd (peilbeheersing). Dit type constructie dient derhalve eveneens voor de waterhuishouding van een gebied. Gebruikelijke typen zijn vijzelgemalen en pompgemalen. Een vijzelgemaal heeft een vijzel, een hellende as met schroefvormige windingen, welke in een half-cilindrische goot (de opleider) is aangebracht. De vijzel is meestal gemaakt van staal. De opleider bestaat uit een betonnen bakconstructie, al of niet op palen gefundeerd. De aandrijving van de vijzel geschiedt door middel van electro- of dieselmotoren. Het toevoer kanaal of de goot kan worden dichtgezet met behulp van schotbalken of schuiven.

Een pompgemaal bestaat veelal uit een zuigkelder welke in open verbinding staat met het af te pompen gebied, een pompenruimte waarin de pompen zijn opgesteld en persleidingen waardoor het afgepompte water wordt afgevoerd naar het ontvangende water. De zuigkelder kan worden dichtgezet door middel van schotbalken of, ingeval van zuigleidingen, door middel van een klep of een schuif. Voor de pompen kunnen centrifugaalpompen of schroefcentrifugaalpompen worden gebruikt.

In de persleiding wordt een terugslagklep of schuif aangebracht om te voorkomen dat het water, bij het stoppen van de pompen, terug gaat lopen. De aandrijving van de pompen geschiedt met electro- of dieselmotoren.

De waterkerende elementen van een gemaal zijn:

1. de betonconstructie van het gemaal
2. achter- en onderloopsheidschermen
3. schotbalken of kleppen/schuiven

#### FAALMECHANISMEN

In hoofdlijnen kunnen de volgende oorzaken voor falen voor gemalen worden genoemd:

- Erosie onder en langs de constructie
- Sterkte van constructie-onderdelen onvoldoende
- Stabiliteit van constructie (-onderdelen) onvoldoende
- Belastingen op constructie-onderdelen te hoog
- Kerende hoogte onvoldoende
- Mechanische installatie werkt niet
- Electrotechnische installatie werkt niet
- Menselijk handelen bij bediening kunstwerk faalt
- Calamiteiten
- Hevelwerking

#### 10.2.7 Coupures

Een coupure is een constructie die, in geopende toestand, een wegverbinding mogelijk maakt door de doorgaande waterkering. De coupure, en dus de waterkering is in het algemeen altijd open en wordt slechts gesloten bij extreem hoge waterstanden.

De constructie van de coupure kan bestaan uit een, al of niet op palen gefundeerde betonnen vloer en gemetselde of betonnen wanden. Ook wanden van stalen damwandprofielen zijn mogelijk.

De coupure kan zijn uitgerust met één of meerdere deuren die de waterkering verzorgen. Deze deuren bestaan meestal uit stalen draai- of roldeuren. Bij kleinere coupures wordt de kering veelal verzorgd door schotbalken of een stalen schuif, welke met behulp van een kraan kunnen worden aangebracht.

De waterkerende elementen van een coupure zijn:

- a. deuren, schuif of schotbalken
- b. onder- en achterloopsheidschermen

### FAALMECHANISMEN

In het kort kunnen de volgende hoofdoorzaken van falen voor deze constructie worden genoemd:

- Erosie onder en langs de constructie
- Sterkte van constructie-onderdelen onvoldoende
- Stabiliteit van constructie (-onderdelen) onvoldoende
- Belastingen op constructie-onderdelen te hoog
- Kerende hoogte onvoldoende
- Menselijk handelen bij bediening kunstwerk faalt
- Plaatsen kering faalt

#### 10.2.8 Pijpleidingkruisingen en tunnels

Bij leidingen gaat het zowel om kruisende als om evenwijdig aan de waterkering lopende gas-, olie- en waterleidingen en rioleringsbuizen. Bij tunnels is meestal alleen sprake van kruisende buiselementen. De functie van de tunnel is het voorzien in een mogelijkheid voor verkeer (auto's, treinen, e.d.) om een watergang te kruisen zonder dat dit leidt tot een hoogtebeperking in de te kruisen waterweg.

Leidingkruisingen moeten zijn ontworpen, berekend en uitgevoerd volgens de Pijpleidingcode, te zijner tijd te vervangen door de normen NEN 3650, NEN 3651 en NEN 3652.

Voor de eisen, gesteld aan eventueel benodigde afsluitmiddelen van pijpleidingen wordt verwezen naar Hoofdstuk 7.

Tunnels zijn in voorkomende gevallen deel van de waterkering. Bij bezwijken van het tunneldak kan de polder vollopen via de tunnelbuis. Het risico hiervan is moeilijk te kwantificeren. De waterkering ter plaatse van de tunnel kan worden gevormd door:

- Waterkerende wanden aan weerszijden van de opritten, aansluitend op de waterkering en op het weglichaam waar dit de vereiste kerende hoogte bereikt. Deze wanden kunnen bestaan uit in grond uitgevoerde kanteldijken, damwandconstructies, betonnen keermuren etc. en dienen te voldoen aan de aan een waterkering te stellen eisen met betrekking tot hoogte, sterkte en stabiliteit. Langs het water wordt de kering over het gesloten tunneldeel heen-gevoerd, ter bescherming van de tunnel tegen het buitenwater. Deze kering behoeft strikt genomen niet te voldoen aan de eisen die worden gesteld aan de primaire waterkering.

- Een afsluitmiddel in de tunnelbuis, ter plaatse van het tunnelhoofd. Het tunnelhoofd met afsluitmiddel maakt hier deel uit van de waterkering, en dient te voldoen aan de hieraan te stellen eisen met betrekking tot hoogte, sterkte en stabiliteit en betrouwbaarheid van het afsluitmiddel.

### FAALMECHANISMEN EN INVLOEDEN

Enkele belangrijke oorzaken van falen en invloeden van de betreffende constructie op de doorgaande waterkering zijn:

- Lekkage van leidingen/tunnels met als mogelijke gevolgen:
  - verweking van dijklichaam (bij persleidingen).
  - wijziging in kwellijnenpatroon .
  - verzakking in dijklichaam.
- Lekkage langs leidingen en tunnel waardoor erosie of hogere water-spanningen (verhoging van freatische lijn) en vergrote kwel ontstaat.
- Eventuele aanpassingen c.q. onderhoud aan leidingen leidt tot beschadiging van een eventuele grasmat, tijdelijk opbreken van bekleding en verstoring van het korreelpakket en de profielopbouw van het dijklichaam.
- Eventueel onderhoud aan de waterkering wordt bemoeilijkt
- Wanneer leidingen zijn afgedekt met dekplaten kan hieronder ruimte ontstaan door zettingen van het dijklichaam
- Breuk van de leiding, gevolgd door erosie door de uitstromende vloeistof of explosie van het gas.

## 10.3 Bijzondere waterkerende constructies

### 10.3.1 Kwelschermen (onder- en achterloopsheidschermen)

Kwelschermen in dijklichamen worden meestal uitgevoerd als stalen damwanden. Zij zorgen ervoor dat onder- en achterloopsheid bij een kunstwerk of leiding wordt beperkt. Onderloopsheid is de aanwezigheid van een waterstroming onder de vloer van het betreffende kunstwerk. Bij achterloopsheid spreekt men van een waterstroming langs de wanden van het kunstwerk. Wanneer deze waterstromen in sterkte en omvang groeien, kan dit aanleiding geven tot uitspoeling van grond en het ontstaan van ruimten onder de vloer en langs de wanden. Dit kan resulteren in stabiliteitsverlies van het kunstwerk en leidt in ieder geval tot een vergroting van de lek door de waterkering.

Ter beperking van de onder- en achterloopsheid worden damwand-schermen, evenwijdig aan de waterkering, onder en naast de constructie aangebracht. Deze worden waterdicht aangesloten aan, of ingelaten in de constructie. De inheidipte van het scherm wordt bepaald door de soort grond, de lengte van het kunstwerk en het verschil in waterstanden vóór en achter het betreffende kunstwerk.

Bij korte kunstwerken is meestal een dieper kwelscherm nodig om de vereiste kwelweglengte te verkrijgen dan bij langere kunstwerken. Bij deze laatste kunnen veelal meerdere kwelschermen aangebracht worden (bijv. ter plaatse van de twee sluishoofden).

#### FAALMECHANISMEN

In hoofdlijnen kunnen de volgende oorzaken van falen worden genoemd:

- Uit het slot gelopen planken in het scherm of onvoldoende aansluiting tussen kunstwerk en scherm.
- Indien ook een kerende functie:
  - Sterkte van constructie-onderdelen onvoldoende
  - Stabiliteit van constructie onvoldoende
  - Belastingen op constructie-onderdelen te hoog
- Afmetingen (hoogte/diepte) onvoldoende

#### 10.3.2 Erosieschermen

Met erosieschermen worden, in de filosofie van de Projectgroep Dijkversterking Sliedrecht schermen bedoeld die onder normale omstandigheden vrijwel niet worden belast, maar in uitzonderlijke situaties wel. Als voorbeelden voor dit laatste kunnen genoemd worden een zeer hoge buitenwaterstand of de situatie waarbij een deel van het buiten- of binnentalud is weggeslagen. Dat betekent dat men accepteert dat een deel van de dijk, dat fungeert als drager van bebouwing, kan worden vrijgesteld van zijn waterkerende functie (en dus mag wegslaan) indien een aangebrachte constructie (het erosiescherm) deze functie in voldoende mate overneemt.

Een dergelijk erosiescherm kan bestaan uit een damwand of een diepwand, welke slechts over een beperkte oppervlakte (lengte en diepte) aanwezig is. Het scherm heeft in eerste instantie uitsluitend een waterkerende functie, maar moet in uitzonderlijke situaties ook als grondkering kunnen fungeren.

Een ander soort erosiescherm is die welke tot doel heeft wegspoeling van het materiaal waarmee een dijklichaam is opgebouwd (interne erosie), te voorkomen. Wegspoeling van gronddeeltjes vindt plaats onder invloed van grondwaterstroming en kan leiden tot het ontstaan van zandmeevoerende wellen (piping). Zo'n erosiescherm heeft alleen een grond-dichtende en geen water- of grondkerende functie.

Dergelijke erosieschermen worden veelal gemaakt van geotextielen of filterkunstwerken. In de onderhavige studie zullen filterkunstwerken niet worden behandeld.

Bij geotextielen kan, in hoofdlijnen, onderscheid gemaakt worden in "wovens" (weefsels) en "non-wovens". In het eerste geval gaat het om een geweven doek opgebouwd uit één of meerdere draadsoorten. Non-wovens zijn gestapelde, dus niet geweven, draden welke thermisch, mechanisch of chemisch aan elkaar zijn verbonden. De materialen waarvan geotextielen in het algemeen zijn gemaakt, zijn polyester (PE), polypropyleen (PP) of polyethyleen (HDPE).

De erosieschermen kunnen zowel verticaal (bijv. achter een damwand of onder een sluishoofd) als onder een helling (talud) worden geplaatst.

Geotextielen kunnen ook toegepast worden bij gewapende grond. Daardoor is het mogelijk taluds veel steiler op te zetten en kunnen zelfs verticale wanden worden gemaakt.

#### FAALMECHANISMEN

In hoofdlijnen kunnen de volgende oorzaken van falen worden genoemd:

- Aanwezigheid van openingen in het scherm.
- Erosiewerende hoogte/diepte onvoldoende
- Bij gewapende grond:
  - Sterkte van materiaal onvoldoende
  - Stabiliteit van constructie onvoldoende
  - Belastingen op constructie te hoog
  - Beschadiging geotextiel
  - Veroudering geotextiel

#### 10.3.3 Vliesconstructies

Vliezen kunnen in waterkeringen, welke zijn opgebouwd uit doorlatend materiaal (zand), worden toegepast als waterafsluitend element. Daarmee wordt de kwel door de waterkering in sterke mate beperkt.

Vliezen kunnen geen grondkerende functie vervullen. Evenals bij geotextielen worden ze tevens gebruikt bij gewapende grond.

Vliezen zijn gemaakt van kunststoffen als polyvinylchloride (PVC) of gechloreerde polyethyleen (CPE).

Bij waterkeringen kunnen vliezen als verticale schermen in de kern van de dijk worden geplaatst, zodat ze de kwel door de dijk beperken. Ook vindt men dergelijke vliezen wel onder het talud van waterkeringen (voornamelijk bij bekkens).

#### FAALMECHANISMEN

In hoofdlijnen kunnen de volgende oorzaken van falen worden genoemd:

- Aanwezigheid van gaten in het vlies
- Waterdichtende hoogte/diepte onvoldoende
- Bij gewapende grond:
  - Sterkte van materiaal onvoldoende
  - Stabiliteit van constructie onvoldoende
  - Belastingen op constructie te hoog
  - Beschadiging vlies
  - Veroudering vlies

#### 10.3.4 Kistdammen

Een kistdam bestaat uit twee aan elkaar verankerde wanden waartussen grond is aangebracht. De kistdam kan een grondkerende en/of waterkerende functie verzorgen. Daarnaast zijn nog aanvullende functies mogelijk, zoals een afmeer- en kadefunctie.

De wanden kunnen bestaan uit damwanden (staal, beton) of een combinatie van palen en damwanden (de zogenaamde combiwand en Peinewand).

De verankeringselementen tussen de wanden bestaan meestal uit stalen ankerstangen die aan de damwanden zijn bevestigd.

De beide wandkunstwerken van een kistdam zijn de elementen die de waterkerende en/of grondkerende functie vervullen. De waterdoorlatendheid van de wanden wordt bepaald door de nauwkeurigheid van de uitvoering. De waterdichtheid van het constructiemateriaal is namelijk

in het algemeen groot; lekkages treden voornamelijk op bij het uit het slot lopen van damwandprofielen. Daarnaast zal de inheidiepte, in de eerste plaats bepaald door de stabiliteit van de wandconstructie, zodanig moeten zijn dat de kwel onder de wand wordt beperkt. De wanden functioneren derhalve eveneens als onderloopseidschermen.

#### FAALMECHANISMEN

In hoofdlijnen kunnen de volgende oorzaken van falen voor deze constructie worden genoemd:

- Kerende hoogte onvoldoende
- Erosie onder de constructie
- Sterkte van constructie-onderdelen onvoldoende
- Stabiliteit van constructie (-onderdelen) onvoldoende
- Belastingen op constructie-onderdelen te hoog
- Calamiteiten

#### 10.3.5 Keermuren/wanden en kademuren

Keermuren/wanden en kademuren zijn kunstwerken die een verticale grondkering verzorgen. Bij keermuren is dit veelal een verticale scheiding tussen twee grondniveau's; bij kademuren meestal een verticale scheiding tussen grond en water. De kademuur heeft daarbij over het algemeen nog een afmeerfunctie voor schepen. Keermuren/kademuren kunnen de volgende constructievorm hebben:

- verankerde wand
- gewichtsmuur (metselwerk, beton)
- L-muur

Een verankerde wandconstructie bestaat uit een voorwand die de grondkering verzorgt en een verankeringselement. De voorwand kan bestaan uit damwanden (hout, staal, beton), palen of een combinatie van palen en damwanden (combiwand, Peinewand). De verankeringsconstructie bestaat veelal uit groutankers, speciale verankeringspalen (bijv. MV palen), ankers met ankerschotten of ankers met verankeringspalen (bokconstructie).

Het waterkerende element van deze wandconstructie is de voorwand zelf. Evenals bij de kistdam geldt dat de waterdoorlatendheid van de wand in sterke mate wordt bepaald door de nauwkeurigheid van de uitvoering.

Er dient te worden opgemerkt dat, in het kader van primaire waterkeringen, er enige weerstand bestaat tegen alleen een stalen damwand als waterkering, en wel om de volgende redenen:

- beperkte levensduur (corrosie aantasting);
- moeilijke controle op de toestand van de waterkering;
- onvoldoende weerstand tegen aanvaring;
- moeilijke aansluiting op taludverdediging;
- moeilijk te realiseren dijkverhoging.

Een combinatie van stalen damwand met een grondlichaam wordt wel erkend als waterkering.

Een gewichtsmuur als keermuur/kademuur is een gemetselde of betonnen muurconstructie op een fundering (op staal of op palen). De horizontale stabiliteit van de constructie wordt gewaarborgd door het gewicht van de muur zelf. De waterdichtheid wordt sterk bepaald door de kwaliteit van het metselwerk of het beton. Indien de funderingsdiepte van de muur ten opzichte van het laagste grondniveau beperkt is, zijn veelal damwandkunstwerken aangebracht om de kwel onder de muur te beperken, zodat erosie onder de muur wordt voorkomen. Deze verzorgen derhalve ook een deel van de waterkerende functie.

Een L-muur is een uit beton gemaakte wand/vloerconstructie die gefundeerd is op staal of op palen. De horizontale stabiliteit wordt dan gewaarborgd door zowel het gewicht van de constructie zelf als door het gewicht van de, op de vloer aanwezige, grond. De waterkerende functies worden vervuld door de constructie van de muur en een eventuele damwandconstructie onder de muur.

Achter de keermuur/kademuur wordt veelal een drainage aangebracht om de belasting achter de muur, ten gevolge van grondwaterdruk te beperken.

#### FAALMECHANISMEN

In hoofdlijnen kunnen de volgende oorzaken van falen voor deze constructie worden genoemd:

- Kerende hoogte onvoldoende
- Erosie onder de constructie
- Sterkte van constructie-onderdelen onvoldoende
- Stabiliteit van constructie (-onderdelen) onvoldoende
- Belastingen op constructie-onderdelen te hoog
- Calamiteiten

#### 10.3.6 Dijkmuurtjes

Een dijkmuur is een constructie die op een dijk is aangebracht om golf-overslag over die dijk te voorkomen of te beperken. De dijkmuurtjes hebben geen grondkerende functie en zijn dan ook meestal beperkt van omvang.

De constructie kan bestaan uit stalen of betonnen damwanden, een gemetselde of betonnen gewichtsmuur of een betonnen L-muur. Een gewichtsmuur of L-muur kan zijn gefundeerd op staal of op palen. Om te voorkomen dat erosie onder de constructie ontstaat, wordt veelal een onderloopsheidscherm onder de muur aangebracht. Daarnaast is een goede aansluiting van de taludverdediging aan de muur noodzakelijk.

#### FAALMECHANISMEN

In hoofdlijnen kunnen de volgende oorzaken van falen voor deze constructie worden genoemd:

- Kerende hoogte onvoldoende
- Erosie onder de constructie
- Sterkte van constructie-onderdelen onvoldoende
- Stabiliteit van constructie (-onderdelen) onvoldoende
- Belastingen op constructie-onderdelen te hoog
- Calamiteiten

---

## 11 PRAKTIJKVOORBEELD "KEERSLUIS"

---

### 11.1 Beschrijving van de keersluis

De beschouwde keersluis beveiligt enkele achtergelegen gebieden tegen overstroming ten gevolge van hoogwater op een rivier. De keersluis is gelegen in het benedenrivierengebied.

De ontwerpfrequentie bedraagt 1/2000. Naast de waterkerende functie heeft de sluis ook een functie met betrekking tot de doorvaart van beroeps- en recreatievaart, en met betrekking tot de doorvoer van water.

De sluis is voorzien van twee paar stalen puntdeuren die alleen bij hoge buitenwaterstand wordt gesloten. Dit gebeurt ongeveer 20 à 30 keer per winterseizoen en 5 à 10 keer per zomerseizoen.

De kering is niet permanent bemand. Als verwacht wordt dat het sluitpeil binnen ongeveer een uur overschreden gaat worden, stuurt men vanuit een commando-post een beambte naar de sluis, die ter plekke de kering bedient. Daartoe wordt de waterstand continu gemeten.

De twee stellen puntdeuren kunnen in beginsel onafhankelijk van elkaar worden gesloten en geopend. De deuren worden gesloten door middel van een hydraulisch systeem met duwpersen. Nadat de deuren gesloten zijn wordt de spleet tussen deur en bodem gedicht door middel van verticale schuiven. Met dit systeem heeft men minder last van eventueel zand op de bodem van de sluis.

Figuur 11.1 geeft een schematische tekening van de sluis. De belangrijkste gegevens m.b.t. de geometrie van de sluis zijn:

- hoogte sluisplateau: NAP +4,25 m
- hoogte deuren: NAP +3,75 m
- sluitpeil: NAP +1,30 m
- vloerniveau: NAP -4,00 m
- onderkant vloer: NAP -4,40 m
- doorvaartbreedte: 14,00 m
- hoogte achterliggende kade: NAP +2,20 m ("open keerhoogte")

Achtereenvolgens worden behandeld:

- Belastingen (par. 11.2)
- Overlopen en overslag (par. 11.3)
- Sterkte en stabiliteit (par. 11.4)
- Betrouwbaarheid sluitingsoperatie (par. 11.5)

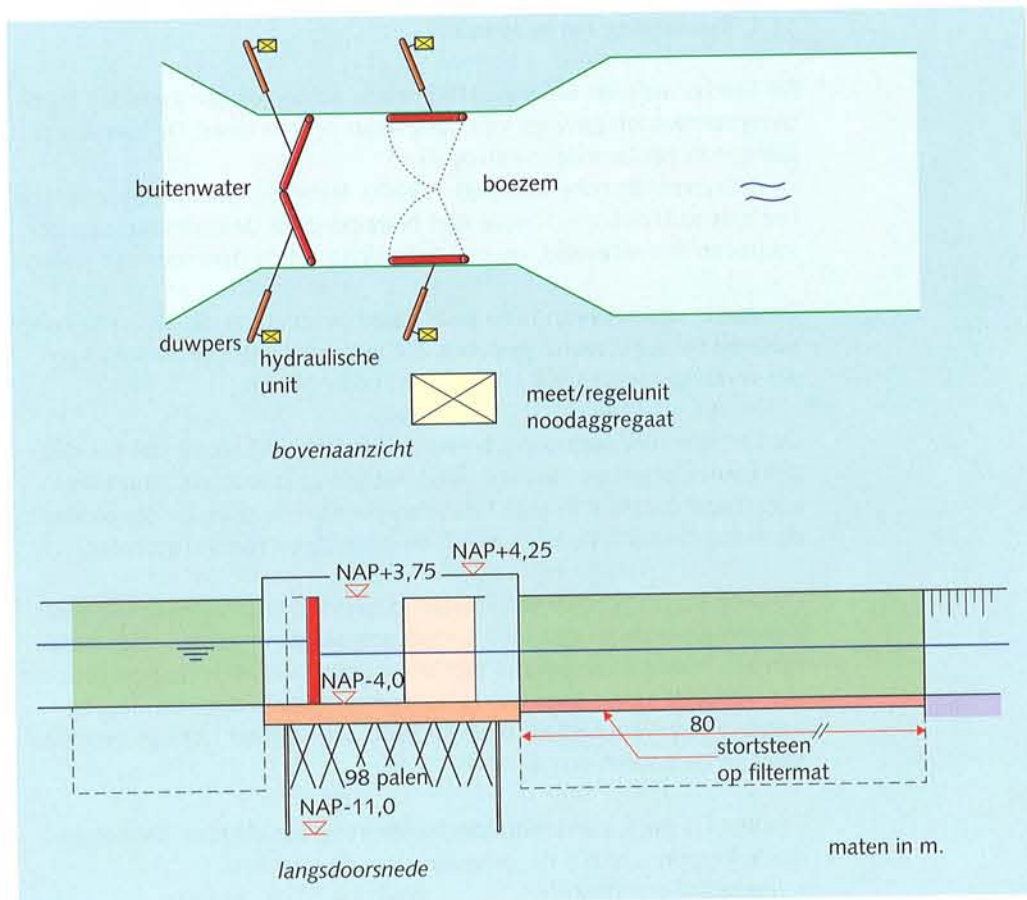


Fig. 11.1 Overzicht keersluis

## 11.2 Belastingen

In tabel 11.1 zijn de hydraulische belastingen samengevat. Weergegeven zijn zowel de extreme waarde als de combinatie waarde. De overige belastingen (gronddruk, grondwaterdruk etc.) zullen in samenhang met de relevante grinstoestanden worden behandeld.

Tabel 11.1 Hydraulische belastingen bij herhalingstijd R (jaar)

belasting	extreme waarde	combinatiewaarde
waterstanden <sup>1)</sup>	NAP +3,16 m (MHW) (R = 2000)	NAP +1,95 m (R = 10)
golfrandvoorwaarden <sup>2)</sup>	$H_s = 1,00$ m; $L = 20$ m (R = 2000)	$H_s = 0,53$ m; $L = 11$ m (R = 10)
stroming <sup>3)</sup>	$u = 1,60$ m/s (R = 50)	$u = 0,80$ m/s (R = 1)
opwaaiing <sup>4)</sup>	$h_{opw} = 0,03$ m (R = 2000)	$h_{opw} = 0$ (R = 10)
retourstroom <sup>5)</sup>	$V = 1,98$ m/s (R = 50)	$V = 1,98$ m/s (R = 1)
schroefstraal <sup>6)</sup>	$U = 2,70$ m/s (R = 50)	$U = 2,70$ m/s (R = 1)

<sup>1)</sup> Bepaald uit frequentielijnen voor de rivier ter plaatse van de keersluis.

<sup>2)</sup> Berekend m.b.v. Bretschneider formules. Extreme waarde: windsnelheid 26 m/s, strijklengte 2000 m, waterdiepte 7 m. Combinatiewaarde: windsnelheid 15 m/s, strijklengte 2000 m, waterdiepte 6 m.

<sup>3)</sup> Bepaald uit waterloopkundig onderzoek.

<sup>4)</sup> Berekend bij windsnelheid 26 m/s, strijklengte 1000 m, waterdiepte 7 m.

<sup>5)</sup> Maatgevend schip: Kempenaar, 600 ton laadvermogen. Maximaal haalbare snelheid door sluis van 1,95 m/s geeft retourstroom 0,68 m/s (1 m uit sluis-as). Hierbij dient nog de maximaal optredende stroomsnelheid van 1,30 m/s te worden geteld.

<sup>6)</sup> Bepaald voor Kempenaar met motorvermogen 200 pk, geladen diepgang 2,4 m en waterdiepte 3,10 m (bij laagst bekende waterstand).

## 11.3 Overlopen en overslag

De deurhoogte is NAP +3,75 m, d.w.z. 0,5 m lager dan het sluisplateau en de aansluitende grondlichamen. Dit betekent dat een eventueel overslagdebiet gecontroleerd over de deuren naar de achterliggende boezem zal afstromen.

De keersluis is de enige overlaat in de boezem. Gesteld wordt dat een instromend watervolume  $K$  van 300.000 m<sup>3</sup> op de boezem kan worden geborgen. Bij een breedte van 14 m betekent dit een toelaatbaar overslagvolume per m breedte:  $V_b = 21.430$  m<sup>3</sup>/m

De kruinhoogte moet voldoen aan de volgende eis:

$$h_{kr} = MHW + h_{zsr} + h_{zkl} + h_{opw} + h_{sbb} + w \quad (11.1)$$

$h_{kr}$  = de aanleghoogte van de deuren: NAP +3,75 m.

MHW = NAP +3,16 m (hierin is al 0,10 m relatieve zeespiegelrijzing verdisconteerd, overeenkomend met een planperiode van 50 jaar).

$h_{zsr}$  = zeespiegelrijzing en verhoging van de waterstand door morfologische ontwikkelingen gedurende de planperiode, voorzover deze niet in het MHW zijn verdisconteerd: 0,10 m.

- $h_{zkl}$  = verhoging in verband met zetting en klink; voor het op palen in het pleistocene zandpakket gefundeerde kunstwerk wordt dit geschat op 0,01 m.  
 $h_{opw}$  = verhoging van de waterstand door lokale opwaaiing = 0,03 m.  
 $h_{sbb}$  = verhoging van de waterstand door seiches, bui-oscillaties, buistoten = 0,00 m.  
 $w$  = waakhoogte in verband met golfoverslag en overloop. Volgens Hoofdstuk 5 geldt voor  $w$ :

$$w = \alpha_{komb} H_s + 0,30 \quad [m] \quad (11.2)$$

Volgens grafiek "Benedenrivieren" van figuur 5.2.1 van de Hoofdstuk 5 bestaat er voor  $V_B = 21.430 \text{ m}^3/\text{m}$  géén  $\alpha_{komb}$ , maar geldt  $\alpha_{komb} = 0$  voor  $V_B = 10.000 \text{ m}^3/\text{m}$ .

We bepalen nu het toelaatbare overloopvolume uit:

$$V_{ovl} = V_B - V(\alpha 0) = 11.430 \text{ m}^3/\text{m}$$

Uit de grafiek "rivierregime" van figuur 5.3 volgt  $h_{ovl} = 0,15 \text{ m}$ , zodat  $w = -0,15 + 0,30 = 0,15 \text{ m}$

Gevonden wordt:  $h_w = \text{NAP} + 3,16 + 0,10 + 0,01 + 0,03 + 0,00 + 0,15 = \text{NAP} + 3,45 \text{ m}$

De keersluis is dus voldoende hoog (NAP +3,75 m).

## 11.4 Sterkte en stabiliteit

### 11.4.1 Controle kwelschermen op piping

Eis methode Lane:

$$L \geq C_w (H_{bu} - H_{bi}) \quad (11.3)$$

met:

Hoge buitenwaterstand:  $H_{bu} = \text{NAP} + 3,16 \text{ m}$  (frequentie 1/2000 per jaar)

Lage binnenwaterstand:  $H_{bi} = \text{NAP} - 1,00 \text{ m}$  (combinatiewaarde)

Coëfficiënt:  $C_w = 5,5$  (zand)

Oftewel:  $L \geq 23 \quad [m]$

Aan voor- en achterzijde zijn kwelschermen aangebracht, elk ca. 6,4 m reikend in de ondergrond. De verticale kwelweglengte bedraagt derhalve:  $4 \times 6,4 = 25,6 \text{ m}$ . De horizontale kwelweglengte mag niet worden meegerekend. De kwelweglengte  $L$  is groter dan 23 m, dus voldoet.

### 11.4.2 Sterkte stalen puntdeuren

N.B. In onderstaande berekening is geen rekening gehouden met de effecten van de fuikwerking en van de schuine stand van de puntdeuren!!

De deuren dienen te worden berekend op sterkte met als rekenwaarde van de belasting een combinatie van waterstand en windgolven (zie Hoofdstuk 4).

Gegevens (zie figuur 11.2):

- Deur: bovenkant NAP +3,75 m; onderkant NAP -4,00 m
- Buitenzijde:
  - Stilwaterstand op afstand van de deur: MHW = NAP +3,16 m ( $D = 7,16 \text{ m}$ )
  - Maatgevende stormpiek: 3 uur
  - $T_{gem} = 3 \text{ sec}$ .
  - Aantal golven tijdens maatgevende stormpiek:  $N = 3 \cdot 3600/3 = 3600$
  - Invallende golfhoogte die in 10% van de maatgevende stormen wordt overschreden:  $H_d = 2,3 H_s$  (de factor 2,3 volgt uit de methode beschreven in paragraaf 4.3).
  - Omdat  $H_s = 1 \text{ m}$  volgt voor de ontwerpgolf:  $H_d = 2,3 \text{ m}$ .
  - golflengte  $L = 14 \text{ m}$  (golffgetal  $k = 2\pi/L = 0,45$ );
  - de maximale golfhoogte die niet breekt is  $H_{max} = 0,2 L = 2,8 \text{ m}$ . Omdat  $H_d = 2,30 \text{ m}$  zal geen breken optreden. De amplitude van de ontwerpgolf ( $2,30/2 = 1,15 \text{ m}$ ) is veel groter dan de afstand kruin-MHW (0,59 m). Daarom kiezen we als reflectiecoëfficiënt:
  - $K_r = 0,5$
- Binnenzijde:
  - Waterstand NAP -1,00 m ( $D' = 3,00 \text{ m}$ )



Hieruit volgt:

- middenstandsverhoging:  $\eta_0 = 1/2 k H_d^2 \coth(kD) = 0,82 \text{ m}$
- maximale amplitude  $a_{kw} = 1/2 (1 + K_r) H_d = 1,72 \text{ m}$

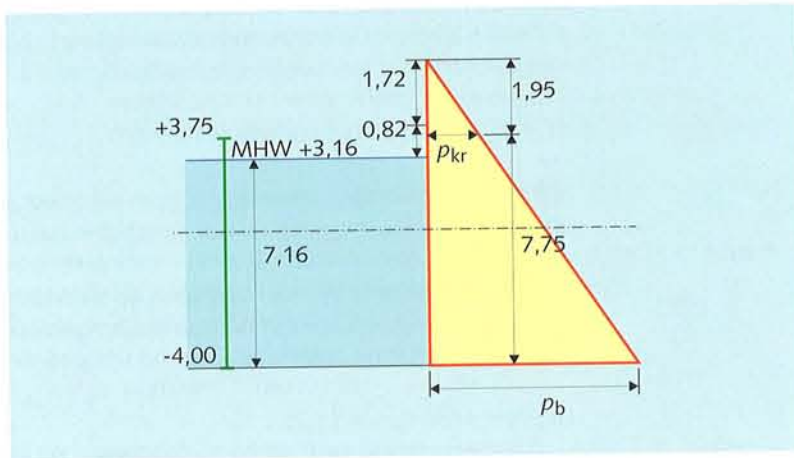


Fig. 11.2 Golfdrukken op deuren.

De krachten op de deur ten gevolge van waterstand en windgolven zijn gelijk aan:

- buitenzijde:  
De top van de golf heeft een maximum dat gelijk is aan de middenstandsverhoging  $\eta_0 = 0,82 \text{ m}$ , plus de amplitude van de "staande" (niet volledig gereflecteerde) golf,  $a_{kw} = 1,72 \text{ m}$ , dus totaal  $2,54 \text{ m}$  boven de stilwaterstand.

De druk tegen de onderkant van de deur is

$$p_b = \rho g \left( D + \frac{a_{kw}}{\cosh(2\pi \frac{D}{L})} \right) = 9,81 * \left( 7,16 + \frac{1,72}{12,45} \right) = 71,6 \text{ kN/m}^2$$

De druk tegen de bovenkant van de deur is:

$$p_{kr} = \frac{1,95}{7,75 + 1,95} p_b = 0,2 * 71,6 = 14,3 \text{ kN/m}^2$$

De kracht tegen de buitenzijde van de deur is:

$$F_1 = 7,75 \frac{14,3 + 71,6}{2} = 332,9 \text{ kN/m}$$

- binnenzijde:

De kracht tegen de binnenzijde is:

$$F_2 = - 1/2 \rho g D^2 = - 45 \text{ kN/m}$$

- Totaal:  $F_t = F_1 + F_2 = 287,9 \text{ kN/m}$

De rekenwaarde van de belasting wordt bepaald door deze totale kracht te vermenigvuldigen met een belastingsfactor 1,25 (zie Leidraad, tabel 3.1):

$$F_{t,d} = 1,25 F_t = 360 \text{ kN/m}$$

Controle van de stalen deuren geschiedt vervolgens conform NEN 6770.

#### 11.4.3 Sterkte betonnen sluiswanden

De horizontale belastingen op de sluiswanden kunnen worden gesplitst in:

- gronddruk  
De NEN 6740 stelt dat korreldrukken strikt genomen niet in het domein van de belastingen vallen, daar ze in sterke mate reageren op de vervormingen van de constructie. Golfbelastingen en op/afwaaiing zijn hier buiten beschouwing gelaten.  
Voor de gronddrukcoëfficiënt geldt (NEN 6740, art. 12.4.5):  $K_0 = 1 - \sin \phi'$ .  
Echter voor starre wanden die zand keren en onder invloed staan van grote fluctuerende waterstanden en temperaturen kan deze factor oplopen tot een waarde van 2 (NEN 6740, art. 12.2.3).  
In de berekening van de belasting wordt gesteld  $K_0 = 1$ .
- (grond)waterdruk  
Als gevolg van de variatie in waterstanden zal de grondwaterstand ook aan schommelingen onderhevig zijn. Als maximaal verschil tussen de grondwaterstand en de kolkwaterstand is  $0,5 \text{ m}$  aangehouden,

daar de optredende extreme waterstanden kortstondig zijn. Voor de bepaling van de belastingen dienen de verschillende optredende (grond)waterstanden te worden gecombineerd. Bepaald wordt nu de totale horizontale gronddruk op de sluiswand (van NAP +4,25 m tot NAP -4,40 m) voor de verschillende grenstoestanden. Aangenomen is dat op deze wijze de gemiddelde belasting is bepaald en dat deze belasting niet dominant is. Dit dient uiteraard geverifieerd te worden.

Tabel 11.2 Belastingssituaties sluiswand

grenstoestand	grondwaterstand	waterstand in sluiswolk	sluiswand en aanaarding
type 1A a) laagwater b) hoogwater c) bouwfase	NAP - 0,40 m NAP +3,25 m NAP	NAP - 0,90 m NAP +2,75 m -	NAP +4,25 m NAP +4,25 m NAP +0,50 m
type 2	NAP +0,40 m	NAP +0,40 m	

<sup>1)</sup> Laagst gemeten waterstand.  
<sup>2)</sup> Nijiling MHW.  
<sup>3)</sup> In NEN 6740 wordt niet ingegaan op belastingen door grond en waterdruk tijdens de bouw. Dit betekent dat de bouwfase als uiterste grenstoestand type 1A dient te worden beschouwd, waarbij de belastingfactoren gelijk zijn aan die voor de permanente situatie.  
<sup>4)</sup> Voor berekening aangehouden.  
<sup>5)</sup> Sluis staat droog.  
<sup>6)</sup> Om de duur van de bemaling te beperken is, nadat de betonnen sluiswanden tot NAP +0,50 m zijn gestort, achter de wanden aangeaard en is de bronnering gestopt.  
<sup>7)</sup> Deze grenstoestand is met name van belang voor de controle van de scheurwijdte van de betonnen sluiswand. Als maatgevend kan hier de langdurig optredende belastingssituatie worden aangehouden.  
<sup>8)</sup> Middenstand bij gemiddelde rivierafvoer.

Bij de bepaling van de rekenwaarde van de resulterende druk op de sluiswand, uitgaande van bovenstaande belastingssituaties, geldt voor de partiële factoren het volgende:

- materiaalfactor  
De materiaalfactor voor de volumieke massa van grond bedraagt  $\gamma_m = 1$  (NEN 6740, art. 8.9: ook bij uiterste grenstoestand geldt  $\gamma_m = 1$ , indien een verhoging van de waarde van de volumieke massa tot een ongunstiger resultaat leidt).
- belastingsfactor  
Er is sprake van een dominante belasting door de buitenwaterstand, in combinatie met grond- en grondwaterdrukken (zie tabel 11.3).

Het betreft hier geen zuiver grondmechanische verificatie. Dit betekent dat een belastingfactor 1,2 op de gronddruk en de grondwaterdruk moet worden gehanteerd:

$$F_{\text{hor, reken}} = 1,2 F_{\text{hor, grond, rep}} + 1,2 F_{\text{hor, water, rep}}$$

Tabel 11.3 Resulterende druk op sluiswand (positief is in de richting van de sluiswolk)

grenstoestand	$F_{\text{hor, grond, rep}}$	$F_{\text{hor, water, rep}}$	$F_{\text{hor, reken}}$
type 1A a)	697 kN/m	21 kN/m	862 kN/m
b)	518 kN/m	37 kN/m	666 kN/m
c)	159 kN/m	97 kN/m	307 kN/m
type 2	636 kN/m	0 kN/m	763 kN/m

Nu de belastingen bekend zijn kan de betonconstructie gecontroleerd worden volgens NEN 6720. In tabel 11.4 zijn de benodigde controles met bijbehorende materiaalfactoren samengevat. De controles zijn niet verder uitgewerkt.

Tabel 11.4 Controles en materiaalfactoren betonconstructie

Controle	Grenstoestand	Materiaalfactor
moment	type 1A	betonstaal $\gamma_m = 1,15$ betondruk $\gamma_m = 1,20$ betontrek $\gamma_m = 1,40$
dwarskracht scheurwijdte en toelaatbare doorbuiging	type 1A type 2	schuifspanning $\gamma_m = 1,40$ materiaalfactor $\gamma_m = 1,00$

#### 11.4.4 Stabiliteit bodembescherming

De berekende stroomsnelheden kunnen als rekenwaarden worden beschouwd (partiële factor = 1,0). De steenstabiliteit kan worden bepaald met behulp van het schuifspanningscriterium volgens Shields [lit. 11-1]:

$$D_{n50} \geq u^2 / \{C^2 \Delta \Psi_{cr}\} k_t^2 / k_{s1} \quad (11.4)$$

met:

- $D_{n50}$  = nominale steendiameter (m)  
 $u$  = diepte-gemiddelde stroomsnelheid (m/s)  
 $C$  = coëfficiënt van Chezy (hier:  $C = 30 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ )  
 $\Delta$  = relatieve dichtheid van de stenen (hier:  $\Delta = 1,65$ )  
 $\Psi_{cr}$  = de kritieke dimensieloze schuifspanning (-) (geen beweging:  $\Psi_{cr} = 0,03$ )  
 $k_t$  = turbulentiecoëfficiënt (-)  
 $k_{sl}$  = coëfficiënt voor de helling (-) (hier:  $k_{sl} = 1$ )

Onderstaand is dit voor de berekende stroomsnelheden uitgewerkt.

belasting	$u$ (m/s)	$k_t$ (-)	vereiste $D_{n50}$ (m)	opmerking
stroming	1,6	1,0	0,06	maatgevend
retourstroom	2,0	1,2	0,13	
schroefstraal	2,7	1,5	0,36	

Er moet dus gelden dat:  $D_{n50} \geq 0,36 \text{ m}$ . Toegepast is stortsteen 60-300 kg. Hiervoor geldt  $D_{n50} \approx 0,40 \text{ m}$ . De stortsteen voldoet aan de eis.

#### 11.4.5 Ontgrondingen

De bij een ontgroning mogelijk optredende inscharing door afschuiving of zettingsvloeiing mag niet groter zijn dan de lengte van de bodembescherming, d.w.z. 80 m.

Indien rekening wordt gehouden met een mogelijk zettingsvloeiing gevoelige ondergrond (losgepakt zand), kan de maximale inscharingslengte worden gesteld op ca. 9 maal de diepte van de ontgrondingskuil [lit. 11.2]. Dit betekent dat de standzekerheid van de constructie met betrekking tot ontgrondingen voldoende gewaarborgd is, indien de maximale ontgrondingsdiepte wordt beperkt tot 8,8 m.

Bij de beëindiging van de bodembescherming bedraagt de gemiddelde stroomsnelheid ca. 0,10 m/s. Bij dergelijke lage stroomsnelheden wordt nauwelijks transport van het bodemmateriaal verwacht, en zal de diepte van een eventuele ontgrondingskuil beperkt zijn. Aanbevolen wordt om de actuele bodemligging tijdens het beheer door regelmatige peilingen te monitoren, zodat indien nodig tijdig maatregelen kunnen worden getroffen.

#### 11.4.6 Toelaatbaar paal draagvermogen

NEN 6743 geeft een semi-probabilistische werkwijze ter bepaling van het totale draagvermogen van een palenveld, afhankelijk van het aantal palen en het aantal uitgevoerde sonderingen.

Er zijn 4 sonderingen uitgevoerd, waartussen geen grote afwijkingen worden geconstateerd. Onder de als "stijf" te beschouwen sluisvloer worden 98 voorgespannen betonpalen toegepast, met schachtafmeting 400 mm en met het paalpuntniveau op NAP -19,0 m.

Ter plaatse van de uitgevoerde sonderingen wordt bepaald:

- de maximale draagkracht van de paalpunt  $F_{r,max;punt}$
- de maximale schachtwrijvingskracht  $F_{r,max;schacht}$

Voor de berekening is ervan uitgegaan dat de bodem niet samendrukbaar is en dat hierin geen zetting en derhalve geen negatieve kleef zijn te verwachten.

Ten behoeve van de sluisvloer zal tot maximaal ca. NAP -6,0 m ontgraven worden. Ter plaatse van de sonderingen begint pas op dit niveau de vaste zandlaag zodat geen reductie van de conusweerstand is toegepast.

De maximale draagkracht van de paalpunt bedraagt:

$$F_{r,max;punt} = A_{punt} p_{r,max;punt} \quad (11.5)$$

waarin:

- $A_{punt}$  = oppervlak van de paalvoet = 0,160 m<sup>2</sup>
- $p_{r,max;punt}$  = maximale puntweerstand  
 $= \frac{1}{2} \alpha_p \beta s ((q_{c,I,gem} + q_{c,II,gem})/2 + q_{c,III,gem})$
- $q_{c,I,gem}$  = de gemiddelde waarde van de conusweerstand over traject I (MPa)
- $q_{c,II,gem}$  = de gemiddelde waarde van de minimale conusweerstand over traject II (MPa)
- $q_{c,III,gem}$  = de gemiddelde waarde van de minimale conusweerstand over traject III (MPa)
- $\alpha_p$  = paalklassefactor;  $\alpha_p = 1,0$
- $\beta$  = factor voor de paalvoetvorm;  $\beta = 1,0$
- $s$  = factor voor de vorm van de dwarsdoorsnede van de paalvoet;  $s = 1,0$

De maximale schachtwrijvingskracht bedraagt:

$$F_{r,max;schacht} = O_p \Delta L p_{r,max;schacht} \quad (11.6)$$

waarin:

- $p_{r,max;schacht}$  = maximale paalschachtwrijving =  $\alpha_s q_{c,z;a}$   
 $\alpha_s$  = factor voor de invloed van de uitvoering en het paalttype;  
 $\alpha_s = 0,010$   
 $q_{c,z;a}$  = de gemiddelde waarde van de conusweerstand over het traject waarover schachtwrijving wordt berekend (MPa)  
 $O_p$  = omtrek van de paalschacht;  $O_p = 1,6$  m  
 $\Delta L$  = traject voor berekening schachtwrijving van NAP -6,0 m tot NAP -19,0 m is  $\Delta L = 13$  m

Voor de rekenwaarde van de maximale draagkracht van de paal kan worden aangehouden:

$$F_{r,max;d} = \xi_{1;N} \{F_{r,max;punt} + F_{r,max;schacht}\} / \gamma_{m;b} \quad (11.7)$$

waarin:

- $\xi_{1;N}$  = factor volgens tabel 1 van NEN 6743 = 0,88 (N=4, M=98)  
 $\gamma_{m;b}$  =  $\gamma_{m;b4}$  = partiële materiaalfactor volgens tabel 3 van NEN 6740 = 1,25

In onderstaande tabel zijn de berekende waarden gepresenteerd.

Sonde-ring	$q_{c;it;gem}$ (MPa)	$q_{c;it;gem}$ (MPa)	$q_{c;it;gem}$ (MPa)	$F_{r,max;punt}$ (kN)	$q_{c;z;a}$ (MPa)	$F_{r,max;punt}$ (kN)	$F_{r,max;d}$ (kN)
1	14,50	13,50	10,25	1940	8,50	1768	2610
2	17,50	17,50	11,50	2320	9,00	1872	2950
3	15,00	13,00	7,00	1680	7,00	1456	2208
4	20,00	18,00	7,50	2120	7,00	1456	2717

De rekenwaarde van de maximale draagkracht van de paal bedraagt gemiddeld  $F_{r,max;d;gem} = 2571$  kN. Ofwel voor de paalgroep van 98 palen geldt  $F_{fund;r,max;d} = 2571 * 98 = 252.10^3$  kN.

Voor grenstoestand 1A geldt volgens NEN 6740:

$$F_{s;d} \leq F_{r;d}$$

Voor grenstoestand 1B kan het zakkingscriterium volgens NEN 6740 worden vervangen door:

$$F_{s;d} + F_{s,nk;d} < F_{r,max;d}$$

waarin:

- $F_{s;d}$  = rekenwaarde van de belasting (kN)  
 $F_{s,nk;d}$  = rekenwaarde van de negatieve kleeftbelasting = 0 kN  
 $F_{r,max;d}$  = rekenwaarde van de maximale draagkracht van de paal (kN)

Voor de meeste paaltypen, zoals grondverdringende palen en avegaarpalen met relatief kleine diameter, is grenstoestand 1B maatgevend, zodat hiermee ook de andere grenstoelstanden worden ondervangen.

#### 11.4.7 Invloed planperiode

De lengte van de planperiode speelt een rol bij:

- verhoging van de waterstand door zeespiegelrijzing en morfologische ontwikkelingen. Deze is veelal reeds verwerkt in de waterstandsgegevens (overschrijdingslijn, MHW).
- zetting  
Doordat de sluis op palen is gefundeerd in het Pleistocene zand zal de zetting te verwaarlozen zijn.
- vermoeiing  
De stalen onderdelen kunnen bij frequente wisselbelasting sterkte verliezen door vermoeiing. Controle van relevante onderdelen volgens NEN 1008 (VOSB) of ontwerp-NEN 6788 (de nieuwe VOSB) of de toekomstige NEN 6786 en 6787 (VOBB: voorschriften voor het ontwerp van beweegbare bruggen) of NEN 2063 (Booglassen; op vermoeiing belaste constructies) verzekert een veilige constructie op dit aspect.
- corrosie  
De stalen onderdelen zullen sterkte verliezen door corrosie. Stalen onderdelen dienen met een zekere overmaat gedimensioneerd te worden om voldoende veiligheid tot het einde van de planperiode zeker te stellen. De grootte van de overmaat hangt af van de lengte van de planperiode, de corrosiesnelheid, eventuele coating en/of bescherming en van de onderhouds- en inspectiefrequentie. Bovenstaande punten dienen geïntegreerd te worden in het ontwerp-proces van de staalconstructie.

- slijtage  
Bewegende onderdelen kunnen slijten. Overdimensionering of frequente inspectie en onderhoud dient plaats te vinden. Frequentie van onderhoud en inspectie zijn afhankelijk van de snelheid van slijtage en de planperiode waarvoor het betreffende onderdeel is ontworpen.
- erosie  
Langs de constructie kan erosie optreden. Inspecties dienen plaats te vinden om te controleren of en zo ja hoeveel erosie er plaats vindt langs de constructie. Inspectie-intervallen zijn afhankelijk van de verwachte erosiesnelheid en het risico van overmatige ontgrondingen. De lengte van het inspectie-interval is te beschouwen als de lengte van de planperiode waarvoor het te eroderen constructie-onderdeel wordt gedimensioneerd.

## 11.5 Betrouwbaarheid sluitingsoperatie

### 11.5.1 Beoordelingsmethode

De actuele faalkans van een beweegbare kering wordt enerzijds bepaald door het aantal keren per jaar dat de kering moet worden gesloten en anderzijds door de kans op het niet tijdig gesloten zijn van de afsluitmiddelen, per vraag:

$$P_{fa} = n_j P_{ns}$$

Met:

$P_{fa}$  = actuele faalkans kunstwerk t.g.v. een falend afsluitmiddel (faalkans/jaar)

$n_j$  = het aantal keren per jaar dat de kering moet worden gesloten (vragen/jaar)

$P_{ns}$  = kans op niet sluiten, gegeven noodzaak (faalkans/vraag)

De eis waaraan de sluitingsoperatie moet voldoen is:

$$P_{fa} \leq 0,1 \text{ norm}$$

Het aantal keren per jaar dat de kering moet worden gesloten is gelijk aan de overschrijdingsfrequentie van het faalpeil (de buitenwaterstand die vermeerderd met de waakhoogte juist gelijk is aan de drempelhoogte).

In formulevorm is deze frequentie bepaald door:

$$n_j = N\{h_{dr} \leq h_f \leq h_{dk}\} \quad [\text{vragen/jaar}] \quad (11.8)$$

met:

$h_f$  = faalpeil [m t.o.v. NAP]

$h_{dr}$  = drempelhoogte bij geopend afsluitmiddel [m t.o.v. NAP]

$h_{dk}$  = dijktafelhoogte bij gesloten afsluitmiddel [m t.o.v. NAP]

De bepaling van  $n_j$  en  $P_{ns}$  wordt behandeld in paragraaf 11.5.2 respectievelijk in paragraaf 11.5.3.

### 11.5.2 Bepaling aantal vragen per jaar

De begingeburtenis die kan leiden tot een overstroming van het beschermde gebied wordt gesteld op faalpeil  $h_f > 2,20$  m. De jaarkans op de gebeurtenis  $h > 2,20$  m bedraagt:

$$n_j = 0,05 \text{ per jaar}$$

Bij waterstanden tussen NAP +1,30 m (sluitpeil) en NAP +2,20 m wordt dus aangenomen dat geen inundatie optreedt omdat de dijken hoog genoeg zijn.

### 11.5.3 Bepaling kans op niet sluiten bij gegeven noodzaak

In dit voorbeeld wordt  $P_{ns}$  bepaald door middel van een betrouwbaarheidsanalyse (zie Hoofdstuk 1). Hier wordt voor de kans op niet sluiten slechts de niet-beschikbaarheid volgens paragraaf 1.6.4 beschouwd. Dit in plaats van de uitgebreide standaard-beoordelingsmethode van Hoofdstuk 3.

Voor de bepaling van de kans op niet sluiten bij gegeven noodzaak dient eerst een overzicht te worden opgesteld van het betreffende systeem:

- Met betrekking tot het hoogwater waarschuwingssysteem is sprake van twee onafhankelijke niveaumeters en twee functionarissen die belast zijn met de aflezing. Dit kan worden opgevat als twee onafhankelijke waarschuwingssystemen.
- Voor de sluiting is er sprake van een erg eenvoudige bedieningsprocedure, met goede mogelijkheden voor controle op uitgevoerde handelingen en voldoende mogelijkheden (tijd) voor herstel.

- Er is sprake van twee onafhankelijke afsluitmiddelen. Bij storingen in het sluitingsmechanisme is geen mogelijkheid voor handbediening of een ander alternatief besturingssysteem aanwezig. Wel is er een nood-aggregaat beschikbaar in geval van storingen in de energielevering.
- De voor de betrouwbaarheidsanalyse belangrijke onderdelen van de sluis zijn: twee paar puntdeuren, 4 duwpersen, 4 hydraulische units, een noodaggregaat en een meet- en regel-unit. De deuren zijn in beginsel onafhankelijk van elkaar te sluiten en te openen.

De uitwerking vindt plaats met behulp van een gebeurtenissenboom.

Indien de begingeburtenis niet optreedt, zal er geen inundatie van het beschermde gebied optreden. Indien de begingeburtenis wel optreedt, is er alleen sprake van inundatie als de deuren van de sluis niet gesloten zijn. Dit kan in grote lijnen het gevolg zijn van:

- falen van het alarm;
- falen van de bediening;
- falen van de elektrische of hydraulische systemen;
- blokkering van de deuren wegens obstakels of zand.

In figuur 11.3 is een gebeurtenissenboom getekend. Systematisch worden hierin de mogelijke faaloorzaken doorlopen en gekwantificeerd.

De uiteindelijke faalkans van de kering wordt gevonden door de verschillende bijdragen op te tellen. Dit leidt tot een systeemfaalkans, gegeven een waterstand hoger dan NAP +2,20 m, van:

$$P_{ns} = 408 \cdot 10^{-6} \approx 4 \cdot 10^{-4}$$

In de gebeurtenissenboom zijn deze items verder uitgewerkt. Gekozen is voor een eenvoudige opzet van de boom, waarbij tal van herstelmogelijkheden nog buiten beschouwing zijn gelaten. Zo wordt er bijvoorbeeld vanuit gegaan dat inundatie optreedt zodra de niveaumeters niet goed werken. Hierbij wordt verwaarloosd dat in zo'n geval het bedienend personeel meestal ook nog wel andere indicaties heeft om te weten dat de deuren gesloten dienen te worden. Bij een analyse ligt het echter voor de hand zich te beperken tot het "officiële en geregelde systeem". In de boom zijn de kansen vermeld dat inundatie optreedt, gegeven dat de waterstand  $h > 2,20$  m is. Deze kansen zullen nu een voor een besproken worden.

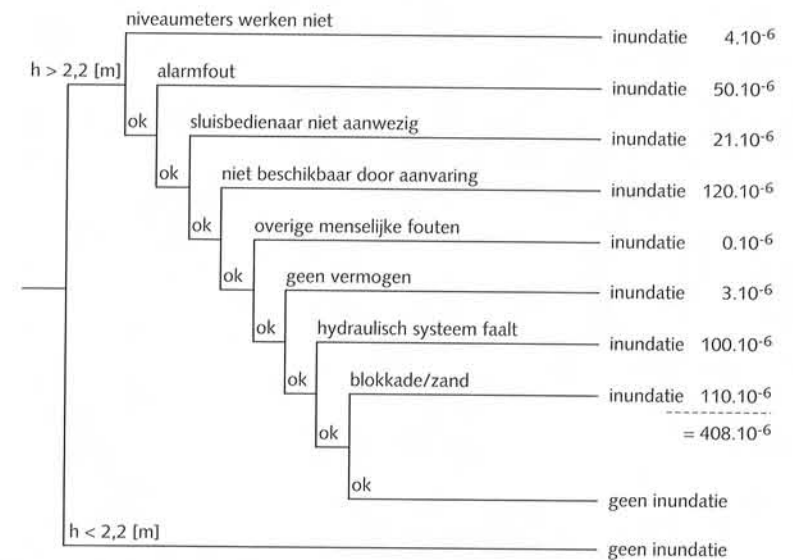


Fig. 11.3 Gebeurtenissenboom met conditionele kansen

- *Niveaumeters werken niet*

Het eerste wat volgens de gebeurtenissenboom fout kan gaan is dat de niveaumeters niet goed werken. De faalfrequentie van een niveau-meter is volgens tabel 1.4.6 in de orde van  $2 \cdot 10^{-5}$  per uur. Merk op dat deze waarde dicht bij de bovengrens dan bij de ondergrens ligt. Er is dus enige veiligheid voor de onzekerheid in deze schatting verdisconteerd. Gegeven de faalfrequentie is de vraag wat de kans is op niet-beschikbaarheid. Neem aan dat de niveaumeter iedere week een keer wordt gecontroleerd. Onder verwaarlozing van een reparatietijd is de niet-beschikbaarheid dan gelijk aan:

$$U = \lambda T/2 = 2 \cdot 10^{-5} * 7 * 24/2 = 1680 \cdot 10^{-6}$$

Omdat deze kans hoog is, ligt het voor de hand het systeem dubbel uit te voeren. De faalkans is dan gelijk aan:

$$U = (\lambda T)^2/3 = (2 \cdot 10^{-5} * 7 * 24)^2/3 = 4 \cdot 10^{-6}$$

Dit getal lijkt aanvaardbaar.

- *Alarmfout*

Indien het niveausysteem goed werkt moeten de functionarissen op de commandopost nog goed reageren. Neem aan dat er in beginsel altijd twee mensen aanwezig zijn, waarvan er een speciaal op de betreffende waterstand moet letten. De kans dat hier een alarmfout wordt gemaakt is volgens tabel 1.4.5:

$$P = P_1 \quad P_2 = (10^{-3}) * (5 \cdot 10^{-2}) = 50 \cdot 10^{-6}$$

Hierin is  $P_1$  de kans op een alarmfout van de eerst aangewezen functionaris en  $P_2$  die van de andere. Eventuele afwezigheid van deze functionarissen wordt geacht in deze kansen te zijn begrepen.

- *Sluisbedienaar niet aanwezig*

Indien de functionarissen in de commandopost opmerken dat het sluitpeil bereikt gaat worden, dienen zij een sluiswachter naar de sluis te sturen. Neem aan dat het bedieningsteam uit vier personen bestaat, waarvan er altijd een is die dienst heeft en een tweede die zich als reserve beschikbaar dient te houden. Er gaat dan iets fout als alle vier de sluiswachters ziek zijn of niet bereikbaar. De kans op ziek zijn van een wachter is volgens tabel 1.4.5 gelijk aan  $5 \cdot 10^{-2}$  en de kans op niet bereikbaarheid is  $10^{-2}$  indien de bereikbaarheid is geregeld is en  $2 \cdot 10^{-1}$  als dit niet zo is. Er zijn nu de volgende faalmogelijkheden:

- geen wachter ziek, niemand bereikbaar:  $P = (10^{-2})^2 * 0,22 = 4 \cdot 10^{-6}$
- een wachter ziek, drie andere niet bereikbaar:  
 $P = 4 * (5 \cdot 10^{-2}) * (10^{-2})^2 * 0,2 = 4 \cdot 10^{-6}$
- twee wachters ziek, twee andere niet bereikbaar:  
 $P = 6 * (5 \cdot 10^{-2})^2 * (10^{-2})^2 = 2 \cdot 10^{-6}$
- drie wachters ziek, de vierde niet bereikbaar:  
 $P = 4 * (5 \cdot 10^{-2})^3 * 10^{-2} = 2 \cdot 10^{-6}$
- vier wachters ziek:  $P = (5 \cdot 10^{-2})^4 = 6 \cdot 10^{-6}$
- totaal:  $21 \cdot 10^{-6}$

Hierbij is dus aangenomen dat geen aanvullende maatregel wordt ondernomen als bekend is dat er drie of vier wachters ziek zijn. Dit is uiteraard een conservatieve aanname. Meestal zal men wel elders een sluiswachter vandaan kunnen halen, zeker als hoogwater te verwachten is.

- *Niet beschikbaar door aanvaring*

Een volgend faalmechanisme is dat de sluis niet beschikbaar kan zijn als gevolg van een aanvaring. De niet beschikbaarheid kan worden geschat volgens:

$$U = \lambda \Theta = N p' L \Theta$$

Voor deze case worden de volgende getallen gekozen:

$N$  = aantal schepen per tijdseenheid = 100/dag

$p'$  = kans op aanvaring per schip per lengte-eenheid =  $10^{-6}$ /schip/km

$L$  = lengte kwetsbare oevers;  $L = 40$  m

$\Theta$  = gemiddelde reparatietijd;  $\Theta = 1$  maand

Met name de waarden voor  $N$  en  $\Theta$  zijn gefingeerd. Met deze getallen volgt een niet beschikbaarheid van:

$$U = 100 \cdot 10^{-9} * 40 * 30 = 120 \cdot 10^{-6}$$

- *Overige menselijke fouten*

Aannemende dat de sluis niet is aangevaren en dat een sluiswachter op tijd ter plekke is, wordt in deze analyse verder aangenomen dat geen menselijke fout door indrukken van een verkeerde knop of iets dergelijks een substantiële bijdrage aan de faalkans kan leveren.

De argumenten hiervoor zijn dat de sluis, het bedieningspaneel en de bedieningsprocedure erg eenvoudig zijn, controle op uitgevoerde handelingen goed mogelijk is, en de sluitingsprocedure kort is zodat vele vormen van herstel mogelijk zijn. Verder is er sprake van getraind personeel dat deze actie enkele malen per jaar uitvoert. Hooguit zal in gevallen waarin "van alles misgaat" (late komst van de wachter, uitvallen stroom, weigering van de deuren) nog redelijkerwijs sprake kunnen zijn van een menselijke vergissing. Dit wordt in het kader van deze case echter buiten beschouwing gelaten.

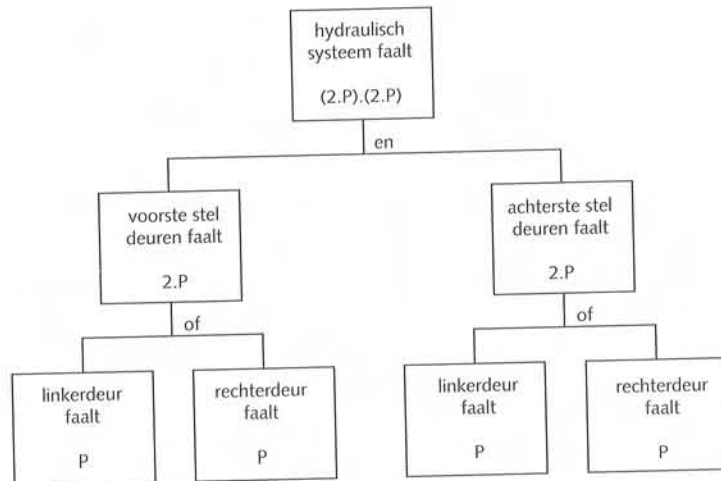
- *Geen vermogen*

De kans dat er geen elektrisch vermogen is om de hydraulische apparatuur te starten is gelijk aan de kans dat het Gemeentelijk Energiebedrijf geen vermogen levert, vermenigvuldigd met de kans dat het noodaggregaat niet werkt:

$$P = P_{\text{GEB}} \quad P_{\text{nood}} = \lambda_{\text{GEB}} T_{\text{GEB}} Q_{\text{nood}} = 10^{-4} * 3 * 10^{-2} = 3 \cdot 10^{-6}$$

Hierbij is uitgegaan van een frequentie van  $\lambda = 10^{-4}$  per uur dat de stroom uitvalt (zie tabel 1.4.1) en een gemiddelde storingsduur  $T = 3$  uur; de faalkans van de noodaggregaat is gelijk genomen aan de startfaalkans van een dieselgenerator. Volgens tabel 1.4.2 is dat  $10^{-2}$ .

- *Hydraulisch systeem faalt*  
Het hydraulisch systeem faalt als een van de twee voorste systemen niet werken of een van de twee achterste systemen niet werken. Onderstaand is een foutenboom getekend, met de bijbehorende kansen.



Ieder hydraulisch systeem is op zich zelf ook weer opgebouwd uit een aantal componenten. De belangrijkste hierbij is de hydraulische unit zelf. Als faalkans wordt de kans op het falen van een elektro-pomp aangehouden ( $P_{\text{hyd}} = 5 \cdot 10^{-3}$  per vraag, zie tabel 1.4.2). Daarmee wordt de faalkans voor dit systeem:

$$P = 4 P_{\text{hyd}}^2 = 4 * (5 \cdot 10^{-3})^2 = 100 \cdot 10^{-6} = 10^{-4}$$

- *Blokkade/zand*  
Tenslotte is er nog de kans dat de deuren niet kunnen sluiten als gevolg van zand of obstakels. Van de betreffende sluis zijn op dit punt geen gegevens bekend. Op basis van tabel 1.4.4 kan in het

algemeen worden geschat dat de kans op zand of vuil in de orde ligt van  $10^{-2}$  en de kans op een obstakel in de orde  $10^{-4}$ . Bij het ontwerp van deze sluisdeuren is echter speciaal rekening gehouden met de aanwezigheid van zand: tijdens draaien van de deuren is er een ruime spleet tussen bodem en onderkant deur. Als de deuren dicht zijn gaan er schuiven naar beneden om de spleet af te sluiten. Zonder verdere analyse wordt hier aangenomen dat hiermee de kans op niet sluiten ten gevolge van zandopeenhoping op de sluisvloer een orde lager is komen te liggen. Voor de obstakels wordt deze maatregel geacht geen effect te hebben. Voor een enkel deurenpaar wordt de kans op "niet kunnen sluiten" gelijk aan:

$$P = P_{\text{zand}} + P_{\text{obs}} = 10^{-3} + 10^{-4} = 1100 \cdot 10^{-6}$$

Indien het eerste stel deuren niet wil sluiten is er nog altijd een tweede stel ter beschikking. De aard van de faalwijze leidt ertoe dat er sprake is van correlatie tussen de beide deurstellen: als het ene stel niet dicht wil, is er een vergrote kans dat het andere stel last heeft van hetzelfde obstakel. Volgens tabel 1.4.4 ligt de faalkans van het tweede stel, gegeven dat het eerste stel niet kan sluiten, in de orde van 10%. Daardoor volgt voor het systeem van twee deurstellen:

$$P = 0,1 * (1100 \cdot 10^{-6}) = 110 \cdot 10^{-6}$$

#### 11.5.4 Beoordeling betrouwbaarheid sluitingsoperatie

De eis voor de betrouwbaarheid van de sluitingsoperatie luidt:

$$n_j P_{\text{ns}} \leq 0,1 \quad \text{norm}$$

hierin is:

$$\begin{aligned} n_j &= 0,05 \text{ per jaar} \\ P_{\text{ns}} &= 4 \cdot 10^{-4} \\ \text{norm} &= 1/2000 \text{ per jaar} \end{aligned}$$

Oftewel:  $2 \cdot 10^{-5} \leq 5 \cdot 10^{-5}$

Geconcludeerd wordt dat de sluitingsprocedure voldoet aan de gestelde eis.



## 11.6 Samenvatting

De hoogte van de keersluis voldoet aan de eis.

De sterkte en stabiliteit van de keersluis is voldoende, indien de dimensionering bij de gegeven belastingen verder geschiedt volgens de TGB. De stabiliteit van de bodembescherming, en daarmee samenhangend de standzekerheid van de constructie, is bij een goed beheer en onderhoud voldoende gewaarborgd.

Uit de betrouwbaarheidsanalyse blijkt dat de betrouwbaarheid van de sluitingsoperatie als voldoende kan worden beoordeeld.

## Literatuur

### Hoofdstuk 1:

- 1.1 KEMA rapport 30117-MAP-21, 1992.
- 1.2 NUREG/CR-2728 Interim Reliability Evaluation Program Procedures Guide, 1983.
- 1.3 VDEN Openbare netten voor elektriciteitsdistributie, 1986.
- 1.4 IEEE Std 500 Reliability data, 1984.
- 1.5 EPRI AP-2071 Component failure and repair data for coal-fired power units, 1981.
- 1.6 Egg-SSRE 8875 Generic component failure data base for light water and liquid sodium reactor PRA's, 1990.
- 1.7 Allianz handbook of loss prevention, 1987.
- 1.8 OREDA-84 Offshore Reliability Data Notebook, 1990.
- 1.9 SAIC 877-03-02 Rev.0 Generic Data Notebook, 1990.
- 1.10 Green & Bourne Reliability Technology, 1972.
- 1.11 ALWR Advanced light water reactor requirements document, 1988.
- 1.12 KEMA rapport WSK/30118-4, 1985.
- 1.13 Quality and Reliability Engineering International vol. 6, 1990.
- 1.14 EIREDA European Industry Reliability Data Handbook, 1991.
- 1.15 NUREG-75/014 (WASH 1400) An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants.
- 1.16 Swain, A.D. & H.E. Guttman 1983 Handbook of human reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications.
- 1.17 KEMA rapport 70219-MAP-8.
- 1.18 Schoonhoven, "Risico-analyse keersluis en coupures te Schoonhoven"; IBBC-TNO rapport B-90-334, mei 1990.
- 1.19 Tolkamer, "Beleidsanalyse Tolkamer", RWS, Dienst Weg- en Waterbouwkunde in samenwerking met ingenieursbureau Oranjewoud, april 1990.
- 1.20 Nieuwe Waterweg, "Faalkans-analyse van het voorontwerp van de stormvloedkering in de Nieuwe Waterweg; sectorkering van de bouwcombinatie Maaslandkering"; IBBC-TNO rapport B-87-627, september 1987.
- 1.21 Aanvaarrisico's voor sluisdeuren, WL-rapport Q1399, maart 1992.
- 1.22 Aansluiting van de Wet op de Waterkeringen op het Bouwbesluit; Fugro B.V. en Grondmechanica Delft; deel-rapportage Veilkunwat, januari 1994.
- 1.23 Achtergrondstukken ten behoeve van de Leidraad Kunstwerken en Objecten in, op en nabij waterkeringen; TNO-BOUW, Witteveen en Bos, KEMA; december 1992

## Hoofdstuk 2:

- 2.1 W. Heins en R.C.M.S. Baaijens, i.s.m. L.H.J. Goossens; Menselijke en organisatorische factoren bij het beheer van beweegbare waterkeringen; Technische Universiteit Delft, faculteit der Wijsbegeerte en Technische Maatschappijwetenschappen, september 1992.

## Hoofdstuk 3:

- 3.1 Betrouwbaarheidsbeoordeling van de sluiting van beweegbare waterkeringen, Fugro B.V., TNO-BOUW, Provincie Zuid-Holland, opdrachtgever Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, 30 augustus 1994.

## Hoofdstuk 4:

- 4.1 Golfkrachten op wanden; DHV-MI: F.T. Heezen 1994; Uittreksel uit rapportage ten behoeve van de renovatie van Zuider- en Kleine sluis te IJmuiden;
- 4.2 Bouwdienst Rijkswaterstaat (opdrachtgever), mei 1994 Krachten op puntdeuren en enkele draaideuren; Waterloopkundig Laboratorium: A. Vrijburcht
- 4.3 Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, 1995 Hydraulische randvoorwaarden voor primaire waterkeringen voor de periode 1995-2000.
- 4.4 Meer, J.W van der, 1994: Conceptual design of rubble mound breakwaters. Delft Hydraulics, Publication No. 483.
- 4.5 Delft Hydraulics: PHAROS, Computer simulation of wave behaviour around coastal structures in water of variable depth.
- 4.6 Battjes, J.A.; 1993: Korte golven, collegehandleiding b76; TU Delft.
- 4.7 Shore Protection Manual, 1984, CERC., U.S. Army Corps of Engineers.
- 4.8 Silvester; Coastal Engineering
- 4.9 Battjes, J.A.: Windgolven, collegehandleiding; TU Delft.

## Hoofdstuk 5:

- 5.1 Bepaling van de kerende hoogte voor kunstwerken in waterkeringen; methode van de Provincie Zuid Holland; Heidemij Advies; in opdracht van Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, november 1994.
- 5.2 Leidraad voor het Ontwerpen van Rivierdijken, deel 1, Bovenrivierengebied; TAW; 1985 en deel 2, Benedenrivierengebied; TAW; 1989.

## Hoofdstuk 6

- 6.1 Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, Technisch rapport voor controle op het mechanisme piping bij rivierdijken, 1994
- 6.2 Heaving bij kunstwerken: Ontwerpmethodiek, J.B. Sellmeijer; Grondmechanica Delft, in opdracht van Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde, 1995
- 6.3 Kwelschermen onder rivierdijken, afstudeerrapport, M. van de Paverd, Technische Universiteit Delft, 1994
- 6.4 Handboek voor de dimensionering van gezette dijkbekledingen, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, Civiel Technisch Centrum voor Regelgeving en Research, 1991
- 6.5 Overgangsconstructies, W. de Rijke, Waterloopkundig Laboratorium en Grondmechanica Delft, in opdracht van Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde, 1991
- 6.6 Onderloopsheid. Onderzoek naar de aard van het verschijnsel en methode ter bepaling van de veiligheidscoëfficiënt, F. van Rossum, A. van Zanen, Gepubliceerd in De Ingenieur No 20, 1959
- 6.7 Handleiding voor het ontwerpen van granulaire bodembeschermingen achter twee-dimensionale uitstromingsconstructies, Doc nr: BOD-R-95002, Rijkswaterstaat Bouwdienst/Dienst Weg- en Waterbouwkunde, februari 1995.
- 6.8 Spreadsheet Programma "Heaving bij kunstwerken", B.J. Sellmeijer, Grondmechanica Delft, in opdracht van Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde
- 6.9 Handleiding "Heaving bij kunstwerken", W-DWW-95-327, E.F.M. Helmus, Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde, juni 1995

## Hoofdstuk 8:

- 8.1 Handboek onderhoud kunstwerken NI; waarborgen voor een onderhoudsbewust ontwerp. Bouwdienst Rijkswaterstaat, concept november 1994.

## Hoofdstuk 11:

- 11.1 Konter, J.L.M., Jorissen, R.E. en H.E. Klatter; Afsluitdammen - regels voor het ontwerp. Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Delft, 1992.
- 11.2 R.E. Jorissen; Ontgrondingen door stroom en golven; PATO-cursus Ontwerp, beheer en onderhoud waterkeringen deel III, OW-14, april 1993.

- 11.3 Vrouwenfelder, A.C.W.M. (TNO-Bouw) en Gestel, P.J. van (KEMA); Faalkans-analyse bedieningsaspecten keersluis Schipdiep; TNO-rapport B-92-1164 (opdrachtgever Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde), december 1992

---

## APPENDICES

---

---

## Appendix I AFSTEMMING WET OP DE WATERKERING EN BOUWBESLUIT

---

### I.1 Aanleiding en doel

Bij de uitwerking van de Leidraad Kunstwerken en Bijzondere Constructies bleek dat voor de beoordeling van de sterkte en stabiliteit van kunstwerken nog onduidelijkheid bestond ten aanzien van:

- de te hanteren veiligheidsfilosofie vanuit de Wet op de Waterkering en de aansluiting op de eisen uit het Bouwbesluit;
- de betrouwbaarheid van bestaande kunstwerken t.a.v. sterkte en stabiliteit.

Daarom is een aparte studie gewijd aan deze vraagstukken.

Doel van de studie is voor een aantal representatieve constructie-onderdelen vast te stellen, welke partiële factor op de Maatgevende Hoogwaterstand (MHW) moet worden gehanteerd voor de bepaling van de rekenbelasting, gegeven een bepaald vereist betrouwbaarheidsniveau voor de beschouwde constructie of constructie-onderdeel.

De resultaten zijn gerapporteerd in het deelrapport "Hoofdstuk 7, Keren: aansluiting van de Wet op de Waterkering op het Bouwbesluit" (januari 1994). Dit rapport betreft de volgende hoofd-onderdelen:

- probleemanalyse en voorstel procedure: Fugro B.V.;
- probabilistische analyse: Grondmechanica Delft;
- conclusies en aanbevelingen: Fugro B.V., Grondmechanica Delft en de Bouwdienst.

Gegevens met betrekking tot de oude ontwerppraktijk zijn toegeleverd door de Bouwdienst.

Onderstaand zijn de belangrijkste resultaten uit de studie samengevat weergegeven, en is aangegeven op welke wijze deze resultaten bij de ontwikkeling van de veiligheidsfilosofie door de TAW kunnen worden gebruikt.

### I.2 Aanpak en belangrijkste resultaten

#### I.2.1 Opzet

De volgende representatieve constructie-onderdelen cq. mechanismen zijn beschouwd:

- sterkte balk in stalen deur;
- stabiliteit kistdam;
- stabiliteit op staal gefundeerd sluishoofd;
- piping.

Voor de balk, de kistdam en het sluishoofd zijn zogenaamde Nivo-II probabilistische analyses uitgevoerd gebaseerd op een eerste orde tweede moment benadering. Het mechanisme piping is geanalyseerd volgens een nivo-I aanpak (TNO-methode).

In de probabilistische berekeningen is de buitenwaterstand telkens als belangrijkste stochastische belastingsparameter meegenomen. De golfbelasting is voorts nog als deterministische belastingsparameter beschouwd. De berekeningen zijn uitgevoerd voor verschillende Gumbel extreme-waarden verdelingen voor de buitenwaterstand, ofwel voor verschillende decimeringshoogten.

Het gevonden verloop van de partiële factor als functie van de betrouwbaarheidsindex voor de verschillende constructie-onderdelen en mechanismen is op twee manieren berekend en gepresenteerd:

- uitgaande van jaarfrequentielijnen, resulterend in grafieken met op de horizontale as de betrouwbaarheidsindex gerelateerd aan kansen per jaar ( $\beta_{C1}$ );
- uitgaande van de 50-jaars-frequentielijnen, resulterend in grafieken met op de horizontale as de betrouwbaarheidsindex gerelateerd aan kansen per levensduur ( $\beta_{CN}$ ).

Bij de eerstgenoemde aanpak wordt correlatie in de tijd, gedurende de planperiode (50 jaar), van sterkteparameters volledig genegeerd. Bij de laatstgenoemde aanpak wordt correlatie op correcte wijze aangenomen. Deze aanpak is dus beter, zij het voor problemen waarbij sterkteafname een rol speelt (corrosie) nog aan de conservatieve kant. Bij de interpretatie van de berekeningen en verdere presentatie van conclusies is derhalve uitgegaan van de resultaten van laatstgenoemde aanpak.

Vervolgens worden de benodigde partiële factoren afgeleid bij verschillende veiligheidsbenaderingen, namelijk:

- gekoppeld aan de normfrequentie: faalruimte  $\xi \cdot f_{norm}$ , met  $\xi = 0,1$  en  $0,01$ ;
- gekoppeld aan het betrouwbaarheidsniveau volgens de TGB;
- gekoppeld aan de oude ontwerppraktijk.

### 1.2.2 Verloop partiële factor als functie van de betrouwbaarheidsindex

Voor de beschouwde constructie-onderdelen zijn probabilistische Nivo-II berekeningen uitgevoerd (met uitzondering van piping). Aan de hand van de gevonden design-point waarden zijn grafieken samengesteld, waarin de volgende waarden als functie van  $\beta_{C1}$  en als functie van  $\beta_{CN}$  zijn uitgezet:

- de vereiste partiële (materiaal)factor op de sterkte;
- de vereiste ontwerp-frequentie van de buitenwaterstand.

Vervolgens is de ontwerp-frequentie van de buitenwaterstand gecorrigeerd voor het feit dat de rekenwaarde van de sterkte wordt bepaald met behulp van de reeds in de TGB gegeven materiaalfactoren, in plaats van met de hierboven gevonden materiaalfactoren.

De "gecorrigeerde ontwerp-frequenties" zijn vervolgens vertaald naar partiële factoren  $\gamma_H$  op het verval bij Maatgevend Hoog Water ( $\Delta H_{MHW}$ ). Dit is zowel gebeurd als functie van  $\beta_{C1}$  (per jaar) ten behoeve van de koppeling met de Wet op de Waterkering, en als functie van  $\beta_{CN}$  (voor de levensduur) ten behoeve van de koppeling met het Bouwbesluit.

Gebleken is, dat de belastingsfactor afhankelijk is van de decimeringshoogte B en de normfrequentie  $f_{norm}$  (1/1250, 1/4000, etc.).

Ter illustratie wordt in figuur I.1 de grafiek met de resultaten van de probabilistische berekeningen getoond voor de "balk", voor een normfrequentie van 1/4000.

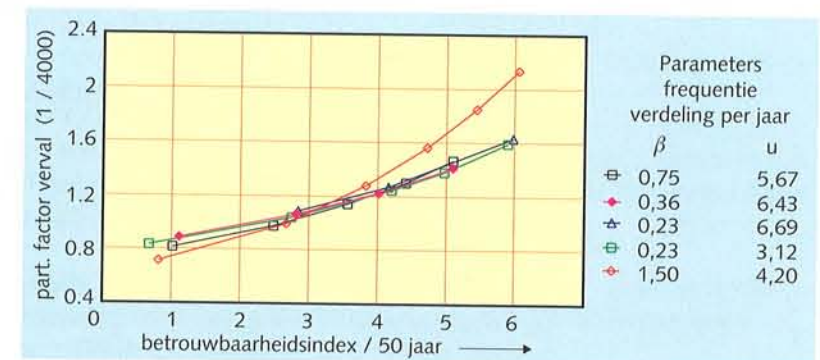


Fig. I.1 Verloop belastingsfactor als functie van de betrouwbaarheidsindex van het constructieonderdeel "balk", betrokken op jaarkansen. Normfrequentie 1/4000.

### 1.2.3 Keuze partiële factor

#### 1.2.3.1 Betrouwbaarheidsniveau gerelateerd aan normfrequentie uit Wet op Waterkering

Indien het betrouwbaarheidsniveau wordt gerelateerd aan de normfrequentie  $f_{norm}$  (overschrijdingskans per jaar van de buitenwaterstand), luidt de eis:

$$P\{\text{falen hoofdconstructie-onderdeel}\} \leq \xi \cdot f_{norm}$$

Uitgaande van de overbelastingsbenadering wordt voor een constructie-onderdeel globaal gevonden dat  $\xi = 0,1$  à  $0,01$ . Dit betreft een eerste grove schatting, waarbij een kunstwerk gelijkgesteld wordt aan een dijkvak.

Bovenstaande eis is uitgedrukt in de faalkans per jaar. Voor de bepaling van de faalkans per levensduur moet deze kans nog worden vermenigvuldigd met de levensduur (hier: 50 jaar). Hiermee is  $\beta_{CN}$  bekend (zie tabel 1.1), zodat de belastingsfactor  $\gamma_H$  kan worden afgelezen. De gevonden belastingsfactoren zijn in tabel 1.2 weergegeven.

Tabel 1.1 Betrouwbaarheidsindex voor een constructie-onderdeel, betrokken op planperiode (50 jaar), afgeleid uit jaarkansen.

$f_{norm}$	betrouwbaarheidsindex $\xi = 0,1$	$\xi = 0,01$
1:1250	2,66	3,35
1:2000	2,81	3,49
1:4000	3,03	3,68
1:10000	3,30	3,90

Voor de verschillende representatieve constructieonderdelen wordt gevonden:

- *Sterkte balk*  
Gevoonden wordt  $\gamma_H = 1,1$  resp.  $1,2$  voor  $\xi = 0,1$  resp.  $0,01$ .  
De belastingsfactor is vrijwel onafhankelijk van de normfrequentie.
- *Stabiliteit kistdam*  
Gevoonden wordt  $\gamma_H = 1,05$  resp.  $1,1$  voor  $\xi = 0,1$  resp.  $0,01$ .  
De belastingsfactor (gecorrigeerd voor aanpassing van materiaal-factoren aan het CUR Handboek Damwandconstructies) is vrijwel onafhankelijk van de normfrequentie.

- *Stabiliteit sluishoofd*  
Gevoonden wordt  $\gamma_H = 1,1$  à  $1,15$  resp.  $1,35$  à  $1,6$  voor  $\xi = 0,1$  resp.  $0,01$ . De belastingsfactor neemt toe met grotere normfrequentie.
- *Piping*  
Gevoonden wordt  $\gamma_H = 0,9$  à  $1,05$  resp.  $1,05$  à  $1,20$  voor  $\xi = 0,1$  resp.  $0,01$ . Nagegaan dient te worden of en in hoeverre aan de sterktekant nog met een partiële factor (modelfactor) dient te worden gerekend. Daarvoor is analyse van de door Lane gepresenteerde casuïstiek nodig.

#### 1.2.3.2 Betrouwbaarheidsniveau volgens de TGB

Kunstwerken in waterkeringen worden ingedeeld in veiligheidsklasse 3 van de TGB. Dit betekent dat de betrouwbaarheidsindex moet voldoen aan  $\beta_{CN} \geq 3,6$  (uitgedrukt in kans per levensduur).

Uit de grafieken met als lopende parameter de betrouwbaarheidsindex, gerelateerd aan kansen per levensduur (d.w.z.  $\beta_{CN}$ ) kan de belastingsfactor  $\gamma_H$  worden afgelezen bij  $\beta_{CN} = 3,6$ . De resultaten zijn eveneens in tabel 1.2 weergegeven.

Voor de verschillende representatieve constructieonderdelen wordt gevonden:

- *Sterkte balk*  
Gevoonden wordt  $\gamma_H = 1,2$  bij een normfrequentie  $1/10000$ , oplopend tot  $1,35$  bij een normfrequentie  $1/1250$ .
- *Stabiliteit kistdam*  
Gevoonden wordt  $\gamma_H = 1,05$  bij een normfrequentie  $1/10000$ , oplopend tot  $1,15$  bij een normfrequentie  $1/1250$ .
- *Stabiliteit sluishoofd*  
Gevoonden wordt  $\gamma_H = 1,2$  bij een normfrequentie  $1/10000$ , oplopend tot  $1,65$  bij een normfrequentie  $1/1250$ .
- *Piping*  
Een belastingsfactor  $\gamma_H = 1,2$  is een praktische keuze. Combinatie van zo'n factor met een factor die onzekerheden in de pipingregel (Lane) afdekt, moet nader worden onderzocht.

#### 1.2.3.3 Betrouwbaarheidsniveau volgens de "oude ontwerp praktijk"

Voor de verschillende representatieve constructieonderdelen wordt gevonden:

- *Sterkte balk*  
Voor stalen deuren luidde de oude ontwerpeis dat de belasting bepaald bij MHW moet worden vermenigvuldigd met een "verlaagde" veiligheidsfactor  $\gamma_H = 1,25$ .
- *Stabiliteit kistdam*  
In de berekeningsmethode volgens het Handboek Damwanden is de "oude veiligheid" geheel verdisconteerd in de materiaalfactoren op de grondsterkte. Dit betekent dat indien voor de ontwerpbelasting dezelfde waarde wordt genomen als in de oude ontwerppraktijk, ook met de nieuwe berekeningsmethode het oude veiligheidsniveau wordt bereikt. Dit houdt in dat voor de rekenbelasting direct MHW kan worden ingevuld. Ofwel:  $\gamma_H = 1,0$ .
- *Stabiliteit sluishoofd*  
In de oude ontwerppraktijk is de stabiliteit van het sluishoofd zelden een probleem, en werd meestal met globale (bovengrens)methoden volstaan.
- *Piping*  
In de oude ontwerppraktijk (TAW-leidraden) werd een controle volgens Lane uitgevoerd bij MHW. Ofwel:  $\gamma_H = 1,0$ . Extra veiligheid was gelegen in de keuze van de (materiaal)factor  $C_w$  en in de verwaarlozing van de horizontale kwelweglengte bij kunstwerken.

Ook deze resultaten zijn opgenomen in tabel I.2.

#### 1.2.3.4 Vergelijking verschillende veiligheidsbenaderingen

In onderstaande tabel zijn de partiële factoren  $\gamma_H$  gegeven voor de verschillende veiligheidsbenaderingen:

Conclusies en opmerkingen naar aanleiding van tabel I.2:

1. Bij de WoW-benadering is de eis afhankelijk van de normfrequentie, maar blijkt de belastingsfactor vrijwel onafhankelijk te zijn van deze normfrequentie. Dit is verklaarbaar, omdat verschillen in de normfrequentie reeds zijn verdisconteerd in MHW. Bij piping is sprake van een zwakke afhankelijkheid.
2. De TGB-eis leidt tot een differentiatie in partiële factoren, afhankelijk van de normfrequentie en mogelijk tot enige trendbreuk bij met name de grootste normfrequentie (1/1250).
3. De TGB-eis sluit het beste aan op de WoW-benadering voor  $\xi = 0,01$ .
4. Uitgaande van de oude ontwerppraktijk, lijkt de "balk" maatgevend te zijn, met  $\gamma_H = 1,25$ .

Tabel I.2 Belastingsfactoren voor de verschillende constructie-onderdelen (bij maatgevende waterstandsfrequentielijn)

grenstoestand constructie-onderdeel	norm- frequentie	belastingsfactor op het verval bij MHW ( $\gamma_H$ )			
		WOW benadering		TGB $\beta = 3,6$	oude praktijk
		$\xi = 0,1$	$\xi = 0,01$		
Sterkte balk	1/1250	1,07	1,24	1,35	1,25
	1/2000	1,07	1,24	1,28	1,25
	1/4000	1,10	1,22	1,20	1,25
	1/10000	1,12	1,22	1,19	1,25
Stabiliteit kistdam	1/1250	1,03	1,11	1,15	1,0 <sup>a)</sup>
	1/2000	1,03	1,11	1,12	1,0 <sup>a)</sup>
	1/4000	1,04	1,11	1,10	1,0 <sup>a)</sup>
	1/10000	1,03	1,10	1,07	1,0 <sup>a)</sup>
Stabiliteit sluishoofd	1/1250	1,16	1,50	1,60	a)
	1/2000	1,13	1,45	1,50	a)
	1/4000	1,10	1,37	1,35	a)
	1/10000	1,08	1,34	1,20	a)
Piping	1/1250	1,03 <sup>b)</sup>	1,21 <sup>b)</sup>	1,27 <sup>b)</sup>	1,0 <sup>c)</sup>
	1/2000	1,00 <sup>b)</sup>	1,16 <sup>b)</sup>	1,19 <sup>b)</sup>	1,0 <sup>c)</sup>
	1/4000	0,96 <sup>b)</sup>	1,11 <sup>b)</sup>	1,09 <sup>b)</sup>	1,0 <sup>c)</sup>
	1/10000	0,92 <sup>b)</sup>	1,05 <sup>b)</sup>	0,98 <sup>b)</sup>	1,0 <sup>c)</sup>

a) Oude ontwerppraktijk zeer gevarieerd  
b) Combinatie met modelfactor, die nader moet worden onderzocht (impliciete veiligheid in regel van Lane)  
c) Onbekende extra veiligheid in kwelweglengtebepaling op regel van Lane.

### I.3 Conclusies en aanbevelingen

#### 1. Differentiatie belastingsfactoren.

Uit de studie blijkt dat voor de verschillende constructie-onderdelen en verschillende normfrequenties niet dezelfde belastingsfactor wordt gevonden. Dit geldt met name indien moet worden afgeijkt op de TGB-betrouwbaarheid. Echter de TGB staat juist voor dat de belastingsfactoren onafhankelijk zijn van het beschouwde constructie-onderdeel en/of mechanismen. Verschillen in normfrequentie kunnen mogelijk ondervangen worden door een nuancering van de veiligheidsklassen voor waterbouwkundige kunstwerken in de TGB, zodat voor alle normfrequenties met dezelfde belastingsfactor kan worden volstaan. Deze werkwijze sluit

ook goed aan op de huidige ontwerppraktijk. Verschillen tussen mechanismen zijn echter moeilijker te vermijden zonder grote trendbreuk met de vigerende praktijk.

#### 2. Nader onderzoek

Benadrukt wordt, dat slechts een beperkt aantal verkennende berekeningen zijn uitgevoerd, met als doel om een globaal inzicht te verkrijgen in het veiligheidsniveau van bestaande constructies, en het effect van variaties in het geëiste veiligheidsniveau op de bijbehorende belastingsfactor.

Afhankelijk van de uiteindelijke keuze kan het nodig zijn om deze keuze nog nader te onderbouwen. Dit kan bijvoorbeeld betrekking hebben op een verdere uitwerking van de modellen, parametrische variatie voor de beschouwde constructievoorbelden, uitwerking van andere constructievoorbelden, nadere detaillering van de invloed van de levensduur, etc.

#### 1.4 Eindconclusie

Op grond van bovenstaande studie wordt geadviseerd om voor de berekende verschildrukken over een waterkering een algemene stabiliteitsfactor  $\gamma_H = 1,25$  te hanteren.

## Appendix II PRAKTIJKVOORBEELD "KEERSLUIS"

### II.1 Inleiding

Ter illustratie van de toepassing van de ontwikkelde standaard-beoordelingsmethode wordt het geval van een keersluis beschouwd. De gegevens zijn ontleend aan een reële situatie. In deze bijlage wordt de standaard-beoordelingsmethode toegepast. In Hoofdstuk 11 wordt op dezelfde keersluis de algemene betrouwbaarheidsanalyse (overeenkomstig Hoofdstuk 1) gepresenteerd.

### II.2 Bepaling aantal vragen per jaar

#### Gegevens buitenwaterstand

Het maatgevend hoogwater wordt gegeven door:

$$\text{MHW} = \text{NAP} + 3,25 \text{ m} \quad \text{met: } f_{\text{norm}} = 1/2000$$

Opmerking: Tijdens het ontwerp was  $f_{\text{norm}} = 1/3000$ .

De waterstandsfrequentielijn is bij de auteurs niet precies bekend, maar wordt geschat op:

$$N \{h > H\} = 10^{-(H-A)/B} \quad \text{met: } A = 1,78 \text{ m en } B = 0,42 \text{ m}$$

Deze benadering is inclusief de invloed van de stormvloedkering in de Nieuwe Waterweg en inclusief 0,10 m zeespiegelrijzing (planperiode 50 jaar) maar exclusief aanpassingen n.a.v. studie Boertien. Bij de bepaling van de waakhogte spelen locale opwaaiing, seiches, buistoten en buioscillaties geen rol. Zettingen zijn verwaarloosbaar klein.

#### Overschrijdingsfrequentie bij geopende keersluis

- De drempelhoogte is gelijk aan de kerende hoogte van de dijken in het Oude Maasje:  $h_{\text{dr}} = \text{NAP} + 2,20 \text{ m}$ .
- De waakhogte is gelijk aan de extra zeespiegelrijzing van 0,10 m (planperiode 100 i.p.v. 50 jaar) plus 0,10 m i.v.m. onzekerheid in de waterstand (nabij het faalpeil) minus de toelaatbare waterschijf van 0,05 m. Ergo:  $w_t = 0,15 \text{ m}$ .



- Gevonden wordt:  $h_{dr} - w_f = \text{NAP} + 2,05 \text{ m}$  (faalpeil). De overschrijdingsfrequentie bij geopende keersluis is dan gelijk aan:

$$N \{h > h_{dr} - w_f\} = 0,23$$

#### Overschrijdingsfrequentie bij gesloten keersluis

De overschrijdingsfrequentie bij gesloten keersluis dient theoretisch gelijk te zijn aan de overschrijdingsfrequentie van MHW. Per definitie geldt dat  $h_{dk} - w_{MHW} = \text{MHW} = \text{NAP} + 3,35 \text{ m}$ . De overschrijdingsfrequentie bij gesloten keersluis is dan gelijk aan:

$$N \{h > h_{dk} - w_{MHW}\} = 3,3 \cdot 10^{-4}$$

De waakhoogte is gelijk aan de extra zeespiegelrijzing van 0,10 m (planperiode 100 i.p.v. 50 jaar) plus 0,30 m i.v.m. onzekerheid in de waterstand (nabij MHW), verminderd met een toelaatbare waterschijf over de keersluis van 0,05 m. Deze waterschijf kan zonder problemen in het achterliggend gebied worden afgevoerd. Ergo:  $w_{MHW} = 0,10 + 0,30 - 0,05 = 0,35 \text{ m}$ . De dijktafelhoogte is dan gelijk aan:

$$h_{dk} = \text{MHW} + w_{MHW} = 3,60 \text{ m}$$

#### Aantal vragen per jaar

Het aantal vragen per jaar wordt gegeven door:

$$N \{h_{dr} < h + w \leq h_{dk}\} = N \{h + w > h_{dr}\} - N \{h + w > h_{dk}\} = N \{h > h_{dr} - w_f\} - N \{h > h_{dk} - w_{MHW}\}$$

$$N \{h_{dr} < h + w \leq h_{dk}\} = 0,23 - 3,3 \cdot 10^{-4} = 0,23$$

Deze waarde worden dus geheel beheerst door de kans op het overschrijden van de drempelwaarde.

### II.3 Bepaling faalkans per aanvraag

#### Uitgangspunten

De kering bestaat uit een twee onafhankelijke stellen puntdeuren, die worden gesloten door middel van een hydraulisch systeem met duwpersen. Nadat de deuren gesloten zijn wordt de spleet tussen deur en bodem gedicht door middel van verticale schuiven. Dit systeem is dus weinig gevoelig voor obstakels op de bodem. Er is een nood-aggregaat.

De kering is niet permanent bemand. Als verwacht wordt dat het sluitpeil binnen ongeveer een uur overschreden gaat worden, stuurt men vanuit een commandopost een beambte naar de sluis, die de kering ter plekke bedient. De waterstand wordt daartoe permanent gemeten. De puntdeuren kunnen worden gesloten zolang de stroomsnelheid minder is dan 2,2 m/s. Deze stroomsnelheid wordt gemeten.

#### Beantwoording vragen Hoogwateralarmeringssysteem

a1	a=3	De waterstand wordt continu automatisch geregistreerd en het systeem wordt maandelijks getest
a2	a=4	De registratie is continu
a3	a=4	Er is geen controle of back up
b1	b=2	Er moet iemand gewaarschuwd worden
b2	b=3	Er is een procedure
b3	b=4	De kering sluit gemiddeld 20 maal per jaar
b4	b=3	Er is één schakel in de commandopost / terugmelding is niet verplicht
c	c=3	tussenscore $c = \min(a;b) = \min(4;3) = 3$
d		Er is geen tweede systeem
e		Er is geen tweede systeem
f	f=0	Tussenscore
g	g=0	De bevolking is te laat
h	E <sub>1</sub> =3	Eindscore: $E_1 = c + f + g = 3$

*Beantwoording vragen Mobilisatie*

a1	a=1	De bemanning is niet permanent bij de sluis
a2	a=1.5	Er is een mobilisatieregeling
a3	a=1.5	Er is geen voorwaarschuwing
a4	a=1.5	Er is geen terugmeldingseis
a5	a=2.0	Er zijn vele sluitingen in een jaar
b1	b=1	Er is een stand-by regeling
b2	b=1	Niet volgens het bronrapport
c	c=3	Tussenscore
d1	d=1	Geen volledige bemanning aanwezig
d2	d=3	Goed bereikbaar
e	$E_2=3$	eindscore: $E_2 = \min(c;d) = 3$

*Beantwoording vragen Bediening*

a1	a=2	Niet automatisch/wel procedure
a2	a=2.5	Er is een terugmeldingsplicht
a3	a=3	De procedure is bij alle betrokkenen bekend
a4	a=3.5	De sluiting vindt enkele malen per jaar plaats
b	b=1	Er is goede controle mogelijk op de handeling
c1	c=1	Er is voldoende verlichting, dit wordt gecontroleerd
c2	c=1	Er zijn sleutels nodig / over controle niets geregeld
c3	c=1.5	Geen bijzondere hulpmiddelen nodig (dus er is voldoende communicatie)
d	d=1	Waarschijnlijk, er is veel tijd
e	$E_3=2.5$	Eindscore: $E_3 = \min(a+b;c+d) = \min(4.5;2.5) = 2.5$

*Beantwoording vragen Technisch Falen*

<b>eerste keermiddel:</b>		
a1	a=2	Het is een permanente deur
a2	a=3	Er zijn vele sluitingen per jaar
a3	a=3	De scheepvaart is minimaal
b	b=4	De normale voeding is via het GEB, er is een noodaggregaat aanwezig
c	c=3	tussenscore $c = \min(a,b) = \min(3;4) = 3$
d	d=0	er is geen reserve-aandrijving
e	e=2	geen bijzondere belemmeringen, speciale voorziening in deur
f	f=0	ingrijpen in den natte is zeer lastig vanwege de afgelegen ligging
g	g=2	tussenscore: $g = \min(c+d,e+f) = \min(3+0;2+0) = 2$
<b>het tweede keermiddel is gelijk aan eerste:</b>		
h	h=2	tussenscore: $h = \min(c,e) = \min(3;2) - 1 = 1$
<b>combinatie van de twee keermiddelen</b>		
i	$E_4=3$	eindscore $E_4 = g+h = 2+1 = 3$

*Faalkans per vraag*

Hoogwater waarschuwingssysteem	: $E_1 = 3$
Mobilisatie	: $E_2 = 3$
Sluiting; bedieningsfout	: $E_3 = 2,5$
Sluiting; technisch falen	: $E_4 = 3,0$
Voor het geheel	: $E = \min(E_i) = 2,5$

Daarmee komt de kans op niet falen bij een gegeven vraag:  $P_{ns} = 10^{-2,5}$

**II.4 Faalruimte afsluitmiddelen**

De aanwezige faalruimte-factor  $\xi_{nsa}$  is gelijk aan:

$$\xi_{nsa} = n_j P_{ns} / f_{norm}$$

scenario	$N \{h_{dt} < h + w \leq h_{dk}\}$ (vragen/jaar)	$P_{ns}$ (1/vraag)	$f_{norm}$ (1/jaar)	$x_{nsa}$ (-)
overbelasting	0,23	$3,0 \cdot 10^{-3}$	1/2000	1,45

Volgens de standaardbeoordelingsmethode is de aanwezige faalruimte-factor dus veel te groot. Er moet daarom een nauwkeuriger analyse plaats vinden. Zie hiervoor Hoofdstuk 10!

## Appendix III ALTERNATIEVE LAY-OUT STANDAARD BEOORDELINGSMETHODE

### III.1 Hoogwateralarmeringssysteem

SCORETABEL HOOGWATER-ALARMINGSSYSTEEM (HAS)			1 <sup>o</sup> SYST.		2 <sup>o</sup> SYSTEEM	
			JA	NEE		
<b>KANS OP FALEN METING (a)</b>						
(a1) Is het primair registratiesysteem aan: - peilstok op gebaseerd op een voorspelling? - automatische niveaumeting met 1x/mnd controle op de werking?	(a2) Is er een controle of backup voor het prim. systeem? ja nee a <sub>2</sub> = 1 a <sub>2</sub> = 0	(a3) Registratie min. 2x/d (getijregime) of min. 1x/d (rivierregime)? ja nee a <sub>2</sub> = 1 a <sub>2</sub> = 0	a <sub>1</sub> = 1 a <sub>1</sub> = 2 a <sub>1</sub> = 3	a <sub>1</sub> = ... a <sub>2</sub> = ... a <sub>3</sub> = ...	a <sub>1</sub> = ... a <sub>2</sub> = ... a <sub>3</sub> = ...	
Tussenscore falen meting: a = a <sub>1</sub> + a <sub>2</sub> + a <sub>3</sub>						
<b>KANS OP FALEN WAARSCHUWING (b)</b>						
(b1) Is er sprake van menselijke schakels (aantal = n) tussen waarnemer en mobilisatie? nee b <sub>1</sub> = 5 b <sub>2</sub> = 0 ja met terugmelding b <sub>1</sub> = 2 - n/2 zonder terugmelding b <sub>1</sub> = 2 - n	(b2) Is er een schriftelijke procedure voor meting en waarschuwing? - nee - ja - ja, met min. 1x/mnd een oefening	b <sub>1</sub> = 0 b <sub>1</sub> = 1 b <sub>1</sub> = 2	b <sub>1</sub> = ... b <sub>2</sub> = ...	b <sub>1</sub> = ... b <sub>2</sub> = ...	b <sub>1</sub> = ... b <sub>2</sub> = ...	
Tussenscore falen waarschuwing b = b <sub>1</sub> + b <sub>2</sub>						
Tussenscore falen waarschuwingssysteem: 1e waarschuwingssysteem c = min (a,b) 2e waarschuwingssysteem f = min (a,b) - 1						
Tussenscore falen waarschuwingssysteem: c = ... f = ... f = 0						
<b>WAARSCHUWING DOOR BEVOLKING BIJ FALEND ALARM</b>						
(g1) Waarschuwen door de bevolking bij falend alarm is niet op tijd g = 0	(g2) Waarschuwen door de bevolking bij falend alarm is mogelijk op tijd g = 0,5	(g3) Waarschuwen door de bevolking bij falend alarm is op tijd g = 1	g = ...	g = ...	g = ...	
EINDSCORE FALEN HOOGWATERWAARSCHUWINGSSYSTEEM: E <sub>1</sub> = c + f + g E <sub>1</sub> = ...						

## III.2 Mobilisatie

SCORETABEL MOBILISATIE (MOB)				
KANS OP FALEN MOBILISATIE AFHANKELIJK VAN PRIMAIRE BEMANNING (a)				
(a1)	(a2)	(a3)	(a4)	(a5)
Is er permanent een volledige bemanning aanwezig? ja nee $a_1 = 1$ $a_2 = 4$ $a_3 = 1$ $a_4 = 1$ $a_5 = 0$	Is er een schriftelijke up to date mobilisatieregeling? ja nee $a_2 = 0,5$ $a_3 = 0$	Is er een voor-waarschuwingssysteem? ja nee $a_3 = 0,5$ $a_4 = 0$	Is er een terug meldingssysteem voor de mobilisatie? ja nee $a_4 = 0,5$ $a_5 = 0$	Wordt de mobilisatie min. 1 x/j geoefend? ja nee $a_5 = 0,5$ $a_5 = 0$
Tussenscore falen primaire bemanning: $a = a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5$				
KANS OP FALEN MOBILISATIE AFHANKELIJK VAN SECUNDAIRE BEMANNING (b)				
(b1)	(b2)	(b3)	(b4)	(b5)
Is er een schriftelijk vastgestelde stand-by regeling? ja nee $b_1 = 1$	Is er een voor-waarschuwingssysteem voor de stand-by? ja nee $b_2 = 0,5$ $b_2 = 0$	Is het kunstwerk meestal bereikbaar? ja nee $b_3 = 2$	Indien het kunstwerk permanent volledig bemand is geldt (ongeacht vraag d1 t/m d3): $d = 4$	
Tussenscore falen secundaire bemanning: $b = b_1 + b_2$				
Tussenscore falen bemanning: $c = a + b$				
BEREIKBAARHEID (d)				
(d1)	(d2)	(d3)	(d4)	(d5)
Is het kunstwerk altijd bereikbaar? $d = 4$	Is het kunstwerk vrijwel altijd bereikbaar? $d = 3$	Is het kunstwerk meestal bereikbaar? $d = 2$	Indien het kunstwerk permanent volledig bemand is geldt (ongeacht vraag d1 t/m d3): $d = 4$	
EINDSCORE FALEN MOBILISATIE: $E_2 = \min(c, d)$				
$a_1 = \dots$ $a_2 = \dots$ $a_3 = \dots$ $a_4 = \dots$ $a_5 = \dots$				
$b_1 = \dots$ $b_2 = \dots$				
$b = \dots$				
$c = \dots$				
$d = \dots$				
$E_2 = \dots$				

## III.3 Bedieningsfout

SCORETABEL BEDIENINGSFOUT (BED)				
SLUITINGSPROCEDURE (a)				
(a1)	(a2)	(a3)	(a4)	(a5)
Is de bediening volledig automatisch? ja $a_1 = 4$ , (a2) t/m (d3) zijn niet van toepassing	Bevat de procedure een terugmeldingsplicht? ja nee $a_2 = 0$ $a_3 = 0$ $a_4 = 0,5$	Is de procedure bekend bij alle bij de sluiting betrokken personen? ja nee $a_4 = 0,5$ $a_5 = 0$	Wordt de sluitingsprocedure regelmatig geoefend? ja nee $a_5 = 0,5$ $a_5 = 0$	nee $a_1 = 1$ , ga verder bij (a2)
Tussenscore sluitingsprocedure: $a = a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5$				
HERSTELMOGELIJKHEDEN BIJ BEDIENINGSFOUT (b)				
(b1)	(b2)	(b3)	(b4)	(b5)
Bij bedieningsfouten zijn er mogelijkheden tot herstel $b = 1$	Bij bedieningsfouten zijn er soms mogelijkheden tot herstel $b = 0,5$	Bij bedieningsfouten zijn er geen mogelijkheden tot herstel $b = 0$		
TOEGANKELIJKHEID (c)				
(c1)	(c2)	(c3)	(c4)	(c5)
Zijn alle ruimten en toegangen verlicht met min 2x/j controle op werking? ja nee $c_1 = 1$	Wordt min 2x/j gecontroleerd of iedereen beschikt over benodigde sleutels? ja nee $c_2 = 1$ $c_3 = 0$	Zijn er communicatiemiddelen (portofoons) of zijn deze niet nodig? ja nee $c_3 = 0,5$ $c_3 = 0$		
Tussenscore toegankelijkheid $c = c_1 + c_2 + c_3$				
HERSTELMOGELIJKHEDEN BIJ TOEGANKELIJKHEID (d)				
(d1)	(d2)	(d3)	(d4)	(d5)
Bij onder c genoemde problemen zijn er mogelijkheden tot herstel $d = 1$	Bij onder c genoemde problemen zijn er geen mogelijkheden tot herstel $d = 0,5$	Bij onder c genoemde problemen zijn er geen mogelijkheden tot herstel $d = 0$		
EINDSCORE BEDIENINGSFOUT $E_3 = \min(a + b, c + d)$				
$a_1 = \dots$ $a_2 = \dots$ $a_3 = \dots$ $a_4 = \dots$ $a_5 = \dots$				
$b = \dots$				
$c_1 = \dots$ $c_2 = \dots$ $c_3 = \dots$				
$c = \dots$				
$d = \dots$				
$E_3 = \dots$				

## III.4 Technische storing

SCORETABEL TECHNISCHE STORING (STO)			1 <sup>e</sup> KEER- MIDDEL	2 <sup>e</sup> KEERMIDDEL JA	NEE
KANS OP FALEN PRIMAIR SYSTEEM AFHANKELIJK VAN TYPE KEERMIDDEL (a)					
(a1) Is het primaire keermiddel permanent? ja a <sub>1</sub> = 2 nee a <sub>1</sub> = 1	(a2) Wordt het prim. keermiddel min. 2x/j getoetst? ja a <sub>2</sub> = 1 nee a <sub>2</sub> = 0	(a3) Is er sprake van aanvaar- of aanrijdrisico van betekenis? ja a <sub>3</sub> = 1 nee a <sub>3</sub> = 0	a <sub>1</sub> = ... a <sub>2</sub> = ... a <sub>3</sub> = ...	a <sub>1</sub> = ... a <sub>2</sub> = ... a <sub>3</sub> = ...	
Tussenscore type keermiddel: a = a <sub>1</sub> + a <sub>2</sub> - a <sub>3</sub>					
VERMOGEN PRIMAIRE AANDRIJVINGSSYSTEEM (b)					
(b1) Electrisch met voeding via GEB en nood-aggregaat b = 4	(b2) Electrisch met voeding via GEB zonder nood-aggregaat b = 3	(b3) Handkracht b = 3		(b4) Diesel of benzinemotor b = 2	
Tussenscore falen primair systeem: c = min (a,b)					
RESERVE AANDRIJVINGSSYSTEEM (d)					
Er is een reserve aandrijvingssysteem: Beantwoord vraag (a) en (b) voor het reserve aandrijvingssysteem en bepaal d = min(a,b) - 1					
			a = ... b = ... d = ...		
BELEMMERINGEN (e en f)					
(e1) normale belemmeringen e = 2	(e2) meer dan normale belemmeringen e = 1	(f1) er is mogelijkheid tot ingrijpen f = 0,5		(f2) er is geen mogelijkheid tot ingrijpen f = 0	e = ... f = n.v.t.
Tussenscore falen keermiddel: 1e keermiddel g = min (c+d,e+f) 2e keermiddel h = min (c,e)-1					
			g = ...	h = ...	h = 0
EINDSCORE TECHNISCHE STORING: E <sub>4</sub> = g + h					
					E <sub>4</sub> = ...

## TOTSTANDKOMING

Zie Leidraad Waterkerende Kunstwerken en Bijzondere Constructies.

---

## VRIJWARING

---

Deze groene versie van deze leidraad is met de grootste zorgvuldigheid opgesteld en vastgesteld door de TAW. Naar de mening van de TAW is deze leidraad in de praktijk direct toepasbaar. Deze versie is "groen" genoemd om gebruikers in de gelegenheid te stellen en aan te moedigen commentaar te geven, met name op de praktische bruikbaarheid.

Opmerkingen en reacties van gebruikers worden door het werkorgaan van de TAW (de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van de Rijkswaterstaat, tel. 015-2699436) verzameld. Op basis van de verzamelde op- of aanmerkingen zal een definitieve versie van de leidraad worden opgesteld en vervalt het predikaat "groen".

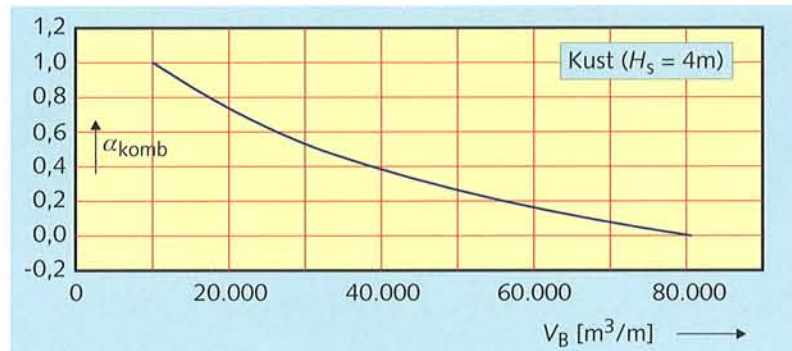
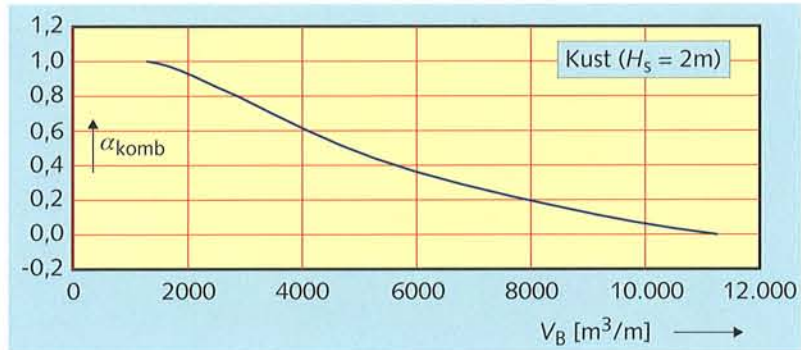


Fig. 5.2.3 Overslagfactor  $\alpha_{komb}$  als functie van de hoeveelheid instromend water,  $V_B$  voor kustregimes ( $H_s = 2m$  en  $H_s = 4m$ ).

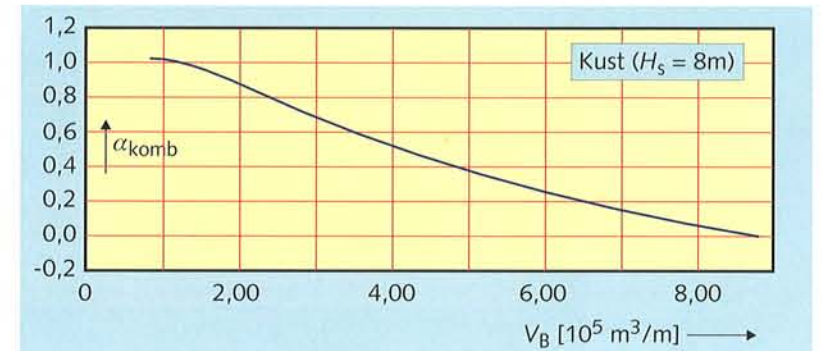
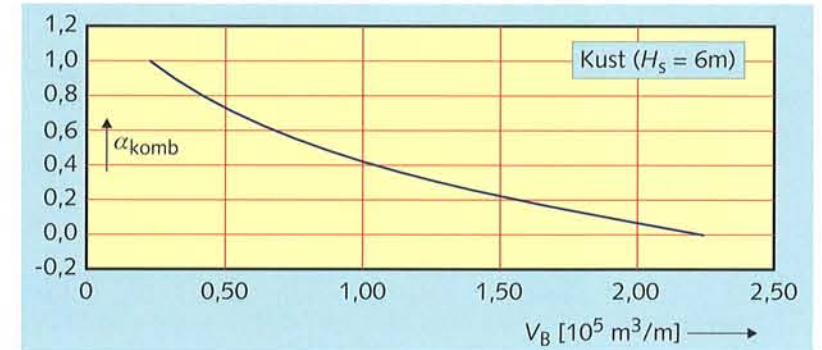


Fig. 5.2.4 Overslagfactor  $\alpha_{komb}$  als functie van de hoeveelheid instromend water,  $V_B$  voor kustregimes ( $H_s = 6m$  en  $H_s = 8m$ ).