

**stowa**

HULPMIDDELEN VOOR TOETSERS

# HISTORISCHE KUNSTWERKEN



RAPPORT

2006  
03

HULPMIDDELEN VOOR TOETSERS  
HISTORISCHE KUNSTWERKEN

RAPPORT

2006

03

ISBN 90.5773.325.0



stowa@stowa.nl www.stowa.nl  
TEL 030 232 11 99 FAX 030 232 17 66  
Arthur van Schendelstraat 816  
POSTBUS 8090 3503 RB UTRECHT

Publicaties van de STOWA kunt u bestellen bij:  
Hageman Fulfilment POSTBUS 1110, 3300 CC Zwijndrecht,  
TEL 078 623 05 00 FAX 078 623 05 48 EMAIL info@hageman.nl  
onder vermelding van ISBN of STOWA rapportnummer en een afleveradres.

# COLOFON

UITGAVE STOWA, UTRECHT, JANUARI 2006

AUTEURS

S.C. Schalkx, V.J.W. Hombergen

BIJDRAGE

R.J. Nortier, P. de Ruiter, R. Houben

PROJECTLEIDER

V. Hombergen

PROJECTMANAGER

T. van Ellen

COMMISSIE

Ruud Bosters (RWS Dienst Weg- en Waterbouwkunde)  
Etienne Faassen (Hoogheemraadschap van Rijnland)  
Ruud Joosten (Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier)  
Hans Knotter (Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden)  
Paul Neijenhuis (Waterschap Vallei & Eem)  
Marc Rademaker (Waterschap Rivierenland)  
Harry Schelfhout (Provincie Zuid-Holland)  
Ludolph Wentholt (Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer)  
Carlo Zimmerman (Bouwdienst Rijkswaterstaat)

MET MEDEWERKING VAN

Harry van der Graaf (Bouwdienst Rijkswaterstaat)

DRUK

Kruyt Grafisch Advies Bureau

STOWA

rapportnummer 2006-03  
ISBN 90.5773.325.0

# TEN GELEIDE

Het Waterkeringonderzoek Historische Kunstwerken is door DHV uitgevoerd in opdracht van de Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA). Aansturing, toetsing en bewaking heeft plaatsgevonden vanuit een begeleidingscommissie, waarin leden uit verschillende belanghebbende organisaties zitting hebben gehad (zie hoofdstuk 8).

Het project is uitgevoerd in een viertal fasen:

1. *Inventarisatiefase (begin 2003)*

In de inventarisatiefase is, zoals de naam al aangeeft, het project nader gedefinieerd, heeft een inventarisatie plaatsgevonden naar de problemen die worden ondervonden bij het toetsen van kunstwerken en zijn voorstellen gedaan voor de te ontwikkelen hulpmiddelen.

2. *Tussenfase Inventarisatiefase (eind 2003)*

Tijdens de inventarisatiefase is voorgesteld de verdere uitwerking van de hulpmiddelen te ondersteunen met concrete voorbeelden uit de praktijk. Hiervoor is een selectie gemaakt van waterkerende kunstwerken waar de verdere uitwerking aan getoetst kon worden.

3. *Tussenfase onderzoeksfase (begin 2004)*

Naar aanleiding van geconstateerde kennis- en informatieleemten in de toetspraktijk en met name op het gebied van funderingen, piping en stabiliteit, hadden GeoDelft, Fugro, provincie Zuid-Holland en Rijkswaterstaat Dienst Weg en Waterbouwkunde de werkgroep "Toetsing Onderbouw Kunstwerken" gevormd die zich vooral bezig zou gaan houden met de geotechnische aspecten. STOWA en DWW hadden begin 2004 het voornemen zowel het Waterkeringonderzoek Historische Kunstwerken en het project Toetsing Onderbouw Kunstwerken onder een gezamenlijke STOWA-DWW project uit te voeren en het resultaat in een technisch rapport te presenteren. In deze fase heeft een herdefiniëring plaatsgevonden van het project zodat kon worden afgestemd met de studies van Rijkswaterstaat.

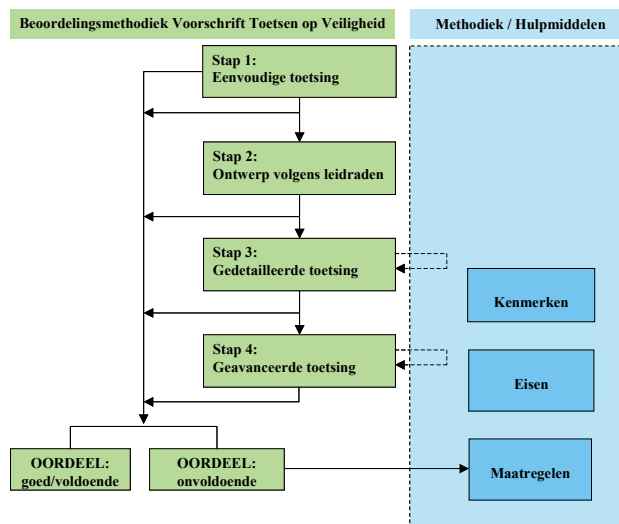
4. *Onderzoeksfase (eind 2004 - 2005)*

Na een presentatie van het nieuwe onderzoeksvoorstel voor het Waterkeringsonderzoek Historische Kunstwerken aan de programmacommissie van STOWA is groen licht gegeven voor de verdere uitwerking. Het voorliggende rapport is hiervan het eindresultaat. Het project Toetsing Onderbouw Kunstwerken is om budgettaire en organisatorische redenen nog niet gestart. In dit STOWA-onderzoek heeft onderzoek plaatsgevonden naar de verwachte kenmerken van de onderdelen van kunstwerken en de verwachte waterstaatkundige kwaliteit van de onderdelen. Omdat bij het toetsen van kunstwerken het mechanisme piping een van de meest voorkomende knelpunten is, is hier ook in dit STOWA-onderzoek aandacht aan besteed (kwelschermen en funderingen). De extra verdiepingsslag op dit mechanisme en verificatie van de hulpmiddelen moest vooral komen uit het DWW-onderzoek Toetsing Onderbouw Kunstwerken door middel van theoretisch onderzoek (rekenregels en parameters) en door veldonderzoek (meetprogramma). Het verdient aanbeveling bij het gebruik van de in het kader van dit STOWA-onderzoek ontwikkelde hulpmiddelen, van te voren na te gaan of er inmiddels voortschrijdend inzicht is op het gebied van de toetsing van kunstwerken op het mechanisme piping.

# SAMENVATTING

Bij de vijfjaarlijkse toetsing van primaire waterkeringen, waaronder ook de toetsing van waterkerende kunstwerken en bijzondere waterkerende constructies is het vaak lastig om inzicht te krijgen in de aanwezigheid en staat van de constructieonderdelen die zich onder en naast de kunstwerken bevinden. Vooral van historische kunstwerken zijn vaak de gegevens voor de toetsing van de geotechnische en bouwkundige componenten niet meer te achterhalen.

Vanwege de vele vragen uit het werkveld waterkeringen is in 2003 door de Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer het “Waterkeringonderzoek Historische Kunstwerken” gestart. Het einddoel van het project is een algemene methodiek voor de beoordeling van de veiligheid van (historische) waterkerende kunstwerken. Het betreft hier kunstwerken waarvan door gebrek aan gegevens, onzekerheden in de gegevens of toepassing van de bestaande toetsmethodieken en criteria, niet tot een voldoende gefundeerd eindoordeel gekomen kan worden.



Het project heeft geresulteerd in een technisch rapport met een drietal hulpmiddelen ter ondersteuning van de toetsing volgens de VTV:

- Kenmerken: Een hulpmiddel voor het vaststellen van gemeenschappelijke kenmerken en waterstaatkundige kwaliteit van waterkerende kunstwerken om lacunes in de beschikbare gegevens met betrekking tot de constructieopbouw te kunnen vullen en onzekerheden te verkleinen.
- Eisen: Een hulpmiddel om op basis van de opgedane ervaringen met de dijkvak benadering en dijkringbenadering te komen tot een specifiek voor historische kunstwerken aangepaste, praktische handreikingen voor een risicoanalyse als onderdeel van een geavanceerde toets (herverdeling van faalkansen).
- Maatregelen: Een snelle en eenvoudige afwegingsmethode tussen (duur) nader onderzoek en relatief goedkope ingrepen ter versterking van de constructie.

Naar aanleiding van dit onderzoek worden nog een aantal aanbevelingen gedaan:

- De database met kenmerken die gebruikt is voor het ontwikkelen van de hulpmiddelen, samen met dit rapport en een handleiding beschikbaar stellen voor de toetsers onder een gemeenschappelijke waterkeringen portaal.
- De ontwikkelingen op het gebied van de veiligheidsbenadering te blijven volgen en als de tijd daar rijp voor is, de hier gepresenteerde alternatieve toetsmethode verder uitwerken.
- De ontwikkelde hulpmiddelen uitgebreid en onafhankelijk laten toetsen.
- Een extra verdiepingsslag en verificatie van de hulpmiddelen door middel van theoretisch onderzoek (rekenregels en parameters) en door veldonderzoek (meetprogramma).

# DE STOWA IN HET KORT

De Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer, kortweg STOWA, is het onderzoeksplatform van Nederlandse waterbeheerders. Deelnemers zijn alle beheerders van grondwater en oppervlaktewater in landelijk en stedelijk gebied, beheerders van installaties voor de zuivering van huishoudelijk afvalwater en beheerders van waterkeringen. Dat zijn alle waterschappen, hoogheemraadschappen en zuiveringsschappen en de provincies.

De waterbeheerders gebruiken de STOWA voor het realiseren van toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk juridisch en sociaal-wetenschappelijk onderzoek dat voor hen van gemeenschappelijk belang is. Onderzoeksprogramma's komen tot stand op basis van inventarisaties van de behoefte bij de deelnemers. Onderzoekssuggesties van derden, zoals kennisinstituten en adviesbureaus, zijn van harte welkom. Deze suggesties toetst de STOWA aan de behoeften van de deelnemers.

De STOWA verricht zelf geen onderzoek, maar laat dit uitvoeren door gespecialiseerde instanties. De onderzoeken worden begeleid door begeleidingscommissies. Deze zijn samengesteld uit medewerkers van de deelnemers, zonodig aangevuld met andere deskundigen.

Het geld voor onderzoek, ontwikkeling, informatie en diensten brengen de deelnemers samen bijeen. Momenteel bedraagt het jaarlijkse budget zo'n zes miljoen euro.

U kunt de STOWA bereiken op telefoonnummer: 030 -2321199.

Ons adres luidt: STOWA, Postbus 8090, 3503 RB Utrecht.

Email: [stowa@stowa.nl](mailto:stowa@stowa.nl).

Website: [www.stowa.nl](http://www.stowa.nl)

# HISTORISCHE KUNSTWERKEN

## INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	STOWA IN HET KORT	
<b>1</b>	<b>INLEIDING</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>PROBLEMATIEK MET BETREKKING TOT TOETSEN</b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	Hoogte [HT]	3
<b>2.2</b>	Sterkte en Stabiliteit [ST]	3
2.2.1	Stabiliteit constructie en grondlichaam (STCG)	3
2.2.2	Sterkte van de waterkerende constructieonderdelen (STCO)	4
2.2.3	Piping en Heave (STPH)	4
<b>2.3</b>	Betrouwbaarheid Sluiting [BS]	5
<b>3</b>	<b>HULPMIDDEL 'KENMERKEN'</b>	<b>6</b>
<b>3.1</b>	Inleiding	6
<b>3.2</b>	Gebruikte gegevens	6
3.2.1	Database VNK	6
<b>3.3</b>	Plaats van het hulpmiddel 'Kenmerken' in de VTV toetsing	7
<b>3.4</b>	Toegepaste materialen en afmetingen bij kunstwerken	8
3.4.1	Toegepaste materialen in de loop van de tijd	8
3.4.2	Gangbare restlevensduren	8
3.4.3	Staal	9
3.4.4	Metselwerk	10
3.4.5	Beton	15
3.4.6	Hout algemeen	16



<b>3.5</b>	Afmetingen en kwaliteit van de onderdelen	17
3.5.1	Funderingen	17
3.5.2	Kwelschermen	21
<b>3.6</b>	Stroomschema's	23
3.6.1	Inleiding	23
3.6.2	Uitleg ten behoeve van het gebruik van de stroomschema's	24
<b>3.7</b>	Voorbeeld	25
<b>4</b>	<b>HULPMIDDEL "EISEN"</b>	27
<b>4.1</b>	Inleiding	27
<b>4.2</b>	De huidige manier van toetsen	27
4.2.1	Dijkvakbenadering	27
4.2.2	Huidige manier van toetsen	28
4.2.3	Beoordelingsniveaus	28
<b>4.3</b>	Handvatten voor een geavanceerde toets volgens dijkvakbenadering VTV	29
4.3.1	Kerende Hoogte	30
4.3.2	Betrouwbaarheid afsluitmiddel	30
4.3.3	Sterkte en Stabiliteit	32
<b>4.4</b>	Handvatten voor een geavanceerd toetsen volgens dijkringbenadering	33
4.4.1	Dijkringbenadering	33
4.4.2	Overloop en overslag	35
4.4.3	Falen dijkring overige mechanismen	36
4.4.4	Verdelen faalkans(budget) over onderdelen	37
4.4.5	Bepalen Neq als representatieve waarde voor het aantal kunstwerken in de dijkring	38
4.4.6	Bepalen taakstellende faalkans voor het (historische) kunstwerk	41
<b>4.5</b>	Voorbeeld	42
<b>5</b>	<b>HULPMIDDEL 'MAATREGELEN'</b>	45
<b>5.1</b>	Inleiding	45
<b>5.2</b>	Afwegingsmethode	45
<b>5.3</b>	Toetsspoor stabiliteit constructie en grond (STCG)	47
5.3.1	Onbekenden met betrekking tot het paal draagvermogen van een houten paalfundering	47
5.3.2	Onbekenden met betrekking tot de stabiliteit van wandconstructies	49
5.3.3	Onbekenden met betrekking tot de sterkte van gewelfconstructies van metselwerk	51
<b>5.4</b>	Toetsspoor Piping en Heave (STPH)	52
5.4.1	Onbekenden met betrekking tot de kwelweglengte	52
<b>6</b>	<b>AANBEVELINGEN</b>	55
<b>6.1</b>	Database	55
<b>6.2</b>	Ontwikkelingen op het gebied van de veiligheidsbenadering	55
<b>6.3</b>	Verdere verfijning hulpmiddelen	55
<b>6.4</b>	Project Toetsing Onderbouw Kunstwerken	56
<b>7</b>	<b>LITERATUURLIJST</b>	57
	<b>BIJLAGEN</b>	
1	Toegepaste materialen in de tijd	
2	Stroomschema's	
3	Systeemfaalkans	

# 1

## INLEIDING

De Wet op de Waterkering schrijft voor dat de beheerder zijn waterkeringen periodiek (iedere 5 jaar) beoordeeld op veiligheid tegen overstromen. De Minister dient hiervoor het instrumentarium ter beschikking te stellen: enerzijds de Hydraulische Randvoorwaarden en anderzijds het Voorschrift Toetsen op Veiligheid (VTV).

Bij deze toetsing moeten ook de waterkerende kunstwerken en bijzondere waterkerende constructies in een waterkering worden beschouwd. Ervaring leert dat het lastig is om inzicht te krijgen in de aanwezigheid en staat van de constructieonderdelen die zich onder en naast de kunstwerken bevinden. Vooral van historische kunstwerken zijn vaak de gegevens voor de toetsing van de geotechnische en bouwkundige componenten (bijvoorbeeld de fundering en onder- en achterloopsheidschermen) niet meer te achterhalen.

Vanwege de vele vragen uit het werkveld waterkeringen heeft DHV Ruimte en Mobiliteit BV in opdracht van de Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA) het “Waterkeringonderzoek Historische Kunstwerken” uitgevoerd. Het einddoel van het project is een algemene methodiek voor de beoordeling van de veiligheid van (historische) waterkerende kunstwerken. Het betreft hier kunstwerken waarvan door gebrek aan gegevens, onzekerheden in de gegevens of toepassing van de bestaande toetsmethodieken en criteria, niet tot een voldoende gefundeerd eindoordeel gekomen kan worden.

Het project, waar dit rapport het eindresultaat van is, is tussen begin 2003 en eind 2005, in een aantal fasen uitgevoerd (zie “ten geleide”). Aansturing, toetsing en bewaking van de kwaliteit hebben plaatsgevonden vanuit een begeleidingscommissie (zie hoofdstuk 8).

Het project heeft geresulteerd in een drietal hulpmiddelen ter ondersteuning bij de toetsing volgens het VTV (zie Afbeelding 1).

### *Kenmerken:*

Een hulpmiddel voor het vaststellen van gemeenschappelijke kenmerken en waterstaatkundige kwaliteit van waterkerende kunstwerken om lacunes in de beschikbare gegevens met betrekking tot de constructieopbouw te kunnen vullen en onzekerheden te verkleinen.

### *Eisen:*

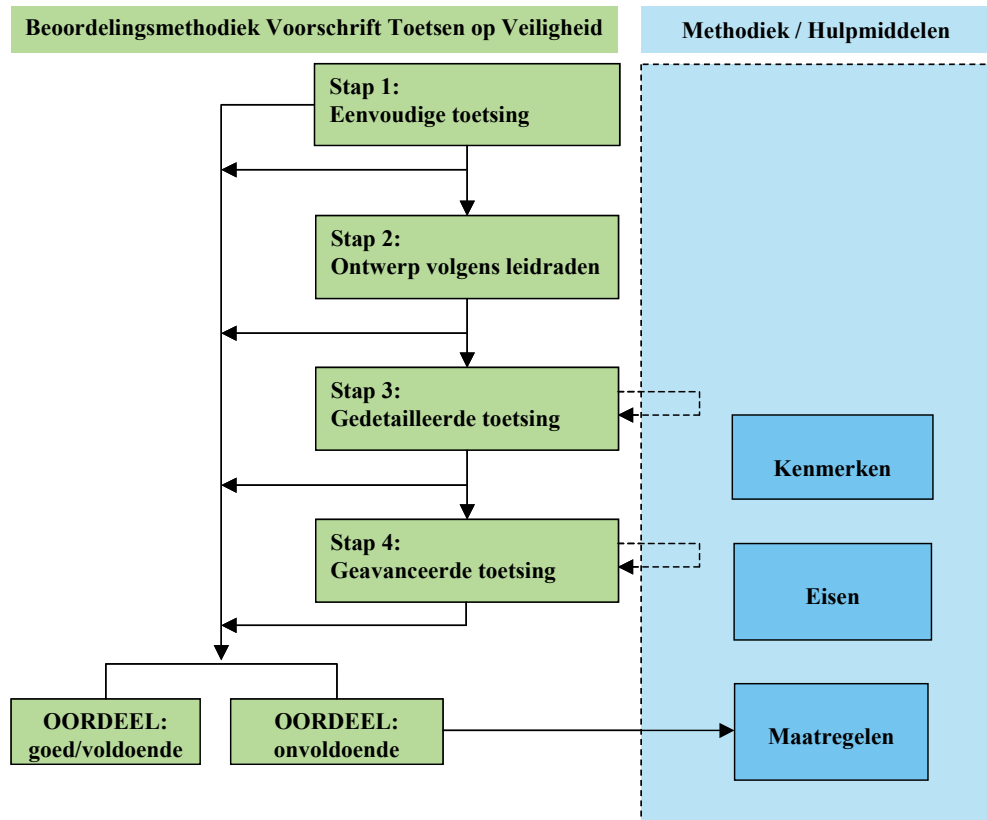
Een hulpmiddel om op basis van de opgedane ervaringen met de dijkringbenadering en dijkvakbenadering te komen tot een specifiek voor historische kunstwerken aangepaste, praktische handreikingen voor een risicoanalyse als onderdeel van een geavanceerde toets (herverdeling van faalkansen).

### *Maatregelen:*

Een snelle en eenvoudige afwegingsmethode tussen (duur) nader onderzoek en relatief goedkope ingrepen ter versterking van de constructie.

“Kenmerken” en “Maatregelen” zijn objectgebonden hulpmiddelen en kunnen op ieder gewenst moment van de toetsing worden toegepast. Het hulpmiddel kenmerken kan gebruikt worden om onbekenden in te vullen, met ‘Maatregelen’ kan inzicht verkregen worden in het geval dat duidelijk wordt dat verder adviseren niet opweegt tegen het treffen van (robuuste) maatregelen om het kunstwerk te laten voldoen. Het hulpmiddel ‘Eisen’ zal naar verwachting alleen in bijzondere situaties worden toegepast tijdens een geavanceerde toets waar alles uit de kast gehaald moet worden om tot een gefundeerd eindoordeel te komen. Het hulpmiddel geeft een aantal suggesties om te komen tot herverdeling van de faalkansen afgeleid van de norm zoals die is vastgelegd in de Wet op de Waterkering. Voorafgaand aan het toepassen van dit hulpmiddel zal altijd eerst overeenstemming moeten zijn met het bevoegd gezag over de aanpak.

AFBEELDING 1 PLAATS VAN HET HULPMIDDEL ALS AANVULLING OP VTV



Benadrukt wordt dat de hulpmiddelen niet voor alle situaties een oplossing zullen bieden. Waterkerende kunstwerken zijn bijna allemaal unieke bouwwerken, vanwege hun functies, afmetingen, uitvoering, ligging, omstandigheden en historie.

# 2

## PROBLEMATIEK MET BETREKKING TOT TOETSEN

De beoordeling van een waterkerend kunstwerk geschiedt volgens de volgende beoordelingssporen:

- Hoogte [HT]
- Sterkte en Stabiliteit [ST]
  - Stabiliteit van de constructie en het grondlichaam (STCG)
  - Sterkte van de constructieonderdelen (STCO)
  - Piping en Heave (STPH)
- Betrouwbaarheid Sluiting [BS]

Voordat een toetsing volgens bovenstaande sporen uitgevoerd kan worden vindt er een gegevensinventarisatie plaats. In veel gevallen zijn de meeste gegevens bekend of op te nemen in het veld, waarna een toetsing uitgevoerd kan worden. Echter bij een deel van de kunstwerken, voornamelijk historische kunstwerken, zijn vaak niet alle gegevens aanwezig en kan de uitvoering van de toetsing niet plaatsvinden. Elk toetsspoor heeft specifieke aspecten, waarvan is gebleken dat op dit gebied vaak de toetsing van een kunstwerk vastloopt.

### 2.1 HOOGTE [HT]

Met betrekking tot de hoogte toets kunnen alle benodigde gegevens in het veld opgenomen worden. Hiervoor is geen extra hulpmiddel nodig.

### 2.2 STERKTE EN STABILITEIT [ST]

#### 2.2.1 STABILITEIT CONSTRUCTIE EN GRONDLICHAAM (STCG)

Een waterkerend object is over het algemeen een onderbreking van een dijklichaam. Bij de toetsing op 'STCG' wordt er integraal gekeken naar de stabiliteit van de constructie en het aansluitende grondlichaam.

Bij een historisch kunstwerk is veelal niet bekend op welke belastingen de constructie is ontworpen. Het kwantificeren van de sterkte van de constructie vereist in dergelijke gevallen een constructieve berekening, al dan niet in combinatie met een kwalitatief oordeel om de sterkte inzichtelijk te maken.

Een berekening vereist inzicht in de opbouw en het gedrag van de verschillende constructieonderdelen, hetgeen bij oudere kunstwerken vaak ontbreekt.

**BOVENBOUW****Stabiliteit bouwmaterialen**

- Stabiliteit gemetselde wanden en gewelven  
*Deze is afhankelijk van:*
  - *Soortelijk gewicht metselwerk*
  - *Type metselmortel*
  - *Type/vorm metselsteen*
  - *Druk- en treksterkte*
  - *Wanddiktes*
  - *Waterdichtheid*
  - *Evt verankering*
- Stabiliteit wanden van beton  
*Deze is afhankelijk van:*
  - *Betondruksterkte*
  - *Wapening*
  - *Wanddikte*
  - *Constructietype*

**ONDERBOUW****Stabiliteit Fundering**

- Paalfundering  
*Deze is afhankelijk van:*
  - *Materiaalsoort*
  - *Paallengte*
  - *Paaldiameter*
  - *Onderling afstand*
  - *Paaldraagvermogen*
- Fundering op staal  
*Deze is afhankelijk van:*
  - *Breedte funderingsstrook*
  - *Optredende gronddruk*
  - *Opbouw/vorm gewichtsconstructie*

Met behulp van het hulpmiddel 'Kenmerken' kan een inschatting worden gemaakt voor deze onbekenden om daarna een toets uit te kunnen voeren. Dit hulpmiddel wordt in hoofdstuk 3 uitgewerkt.

**2.2.2 STERKTE VAN DE WATERKERENDE CONSTRUCTIEONDERDELEN (STCO)**

Het toetspooor STCO omvat de toetsing van de sterkte van de waterkerende onderdelen, dit zijn bijvoorbeeld voor een uitwateringssluis de terugslagkleppen en schuiven en voor een sluis de sluisdeuren.

De beoordeling van de sterkte van constructieonderdelen begint met het selecteren van de kritieke onderdelen en de maatgevende belastingen en belastingcombinaties daarop. In eerste instantie kan onderscheid worden gemaakt tussen afsluitmiddelen en overige onderdelen van de constructie. De overige te toetsen onderdelen zijn in de regel betonconstructies of oudere gemetselde constructies.

Veel van de benodigde gegevens voor de toets op 'sterkte van de constructieonderdelen' kunnen in het veld opgenomen worden al dan niet aangevuld met een beheerdersoordeel of een (duik)inspectie. Derhalve is voor dit toetspooor geen specifiek hulpmiddel nodig.

**2.2.3 PIPING EN HEAVE (STPH)**

Het toetspooor STPH omvat een toetsing van de weerstand die een constructie heeft ten opzichte van piping en heave. Piping is het verschijnsel dat onder een waterkering een holle pijpvormige ruimte ontstaat doordat het erosieproces van een zandmeevoerende wel niet stopt. Heave is een situatie waarbij verticale korrelspanningen in een zandlaag wegvallen onder invloed van een verticale grondwaterstroming. Dit wordt ook wel de vorming van drijfzand genoemd.

Een eenvoudige toetsing op Piping en Heave is in veel gevallen niet mogelijk of erg lastig uit te voeren omdat er te veel onbekenden zijn om te kunnen voldoen aan genoemde criteria in het VTV. Als een eenvoudige toetsing niet uitvoerbaar is en de ontwerpvoorwaarden onbekend zijn, moet een gedetailleerde toetsing uitgevoerd worden.

De basis van de gedetailleerde toetsing is een analyse van alle mogelijke kwelwegen onder en langs het kunstwerk. De gedetailleerde toetsing op piping wordt uitgevoerd met behulp van de formule van Lane. De onbekenden voor het uitvoeren van deze toetsing zijn:

- Kwelweglengte (horizontaal en verticaal)

*Deze is afhankelijk van:*

- *Funderingstype*
- *Materiaaltype kwelscherm*
- *Planklengte*
- *Plankdikte (evt.)*
- *Schermlengte*

- Kenmerken grond

Er is een hulpmiddel ontwikkeld dat handvatten biedt om een inschatting te doen voor deze onbekenden om daarna een toets uit te kunnen voeren. Dit hulpmiddel 'Kenmerken' wordt in hoofdstuk 3 uitgewerkt.

### 2.3 BETROUWBAARHEID SLUITING [BS]

Voor de toetsing op betrouwbaarheid sluiting is informatie nodig van de bediening van het afsluitmiddel. Deze informatie is in de meeste gevallen beschikbaar vanuit calamiteitenplannen of sluitingsprotocollen van de beheerder.

Opgemerkt moet worden dat dit beoordelingspoot theoretisch vaak een dominante rol speelt in de beoordeling van de veiligheid van het kunstwerk, terwijl het in de praktijk mee kan vallen. Ook als een beheerder de sluitingsprocedures goed georganiseerd heeft, wordt dit doorgaans met de huidige toetsmethode slecht gewaardeerd. Dit gebeurt bijvoorbeeld bij:

- Handbediende kunstwerken,
- Verouderde aandrijvingen; stalen schuiven met loopwielen,
- Risicovolle bediening; bijvoorbeeld het sluiten van stormdeuren door een sleepboot die ingehuurd moet worden en waarvan er maar enkele beschikbaar zijn,
- Onvoldoende vastgelegde calamiteitenprocedure.

Met behulp van het hulpmiddel 'Eisen' wordt handvatten geboden voor herverdeling van de faalkansen over de verschillende bezwijkmechanismen c.q. toetssporen, waardoor de toegekende faalkansen voor de betrouwbaarheid van de sluiting onderbouwd kan worden bijgesteld ten opzichte van de toegekende faalkansen voor de andere sporen..

# 3

## HULPMIDDEL 'KENMERKEN'

### 3.1 INLEIDING

Het hulpmiddel 'Kenmerken' biedt, met behulp van stroomschema's, ondersteuning om lacunes in de beschikbare gegevens van de constructieopbouw van een kunstwerk aan te vullen, op basis van gemeenschappelijke kenmerken van een bepaalde groep kunstwerken. Daarnaast is het hulpmiddel uitgebreid met gegevens om de onzekerheden in de onderhoudsstaat of de actuele sterkte van onderdelen van het kunstwerk te verkleinen. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de huidige kennis en ervaring op het gebied van de kwaliteitsafname van de verschillende bouwmaterialen en onderdelen in de tijd.

In paragraaf 3.2 wordt nader ingegaan op de gebruikte gegevens, paragraaf 3.3 licht het toepassingsgebied voor het hulpmiddel 'Kenmerken' toe. In paragraaf 3.4 volgt een opsomming van materiaalsoorten, afmetingen en de toepassing ervan in constructies, paragraaf 3.5 gaat in op de verschillende constructieonderdelen en de daarbij behorende specifieke materiaalsoorten en kenmerken. Paragraaf 3.6 omvat de daadwerkelijke stroomschema's ter ondersteuning van de toetsers.

### 3.2 GEBRUIKTE GEGEVENS

#### 3.2.1 DATABASE VNK

Als basis voor het opstellen van de hulpmiddelen is de landelijke database<sup>1</sup> van de VNK (Veiligheid Nederland in Kaart) gebruikt. Deze database omvat de basisgegevens van de waterkerende kunstwerken in primaire waterkeringen welke ingevoerd zijn door de beheerder. Echter voor de toetsing van kunstwerken zijn naast deze basisgegevens meer (gedetailleerdere) gegevens van belang. De database is hiervoor uitgebreid en aangevuld met behulp van een archiefonderzoek bij het projectbureau van VNK.

Hieronder is een overzicht weergegeven van de kunstwerksoorten en de bekende bouwjaren die zijn opgenomen in de database van dit onderzoek. In totaal zijn 607 kunstwerken geanalyseerd. Voor de gehele database geldt dat niet elk kunstwerk volledig in de database kon worden opgenomen omdat daarvan de gegevens onvolledig waren.

*Een centrale database op het gebied van waterkerende kunstwerken wordt aanbevolen. Door deze verder uit te breiden met de voor de hulpmiddelen relevante informatie wordt de kwaliteit van de hulpmiddelen, de trefzekerheid en betrouwbaarheid van de benodigde informatie vergroot.*

<sup>1</sup> Van de database zijn alleen de gegevens van de waterkerende objecten gebruikt. De gegevens van de tunnels, langsconstructies en pijpleidingen zijn binnen dit project buiten beschouwing gelaten.

Kunstwerksoort	Totaal	Onbekend	tot 1900	1900-1930	1930-1960	1960-1990	1990 e.l.
Coupure	127	40	6	20	6	23	32
Gemaal	191	64	3	12	23	68	21
Inlaatsluis	69	32	4	1	8	17	7
Keersluis	32	14	7	1	3	5	2
Schutsluis	71	25	15	4	12	15	0
Uitwateringssluis	117	58	5	2	9	23	20
Totaal	607	232	40	40	61	152	82

### 3.3 PLAATS VAN HET HULPMIDDEL 'KENMERKEN' IN DE VTV TOETSING

Toetsing van een waterkerend kunstwerk op hoogte (HT) en op stabiliteit (STCO, STCG en STPH) gaat aan de hand van 4 stappen welke inzichtelijk gemaakt zijn in figuur 7 - 4.1 'Algemeen beoordelingsschema voor waterkerende kunstwerken' uit het Voorschrift toetsen op Veiligheid. Het hulpmiddel 'Kenmerken' is voornamelijk een aanvulling bij de gedetailleerde en de geavanceerde toetsing.

#### *Stap 1 – Eenvoudige toetsing*

Hierbij kan bijvoorbeeld gekeken worden hoe de ontwerp belastingen zich verhouden tot de optredende belastingen. Bij sommige kunstwerken is de hoogst gekeerde waterstand gelijk of hoger dan het toetspeil. Als het kunstwerk deze waterstand zonder problemen heeft kunnen keren, kan geconcludeerd worden op basis van 'bewezen sterkte' dat de constructie die belastingen kan opnemen. Voor (historische) kunstwerken ontbreken deze gegevens vrijwel altijd en volgt stap 2.

#### *Stap 2 – Ontworpen volgens vigerende leidraden of gelijkwaardig en de uitgangspunten zijn ongewijzigd.*

Dit geldt alleen voor 'recent' gebouwde objecten waarbij geldt dat de ontwerpgegevens beschikbaar moeten zijn. Voor (historische) kunstwerken ontbreken deze gegevens vrijwel altijd en volgt stap 3.

#### *Stap 3 - Gedetailleerde toetsing*

In deze stap wordt herberekening uitgevoerd conform de rekenregels en methodes in de vigerende leidraden en normen. Hiervoor is input van constructiegegevens nodig. In veel gevallen zijn deze gegevens niet volledig of ontbreken deze. Het hulpmiddel 'Kenmerken' biedt informatie om een nadere invulling te geven aan de ontbrekende gegevens.

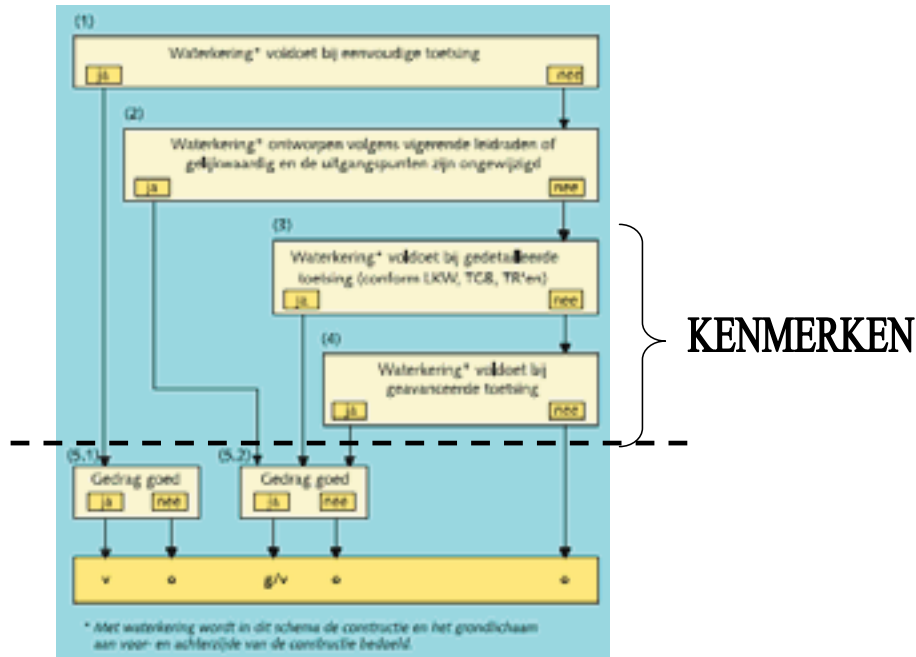
#### *Stap 4 – Geavanceerde toetsing*

Bij de geavanceerde toetsing wordt gebruik gemaakt van alle verzamelde gegevens in de stappen 1 tot en met 3. Op basis van deze gegevens wordt een risicoinventarisatie gemaakt van de tot dit punt 'onvoldoende' getoetste onderdelen van de constructie.

Hierbij kan gebruik gemaakt van hulpmiddel 'Kenmerken' en het hulpmiddel 'Eisen'.



AFBEELDING 2 PLAATS VAN HET HULPMIDDEL 'KENMERKEN' TEN OPZICHTE VAN HET VTV



### 3.4 TOEGEPASTE MATERIELEN EN AFMETINGEN BIJ KUNSTWERKEN

Deze paragraaf gaat in op de diverse materiaalsoorten toegepast bij (historische) kunstwerken en de globale afmetingen hiervan. In paragraaf 3.5 wordt meer in detail ingegaan op de materiaalsoorten per onderdeel van de (historische) kunstwerken.

In deze paragrafen is in het bijzonder gebruik gemaakt van het boek 'Instandhouding en waardering van historische Sluizen' van dhr J. Arends.

#### 3.4.1 TOEGEPASTE MATERIELEN IN DE LOOP VAN DE TIJD

Om een beeld te kunnen vormen van de leeftijd van een constructie is in bijlage 1 een tijdlijn van toegepaste materialen en kenmerkende bouwmethoden toegevoegd.

#### 3.4.2 GANGBARE RESTLEVENSDUREN

Per materiaalsoort kunnen als vuistregel de volgende restlevensduren aangehouden worden. Dit zijn theoretische waarden onder normale omstandigheden, zonder invloeden van buiten af (bijvoorbeeld mechanische schade, overbelasting, aantasting door zuren).

Materiaal	levensduur
Beton	80
Staal	50
Hout	25
Hout (Hardhout)	40
Hout (Onder water)	Meer dan 100 jaar
Metselwerk	60

### 3.4.3 STAAL

#### TOEGEPASTE MATERIALEN EN AFMETINGEN

In de toepassing van staal in de waterbouw kan het volgende onderscheid gemaakt worden:

- Stalen damwanden  
Stalen damwanden worden al langer toegepast. De meest voorkomende staalkwaliteit is ST52 voor vooroorlogse bouwwerken en Fe510 voor naoorlogse. Uit de literatuur is bekend dat in 1947 binnen Rijkswaterstaat het gebruikelijk was om damwanden met teer te conserveren. De periode vanaf wanneer en tot wanneer dit gebruikelijk was is vooralsnog onbekend.
- Stalen buispalen als fundering  
Het toepassen van stalen buispalen als funderingspalen is pas vanaf de jaren '80. Hiervoor is in de meeste gevallen de staalkwaliteit FE510 toegepast.
- Wapening

Voor de wapening wordt verwezen naar hoofdstuk 'Beton'

In de periode tussen 1869 tot ongeveer 1940 is het klinken van stalen onderdelen veel toegepast. Vanaf 1930 is het elektrisch lassen in opkomst gekomen en het is tot op heden de meest voorkomende manier voor het uitvoeren van stalen verbindingen.

*Berekening van de lengte van een damwand uit 1947:*

*'Ongeacht de berekening is het gewenscht den damwand als gesloten formatie te doen reiken tot  $h/0,9$  m onder den ontgraven sluisbodem. H is hierin het te keren verval en 0,9 het soortelijk gewicht van de grond onder water. Dit is ter voorkoming van wellen onder de damwand door.'*

#### TE VERWACHTEN ONDERHOUDSSTAAT

De kwaliteit / onderhoudsstaat van staal kan aangetast worden door verschillende corrosiemechanismen zoals: uniforme corrosie, erosie corrosie, zwerfstroomcorrosie en microbiologische corrosie.

Met betrekking tot de uniforme corrosie kan het verloop van deze corrosie enigszins voorspeld worden.

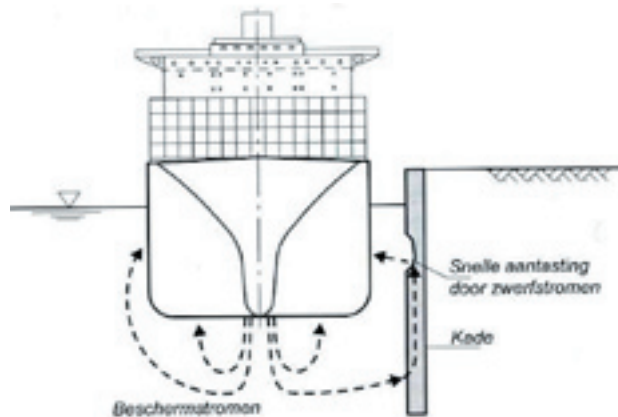
AFBEELDING 3 GEMIDDELDE CORROSIESNELHEID (HANDBOEK KADEMUREN)



Naast deze afname kunnen bepaalde factoren nog extra invloed hebben, dit kunnen zowel vertragende als versnellende factoren zijn. Enkele voorbeelden van deze factoren zijn:

- zoet/zout watertong (vooral bij sluizen).
- vervuild / verontreinigd milieu.
- biologische aangroei (ontstaan van  $H_2S$ ).
- gebruikte staaltype.
- zwerfstroom (zwerfstroomcorrosie).
- aanwezigheid van een coating.

AFBEELDING 4 ZWERFSTROOMCORROSIE (HANDBOEK KADEMUREN)



#### 3.4.4 METSELWERK

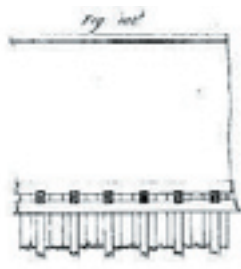
Gemetselde civiele constructies zijn onder te verdelen in verschillende bouwstijlen;

- gewichtsmuren,
- u-vormige bakken,
- gewelven, kokers en boogconstructies.

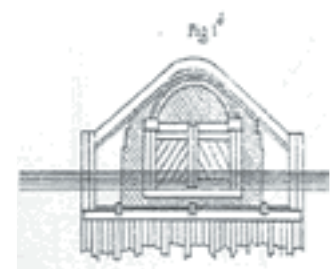
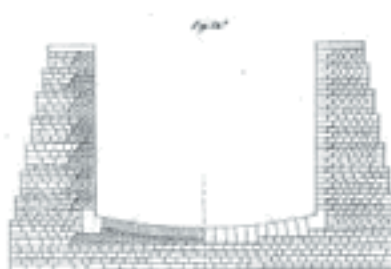
AFBEELDING 5 GEWICHTSMUUR



AFBEELDING 6 GEMETSELDE BAK



AFBEELDING 7 GEWELF



#### TOEGEPASTE MATERIALEN EN AFMETINGEN

##### Natuurstenen

In de waterbouw komen we de volgende natuursteensoorten tegen:

- Zandsteen; wegens gevaar op 'steenhouwersziekte' bestaat er sinds 1951 een verbod op het verwerken van zandsteen.
- Kalksteen; in bruggenbouw ook veel gebruikt, bijvoorbeeld als een wrijfgording om schade aan metselwerk door scheepvaart en vorst te voorkomen
- Hardsteen; toepassing in weg- en waterbouw vanaf van 16<sup>e</sup> eeuw, vaak toegepast als boogstenen, deksloven en natuursteen wrijfstijlen.

### Metselstenen

De bakmethoden van de metselstenen is in de loop der jaren geëvalueerd. Hierdoor zijn de bakstenen steeds harder en minder poreus geworden en dus steeds beter bestand tegen aantasting door vorst, mosgroei ed.

### Metselmortels

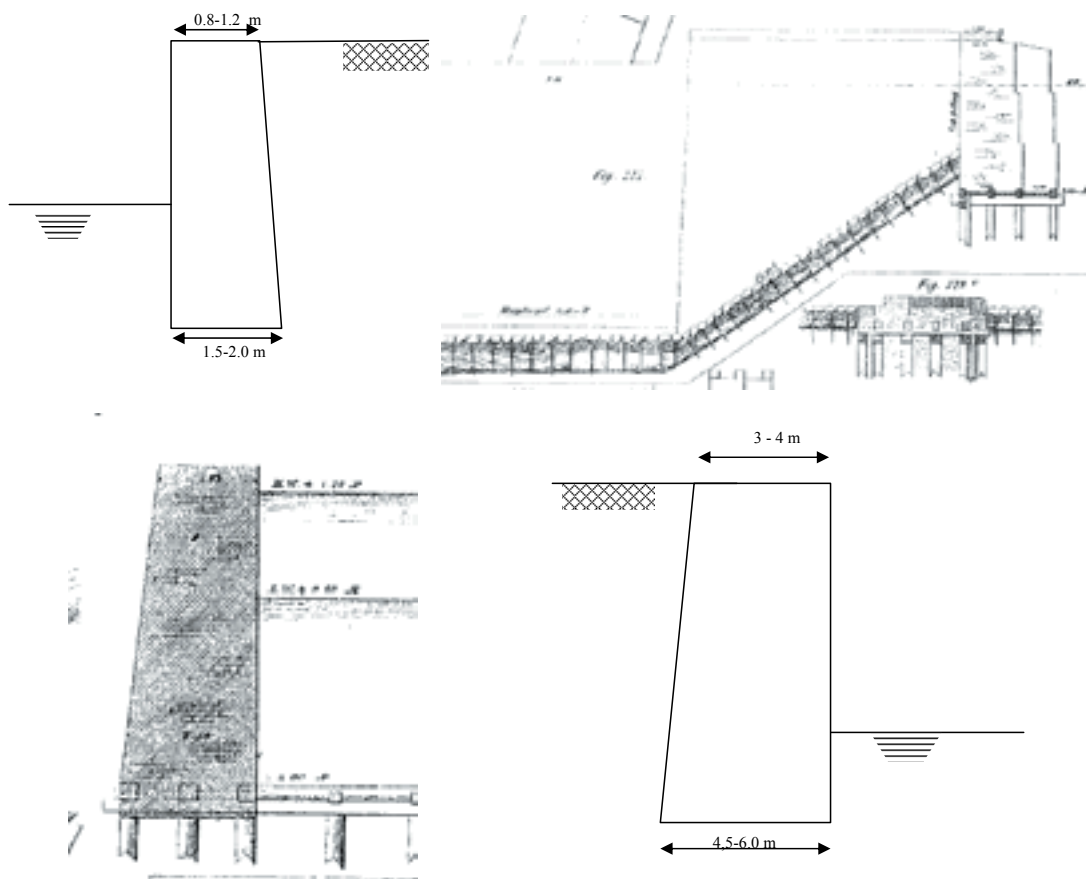
Gemetselde constructies van voor 1850 zijn vrijwel allemaal gemetseld met kalkmortels of kalktrasmortels. Vooral in de 17<sup>e</sup> eeuw zijn de tras-houdende mortels toegepast voor waterdicht werk. In 1824 is cement op de markt gekomen.

### Afmetingen

Gemetselde dragende en grondkerende wanden van oudere waterkerende kunstwerken zijn altijd massief. Enkele constructies zijn grondig gerenoveerd en/of versterkt door delen van het dragende gemetselde constructie te vervangen door een beton- of staalconstructie.

De afmetingen van de gemetselde muren in waterkerende kunstwerken variëren nauwelijks. Onderstaande afbeeldingen geven hiervan een indruk.

AFBEELDING 8 GANGBARE AFMETINGEN EN VORMGEVING GEMETSELDE WANDCONSTRUCTIES



Voor de hoogte en afmetingen van sluismuren is in vakliteratuur uit 1845 de volgende vuistregel aangetroffen:

*De geschikste vorm voor de sluismuren is met loodregten of althans weinig hellende voorkant wegens den meerderen weerstand tegen de drukking der aarde. De achterkant wordt meestal met versnijdingen gewerkt zoodat de muur eene grootere breedte in aanleg dan op de kruin verkrijgt; deze vorm is ook daarom de gunstigste, omdat alsdan het gewigt van den muur over eene grootere oppervlakte verdeeld wordt. De hoogte der muren is bij de van boven opene sluizen 0,5 á 0,6 el boven de hoogste waterstanden.*

In de 19<sup>e</sup> eeuw werden de eerste berekeningen uitgevoerd om de afmetingen van onderdelen te bepalen. Een voorbeeld hiervan is de constructie van gemetselde gewelven.

*Er zijn in het verleden veel formules opgesteld voor dikte van gewelven.*

Dikte van gewelven

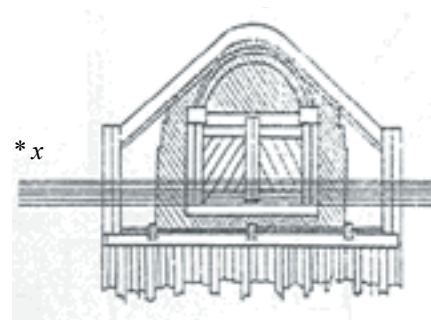
Dagwijdte kleiner dan 2 m  $d = 0.33 \text{ m}$

Wijdte 2-16 m  $d = 0.33 + 1/24 * l$

Wijdte 16-32 m  $d = 1/24 \text{ l}$

Wijdte 32 - x m  $d = 1/24 * 32 + 1/48 * x$

(Formule van Gauthey)



*Voor kleine overspanningen niet echt goed toepasbaar. Beter: Dikte van het gewelf is 1/12 van de dagwijdte (Romany)*

*Dikte van de pijlers van gemetselde gewelven met meerdere overspanningen: 1/3 – 1/4 van de wijdte van de dagmaat van opening.*

Ook voor de wanden van gemetselde uitwateringssluizen zijn vuistregels gevonden.

*Citaat uit Waterbouwkunde van L. Zwiens (ca 1910)*

*Kokers van een gemetselde uitwateringssluis:*

*“De dikte der rechtstandmuren is minstens 0,66 m (1/3 maal de hoogte) meestal zonder versnijdingen opgemetseld.” “Als een sluis uit meerdere kokers bestaat, dan neme men de minimum-dikte van de penanten 0,33 m.”*

Na de opkomst van de bouwmaterialen beton en staal (na 1900) zijn andersoortige kerende constructies gebouwd, in veel grotere variatie dan voorheen. De mate waarin gemeenschappelijke kenmerken voorkomen wordt dan ook steeds minder naarmate het bouwjaar van de kunstwerken dichter bij het heden ligt.

AFBEELDING 9 MOGELIJKE SCHADEBEELDEN BIJ GEMETSELDE CONSTRUCTIES



### TE VERWACHTEN ONDERHOUDSSTAAT

#### *Desintegratie cement*

Oud(er) metselwerk kan een verminderde samenhang hebben door een desintegratie van het cement. Dit is vooral te verwachten bij constructies ouder dan het begin van 20<sup>e</sup> eeuw omdat er toen met kalktoeslag in het cement gewerkt werd.

Dit kan een onsamenhangend metselwerk geven tot diep in de constructie.

#### *'verkeerde' reparatie*

Als een oude, met kalkmortel gemetselde constructie gerepareerd wordt met een cementmortel, kan schade optreden aan het metselwerk en de voegen. Door de later aangebrachte hardere cementvoeg werkt deze zich op veel plaatsen los en veroorzaken schaden aan de (zachtere)steen. Door deze schade is er een versnelde aantasting van de dieper liggende stenen en de zetmortel waardoor de samenhang van het metselwerk op den duur verloren gaat.

AFBEELDING 10 MOGELIJK SCHADEBEELD BIJ EEN VERKEERDE REPARATIE



#### *Wortelgroei*

Wortelgroei van planten kan een probleem vormen. Algen en korstmossen wortelen niet diep, maar als er grassen of zelfs struiken aanwezig zijn op de constructie kunnen de wortels schade aanrichten aan het metselwerk. Tevens blijft door de begroeiing het metselwerk vochtig, wat weer vorstschade kan opleveren.

AFBEELDING 11 BIJ DEZE CONSTRUCTIE KAN (OA.) WORTELGROEI VOOR PROBLEMEN ZORGEN



#### *Vorstschade*

Vorstschade komt voor bij (vaak poreuze) steensoorten waarbij water kan indringen. Vorstschade kenmerkt zich door afgedrukte delen aan het oppervlak. Hierdoor zal versnelde aantasting plaatsvinden van de stenen en de metselmortel waardoor de samenhang van het metselwerk op den duur verloren gaat.

#### *Scheurvorming*

Zowel verticale als horizontale scheurvorming leiden tot sterkteverlies. Verticale scheurvorming is te verwachten bij ongelijke zettingen, falende fundering ed. Door deze scheuren kan gronduittrekking plaatsvinden waardoor achter de constructie een holle ruimte ontstaat. Horizontale scheurvorming komt bijvoorbeeld voor bij te hoge dwarskrachten in de constructie, bijvoorbeeld bij een te hoge bovenbelasting. De scheuren kunnen in de lintvoegen van het metselwerk lopen, maar ook vertand.

AFBEELDING 12 ENKELE VOORBEELDEN VAN SCHEURVORMING



Scheurvorming valt van tevoren niet te voorspellen. Het wel of niet optreden, wanneer en waar deze optreden is een onbekende waarin een visuele inspectie en eventueel nader onderzoek noodzakelijk is voor de vaststelling van de scheuren maar belangrijker de daarbij behorende sterkte/stabiliteit van de constructie.

### 3.4.5 BETON

#### TOEGEPASTE MATERIALEN EN AFMETINGEN

De ontwikkeling van beton heeft de afgelopen decennia niet stil gestaan. Om iets te kunnen zeggen over de kwaliteit van het beton is vaak ook een inschatting van de betondruksterkte nodig. Hiervoor kan globaal aangehouden worden:

Voor 1950	B12.5-B22,5
1950-1970	B32.5
1970-1990	B35
1990 en later	B45 en hoger

#### Wapening

In de waterbouw wordt en is zo goed als altijd gewapend beton toegepast. Er is bekend dat vanaf 1867 al sporadisch wapening toegepast is in betonnen constructies. Rond 1880 is het gebruik van wapening in Nederland opgekomen, maar vanaf 1930 is het op grote schaal toegepast. Voor 1930 bestond de toegepaste wapening uit gladstalen staven, na 1930 is het geribbelde betonstaal gekomen.

#### Dekking

Vanaf 1918 zijn er eisen gekomen voor de dekking op de wapening:

Gangbare betondekking:

Vanaf 1918:

balken minimaal 25 mm en kolommen 35 mm.

Rond 1970 was dit:

	droog milieu	vochtig milieu	agressief milieu
vloer	10	15	25
wand	15	20	30
balk	20	25	35
kolom	25	30	40

nu: (TGB 1990)

Milieuklasse	1	2	3, 4 en 5
plaat/wand	15	25	30
balk/poer/console	25	30	35
kolom	30	35	40

Per constructiedeel kunnen er nog 3 toeslagen in rekening gebracht worden van 5 mm. Dit is voor een nabewerkt oppervlak, oncontroleerbaar oppervlak en als  $f_{ck} < 25 \text{ N/mm}^2$ .



Prefabelementen werden al een tijd geproduceerd, maar pas na 1945 is de kwaliteit van deze prefab betonelementen beter geworden.

#### TE VERWACHTEN ONDERHOUDSSTAAT

Het achteruitgaan van de onderhoudsstaat in beton gaat altijd gepaard met visueel waarneembare uiterlijke kenmerken. Van deze achteruitgang is zeer moeilijk te voorspellen waar en wanneer deze optreedt.

*Het is bekend dat in de jaren zestig en zeventig calciumchloride aan het beton is toegevoegd als versneller van het verhardingsproces. Deze toevoeging is vandaag de dag (2005) verboden. Deze ingemengde chloriden kunnen voor grote schade zorgen (deze schaden zijn vooral bekend uit de woningbouw).*

*Ook kan het toeslagmateriaal voor een expansieve reactie zorgen (tussen het reactief kiezelzuur en de alkaliën uit het cement) waardoor een desintegratie van het beton ontstaat. Over de toepassing en periode van toepassing van het toeslagmateriaal met reactief kiezelzuur zijn geen duidelijke conclusies te trekken*

Voor het herkennen van de verschillende schademechanismen is expertise nodig op dit gebied. Voor een overzicht van de mogelijk optredende schademechanismen en hun oorzaken wordt verwezen naar de CUR 172.

AFBEELDING 13 ENKELE VOORBEELDEN VAN BETONSCHADE



### 3.4.6 HOUT ALGEMEEN

#### TOEGEPASTE HOUTSOORTEN

In de jaren 60 waren de uit Nederland afkomstige grenen palen goedkoper dan buitenlands hout (vuren, lariks en douglas) en dus veel meer toegepast. Voor de kortere lengten (< 8 m) is grenen toegepast en voor de langere lengten vuren.

De toepassing van houten funderingspalen is vandaag de dag beperkt tot kleinere projecten in de woningbouw. Zelden worden deze in de waterbouwkundige kunstwerken toegepast.

*Bekende gegevens uit de literatuur*

- Hardhout  
In de loop van de jaren negentig is het toepassen van hardhout uit de regenwouden zoals azobé en basalocus aan banden gelegd. In de periode hiervoor is op veel plaatsen hardhout toegepast, bijvoorbeeld als sluisdeuren, remmingwerken, damwanden.
- Inlands hout (B&D – 233 ev.)  
In 1965 was 57% van het rondhout grenen, in 1967 was dit nog maar 36%. (B&D – 233)
- Zuiderzeewerken, deltawerken  
Veel inlands hout toegepast, voornamelijk grenen hout, een klein deel is vuren.

### 3.5 AFMETINGEN EN KWALITEIT VAN DE ONDERDELEN

Paragraaf 3.5 gaat in op de verschillende constructieonderdelen en de daarbij behorende specifieke materiaalsoorten en kenmerken.

#### 3.5.1 FUNDERINGEN

##### 3.5.1.1 Houten paalfundering

#### GEBRUIKTE MATERIALEN EN AFMETINGEN

Uit de database en de literatuur kan voor waterbouwkundige constructies geconcludeerd worden dat *een gemetselde constructie altijd op houten palen gefundeerd is.*

Betonnen constructies kunnen zowel op houten als op betonnen palen gefundeerd zijn, waarbij in het algemeen de 'eerste' betonnen constructies op houten palen werden gefundeerd en de latere (voornamelijk na 1945) op betonnen palen.

De houten paalfunderingen werden gemaakt van grenen of vuren palen met daarop een laag balken waarop een houten vloertje met zwalpen werd aangebracht waar omheen gemetseld werd. Bij houten paalfunderingen staan de palen zo'n 0.9 tot 1.1 m uit elkaar.

Een houten paalfundering gaat vrijwel altijd samen met houten kwelschermen.

De lengte van een paal in een Nederlandse paalfundering varieert van 2 tot 23 meter.

#### TE VERWACHTEN ONDERHOUDSSTAAT

Houten paalfunderingen kunnen aangetast zijn door schimmels, bacteriën en insecten.

#### SCHIMMELAANTASTING (SOFTROT)

- Onder water vindt geen aantasting plaats
- Als fundering droog staat start het rottingsproces, als het weer onder water staat stopt dit tijdelijk, bij de volgende droogstand gaat het rottingsproces verder.
- Cumulatieve droogstand van 10-20 jaar kan tot ernstige constructieve aantasting leiden
- Een hogere concentratie zuurstof, een hogere temperatuur en/of de aanwezigheid van organische stikstof versnellen het rottingsproces.

Voor de bestandheid van funderingshout tegen schimmelaantasting (en dus de levensduur) is een hoge grondwaterstand van belang.

In het oud stedelijk gebied kan de grondwaterstand in de toplaag van de bodem sterk variëren omdat in deze wijken vaak dicht op elkaar gebouwd is en het grondwater hierdoor minder wordt aangevuld. Hier kan een onttrekking van het grondwater (bijvoorbeeld door een lekkage van het rioolstelsel) snel droogstand van het funderingshout veroorzaken.

Naast de lage grondwaterspiegel in stedelijk gebied is er in Nederland een aantal risicovolle gebieden te benoemen die bekend zijn met droogstand, en daarmee aantasting, van de paalfunderingen.

Waterkerende kunstwerken liggen vaak buiten de stedelijke gebieden en hebben bij een houten paalfundering vaak een laaggelegen funderingsniveau. Schimmelaantasting bij waterkerende kunstwerken is hierdoor dus niet snel te verwachten, ook wijzen ervaringen uit de praktijk dit uit.

AFBEELDING 14 EEN VOORBEELD VAN HOUTAANTASTING AAN DE BOVENZIJDJE VAN EEN DAMPLANK



### EEN HOOG ZOUTGEHALTE (NACL) IN HET GRONDWATER IS SCHIMMELREMMEND.

#### *Bacteriële aantasting ("Palenpest")*

In de laatste jaren zijn in diverse binnensteden in West-Nederland (Amsterdam, Haarlem en Gouda) aangetaste houten funderingen aangetroffen, waarbij geen sprake is van droogstand. In deze situaties bleek sprake van bacteriële aantasting. De schaal waarop dit aantastingsmechanisme voorkomt is nog in onderzoek (2005). Het is echter wel duidelijk dat er sprake is van een langzaam proces van aantasting, waarbij moet worden gedacht in perioden van 50-100 jaar voordat sprake is van een significante afname van het paal draagvermogen. Voorlopige conclusies met betrekking tot dit fenomeen zijn:

- bacteriële aantasting komt alleen voor in spinhout, mede hierdoor is met name grenen gevoelig voor aantasting;
- grondwaterstromingen rond de paal lijken kunnen de aantasting versnellen;
- de aantasting lijkt in zandige gronden sneller te verlopen.

Vooralsnog zijn er geen ervaringen met waterkerende kunstwerken, waaruit enige conclusies kunnen worden getrokken met betrekking tot de mogelijke consequenties voor de waterkering. De meeste kunstwerken zijn buiten de risicovolle gebieden gebouwd.

Bij ernstige aantasting van de paalfundering zal de constructie altijd gaan 'praten' door middel van scheuren en/of verzakkingen. Een constructie buiten de risicovolle gebieden zoals aangegeven in onderstaande afbeelding, welke geen uiterlijke kenmerken heeft op verzakkingen, heeft een zeer kleine kans op aantasting van de houten funderingspalen door bacteriën.

Uit wetenschappelijk onderzoek blijkt dat er enkele hypothesen geformuleerd kunnen worden over de bacteriële aantasting van heipalen.

1. Zonder een continue zuurstoftoevoer blijkt bacteriële aantasting actief te kunnen zijn. (mogelijk is een sporadische bron noodzakelijk waarna zuurstof in hout wordt opgeslagen (droogstand, tijdelijk hoge zuurstof concentratie grondwater, van nature aanwezige zuurstof in hout.)
2. De omgeving (pH, nutriënten) rondom het hout blijkt geen rol te spelen met betrekking tot de aantasting
3. Voor bacteriële houtaantasting is aanvoer van voedingsstoffen (met name stikstof) in het hout noodzakelijk
4. Nutriënten kunnen op verschillende manieren in het hout worden gebracht. (reeds aanwezig bij plaatsing paal; door waterstroming door de paal; door inzuigen in het paalhout.

AFBEELDING 15 DE BEKENDE RISICOVOLLE GEBIEDEN BACTERIËLE AANTASTING PAALFUNDERING (AFBEELDING VAN STICHTING HOUT RESEARCH (SHR)) EN AANGETASTE EN GEKNAKTE PAAL (FOTO VAN FUGRO INGENIEURSBUREAU BV)



#### *Aantasting door insecten*

- (Hei)paalkever  
Deze kever (*Nacertes melanudra*) komt alleen op plaatsen met veel zuurstof en veel voedingsstoffen.
- Gribbel
- Paalworm

In zeewater moet rekening gehouden worden met aantasting door paalworm. Dit geldt voor vrijwel alle houtsoorten, zeker de houtsoorten die in het verleden op grote schaal in Nederland zijn toegepast. Houtsoorten die ongevoelig zijn voor paalworm zijn larahout, bankirai, basralocus, demarara groenhart en surinaamsch groenhart en borneosch ijzerhout.

#### *Gebiedsindeling draagkrachtige laag*

Grenen palen zijn tot ongeveer in de jaren zestig gebruikt in Nederland. In de gebieden met een 'ondiepe' draagkrachtige zandlaag is een hoger percentage grenen palen te vinden in vergelijking met gebieden waar de draagkrachtige laag op grotere diepte ligt.

#### Aspecten van belang voor aantasting onder water

- Houtsoort en spintgehalte
  - Grenen spint: niet duurzaam, open structuur (aantasting)
  - Grenen kern: duurzaam, gesloten structuur (geen aantasting)
  - Vuren spint: niet duurzaam, gesloten structuur (enige aantasting)
  - Vuren kern: niet duurzaam, geslotener structuur (enige aantasting)
- Schimmelaantasting gaat een factor 10 tot 25 keer stellen dan bacteriële aantasting
- Bacteriële aantasting stopt bij zuurstof tekort. Alle palen worden beperkt aangetast door interne zuurstof.
- Bacteriële aantasting breidt zich uit bij nutriënten houden getransporteerd water door de paal omhoog (m.n. voor grenen spint, eikenspint en elzen)
- Bacteriële aantasting zou snel kunnen reageren op kortstondige perioden van droogstand door zuurstof opslag. (wanneer de perioden langer worden komen eerst koloniserende schimmels en dan softrot schimmels, meerdere perioden van droogstand die softrot toelaten zorgen voor sterkere bacteriële aantasting onder water.

De aantasting door bacteriën kunnen binnen één gebied zeer variabel zijn, dit komt door:

- is in relatie met grondsoort en het grondwater (waterdruk)
- Waterdekking over de paalkop (meer waterdekking is minder aantasting)
- Zoutgehalte grondwater (NaCl is schimmelremmend)

#### Sterkte van hout in heipalen

- Effect aangetaste schil op draagvermogen is afhankelijk van de paallengte en de mate van aantasting richting de punt. Softrot zit alleen aan de paalkop, bacteriële aantasting is bij vuren meestal beperkt en waarschijnlijk is er weinig verspreiding richting de punt. Bacteriële aantasting bij grenen kan sterk zijn en breidt zich ook uit naar de punt. Of de puntdiameter wordt aangetast is nog niet duidelijk
- De diameter van de dragende schacht is de diameter van de punt op de grens van zand en slappe laag. Uitgaande van een tapsheid van 7,5 mm/m kan bij een paallengte van 13 m de aangetaste schil tot 50 mm bedragen zonder dat dit de dragende schacht negatief beïnvloedt.
- Uitknikken (slankheid) is van belang, weinig ervaringsgegevens bekend.
- Mogelijk een positief effect van een aangetaste schil bij negatieve kleeft, maar negatief effect bij schachtwrijving.

### 3.5.2 KWELSCHERMEN

#### VOORKOMENDE MATERIALEN EN AFMETINGEN

Kwelschermen kunnen in de volgende materiaalsoorten voorkomen:

- beton
- staal
- hout
- neopreen / HDPE
- combinatie van bovenstaande materialen

De toepassing van de verschillende materiaalsoorten is in de loop der jaren gewijzigd.

Voor zover bekend kan uit de database de volgende getallen gehaald worden:

	Beton	Staal	Hout	Neopreen	Combi
-1900	-	8	9	-	1
1900-1930	-	1	2	-	4
1930-1960	2	4	2	-	9
1960-1990	-	20	4	-	4
1990-nu	-	45	1	1	8

*Een houten paalfundering gaat vrijwel altijd samen met houten kwelschermen.*

*Een betonnen paalfundering gaat vrijwel altijd samen met een stalen kwelscherm.*

*Kwelschermen zijn vrijwel altijd aangebracht aan de voor- en achterzijde van een kunstwerk en bij de afsluitmiddelen.*

De onderhoudsstaat van de kwelschermen is afhankelijk van dezelfde factoren als die genoemd zijn voor de houten paalfundering. Een waterdichte aansluiting van de schermen op de constructie is voor het functioneren van de kwelschermen van essentieel belang. Indien er geringe aanwijzingen bestaan over de aanwezigheid van aantastende mechanismen kan dit gevolgen hebben voor de in rekening te brengen kwelweglengte.

Voor stalen en betonnen kwelschermen zal de aansluiting van de kwelschermen op de constructie zelden verminderd zijn.

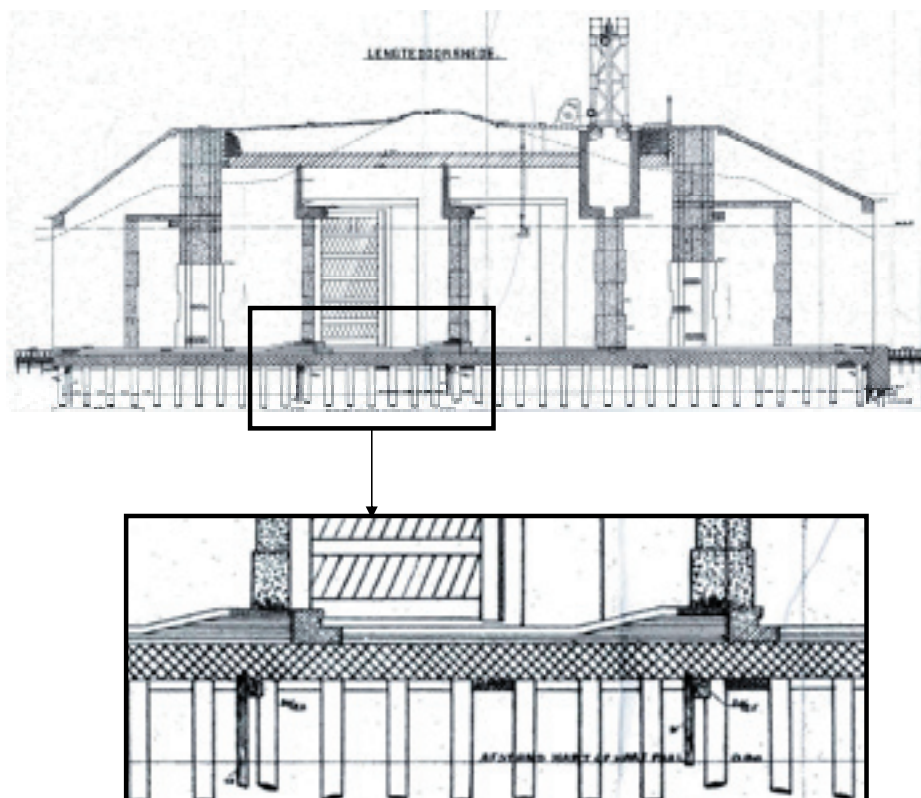
#### *Stalen schermen*

- bij 1 kwelscherm is de constructie vrijwel altijd op staal gefundeerd.
- bij 2/3/4 schermen kan de constructie zowel op staal als op palen gefundeerd zijn.
- bij 5 en meer schermen is de constructie vrijwel altijd op (betonnen) palen gefundeerd.
- Het maximale aantal kwelschermen wat voorkomt is 7 stuks.

#### *Houten schermen*

- Na 1960 zijn onder waterkerende kunstwerken 1 tot 4 schermen aangebracht, die een lengte hebben tot maximaal 5 meter.
- Tot 4 stuks kwelschermen is de fundering op staal.
- Vanaf 5 stuks kwelschermen is de fundering op (houten) palen.
- Maximale aantal dat voorkomt in de database is 15 stuks.

AFBEELDING 16 GANGBARE PLAATS EN AFMETINGEN HOUTEN KWELSCHERMEN. (INLAATSLUIS OOSTOEVER)



#### Betonschermen

- komen weinig voor in de database (9 stuks)
- 8 van de 9 komen voor bij coupures, het gaat hier om 1 kwelscherm onder op staal gefundeerde constructie.
- 1 van de 9 is toegepast bij een op betonpalen gefundeerde inlaatsluis. In totaal 4 stuks.

De dikte van de constructie is:

- Houten planken ; 0,04 -0,25 m met een gemiddelde van 0,092 m
- Beton planken ; 0,1 -0,25 m met een gemiddelde van 0,183 m

#### Gegevens uit de literatuur

Bij het bestuderen van oudere literatuur (voor 1900) kan de conclusie getrokken worden dat men er reeds vele eeuwen van op de hoogte was dat kwelschermen noodzakelijk zijn. Mede op basis van de gebruikte database kan worden geconcludeerd dat met grote aannemelijkheid kan worden aangenomen dat er onder waterkerende kunstwerken kwelschermen aanwezig zijn en dat deze bij voorkeur tot in een kleilaag reiken. Als de kleilaag te diep ligt, werd er een lengte aangehouden tussen de 3 en 5 el, dit komt overeen met circa 2.0 en 3.5 m.

Citaat uit: *Sluizen, kanalen en havens, 1937:*

Voor een uitwateringssluis:

*Om de onderloopsheid zoveel mogelijk tegen te gaan worden onder de vloer minstens vier damwanden geslagen langs de kessen en wel één langs de buitenste, één langs de binnenste, één ter plaatse van de schuif en één ter plaatse van de deur. Deze damwanden bestaan uit geploegde, 8 – 1- cm dikke en 3 m lange en zo breed mogelijke planken. De uiterste damwanden lopen door tot de einden der retourmuren en die ter plaatse van de schuif en de deur 2 tot 3 m voorbij de achterkant der contreforten. Ze worden tot even boven de hoogste binnenwaterstand opgetrokken en een halve steen diep in de contreforten ingelaten.*

Ontwerpregels uit 1947:

*'Een praktische minimum lengtmaat h van de planken van den damwand aan het kolkeinde van een sluishoofd, welke waarborg geeft, dat er geen wellen zullen optreden is  $h = h' / 0,9$  (de overdruk van het grondwater ter plaatse van den onderkant van den damwand maakt evenwicht met het gewicht van den onder water gedompelden grond aan de kolkzijde van den damwand; h' is het verval, 0,9 is het soortelijk gewicht van den grond onder water).*

*Waar dit eenvoudige beginsel niet is toegepast is veelal in den loop der tijden onderloopsheid ontstaan. Toepassing van kortere damplanken dan 5 á 6 m wordt bijzondere omstandigheden voorbehouden (bijvoorbeeld in verband met de hoogteligging van de waterdichte laag) voor onderloopsheidsschermen ontraden.*

*Bij grote vervallen is veelal aan de sluishoofden onvoldoende kwellingte te ontleenen en moet men zijn toevlucht nemen tot het verlengen daarvan, hetgeen dus de vormgeving van de sluis sterk beïnvloedt.*

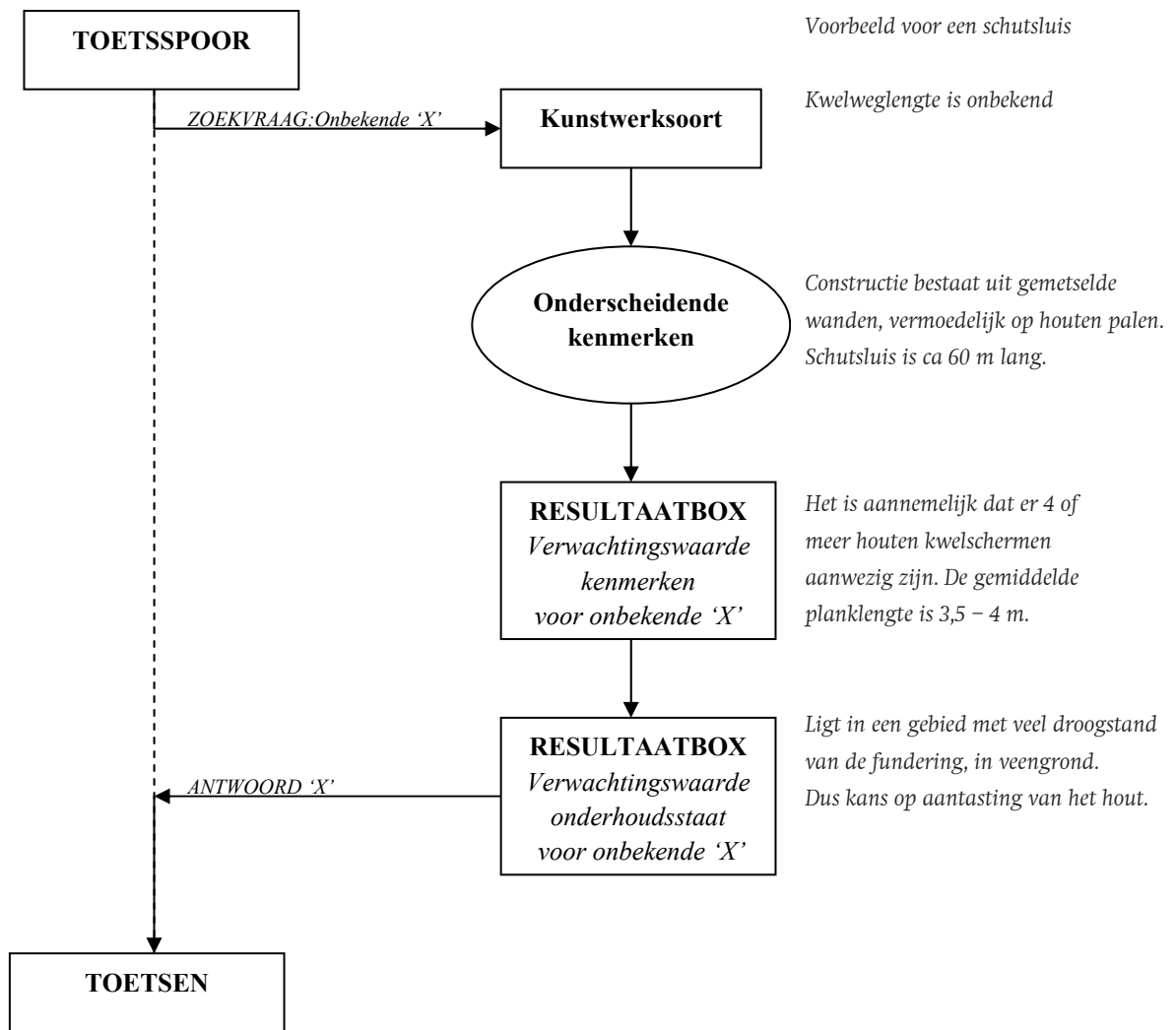
*'Vergrooiting van de kwellingte: Voor het geval de tegen onderloopsheid geheide damwanden niet tot in een waterdichte grondlaag kunnen reiken, zou het gewenscht kunnen zijn elk sluishoofdeinde van een damwand te voorzien. Doch ook in andere gevallen is het aanbrengen van twee damwanden gewenscht. De eene in reserve van den anderen. Wanneer twee damwanden vereischt zouden zijn, verdient het aanbeveling nog een derde aan te brengen. '*

## 3.6 STROOMSCHEMA'S

### 3.6.1 INLEIDING

Het hulpmiddel 'Kenmerken' heeft als doel een verwachtingswaarde te bepalen voor de ontbrekende gegevens die noodzakelijk zijn voor de toetsing. Op basis van gemeenschappelijke kenmerken van soortgelijke constructies kan een inschatting worden gemaakt van de kenmerken en onderhoudsstaat van de ontbrekende gegevens, verder aangeduid als "ONBEKENDE". De onbekende levert een zoekvraag op voor het hulpmiddel en is input/vertrekpunt voor gebruik van het hulpmiddel. Onderstaande schema geeft een algemene indruk van de methodiek van het hulpmiddel.



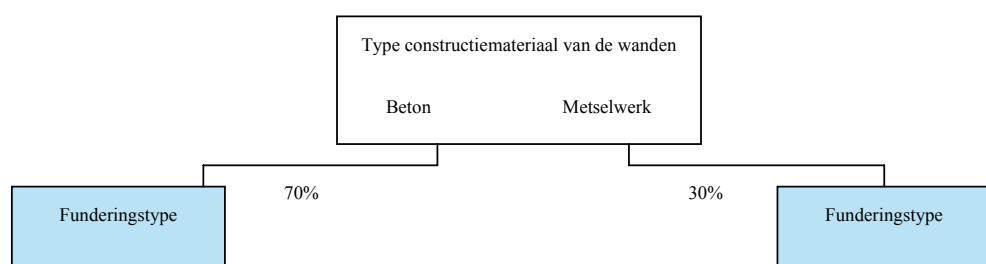


### 3.6.2 UITLEG TEN BEHOEVE VAN HET GEBRUIK VAN DE STROOMSCHEMA'S

De stroomschema's zijn opgesteld op basis van ervaringen binnen DHV, de samengestelde database, literatuurstudie en gesprekken met deskundigen. In theorie zijn oneindig veel mogelijkheden uit te werken voor de gegeven constructietypen. Op basis van ervaringen en de beschikbare gegevens uit de database zijn meest voorkomende gevallen behandeld.

Om bij de stroomschema's een inschatting en onderbouwing mee te geven bij het maken van een keuze zijn bij het opstellen van de schema's percentages genoemd. Dit percentage is het percentage van voorkomen in de database.

Voor de kwelweglengte van een schutsluis begint het stroomschema als volgt:



Dit betekent dat in de voor dit onderzoek gebruikte database, van alle schutsluizen 30% gemetselde wanden heeft en 70% betonnen wanden.

De gegeven percentages zijn een indicatieve weergave van in de database aangetroffen situaties. Door onderhoud en aanvulling van deze database worden deze percentages in de loop van de tijd nauwkeuriger.

### 3.7 VOORBEELD

Toetsing op piping voor een schutsluis (STPH).

Bekende gegevens:

- Gemetselde sluis met dichte vloer
- Lengte kolk 100 m
- Optredend verval is 6,0 m

Te doorlopen stappen volgens het Voorschrift Toetsen op Veiligheid:

*Stap 1 – Eenvoudige toetsing*

Er wordt niet voldaan aan de criteria voor eenvoudige toets.

*Stap 2 – vigerende leidraden*

Het kunstwerk is niet ontworpen volgens vigerende leidraden of gelijkwaardig.

*Stap 3 – Gedetailleerde toetsing*

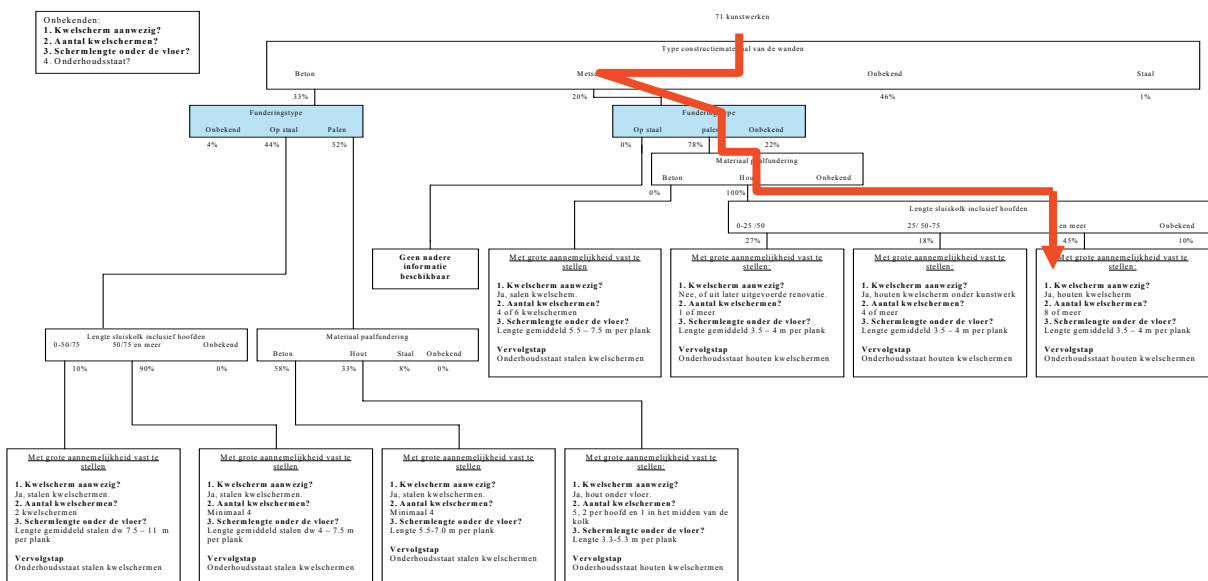
Gedetailleerde toets volgens Lane

$$h * c_1 < L_v + L_h/3$$

h is bekend, de overige gegevens zijn onbekend.

Op basis van het stroomschema voor de kwelweglengte bij een schutsluis kan het volgende geconcludeerd worden:

AFBEELDING 17 WEERGAVE VAN DE 'BEWANDELDE WEG' DOOR HET STROOMSCHEMA



Wanden zijn van metselwerk dus is het zeer aannemelijk dat er een houten paalfundering onder de constructie aanwezig is. De lengte is meer dan 75 m dus kan er geconcludeerd worden dat er 8 of meer schermen onder de vloer aanwezig zijn met een gemiddelde lengte van 3,5 – 4 m per plank.

Conclusie:

$$L_h = 0, \text{ want de constructie is op palen gefundeerd}$$

$$L_{v \text{ minimaal}} = 8 * 2 * 3,5 = 56 \text{ m}$$

$$L_{v \text{ maximaal}} = 8 * 2 * 4,0 = 64 \text{ m}$$

Voor de c-waarde van de grond zal in eerste instantie de meest ongunstige waarde aangehouden worden; 8,5

Situatie 1 –  $L_v$  minimaal

$$6 * 8,5 < 56 + 0/3$$

$$51 < 56$$

Dit voldoet, voor de volledigheid kan er gekeken worden naar de situatie met de  $L_v$ ; maximaal:

Situatie 2 –  $L_v$  maximaal

$$6 * 8,5 < 64 + 0/3$$

$$51 < 64$$

Voor deze sluis geldt dat de meest conservatieve situatie al voldoet en kan dus “GOED” getoetst worden op het toetspoot STPH.

# 4

## HULPMIDDEL “EISEN”

### 4.1 INLEIDING

Dit hulpmiddel bevat een aantal suggesties om bij een geavanceerde toets volgens het Voorschrift Toetsen op Veiligheid een volledig zelfstandig waterkerend kunstwerk (type I), in combinatie met de leidraad Kunstwerken 2003, te toetsen.

De eerste stap is altijd het vaststellen van een taakstellende faalkans voor het kunstwerk op basis van de normfrequentie voor de dijkkring. De tweede stap is een verdeling van deze taakstellende faalkans over de verschillende mechanismen. De taakstellende faalkans wordt afgeleid van de normfrequentie. De normfrequentie per dijkkringgebied is vastgelegd in de Wet op de Waterkering en staat in dit hoofdstuk niet ter discussie.

In paragraaf 4.2 wordt ingegaan op de huidige toetsmethodiek. In paragraaf 4.3 wordt een methode aangereikt waarmee binnen de vigerende toetsmethodiek, uitgaande van de dijkvakbenadering en de Leidraad Kunstwerken (LK 2003) een verdiepingsslag kan worden gemaakt.

In paragraaf 4.4 wordt een alternatieve beoordelingsmethode aangereikt waarbij uitgegaan wordt van de beginselen van de dijkkringbenadering. Benadrukt wordt dat een probabilistische benadering bij het beoordelen van waterkerende kunstwerken, en vooral uitgaande van een dijkkringbenadering, nog sterk in ontwikkeling is (status 2005) en regelmatig wordt geactualiseerd. Voordat dit hulpmiddel wordt toegepast dient over de aanpak met het bevoegd gezag overeenstemming te zijn.

### 4.2 DE HUIDIGE MANIER VAN TOETSEN

#### 4.2.1 DIJKVAKBENADERING

Bij de dijkvakbenadering wordt de primaire waterkering, die deel uitmaakt van het stelsel dat het dijkkringgebied omsluit, opgedeeld in verschillende secties. Per sectie wordt de vereiste veiligheid beschouwd. Overbelasten (hetgeen nog niet betekend “bezwijken”) treedt op als het overslagdebiet  $q$  groter is dan het toelaatbare debiet. Deze benadering wordt ook wel de overbelastingsbenadering per dijkvak genoemd.

Veiligheidseisen:

- 1 De kans op overschrijden van het toelaatbare overslagdebiet mag voor elk dijkvak niet groter zijn dan de norm die in de Wet op de Waterkering voor het betreffende dijkkringgebied is vastgesteld. Daarbij wordt meestal uitgegaan van maatgevende waterstand, waarbij een golf hoort, waaruit weer een golfoverslagdebiet volgt.
- 2 Bij waterstanden gelijk aan of kleiner dan de maatgevende waterstand mag de kans op falen door andere oorzaken dan overloop/overslag, niet meer dan 1% (constructief falen) tot 10% (afsluitmiddel) van de bij punt 1 genoemde norm bedragen.

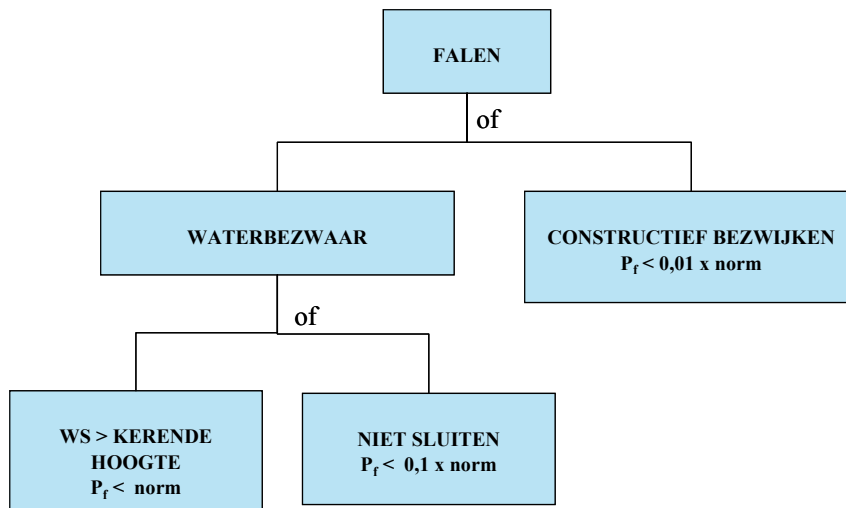
De eerste eis is voor het bepalen van de kerende hoogte in combinatie met andere geometrische kenmerken en de kwaliteit van de constructie. De tweede eis is ter verificatie van alle overige faalmechanismen naast overloop/overslag.

Aan de vereiste bescherming tegen overstromen van het dijkkringgebied wordt voldaan wanneer alle secties ontworpen zijn op de bij de normfrequentie behorende waterstanden en overige maatgevende belastingen en factoren. De charme van deze benadering is de eenvoud. Deze benadering is het ijkpunt voor alle ontwikkelingen in de veiligheidsbenaderingen.

#### 4.2.2 HUIDIGE MANIER VAN TOETSEN

De Wet op de waterkering schrijft een vijfjaarlijkse toetsing van de per dijkkringgebied aanwezige veiligheid voor volgens het Voorschrift Toetsen op Veiligheid (VTV). Voor het begrip is het belangrijk om vast te stellen dat het VTV hierin feitelijk wet is en dat de Leidraad Kunstwerken, waar in het VTV veelvuldig naar verwezen wordt, een hulpmiddel is dat bij de toetsing gebruikt mag worden. Bij het toetsen wordt uitgegaan van de dijkvakbenadering. Afzonderlijk van elkaar worden de kerende hoogte (norm), de kans op niet sluiten van de keermiddelen ( $0,1 \times \text{norm}$ ) en de sterkte van de constructieonderdelen ( $0,01 \times \text{norm}$ ) beoordeeld (zie Afbeelding 18).

AFBEELDING 18 SCHEMA OVERBELASTINGBENADERING



Dat wil bijvoorbeeld in het geval van een normfrequentie van 1/4000 jaar zeggen dat de waterstand met deze overschrijdingskans nog volledig veilig gekeerd moet kunnen worden. Het VTV en de Leidraad Kunstwerken bieden voor de hoogtetoets de mogelijkheid om bij een lage hoogte de komberging te beschouwen. Voor de toets van de betrouwbaarheid van de afsluitmiddelen zijn in de LK2003 in beperkte mate kentallen en stroomschema's aangereikt. Voor een geavanceerde toets zal in aanvulling op de kentallen een systeemanalyse en een betrouwbaarheidsanalyse cq. faalkansanalyse moeten worden opgesteld.

#### 4.2.3 BEOORDELINGSNIVEAUS

Het VTV onderscheidt verschillende niveaus van beoordeling: eenvoudige toetsing, gehanteerde ontwerpmethodode, gedetailleerde toetsing, geavanceerde toetsing en controle gedrag. Kenmerkend hiervan is dat bij gebrek aan (actuele) gegevens een niveau dieper wordt gegaan om het kunstwerk te kunnen toetsen. Indien ontwerpberekeningen voorhanden zijn, kan

bijvoorbeeld worden volstaan met een controle van de ontwerpberekeningen in een eenvoudige toetsing. Bij een gedetailleerde toetsing vindt een herberekening plaats conform rekenregels en methodes in de vigerende leidraden en normen.

Het oordeel volgens de Toetsing is kwalitatief. Er kunnen scores gehaald worden die variëren van goed als er ontwerp kwaliteit bestaat, voldoende als het kunstwerk voldoet aan de toetscriteria tot onvoldoende als niet wordt voldaan aan toetscriteria.

Bij historische kunstwerken is de kans groot dat men vanwege gebrek aan de benodigde informatie al snel uitkomt bij een geavanceerde toetsing. Onder een geavanceerde toetsing wordt in het VTV verstaan dat er specialistische inbreng nodig is. Hierbij kan naast herberekeningen ook worden gedacht aan probabilistische berekeningen. In het VTV wordt hiervoor verwezen naar de Leidraad Kunstwerken. In paragraaf 4.3 worden praktische handvatten gegeven voor een geavanceerde toets volgens het VTV.

#### 4.3 HANDVATTEN VOOR EEN GEAVANCEERDE TOETS VOLGENS DIJKVAKBENADERING VTV

De huidige toetspraktijk is gebaseerd op een kwalitatief oordeel over de staat van een kunstwerk. De beoordelingscriteria, in de vorm van maximaal toelaatbare overschrijdingsfrequenties van een waterstand, zijn gebaseerd op adviezen van de Deltacommissie voor de beveiliging tegen stormvloed.

De criteria die in de Leidraad Kunstwerken worden gehanteerd zijn (zie Afbeelding 18):

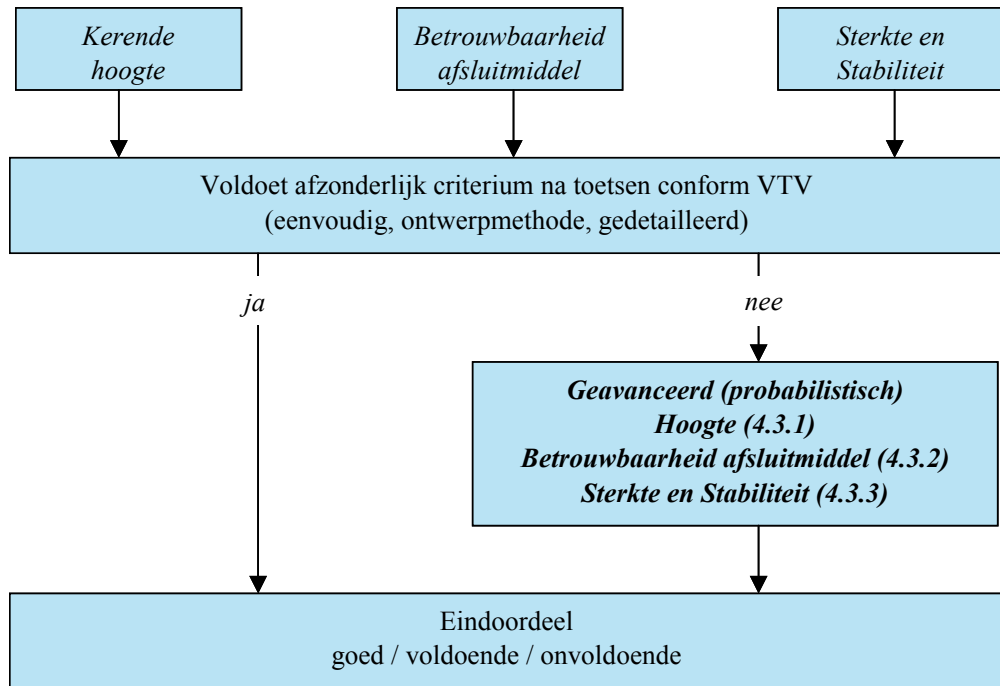
- de kerende hoogte (norm)
- de betrouwbaarheid van de afsluitmiddelen ( $0,1 \cdot \text{norm}$ )
- sterkte en stabiliteit ( $0,01 \cdot \text{norm}$ )

Deze criteria zijn overigens geen harde eisen, maar pragmatisch vastgestelde waarden afgeleid van de norm. Enige bandbreedte rondom deze waarden is acceptabel zolang de faalkans voor de topgebeurtenis niet wordt overschreden. De norm zoals vastgelegd in de Wet op de Waterkering, is een overschrijdingsfrequentie van een waterstand die een waterkering nog veilig moet kunnen keren. In deze faalkansanalyse wordt de overschrijdingsfrequentie voor de waterstand gebruikt als faalkans van het kunstwerk. Doordat zij dezelfde eenheid hebben worden zij vaak door elkaar gehaald. In feite wordt de "norm" hier alleen maar als vertrekpunt voor de faalkansanalyse gebruikt.

Bij gebrek aan gegevens of door de huidige toetsmethodiek is de kans aanwezig dat een historisch kunstwerk onterecht wordt afgekeurd. In onderstaand schema zijn de stappen aangegeven waarmee door middel van een enige nuancering, binnen de randvoorwaarden van het VTV, de kans op onterecht afkeuren van een historisch kunstwerk wordt verkleind.

Deze geavanceerde toets is meer een gevoeligheidsanalyse. Per criterium wordt onderzocht in hoeverre deze in het schema van de overbelastingbenadering (Afbeelding 18) bijdraagt in de faalkans. In de volgende paragrafen wordt dit per criterium uitgewerkt.

AFBEELDING 19 STROOMSCHEMA NUANCERINGEN IN HET VTV TOETS



#### 4.3.1 KERENDE HOOGTE

De hoogte van de constructie en de afsluitmiddelen is fysiek te beoordelen en een gebrek aan informatie zal dus niet snel leiden tot problemen in de toets.

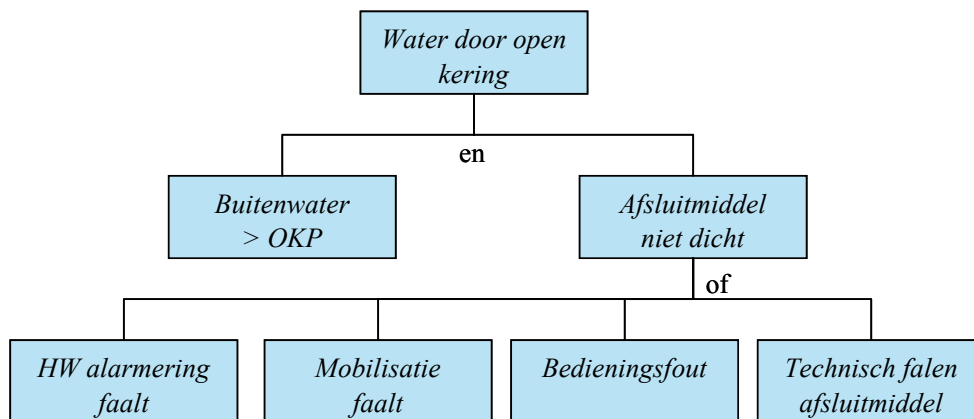
Van belang is echter te onderkennen dat bij het ontwerp van historische kunstwerken doorgaans nog niet dezelfde overwegingen een rol hebben gespeeld als tijdens het vaststellen van de huidige ontwerpwaterstanden. Bij het ontwerp van het kunstwerk is voor de overhoogte vaak een veiligheidsfactor of een vaste waarde gebruikt gebaseerd op ervaring en intuïtie die aspecten als opwaaiing, overslag, stijging van het buitenwater etc. moet dekken.

#### 4.3.2 BETROUWBAARHEID AFSLUITMIDDEL

Indien aanwezig moet de betrouwbaarheid van het afsluitmiddel beschouwd worden.

De foutenboom voor niet sluiten is hieronder weergegeven. Afhankelijk van de kans op overschrijding van het open keerpeil (OKP) en beschikbare informatie zal de toets eenvoudig, gedetailleerd of geavanceerd verlopen.

AFBEELDING 20 FOUTENBOOM GEBEURTENIS NIET-SLUITEN (BRON LK2003)



Technisch falen heeft betrekking op bijvoorbeeld de mechanische, elektrische en andere fysieke onderdelen van de kering. Bij historische kunstwerken zullen deze onderdelen vaak een hogere faalkans toebedeeld krijgen. De gebeurtenis van het niet sluiten van de afsluitmiddelen wordt ook in hoge mate beïnvloed door menselijk handelen (bediening, mobilisatie en alarmering). Er zijn verschillende mogelijkheden om, ook bij gebrek aan gegevens, toch tot een gefundeerd eindoordeel te komen.

In eerste instantie zal men bij een toets de relatief eenvoudige “gedetailleerde” beoordelingsmethode van de betrouwbaarheid van de sluiting uitvoeren. Naast het vaststellen van het open keerpeil (OKP) hoort hierbij onder andere het bepalen van de kans op niet sluiten. Het vaststellen van deze kans gebeurt op dit niveau door middel van scoretabellen in de LK2003 voor de aspecten hoogwateralarmeringssysteem, mobilisatie, bediening en technisch falen. De scoretabellen bieden de ruimte aan de toetsers om aspecten in kaart te brengen, die mogelijk een maatgevende bijdrage leveren aan de faalkans. Extra controles, procedures en oefeningen van procedures dragen significant bij aan de betrouwbaarheid van een kunstwerk. De toetsers kan zo zelf beoordelen waar winst valt te halen voor het specifieke kunstwerk. Elementen uit de toetsingsmethode worden dan dus gebruikt om te sturen op de gewenste veiligheid. Voorwaarde hierbij is dan wel dat er een onafhankelijk of objectieve controle plaatsvindt op deze toets en dat de geëiste veiligheid (0,1 x norm) wordt gehaald.

Mogelijkheid tot aanscherping van het oordeel van de gedetailleerde toets is een geavanceerde methode waarbij de veiligheid van de kering wordt beoordeeld met een volledige betrouwbaarheidsanalyse. Kenmerkend voor deze methode is de uitwerking van een foutenboom met als topgebeurtenis “afsluitmiddel niet tijdig gesloten” (figuur B3.16 LK2003). De getalwaarden voor de faalkansen worden hierbij onder andere ingevuld aan de hand van tabellen in de LK2003. Bij een kritische analyse van deze waarden is de kans groot dat er enige ruimte ontstaat om binnen de betrouwbaarheidsanalyse een lagere faalkans voor de (top)gebeurtenissen te bewerkstelligen. Met name de ervaringscijfers voor faalkansen van de fysieke elementen van een kunstwerk of menselijke fouten kunnen per kunstwerk verschillen. Zo kan bijvoorbeeld het gevaar voor aanvaren genuanceerd worden door de beheerder op basis van eigen ervaringen met het (historische) kunstwerk. Ook menselijke fouten kunnen door de beheerder gebaseerd op de werkelijke situatie tot een minder conservatieve, en dus betere schatting leiden dan de huidige standaardwaarden in de LK2003. Een en ander dient wel grondig geanalyseerd te worden en inschattingen van de beheerder of toetsers moeten voldoende beargumenteerd worden.



Op deze manier kan uit een gedetailleerde analyse van de basisgebeurtenissen in de foutenboom volgen dat hoge faalkans voor het menselijk handelen gedeeltelijk gecompenseerd kan worden door de technische betrouwbaarheid te verhogen (en omgekeerd).

#### 4.3.3 STERKTE EN STABILITEIT

Volgens de overbelastingbenadering (Afbeelding 18) wordt de faalkans voor de sterkte van het waterkerende kunstwerk kleiner dan  $0,01 \cdot \text{norm}$  aangehouden. Dit verschilt per kunstwerk. Zo wordt er onderscheid gemaakt tussen constructies die volledig zelfstandig water moeten keren en constructies die dat moeten doen in combinatie met een grondlichaam. Een indeling in typen kunstwerken is te vinden in de Leidraad Kunstwerken (B4).

De werkwijze in de LK 2003 is “semi-probabilistisch” en sluit aan bij de Technische Grondslagen voor Bouwconstructies (TGB). In de TGB is geïnventariseerd welke faalmechanismen en belastingen een rol spelen. De belastingfactoren en stabiliteitsfactoren zijn gebaseerd op de TGB met uitzondering van de vervalbelasting. Deze is door de Technische Adviescommissie Waterkeringen (TAW) bepaald als 1,25. Eventueel kan deze worden aangescherpt met behulp van appendix B4.2 van de LK2003. Het mechanisme achterloopsheid wordt zonder belastingfactor beschouwd.

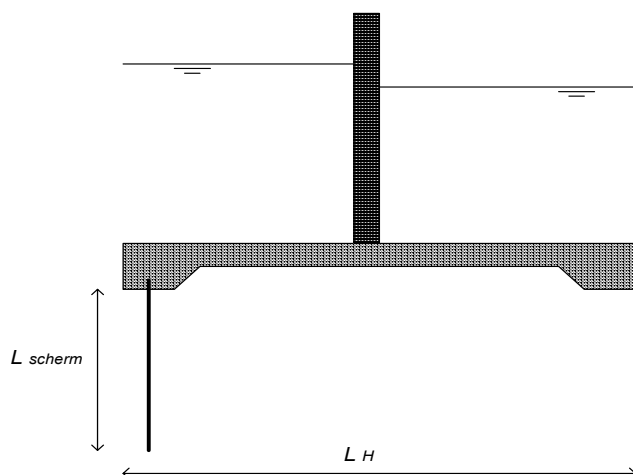
Dit onderdeel sterkte en stabiliteit levert de meeste problemen op bij de toets van historische kunstwerken. Met name een gebrek aan informatie over de eigenschappen vormt een probleem.

Bij historische kunstwerken kan het bijvoorbeeld voorkomen dat niet bekend is of er kwel-schermen zijn aangebracht. Dit is een belangrijk gegeven bij de beoordeling op het faalmechanisme onderloopsheid. Gebruik makend van gemeenschappelijke kenmerken van kunstwerken en eventueel met inschakeling van ervaringsdeskundigen (hulpmiddelen “Kenmerken”) kan een inschatting worden gemaakt van de faalkans van constructieonderdelen.

#### VOORBEELD

Als voorbeeld wordt hier een historisch waterkerend kunstwerk genomen waarvan het waarschijnlijk is dat er een kwel scherm aanwezig is maar waarvan men geen verdere specificaties heeft, zie Afbeelding 21 ter illustratie.

AFBEELDING 21 VOORBEELD PIPING



Op basis van een analyse van gemeenschappelijke kenmerken van vergelijkbare kunstwerken kan eventueel in combinatie met een probabilistische benadering tot een genuanceerder oordeel worden gekomen. Men kan bijvoorbeeld een gemiddelde waarde voor de lengte van het scherm vaststellen met een bepaalde spreiding, op basis van gegevens van (een reeks) vergelijkbare kunstwerken. Dat biedt aanknopingspunten om een betrouwbaarheidsfunctie op te stellen en d.m.v. een probabilistische benadering een som te maken. De betrouwbaarheidsfunctie voor het mechanisme onderloopsheid, uitgaande van Bligh, heeft de vorm van:

$$Z = R - S = L_{\text{totaal}} - c_1 * h$$

Met:             $L_{\text{totaal}}$  = totale kwelweglengte  
                    $c_1$             = constante afhankelijk van de grondsoort  
                    $h$                 = verval over de constructie

Hierin kunnen dan de totale kwelweglengte en het verval, dat afhankelijk is van de waterstanden, tot variabelen gemaakt worden. Een probabilistische som is mogelijk op niveau 2 zoals beschreven in de CUR 190.

Deze methode staat of valt met het beschikbaar zijn van (vergelijkbare) gegevens. Als er geen gegevens bestaan van zowel het betreffende kunstwerk als vergelijkbare kunstwerken, dan pas zal men een conservatieve beoordeling volgen. Hierbij wordt de opmerking gemaakt dat het onwaarschijnlijk is dat er totaal geen gegevens beschikbaar zijn. Immers, bovenstaande maakt deel uit van een geavanceerde toets. Voordat men in dit spoor terechtkomt bij toetsen volgens het VTV, zijn er reeds enkele beoordelingsniveaus doorlopen waarvoor informatie omtrent het kunstwerk nodig is.

#### 4.4 HANDVATTEN VOOR EEN GEAVANCEERD TOETSEN VOLGENS DIJKRINGBENADERING

##### 4.4.1 DIJKRINGBENADERING

Naast de dijkvakbenadering bestaat er ruimte om (waar gewenst en waar mogelijk) voor een integrale benadering te kiezen door uit te gaan van de gehele primaire waterkering die deel uit maakt van het stelsel dat het dijkringgebied omsluit. De zogenaamde dijkringbenadering (ook wel overbelastingsbenadering per dijkring) veronderstelt dat bij het ontwerp en onderhoud van de dijkring alle elementen van de waterkering (dijken, duinen, kunstwerken etc) in beschouwing worden genomen.

AFBEELDING 22 SCHEMATISERING VAN EEN DIJKRING



Rekening wordt gehouden met de samenhang tussen belastingen en faalmechanismen op verschillende locaties van de dijkkring, alsmede met mogelijke verschillen van beveiliging en gevolgen bij overstroming. De toelaatbare faalkans voor de dijksectie wordt afgeleid uit een veronderstelde verdeling van de toelaatbare faalkans over alle dijken, kunstwerken etc. van de beschouwde dijkkring.

Veiligheidseisen:

- 1 De kans op overschrijden van het toelaatbare overslagdebiet mag voor elke dijksectie niet groter zijn dan de afgeleide toelaatbare faalkans voor het betreffende dijkvak.
- 2 Bij overslagdebieten gelijk aan of lager dan het toelaatbare debiet mag de kans op falen per dijksectie door andere oorzaken dan overloop/overslag niet meer dan 10% van de bij punt 1 genoemde waarde bedragen.

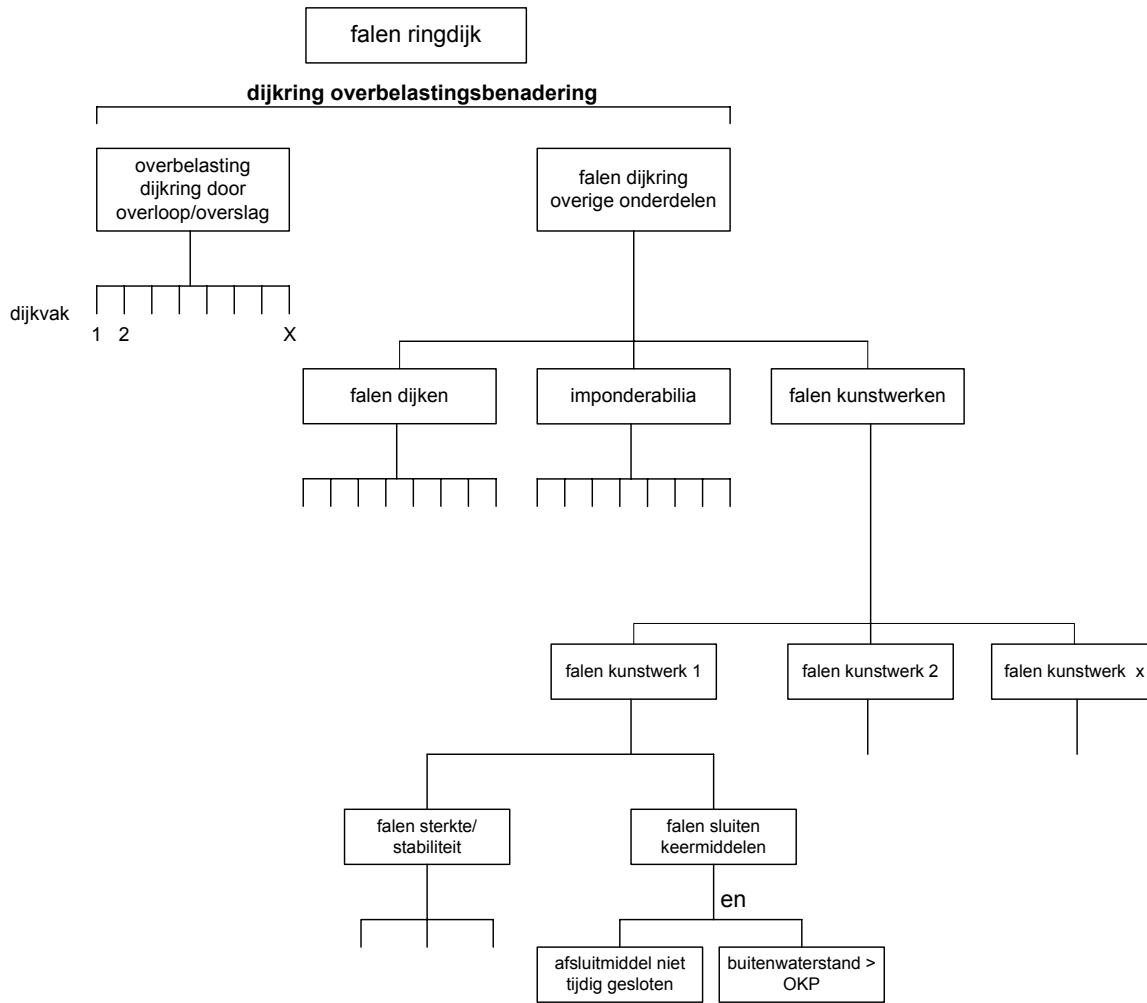
De huidige tendens in de veiligheidsbenadering is een verschuiving van de dijkvakbenadering naar een combinatie van de dijkkringbenadering en de overstromingsrisicobenadering (Project Veiligheid Nederland in Kaart). Een overstromingsrisicobenadering is een veiligheidsbeschouwing waarbij een hele dijkkring wordt beschouwd en rekening wordt gehouden met de gevolgen van overstroming in termen van slachtoffers en schade (kans maal gevolg).

In deze paragraaf worden handvatten aangereikt om te toetsen uitgaande van een dijkkringbenadering. Deze meer probabilistische benadering bij toetsen van kunstwerken is nog sterk in ontwikkeling en pretendeert niet meer te zijn dan een voorstel om tot geavanceerde methoden over te gaan. Overigens binnen de ruimte die het VTV daarvoor toelaat. Toepassing van deze methode dient van tevoren goed met het bevoegd gezag te zijn afgestemd.

Er wordt onderscheid gemaakt naar verschillende wijzen waarop de waterkering kan falen. Tevens is er onderscheid gemaakt tussen daadwerkelijke faalmechanismen en mechanismen die leiden tot overbelasting van de dijkkring. In de Afbeelding 23 is een foutenboom voor het falen van de ringdijk weergegeven.

In deze paragraaf wordt vooral ingegaan op categorie a waterkeringen. De methodiek is op alle typen waterkering toepasbaar. Omdat het onderzoek zich richt op de (historische) kunstwerken van het type I (volledig zelfstandig waterkerend) wordt hier vooral ingegaan op de uitwerking van de tak "falen dijkkring door overige onderdelen". In paragraaf 4.4.2 wordt kort ingegaan op een methode om de faalkans als gevolg van overloop en overslag te bepalen.

AFBEELDING 23 FOUTENBOOM DIJKRINGBENADERING



#### 4.4.2 OVERLOOP EN OVERSLAG

Een inschatting van de faalkans ten gevolge van onvoldoende kerende hoogte (Bron VNK, beoordeling waterkerende kunstwerken – algemeen) kan als volgt worden bepaald:

$$N_{f,h} = norm \times 10^{\frac{TP+W_{kh}-KH}{B}}$$

Met:	TP	=	Toetspeil (m t.o.v. NAP)
	$W_{KH}$	=	Vereiste veilige waakhogte
	KH	=	Kerende hoogte van de constructie (m.t.o.v. NAP)
	B	=	decimeringhoogte van de waterstand (m)

Een niveau 2 som, waarbij voor de verschillende variabelen gerekend wordt met statistische waarden in een vereenvoudigde vorm behoort ook tot de mogelijkheden. Voor het mechanisme overloop zou dat er als volgt uit kunnen zien:

$$Z = R - S = hc - h$$

Met:	hc	=	hoogte van de constructie en afsluitmiddelen
	h	=	waterstand ter plaatse van de constructie bepaald door factoren zoals waterstand, opwaaiing, seiches, buistoten etc.

#### 4.4.3 FALEN DIJKRING OVERIGE MECHANISMEN

Uitgegaan wordt van enige correlatie tussen de kunstwerken onderling (via de sterkte of via de belasting). De belasting kan per dijkringgebied verschillen en is als zodanig afhankelijk van de ligging van de dijkring t.o.v. de hydraulische randvoorwaarden (kust, meren, beneden- en bovenrivierengebied). De sterkte kan ook sterk per kunstwerk verschillen als ook de mechanismen die hierbij een rol spelen.

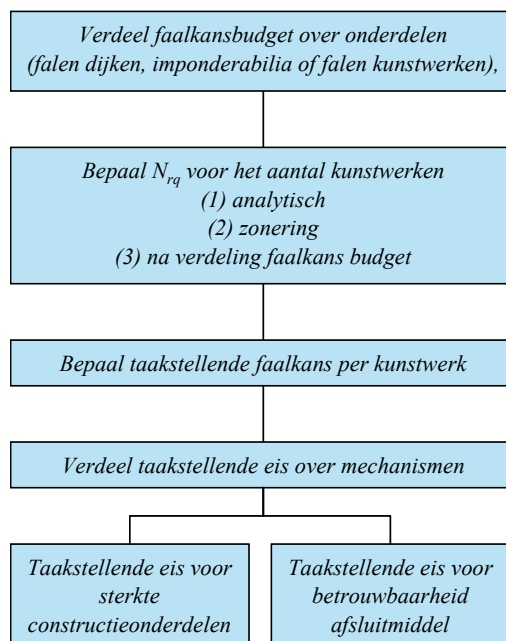
In plaats van het werkelijke aantal kunstwerken wordt de taakstellende faalkans voor alle kunstwerken samen verdeeld over een equivalent aantal kunstwerken ( $N_{eq}$ ). Hierbij geldt voor  $N_{eq}$  :  $1 \leq N_{eq} \leq n$ , waarbij  $n$  het werkelijke aantal kunstwerken in de dijkring is. Hoe kleiner  $N_{eq}$ , hoe hoger de taakstellende faalkans per kunstwerk, hoe meer ruimte om via een geavanceerde toets het kunstwerk als voldoende veilig te kunnen beoordelen.

Om te komen tot een taakstellende faalkans per (historische) kunstwerk worden de volgende stappen doorlopen:

- 1 Verdelen faalkans(budget) over onderdelen
- 2 Bepalen  $N_{eq}$  als representatieve waarde voor het aantal kunstwerken in de dijkring
- 3 Bepalen taakstellende faalkans voor het (historische) kunstwerk
- 4 Verdeling taakstellende eis over de mechanismen

Deze stappen worden hieronder nader uitgewerkt. Het stroomschema is weergegeven in Afbeelding 24.

AFBEELDING 24 STROOMSCHEMA TOETSEN MET DIJKRINGBENADERING



Nadat de taakstellende faalkans per kunstwerk is vastgesteld wordt de middels een risicoanalyse zoals beschreven in de LK2003, getoetst of het kunstwerk hier aan kan voldoen.

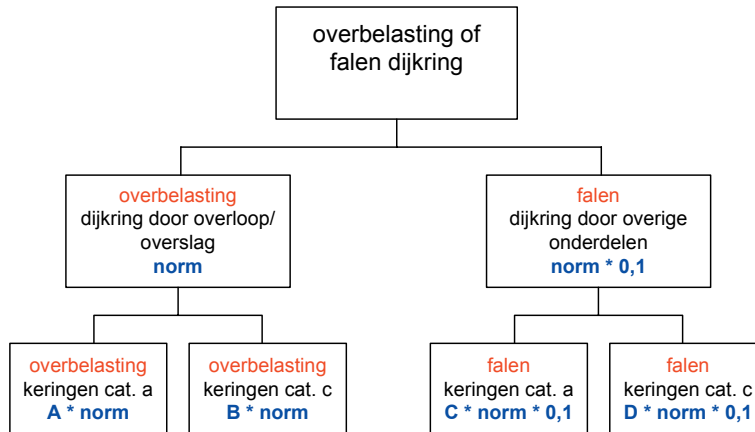
In wezen is deze methode een iteratief proces waar men een paar keer doorheen loopt tot men een optimale verdeling vindt waar de onderdelen aan kunnen voldoen.

#### 4.4.4 VERDELEN FAALKANS(BUDGET) OVER ONDERDELEN

Overeenkomstig de huidige toetsmethodiek en filosofie volgens de LK2003 wordt voor de toelaatbare kans op overbelasting van de dijkkring door overloop/overslag uitgegaan van de norm. Voor de toelaatbare kans op falen van de dijkkring door de overige mechanismen wordt uitgegaan van 10% van de norm. Indien nodig wordt hiervan een deel gereserveerd voor waterkeringen die indirect buitenwater keren (categorie c). Dat betekent dat de top van de boom uit Afbeelding 23 als volgt kan worden weergegeven:

$$A + B = 1 \text{ en } C + D = 1$$

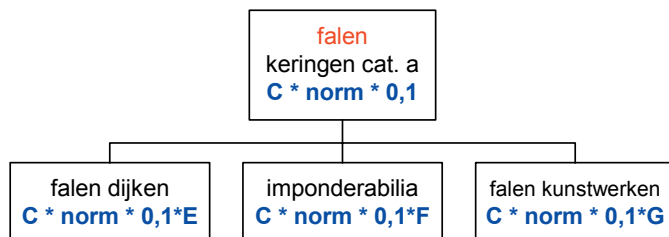
AFBEELDING 25 VERDELING FAALKANSBUDGET OVER ONDERDELEN



$$A + B = 1 \text{ en } C + D = 1$$

Om tot een toelaatbare faalkans per kunstwerk te komen, wordt een verdeling gemaakt van de faalkansruimte over de verschillende onderdelen. Van de faalkans van de dijkkring door overige onderdelen wordt bijvoorbeeld 3/5 (E) toebedeeld aan het falen van de dijken, 1/5 (F) wordt gereserveerd voor imponderabilia en nog eens 1/5 deel (G) wordt gereserveerd voor het falen van alle kunstwerken in de ringdijk. Van deze verdeling kan worden afgeweken afhankelijk van de lokale omstandigheden en een eerste inschatting van de waterstaatkundige kwaliteit van de kunstwerken. Overwogen moet worden waar men het beste extra faalkansruimte moet reserveren voor de geavanceerde toets.

AFBEELDING 26 VERDELING FAALKANSRUIMTE OVERIGE ONDERDELEN E + F + G = 1



#### 4.4.5 BEPALEN NEQ ALS REPRESENTATIEVE WAARDE VOOR HET AANTAL KUNSTWERKEN IN DE DIJkring

In plaats van het werkelijke aantal kunstwerken in de ringdijk wordt uitgegaan van een equivalent aantal kunstwerken ( $N_{eq}$ ). Het bepalen van het equivalent aantal kunstwerken in een dijkkring kan op verschillende manieren gebeuren. De mate van correlatie dient dan wel bekend te zijn. Als de correlatie niet bekend is, kan men hier een inschatting van maken. Er zijn drie manieren om  $N_{eq}$  te bepalen:

1. Via een analytische methode
2. Zonerings
3. Na verdeling van het faalkansbudget

##### 4.4.5.1 Analytische methode voor het bepalen van $N_{eq}$

Uitgegaan wordt van enige correlatie tussen de kunstwerken onderling (via de sterkte of via de belasting). In theorie (zie bijlage 2) ligt de faalkans van een systeem van  $n$  kunstwerken tussen:

$$\max(P(R_i < S_i)) \leq P_s \leq \sum_{i=1}^n P(R_i < S_i)$$

Dit zijn de elementaire grenzen waarbinnen de systeem faalkans kan liggen. Als we nu veronderstellen dat elk element (kunstwerk) dezelfde faalkans,  $P_e$ , heeft (of in ieder geval dezelfde orde) dan geldt voor de bovengrens van de systeemfaalkans,  $P_s \leq n \cdot P_e$

Als de faalkans van het systeem en de faalkans van een enkel kunstwerk bekend is, dan kan bepaald worden wat het equivalent aantal kunstwerken is dat bijdraagt aan de faalkans van het systeem. In feite geldt:

$$P(1 \text{ van de } n \text{ kunstwerken in het systeem faalt}) = N_{eq} \cdot P(1 \text{ kunstwerk faalt})$$

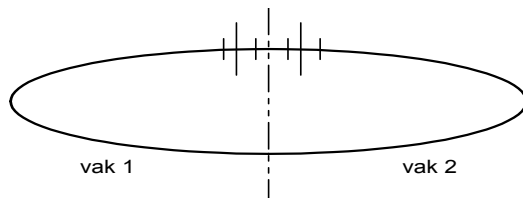
$$\text{of te wel: } P_s = N_{eq} \cdot P_e \quad \text{en dus} \quad N_{eq} = \frac{P_s}{P_e} \quad (3)$$

Elementaire bovengrens voor het equivalent aantal kunstwerken in de dijkkring is dan uiteraard het werkelijke aantal kunstwerken in de dijkkring:

Immers, bij volledige onafhankelijkheid tussen de elementen wordt de systeemfaalkans bepaald door de som van de faalkans van de kunstwerken. Als ondergrens voor  $N_{eq}$  geldt het aantal onafhankelijke hydraulische regimes dat langs de ring (het systeem) voorkomt.

Per definitie wordt de werkelijke waarde van  $N_{eq}$  bepaald door het quotiënt van de (feitelijke) faalkans van de dijkkring en de faalkans per element. Het werken met  $N_{eq}$  impliceert dat de faalkansen voor elk element gelijk zijn, of in ieder geval van dezelfde orde.

Ter illustratie wordt hieronder een eenvoudig voorbeeld gegeven van een situatie van een seriesysteem van 2 elementen, uit de PAO cursus Risicobenadering voor Waterkeringen [PAO RBW 2, 2002]. De elementen bestaan in dit geval uit twee dijkvakken. De twee dijkvakken worden vervangen door een enkel dijkvak. Deze methode van combineren van een systeem van elementen wordt in principe toegepast in PC-Ring (VNK).

**VOORBEELD: SERIESYSTEEM BESTAANDE UIT TWEE DIJKVAKKEN**

Stel dat de grenstoestandsfunctie van een dijkvak een functie is van de waterstand  $h$ , de windsnelheid  $v$  en het kritieke overslagdebiet  $q$ . Stel dat de betrouwbaarheidsfunctie voor alle dijkvakken hetzelfde is en stel dat de een niveau 2 som voor een enkele dijk als resultaat geeft:

$$\alpha_{ih} = 0,79, \alpha_{iv} = 0,44, \alpha_{iq} = 0,44 \text{ en dat } \beta_i = 4, \text{ en dus } P\{Z_i < 0\} = 0,32 \cdot 10^{-4}$$

Verder zijn de windsnelheid en de waterstand voor verschillende elementen volledig gecorreleerd, terwijl het kritieke overslagdebiet onafhankelijk is voor verschillende dijkvakken. Met andere woorden:  $\rho(h_i, h_j) = 1$ ,  $\rho(v_i, v_j) = 1$  en  $\rho(q_i, q_j) = 0$ .

Dan kan, op basis van bovenstaande, de rekenregels uit Bijlage 2 en CUR 190 (H6), de faalkansen bepaald worden van het seriesysteem.

Voor het hier gehanteerde voorbeeld geldt voor:  $\rho(Z_i, Z_j) = 0,81$ . Voor het falen van de twee dijkvakken kan dan worden gevonden dat:

$$P\{Z^{eq} < 0\} = P\{(Z_1 < 0) \cup (Z_2 < 0Z_2)\} = 0,59 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{Voor betekent dit een waarde van } N_{eq} = \frac{P\{Z^{eq} < 0\}}{P\{Z_i < 0\}} = \frac{0,59 \cdot 10^{-4}}{0,32 \cdot 10^{-4}} = 1,84$$

$N_{eq}$  is nauwelijks kleiner dan 2, dus er is maar weinig winst behaald.

Om de methode van het bepalen van  $N_{eq}$  te vereenvoudigen is nader (statistisch) onderzoek nodig waarbij de faalkansen van meerdere dijkkringen en elementen, dus kunstwerken, dijkvakken etc., worden geïnventariseerd. VNK heeft de kansen op en de gevolgen van overstromingen van een aantal dijkkringen in Nederland in kaart gebracht. Hierbij zijn de faalkansen per dijkringelement en de totale faalkansen voor de met het programma PC-Ring dijkkringen bepaald. Nader onderzoek moet plaatsvinden naar de mechanismen en parameters die de eindresultaten van het VNK project sterk beïnvloeden.

VNK heeft ten behoeve van dit STOWA onderzoek enkele gegevens van kunstwerken en dijkkringen ter beschikking gesteld. Het onderzoek geeft enig inzicht in de spreiding over de  $P_f$  van kunstwerken in een ring Omdat de eindresultaten nog aan verandering onderhevig zijn, lenen zij zich er niet voor om per dijkringgebied een  $N_{eq}$  aantal kunstwerken af te leiden.. Na eventueel nader onderzoek op de eindresultaten van het VNK project kan  $N_{eq}$  per dijkkring bepaald worden. Dit kan leiden tot een gemiddelde een  $N_{eq}$  per dijkkring.

Om deze reden zijn nog een tweetal pragmatische methoden bedacht om een equivalent aantal kunstwerken te kunnen bepalen. De bovengrens van  $N_{eq}$  is het werkelijk aantal kunstwerken. Hoe lager  $N_{eq}$ , hoe groter de taakstellende faalkansen per kunstwerk wordt, hoe meer ruimte er ontstaat zodat een kunstwerk binnen de ring kan voldoen.

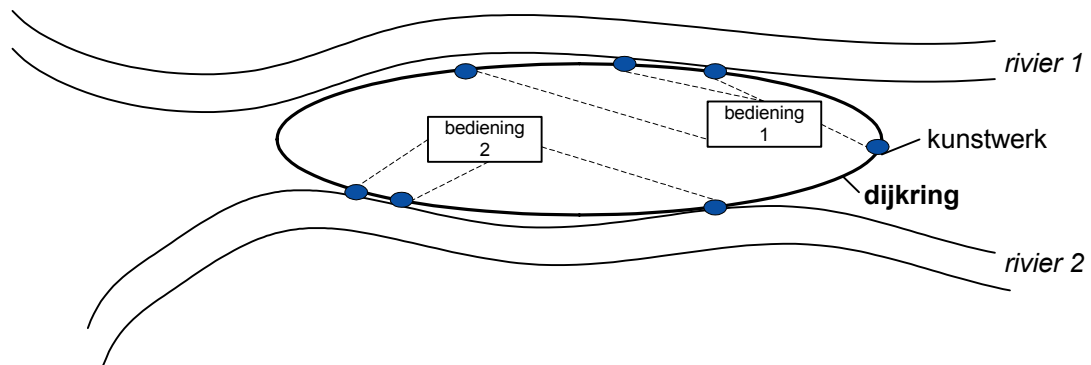


#### 4.4.5.2 Zonering

De benodigde informatie voor het concreet bepalen van de waarde van  $N_{eq}$  is op dit moment nog niet betrouwbaar genoeg. Als alternatief wordt een meer pragmatische aanpak voorgesteld. De dijk wordt hierbij in zones ingedeeld. Dat wil zeggen dat de elementen (kunstwerken) van de dijkkring worden ingedeeld in zones waarbij de volgende aspecten in de verdeling een rol spelen:

- hydraulisch regime
- de ligging van de kunstwerken t.o.v. die regimes
- beheer (bediening)
- aantal kunstwerken
- overige parameters die een rol spelen v.w.b. sterkte en stabiliteit

AFBEELDING 27 SCHETS VAN EEN DIJKRING MET KUNSTWERKEN

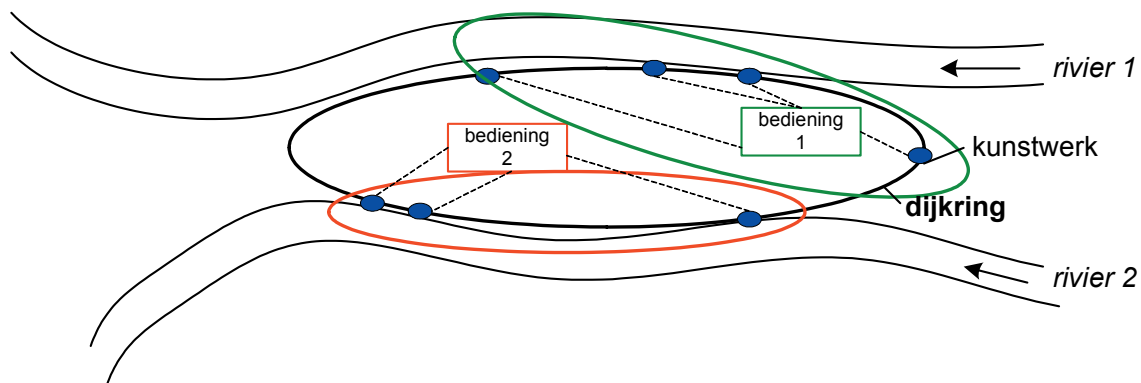


Veronderstel een dijkkring belast door twee onafhankelijke hydraulische regimes. In de dijkkring bevinden zich zeven kunstwerken, waarvan er vier door op locatie 1 worden bediend en drie kunstwerken worden op locatie 2 bediend. Van de vier kunstwerken keren er drie direct buitenwater van rivier 1 en een kunstwerk indirect. De drie kunstwerken die op locatie 2 worden bediend, keren allemaal direct buitenwater van rivier 2.

Bij volstrekt identieke kunstwerken met dezelfde sterkte en dezelfde belasting volgt  $N_{eq} = 1$ . In dit geval wordt de taakstellende faalkans van alle kunstwerken samen niet nog eens verdeeld over de kunstwerken en dus niet nog kleiner per kunstwerk. Dit zal helaas zelden voorkomen. Gekeken moet ook worden naar sterkte kant van de betrouwbaarheidsfunctie, de mechanismen (basisgebeurtenissen die leiden tot falen) en de parameters die hierop van invloed zijn. Als deze zijn gecorreleerd dan kan worden ingeschat in hoeverre de kunstwerken als "identiek" kunnen worden beschouwd. Indien dit niet voldoende kan worden gemotiveerd, dient voor  $N_{eq}$  het aantal kunstwerken aangehouden te worden.

In ons voorbeeld gaan wij er van uit dat voor een aantal kunstwerken deze parameters inderdaad gecorreleerd zijn. In onderstaande figuur 12. is weergegeven hoe de zonering voor wat betreft de kunstwerken er dan uitziet. Uit dit voorbeeld volgt een  $N_{eq} = 2$ .

AFBEELDING 28 VOORBEELD VAN ZONERING



Daarnaast kan altijd nog afhankelijk van de informatie die men heeft over een specifiek kunstwerk overwogen worden binnen een zone de kans te verdelen om het ene kunstwerk meer faalkansruimte te geven ten opzichte van de kunstwerken in dezelfde zone. Dit heeft veel weg van de volgende methode om  $N_{eq}$  in te schatten.

#### 4.4.5.3 Bepalen $N_{eq}$ na verdeling van het faalkansbudget

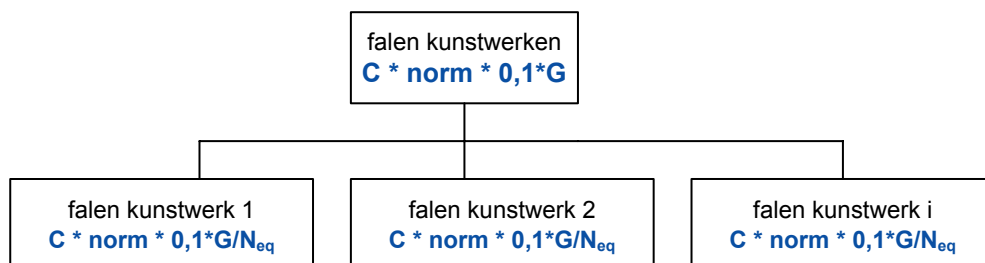
In verband met de integrale beoordeling vindt, in geval er meerdere beheerders per dijkkring zijn, eerst afstemming plaats. De beheerders dienen onderling overeenstemming te bereiken omtrent de sterke en zwakke schakels in de ring (kwalitatief oordeel, ervaring). Dit vormt een essentieel onderdeel van deze aanpak. Kunstwerken waar de beheerders twijfelen over de conditie krijgen dan een hogere faalkans toebedeeld. De kunstwerken waar men het meeste vertrouwen in heeft, krijgen een lage faalkans toegekend.

Het verdelen van de faalkansen over de kunstwerken is een iteratief proces. Mogelijk zal na een eerste analyse blijken of een nieuwe herverdeling moet worden gemaakt, om de foutenboom sluitend te kunnen maken.  $N_{eq}$  volgt uit de faalkans van de dijkkring gedeeld door de gemiddelde faalkans van de kunstwerken. Doordat hij achteraf wordt bepaald, is in dit geval  $N_{eq}$  minder relevant.

#### 4.4.6 BEPALEN TAAKSTELLEDE FAALKANS VOOR HET (HISTORISCHE) KUNSTWERK

Op basis van bovenstaande kan de taakstellende faalkans per (historisch) kunstwerk worden vastgesteld. De taakstellende kans per kunstwerk wordt dan:  $C \cdot \text{norm} \cdot 0,1 \cdot G / N_{eq}$

AFBEELDING 29 TAAKSTELLEDE FAALKANS PER KUNSTWERK



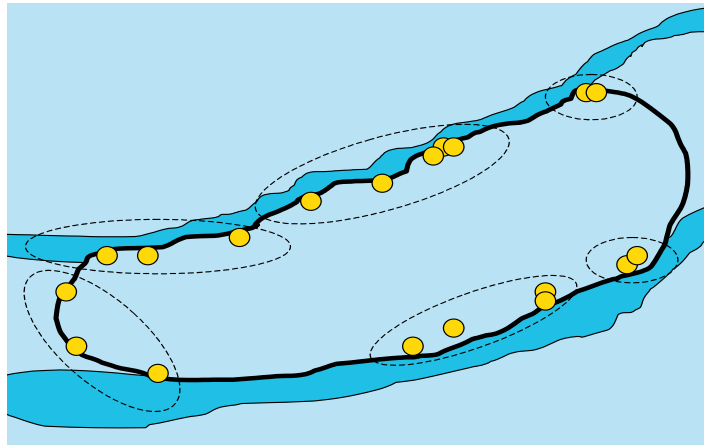
De taakstellende faalkans voor het kunstwerk wordt nu verdeeld over de verschillende mechanismen, afhankelijk van het type kunstwerk. Via de hulpmiddel Kenmerken is er (aanvullende) informatie verzameld over de opbouw en onderhoudstaat van het kunstwerk, wat een extra hulpmiddel is bij het verdelen van de faalkans over de mechanismen. Met name bij het kwantificeren van de sterkte.

Voor de betrouwbaarheid van het afsluitmiddel wordt gebruik gemaakt van de kentallen in de Leidraad Kunstwerken. Voor een geavanceerde toets zijn vaak een aanvullende systeem-analyse en faalkansanalyse nodig om beter inzicht in de verschillende mechanismen te krijgen.

#### 4.5 VOORBEELD

Ter illustratie wordt hier als voorbeeld een fictieve dijkring uitgewerkt. Voor deze dijkring moeten veiligheidseisen worden afgeleid om op kunstwerkniveau te komen tot een taakstellende eis.

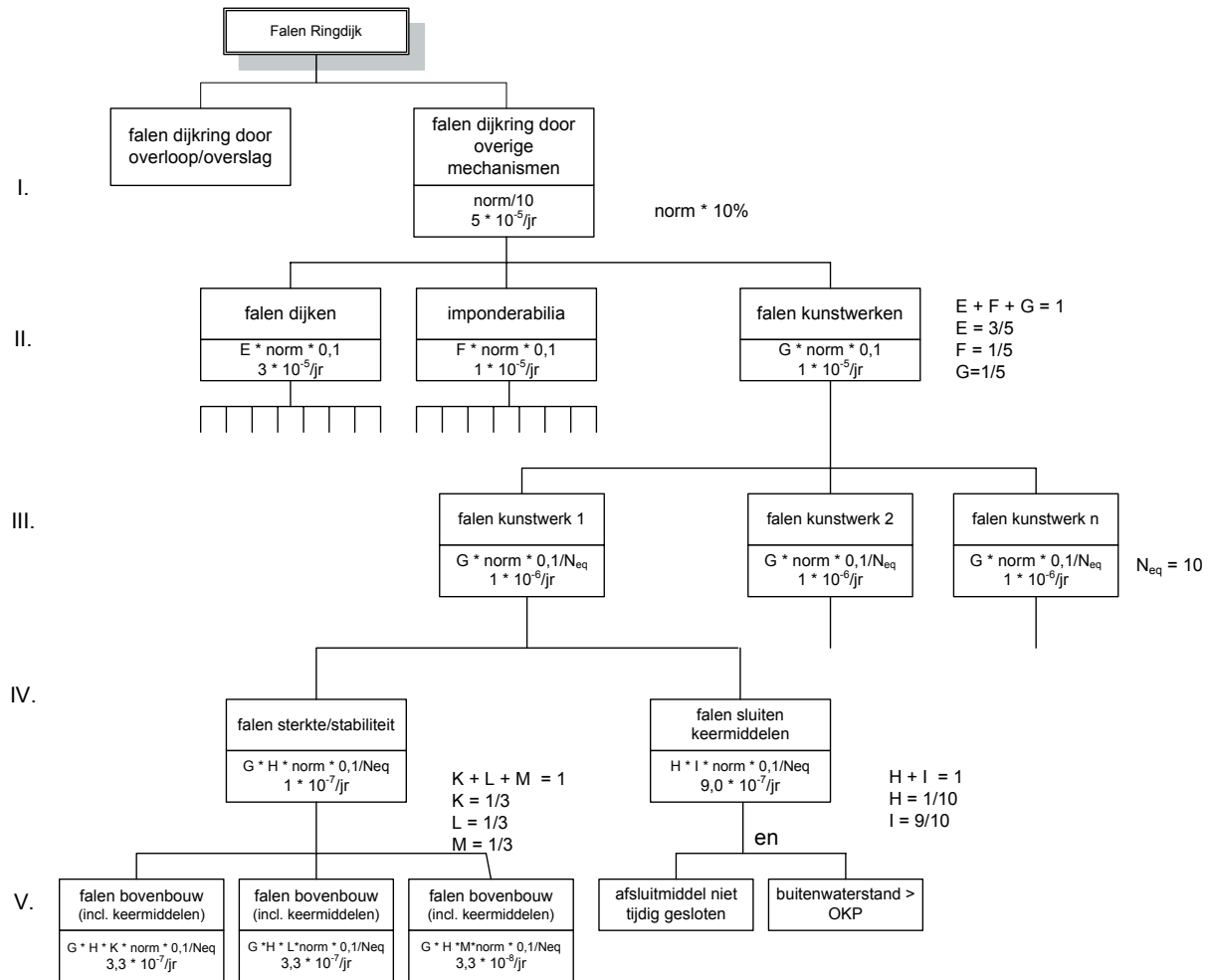
AFBEELDING 30 VOORBEELD DIJKRING



Het betreft met name taakstellende eisen voor de sterkte van constructieonderdelen en voor de betrouwbaarheid van de sluiting. Een dijkringbenadering is gehanteerd met als basis de foutenboom uit Afbeelding 23. In dit voorbeeld wordt alleen de tak kunstwerken verder uitgewerkt (zie Afbeelding 31).

Het hier gegeven voorbeeld is het resultaat van een (vaak) iteratief proces waarin meerdere malen aannames worden gedaan en faalkansen herverdeeld om te kunnen voldoen aan een van tevoren vastgestelde taakstellende faalkans voor de dijkring met haar onderdelen. Uit de eerste iteratiestap volgt al vrij snel welke mechanismen een dominante rol spelen in de totale faalkans. Aanbevolen wordt om dan vooral te focussen op die mechanismen. Het vaststellen van die taakstellende faalkans moet in overleg met het bevoegd gezag gebeuren. De daarna volgende herverdeling en aannames is dienen goed en navolgbaar onderbouwd te worden.

AFBEELDING 31 VOORBEELD FOUTENBOOM



### Stap I

Vertrekpunt is de norm voor de overschrijdingsfrequentie van de waterstand die nog veilig gekeerd moet kunnen worden. In dit voorbeeld een dijkkringfrequentie van 1/2000 per jaar ( $5 * 10^{-4}$ ). Van deze norm wordt 90% gereserveerd voor het falen als gevolg van overloop/overslag en 10% voor het falen van de ringdijk door alle overige mechanismen. Met andere woorden als faalkans voor alle dijkvakken tezamen door overige mechanismen wordt  $5 * 10^{-5}$  per jaar aangehouden.

### Stap II

Van de faalkans van de dijkkring door overige mechanismen wordt in dit voorbeeld 60% gereserveerd voor het falen van de dijken, 20% voor imponderabilia (bv. muskusratten, kruierend ijs) en 20% voor het falen van alle kunstwerken.

### Stap III

De in Afbeelding 30 geschetste fictieve dijkkring bevat 19 waterkerende kunstwerken, die door hun ligging ten opzichte van de 2 rivieren, beheer en bediening en overeenkomsten onder te verdelen zijn in 6 zones. Dit leidt tot een eerste schatting van  $N_{\text{eq}} = 6$ . Rekening houdend met toekomstige ontwikkelingen en onzekerheid wordt conservatief gerekend met  $N_{\text{eq}} = 10$ .

#### Stap IV

Om te komen tot een taakstellende eis voor de constructieonderdelen zal er een indicatieve schatting gemaakt moeten worden van de faalruimte verdeling. In eerste instantie wordt hier uitgegaan van een faalruimteverdeling van 10% voor sterkte/stabiliteit en 90% voor het falen van de sluiting van de keermiddelen. Dat geeft een maximaal toelaatbare faalkans voor sterkte/stabiliteit van  $1,0 * 10^{-7}$  per jaar. En voor het sluiten van de keermiddelen  $9,0 * 10^{-7}$  per jaar.

#### Stap V

De laatste stap is weer een herverdeling van de toelaatbare faalkans per mechanisme dat kan leiden tot het falen van de constructie op sterkte of stabiliteit of falen van het afsluitmiddel en vervolgens het controleren of aan deze toelaatbare faalkans voldaan kan worden. Hierbij kan gebruik worden gemaakt van kengetallen en ervaringscijfers zoals bijvoorbeeld opgenomen in de LK2003.

Voor de coupures Dalempoort en Waterpoort is Provincie Zuid-Holland zo ver gegaan dat aan de hand van boorkernen uit het metselwerk de daadwerkelijke sterkte van het metselwerk is onderzocht. Hiervan is een betrouwbaarheidsindex  $\beta$  afgeleid en daarmee de faalkans. Gebleken is dat het metselwerk dermate sterk is dat vrijwel alle faalkansruimte kon worden benut voor het falen van de sluiting.

# 5

## HULPMIDDEL 'MAATREGELEN'

### 5.1 INLEIDING

Indien gebruik van de hulpmiddelen 'Kenmerken' en 'Eisen' niet leidt tot een oordeel in de toetsing, is in de meeste gevallen een fysieke ingreep noodzakelijk.

Een nader onderzoek om door middel van beproevingen en/of metingen te komen tot een sterkte-schatting is een eerste optie. Dergelijke onderzoeken hebben echter vaak een lange looptijd, zijn relatief kostbaar en leveren in veel gevallen nog slechts globale en minder betrouwbare informatie.

Een tweede mogelijkheid is de constructie te versterken of aan te passen zodat door het aanbrengen van de versterkende maatregel de zekerheid en aantoonbaarheid van de waterstaatkundige veiligheid wordt verkregen.

Het doel van dit hulpmiddel is een snelle en eenvoudige afwegingsmethode tussen (duur) nader onderzoek en relatief goedkope ingrepen ter versterking van de constructie. Deze afweging is in bijna alle gevallen maatwerk. Het is daarom volgens ons niet mogelijk een pasklaar antwoord te hebben voor elke situatie. Wel is het mogelijk hiervoor bouwstenen aan te reiken.

In paragraaf 5.2 is de afwegingsmethode beschreven. In de daaropvolgende paragrafen wordt voor de meest voorkomende onbekende kenmerken een onderzoeksvorstel gedaan en voorstel voor versterking.

### 5.2 AFWEGINGSMETHODE

Analoog aan het hulpmiddel 'Kenmerken', wordt hierbij geconcentreerd op de belangrijkste onbekenden voor de toetssporen Stabiliteit van de constructie (STCG) en Piping en heave (STPH).

Toetsspoor	Onbekende	Onderzoek	Versterking
STCG	Paal draagvermogen	1. Proefpaalbelasting	1. Aanbrengen nieuwe paalfundering 2. Ontlasten constructie
STCG	Stabiliteit wandconstructie	1. Materiaalonderzoek	1. Verzwaren wanden 2. Ontlasten constructie
STCG	Sterkte gewelfconstructies	1. Materiaalonderzoek	1. Aanbrengen gewapend beton op gewelf
STPH	Kwelweglengte	1. Grondradar 2. Remote sensing grondwaterstromen	1. Aanbrengen damwandscherm 2. Aanbrengen jet-grout injecties

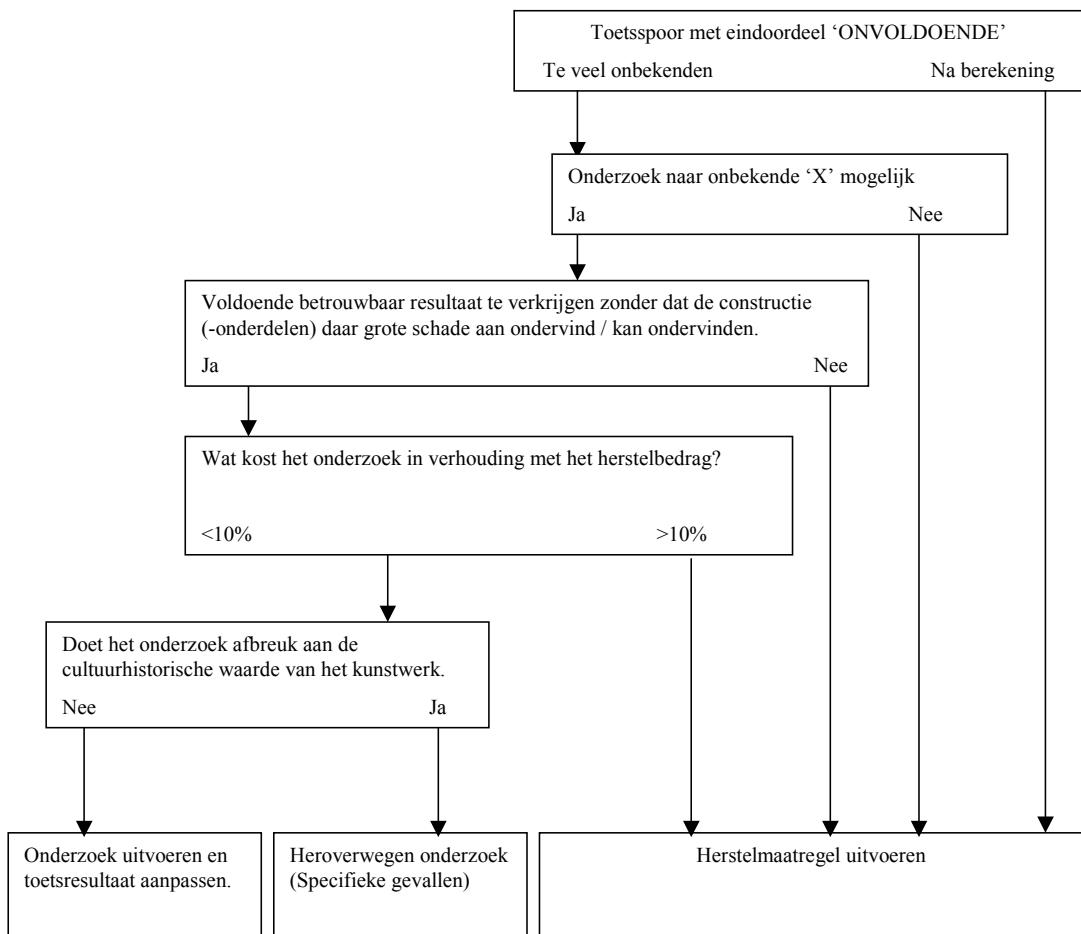
In het stroomschema (Afbeelding 32) wordt de afwegingsmethode voor de maatregelen beschreven. Hierbij start het stroomschema met de afweging welke onbekenden er zijn, of deze met behulp van onderzoek te achterhalen zijn en of tot een voldoende onderbouwd resultaat gekomen kan worden. Daarna moet er gekeken worden of het (destructief) onderzoek risico's met zich mee brengt ten aanzien van het verslechteren van de toestand van

bepaalde onderdelen. Hierbij kan gedacht worden aan het droogzetten van houten paal funderingen (risico houtrot), droogzetten van sluisvloer (risico opbarsten of opgedrukt worden van de constructie) of het volledig blootgraven van constructie (risico verminderde stabiliteit van de waterkering en/of de constructie zelf).

De kosten van een destructief onderzoek aan (historische) kunstwerken zijn doorgaans hoog. Soms kan er met betrekking tot de kosten de overweging gemaakt worden om geen onderzoek uit te voeren, maar gelijk over te gaan naar de uitvoering van een herstelmaatregel. Hierbij zal altijd de afweging gemaakt moeten worden tussen de te investeren kosten ten opzichte van het resultaat van het onderzoek en de uitvoeringskosten.

Destructief onderzoek kan de cultuurhistorische waarde van een kunstwerk aantasten. De mate waarin kan doorslaggevend zijn om voor een alternatieve methode te kiezen. Deze alternatieve methoden zullen per specifiek geval bepaald moeten worden.

AFBEELDING 32 AFWEGINGSMETHODE TEN BEHOEVE VAN DE HERSTELMAATREGELEN



### 5.3 TOETSSPOOR STABILITEIT CONSTRUCTIE EN GROND (STCG)

#### 5.3.1 ONBEKENDEN MET BETREKKING TOT HET PAALDRAAGVERMOGEN VAN EEN HOUTEN PAALFUNDERING

##### 5.3.1.1 Onderzoeken

1. Proefbelasting op paal toepassen.

Gedeeltelijk slopen van de constructie, vrijgraven paal en druk uitoefenen op de paal tot bezwijken.

*Nadelen:*

- destructieve maatregelen noodzakelijk;
- omvangrijke operatie (droogzetten, gedeeltelijk slopen en weer herstellen)

*Voordelen:*

- goed beeld van de onderhoudsstaat
- zo reëel mogelijke gegevens van paal draagvermogen

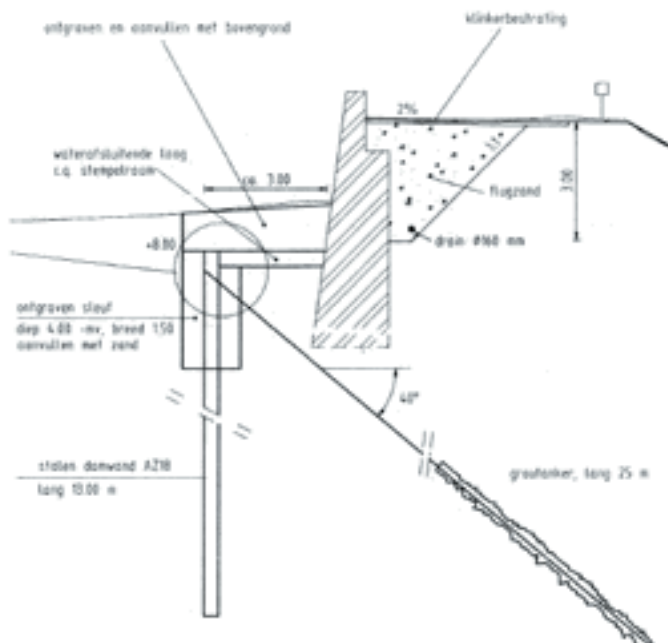
*CONCLUSIE:*

Selectief toepassen wanneer er twijfel is bij de onderhoudsstaat (bijvoorbeeld vermoedens van droogstand van de fundering dan wel scheurvorming/verzakking) of wanneer uit een herberekening met conservatieve inschatting van het paal draagvermogen wordt geconcludeerd dat sprake is van een te lage veiligheid.

##### 5.3.1.2 Versterking

1. Aanbrengen nieuwe paalfundering en/of verankering.

AFBEELDING 33 VERSTERKING HORIZONTALE STABILITEIT WALMUREN TIEL





Nadelen:

- kostbare operatie
- uitvoeringsrisico's in verband met blijvende onzekerheden in de bestaande situatie

Voordelen:

- grote zekerheid van de veiligheid
- er kunnen grotere veiligheidsmarges worden verkregen

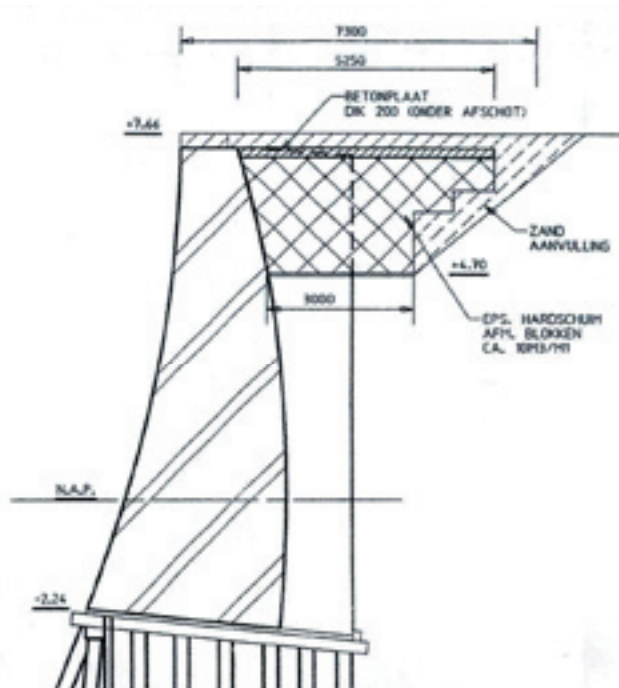
CONCLUSIE:

Alleen toepassen wanneer er volle overtuiging van het onvoldoende functioneren van de fundering.

## 2. Ontlasten van de constructie door toepassing van lichte ophoogmaterialen

Gebruik van polystyreen blokken, EPS hardschuim of schuimbeton als aanvulmateriaal achter of op kerende constructies kan de belastingen verlagen, waarmee de veiligheid kan worden vergroot.

AFBEELDING 34 ONTLASTING KOLKWANDEN MET LICHTE AANVULMATERIALEN KONINGINNESLUIS



Nadelen:

- de onzekerheden met betrekking tot de mechanische eigenschappen van de bestaande, oude constructie blijven bestaan

Voordelen:

- relatief eenvoudige, goedkope ingreep

CONCLUSIE:

Deze methode is vooral toepasbaar bij constructies waarvan is aangetoond dat de houten fundering in goede staat verkeert en waarvan de verwachting is dat in de toekomst een minimale aantasting zal optreden en geen wijzigingen optreden in de belastingen. Immers, de paalfundering moet de constructie volledig kunnen blijven dragen.

### 5.3.2 ONBEKENDEN MET BETREKKING TOT DE STABILITEIT VAN WANDCONSTRUCTIES

#### 5.3.2.1 Onderzoeken

##### 1. Inventariseren afmetingen en materiaalonderzoek metselwerk

Door middel van het nemen van kernen uit het materiaal van de wanden kan worden geïnventariseerd welke afmetingen de wand heeft en welke sterkte-eigenschappen aan het metselwerk kunnen worden toegekend. Daarnaast kunnen de kernen inzicht geven in de kwaliteit van het metselwerk (samenhang, aanwezigheid scheuren etc.). De kernen moeten een minimale diameter van 100 mm hebben. Kernen kunnen in een laboratorium worden onderzocht op druksterkte, volumieke massa etc.

AFBEELDING 35 BOORKERNEN UIT GEMETSELDE WAND KADEMUUR ZIERIKZEE



#### Nadelen:

- enige mate van destructief onderzoek

#### Voordelen:

- met relatief geringe middelen wordt een goed inzicht verkregen in de opbouw en kwaliteit van de wand

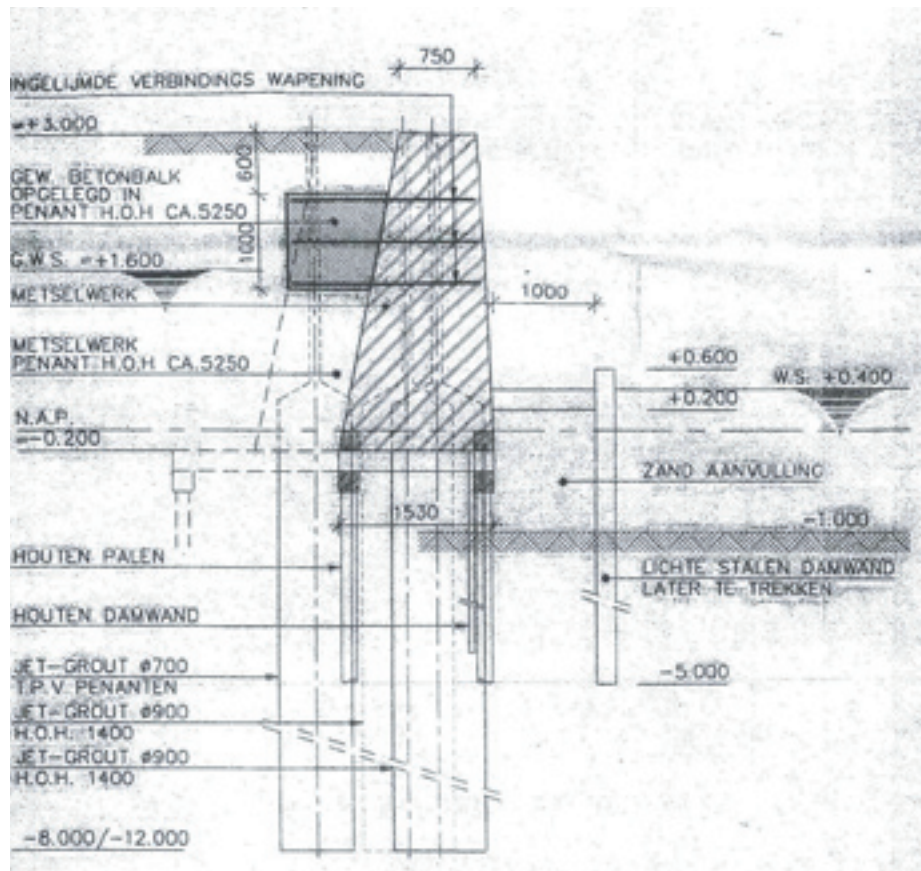
#### CONCLUSIE:

Als eerste, relatief goedkope stap in een onderzoekstraject een goede optie.

## 5.3.2.2 Versterking

## 1. Aanbrengen wandverzwaringen

AFBEELDING 36 VERSTERKING KOLKWAND DOOR MIDDEL VAN JET-GROUT-INJECTIE (ALS TREKELEMENT EN DRUKPAAL) SLUIS NIEUWEGEIN



Nadelen:

- relatief kostbare operatie
- blijvende onzekerheden in de bestaande situatie en mogelijke verschillen in gedrag tussen oude en nieuwe constructie

Voordelen:

- grotere zekerheid van de veiligheid en van de veiligheidsmarges

CONCLUSIE:

Alleen toepassen wanneer er volle overtuiging van het onvoldoende functioneren van de fundering.

2. Ontlasten van de constructie door toepassing van lichte ophoogmaterialen zie par. 5.3.1.2.

### 5.3.3 ONBEKENDEN MET BETREKKING TOT DE STERKTE VAN GEWELFCONSTRUCTIES VAN METSELWERK

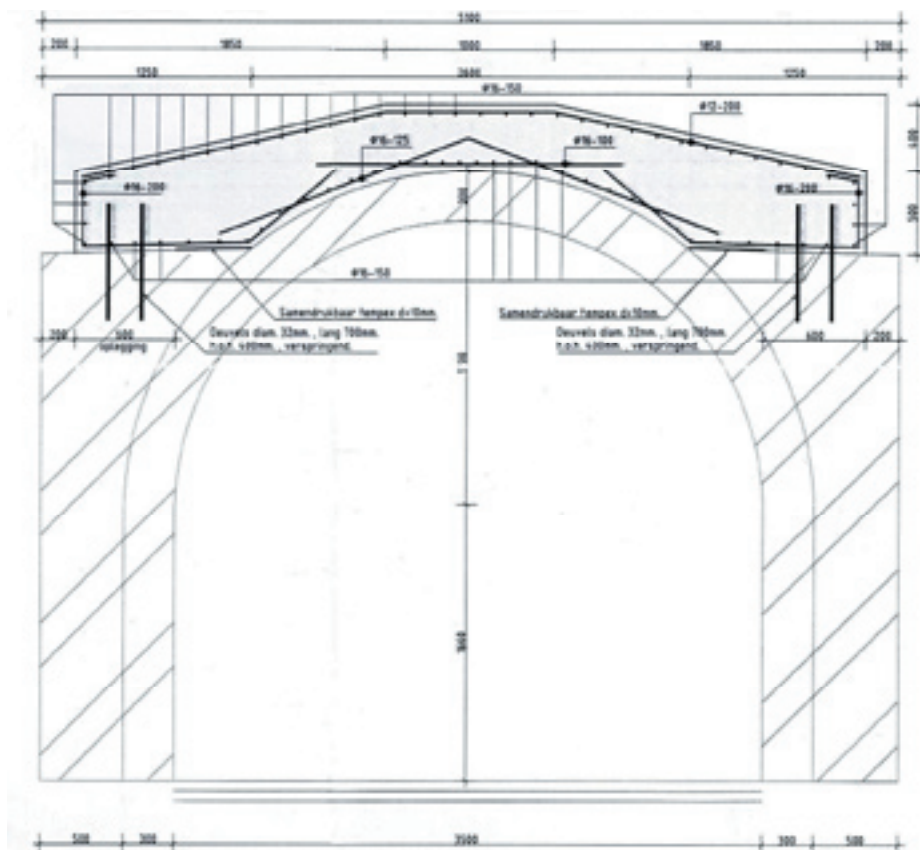
#### 5.3.3.1 Onderzoeken

1. Inventariseren afmetingen en materiaalonderzoek metselwerk zie par. 5.3.2.1.

#### 5.3.3.2 Versterking

1. Aanbrengen versterking van gewapend beton op het gewelf

AFBEELDING 37 VERSTERKING GEWELF DOOR MIDDEL VAN OPBRENGEN VAN GEWAPEND BETON BOVENSLUIS BIJ WILLEMSTAD



#### Nadelen:

- relatief kostbare operatie
- alleen in combinatie met het aanbrengen van een nieuwe paalfundering wordt een constructie verkregen, die volledig onafhankelijk van de bestaande constructie is en daarmee alle onzekerheden van de sterkte van de bestaande constructie wegneemt.

#### Voordelen:

- oorspronkelijke constructie zo veel mogelijk gehandhaafd.

#### CONCLUSIE:

Alleen toepassen wanneer er volle overtuiging van het onvoldoende functioneren van de fundering.

## 5.4 TOETSSPOOR PIPING EN HEAVE (STPH)

### 5.4.1 ONBEKENDEN MET BETREKKING TOT DE KWELWEGLENGTE

#### 5.4.1.1 Onderzoeken

##### 1. Grondradar

Met behulp van radartechnieken kunnen objecten in de grond worden geïnventariseerd.

#### Nadelen:

- radartechnieken voor het in kaart brengen van in de grond aanwezige objecten zijn sterk in ontwikkeling en de betrouwbaarheid ervan wordt nog ter discussie gesteld, met name bij metingen op grotere diepte.
- aanwezigheid van palenvelden kunnen sterk verstoringen veroorzaken van de resultaten
- geen oordeel over de werking en/of de kwaliteit van een kwelscherm

#### Voordelen:

- geen destructief onderzoek noodzakelijk

#### CONCLUSIE:

Vanwege geringe betrouwbaarheid altijd toepassen in combinatie met steekproefsgewijze controles.

##### 2. Onderzoek grondwaterstromingen

Met behulp van meetsondes in de waterkering kan een beeld worden verkregen van de grondwaterstromingen door het grondlichaam en daarmee het functioneren van kwelschermen. Er wordt onder andere gewerkt met temperatuurmeting, waaruit stromingen kunnen worden herleid. Deze techniek staat in de kinderschoenen en moet nog verder worden geoptimaliseerd.

#### Nadelen:

- vereist lange looptijd
- het resultaat is beperkt tot een kwalitatief oordeel over de mate waarin stromingen plaatsvinden, gegevens over afmetingen en onderhoudsstaat van onderdelen kan hieruit niet of nauwelijks worden herleid.
- een oordeel over de weerstand tegen piping/heave onder maatgevende omstandigheden is moeilijk op te stellen; de kennis ontbreekt om te komen tot extrapolatie van de dagelijkse omstandigheden naar de maatgevende.

#### Voordelen:

- geen destructief onderzoek noodzakelijk

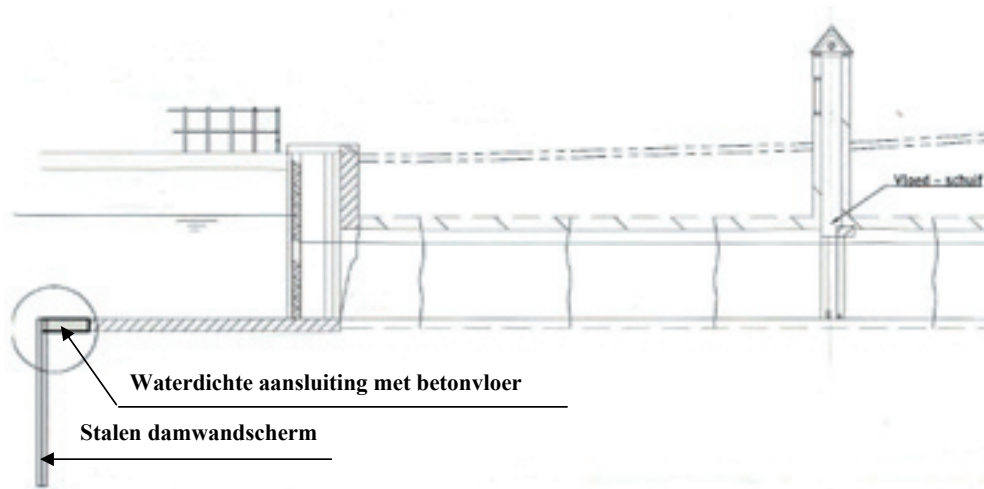
#### CONCLUSIE:

Deze methode is meer geschikt voor het uitvoeren van fundamenteel onderzoek naar piping/heave bij waterkerende kunstwerken in het algemeen.

5.4.1.2 Versterking

1. Aanbrengen extra damwandscherm

AFBEELDING 38 AANBRENGEN STALEN DAMWANDSCHERM BIJ EEN GEMETSELDE KOKER (STADSESLUIS WILLEMSTAD)



Nadelen:

- relatief kostbare operatie

Voordelen:

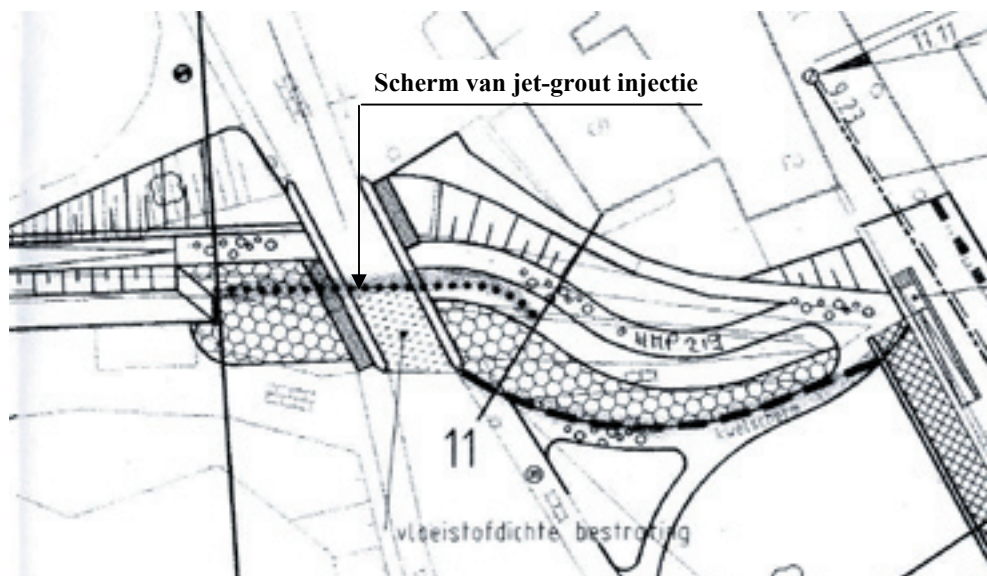
- grote zekerheid van de veiligheid
- aanleg met grotere veiligheidsmarges mogelijk

CONCLUSIE:

Alleen toepassen wanneer er volle overtuiging van het onvoldoende functioneren van de fundering.

2. Toepassen jet-grout injectie om de grond onder het kunstwerk weerstand tegen grondwaterstroming te geven

AFBEELDING 39 AANBRENGEN SCHERM VAN GROUTINJECTIE ONDER COUPUREVLOER (COUPURE WAALSTRAAT TIEL)



*Nadelen:*

- eindresultaat is relatief moeilijk controleerbaar en kan sterk worden beïnvloed door (verschillen in) de bodemgesteldheid onder het kunstwerk

*Voordelen:*

- relatief eenvoudige, goedkope ingreep

*CONCLUSIE:*

De haalbaarheid van deze methode is afhankelijk van de bodemgesteldheid onder het kunstwerk in relatie tot de aan te brengen lengte van het "scherm". In zijn algemeenheid kan worden gesteld dat kortere schermen (< 5 m) in homogene grondlagen tot goede, betrouwbare resultaten kunnen leiden.

# 6

## AANBEVELINGEN

### 6.1 DATABASE

De hulpmiddelen zijn ontwikkeld op basis van een in het kader van deze opdracht opgestelde database met kenmerken van 607 kunstwerken. De database Kenmerken Historische Kunstwerken (KHK) bevat een enorme hoeveelheid informatie. In dit rapport is een aantal schema's opgesteld. Er zijn echter aan de hand van de database oneindig veel stroomschema's op te stellen, afhankelijk van het vertrekpunt dat men voor een bepaalde zoekvraag neemt.

Aanbevolen wordt de database met kenmerken die gebruikt is voor het ontwikkelen van de hulpmiddelen, samen met dit rapport en een handleiding, beschikbaar te stellen voor de toetsers onder een gemeenschappelijke waterkeringen portaal.

De verzamelde data moet dan nog gegroepeerd (voor zover dit al niet gedaan is) en een aantal afhankelijkheden worden aangebracht waarmee de gebruiker op een efficiënte manier naar het gezochte resultaat wordt geleid. Dit naar analogie van de schema's die al in de rapportage staan. Daarnaast kan ook altijd nog de volledig vrije zoekmogelijkheid open worden gehouden (voor de deskundige gebruikers).

### 6.2 ONTWIKKELINGEN OP HET GEBIED VAN DE VEILIGHEIDSBENADERING

De Wet op de waterkering schrijft een vijfjaarlijkse toetsing van de per dijkkringgebied aanwezige veiligheid voor volgens het Voorschrift Toetsen op Veiligheid (VTV). Het VTV is dus feitelijk wet. De Leidraad Kunstwerken, waar in het VTV veelvuldig naar verwezen wordt, is een hulpmiddel dat bij de toetsing gebruikt mag worden. Bij het toetsen wordt uitgegaan van de dijkvakbenadering. Op het moment van samenstellen van dit rapport vindt in het project *Veiligheid Nederland in Kaart (VNK)* een verkenning plaats naar de beoordeling van de veiligheid van een dijkkring en de overstromingskansen van de dijkkring. De verwachting is dat op korte termijn geen verandering plaats vindt op het gebied van de veiligheidsbenadering, en blijft het vooralsnog bij de dijkvakbenadering. Dit onderzoek doet een voorstel voor een alternatieve toetsing uitgaande van de principes van een dijkkringbenadering.

Aanbevolen wordt de ontwikkelingen op het gebied van de veiligheidsbenadering te blijven volgen en als de tijd daar rijp voor is, de hier gepresenteerde alternatieve toetsmethode verder uit te werken.

### 6.3 VERDERE VERFIJNING HULPMIDDELEN

De ontwikkelde hulpmiddelen zijn geïllustreerd met voorbeelden. Aanbevolen wordt de ontwikkelde hulpmiddelen uitgebreid en onafhankelijk te laten toetsen, door ze toe te passen op een aantal (historische) kunstwerken. Hieruit volgen dan aanbevelingen voor verdere verfijning en optimalisatie van de hulpmiddelen.



#### 6.4 PROJECT TOETSING ONDERBOUW KUNSTWERKEN

Gezien het ambitieniveau om de resultaten van het waterkeringonderzoek historische kunstwerken een keer op te nemen in een Technisch Rapport onder de vlag van de ENW (voorheen TAW) verdient het aanbeveling om een verdiepingsslag uit te voeren naar het mechanisme piping. Doordat het DWW-project Toetsing Onderbouw Kunstwerken (zie put 4 onder “Ten Geleide”) nog niet heeft plaatsgevonden moet vooralsnog worden volstaan met de resultaten van dit STOWA-onderzoek waarin alleen wordt ingegaan op de verwachtingen voor wat betreft constructieve kenmerken en de waterstaatkundige kwaliteiten van deze onderdelen.

De extra verdiepingsslag en verificatie van de hulpmiddelen moest vooral komen uit het DWW-onderzoek Toetsing Onderbouw Kunstwerken door middel van theoretisch onderzoek (rekenregels en parameters) en door veldonderzoek (meetprogramma). Aanbevolen wordt het DWW-onderzoek op korte termijn uit te voeren om de resultaten van het STOWA onderzoek te kunnen verifiëren en verfijnen.

# 7

## LITERATUURLIJST

De volgende bronnen zijn mede gebruikt als input voor het opstellen van het hulpmiddel Kenmerken:

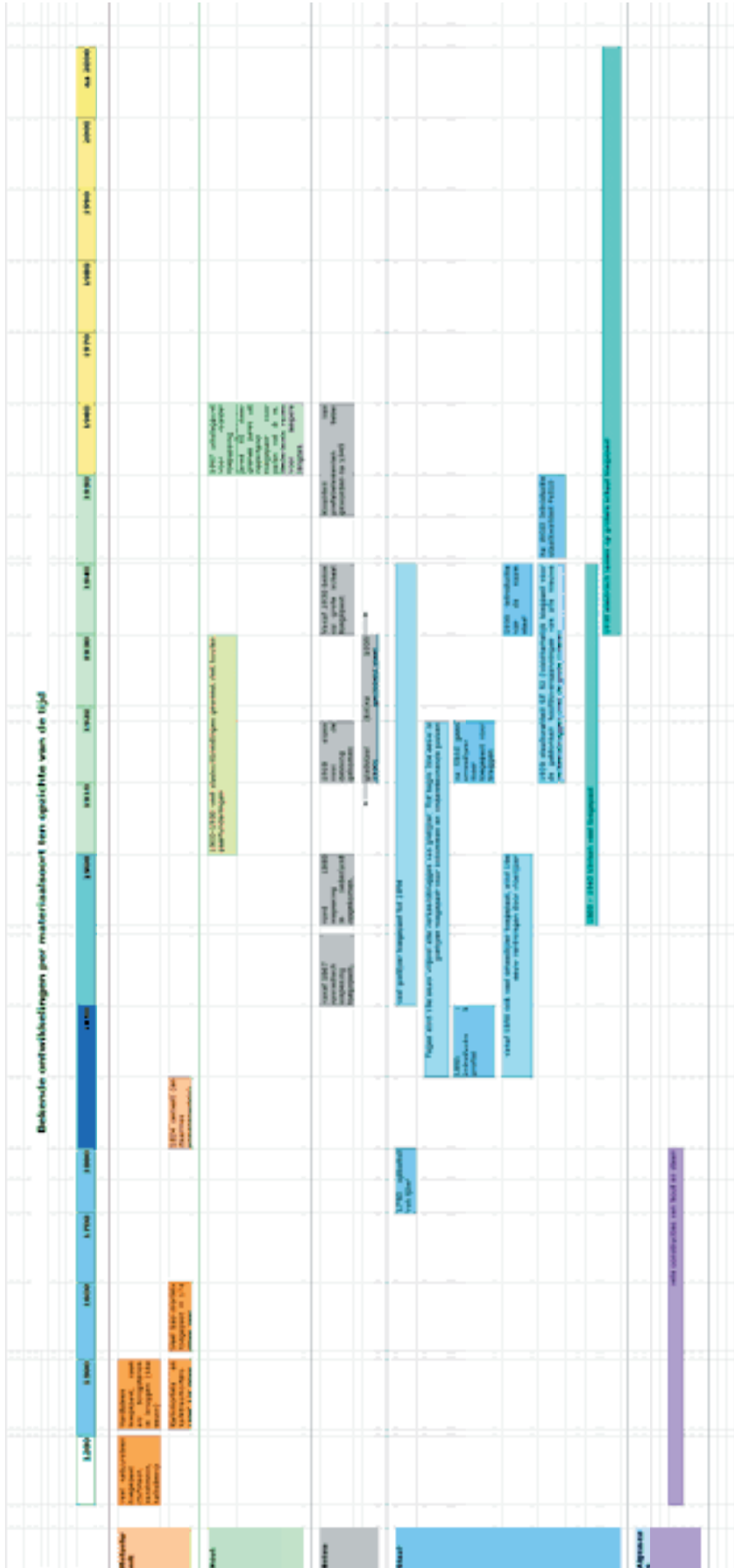
- Achtergrondinformatie VNK.
- Voor het invullen van de ontbrekende specifieke gegevens is in de eerste plaats een bureau-onderzoek uitgevoerd naar de gegevens, die met de inwinsheets zijn meegeleverd (met name tekeningen). Hieruit is veelal veel informatie te verkrijgen over constructie-opbouw.
- Archiefonderzoek en interviews met beheerders van 11 geselecteerde "pilot"objecten.
- Dit omvat een gericht onderzoek naar informatie, die beschikbaar kan komen bij de beoordeling en toetsing van de 11 geselecteerde pilot-objecten.
- Overige informatie binnen de eigen organisatie.
- De bij DHV bekende informatie uit eerder uitgevoerde toetsingen en/of controles van kunstwerken.
- Gegevens uit de praktijk van uitgevoerde renovaties en sloopwerkzaamheden aan historische kunstwerken.
- Overige bronnen zoals ervaringen van cultuurhistorici, gemalenstichting, Monumentenzorg, literatuuronderzoek.

**GEBRUIKTE LITERATUUR**

1. Houtonderzoek bij funderingsinspecties, SHR. Cursusdocumentatie uit 2005.
  2. Bacteriële aantasting van houten paalfunderingen, Literatuurstudie en inventarisatie van de Nederlandse situatie. Uitgevoerd door SHR, Wareco, TNO. 2000.
  3. Leidraad kunstwerken, Technische Adviescommissie voor de waterkeringen (TAW)
  4. Leidraad toetsen op veiligheid, TAW, 1999
  5. De veiligheid van de primaire waterkeringen in Nederland, Voorschrift toetsen op Veiligheid voor de tweede toetsronde 2001-2006 (VTV). Van Ministerie van Verkeer en Waterstaat
  6. Technisch rapport zandmeevoerende wellen, TAW
  7. Proeve van eenen Cursus over de waterbouwkunde, Tweede deel incl atlas van 26 platen, door F. Baud. Gedrukt in 1838.
  8. Handleiding tot de kennis der Waterbouwkunde voor de kadetten van den waterstaat en der genie, deel II, door D.J.Storm Buysing. Gedrukt in 1845
  9. Bouwkundige Leercursus ten gebruike der koninklijke militaire akademie. Atlas van XCVI Platen, behorende bij de handleiding tot de kennis der bowukunde (tweede druk) Gedrukt in 1858.
  10. Waterbouwkunde Deel II Sluizen, door L. Zwiers. Geschreven rond 1910.
  11. Sluizen, Kanalen en Havens, Deel II, door Ir. J.A. Postema, Ir. M.F.A. Schiphorst en Ir. W. van der Schrier. Gedrukt in 1937.
  12. Sluizen en andere waterbouwkundige kunstwerken in en langs kanalen, door Ir. J.P. Josephus Jitta. Gedrukt in 1947
  13. Waterbouwkunde I, Bolderman en Dwars, Gedrukt in 1968.
  14. Handboek kademuren, CUR en Gemeentewerken Rotterdam. 2003
- CUR/Betonvereniging - publicatie 172 "Duurzaamheid en onderhoud van beton-constructies, 1998, Stichting CUR, Gouda.

**BIJLAGE 1**

# TOEGEPASTE MATERIALEN IN DE TIJD

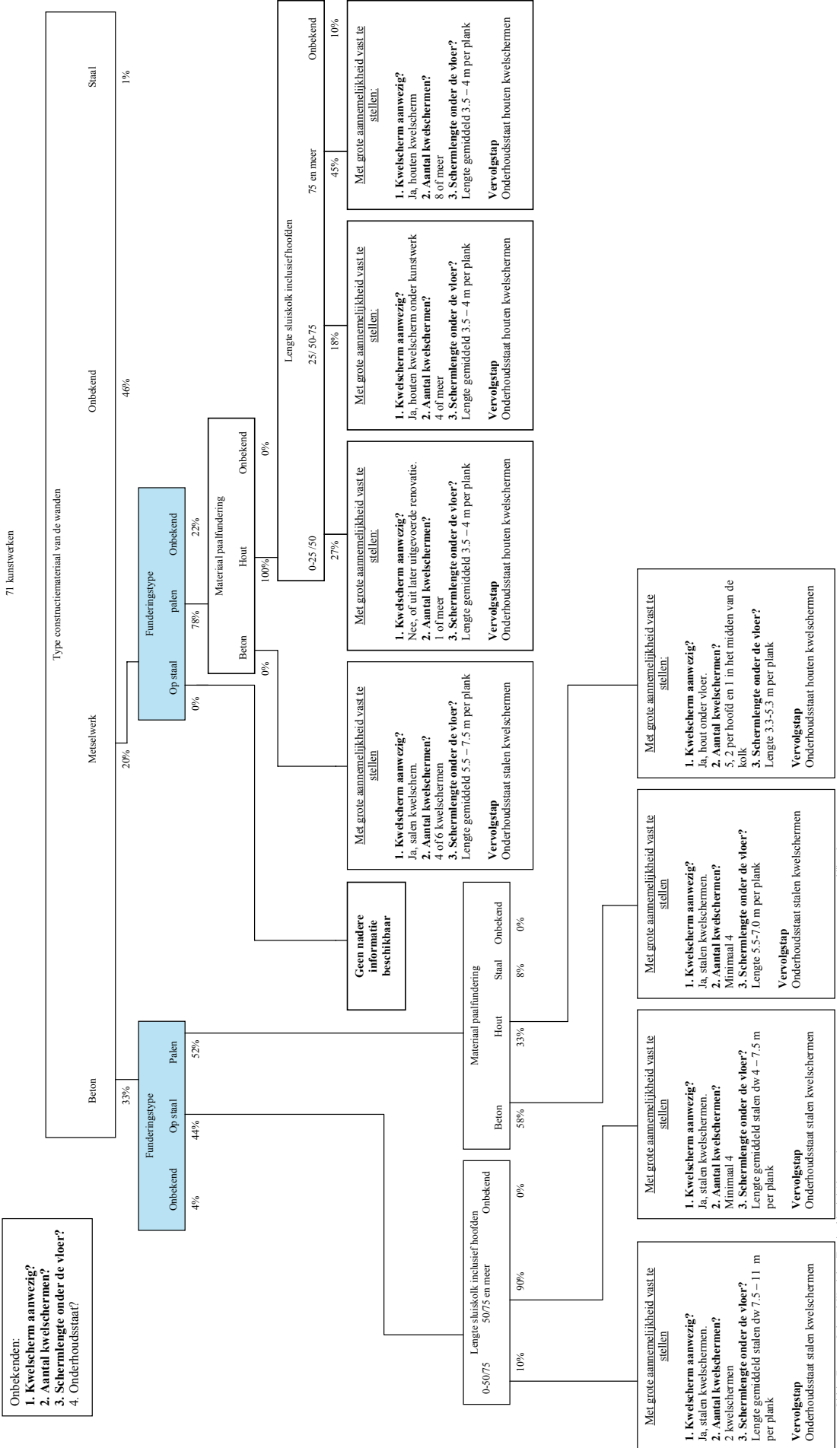


BIJLAGE 2

# STROOMSCHEMA'S

**Toetsing op Piping en Heave (STPH)**

**Wat is met enige aannemelijkheid te zeggen over de kwelweglengte bij een schutsluis?**



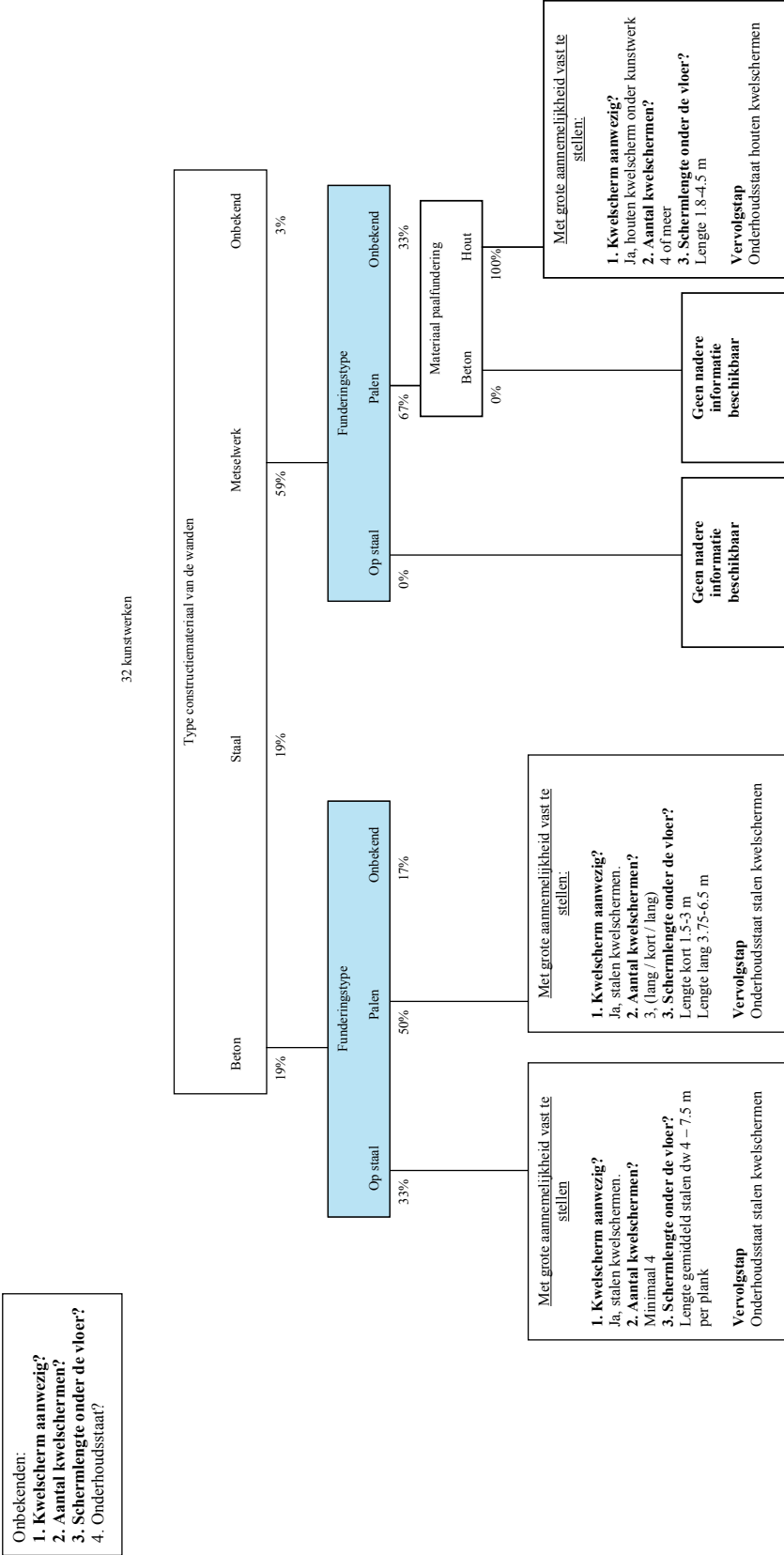
## Toetsing op Piping en Heave (STPH)

# Wat is met enige aannemelijkheid te zeggen over de kwelweglengte bij een keersluis?

Onbekenden:

1. Kwelscherm aanwezig?
2. Aantal kwelschermen?
3. Scherm lengte onder de vloer?
4. Onderhoudsstaat?

32 kunstwerken





**Toetsing op Piping en Heave (STPH)**

**Wat is met enige aannemelijkheid te zeggen over de kwelweglengte bij een uitwateringsluis?**

Onbekenden:  
 1. Kwelscherm aanwezig?  
 2. Aantal kwelschermen?  
 3. Scherm lengte onder de vloer?  
 4. Onderhoudsstaat?

117 kunstwerken

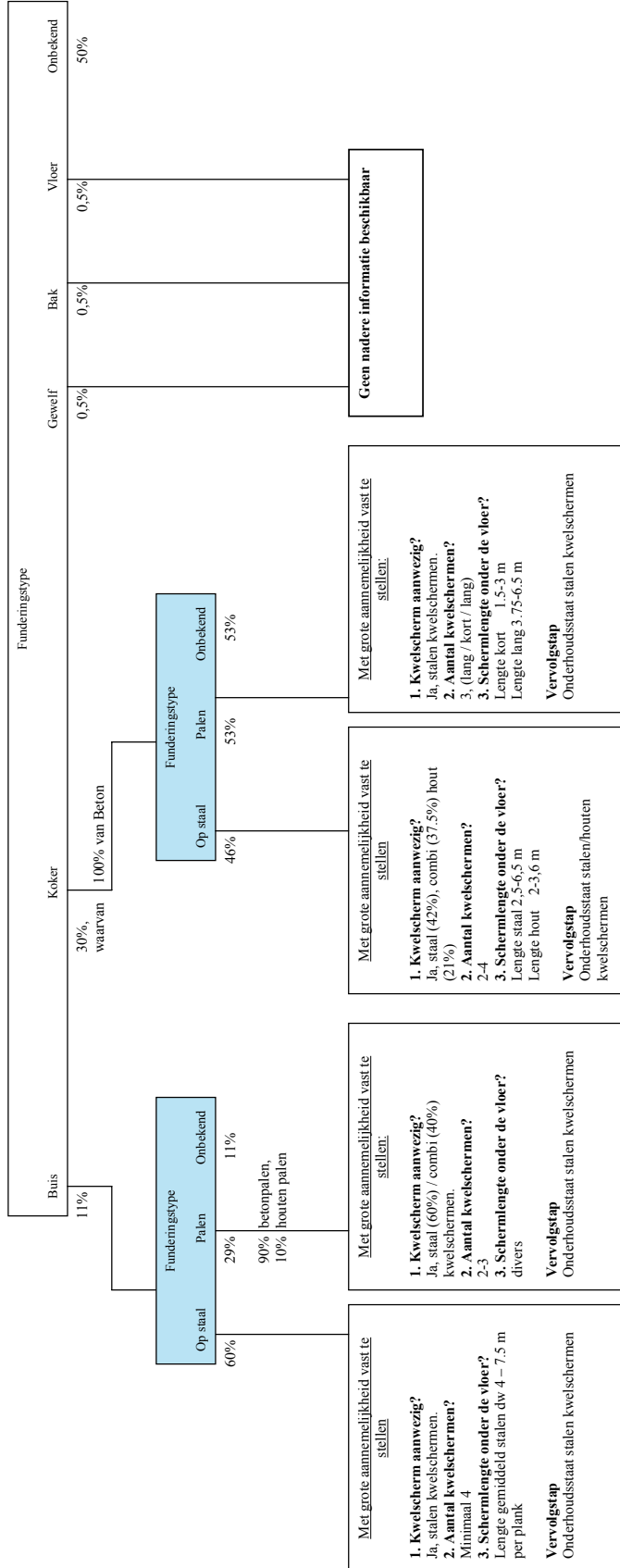
Type constructiemateriaal van de wanden						
Betomen bak	Beton	Buis Staal	Overig	Metselwerk gewelf of wandconstructie	Betomen koker	Onbekend
2%	5%	5%	9%	5%	18%	56%
Funderingstype: 50% Op palen 50% op staal	Funderingstype: Op staal	Funderingstype: Op staal	Funderingstype: Op staal	Funderingstype: Op houten palen	Funderingstype: 40% op palen 60% op staal	
Met grote aannemelijkheid vast te stellen	Met grote aannemelijkheid vast te stellen	Met grote aannemelijkheid vast te stellen	Met grote aannemelijkheid vast te stellen	Met grote aannemelijkheid vast te stellen	Met grote aannemelijkheid vast te stellen	
<b>1. Kwelscherm aanwezig?</b> Ja, houten of stalen kwelschermen. <b>2. Aantal kwelschermen?</b> 2 tot 4 schermen <b>3. Scherm lengte onder de vloer?</b> Zeer divers <b>Vervolgstep</b> Onderhoudsstaat houten/ stalen kwelschermen	<b>1. Kwelscherm aanwezig?</b> Ja, houten of stalen kwelschermen. <b>2. Aantal kwelschermen?</b> 1 of 2 <b>3. Scherm lengte onder de vloer?</b> Zeer divers <b>Vervolgstep</b> Onderhoudsstaat houten/stalen kwelschermen	<b>1. Kwelscherm aanwezig?</b> Ja, staal, hout of neopreen scherm <b>2. Aantal kwelschermen?</b> 1 tot 3 <b>3. Scherm lengte onder de vloer?</b> Zeer divers <b>Vervolgstep</b> Onderhoudsstaat houten/stalen kwelschermen	<b>1. Kwelscherm aanwezig?</b> Ja, staal of combinatie hout/staal 60% is stalen kwelscherm. <b>2. Aantal kwelschermen?</b> 1 tot 3 <b>3. Scherm lengte onder de vloer?</b> Lengte stalen scherm 1,75-4,75 m <b>Vervolgstep</b> Onderhoudsstaat houten/stalen kwelschermen	<b>1. Kwelscherm aanwezig?</b> Ja, houten kwelscherm onder kunstwerk <b>2. Aantal kwelschermen?</b> 4 m <b>3. Scherm lengte onder de vloer?</b> Lengte 4 m <b>Vervolgstep</b> Onderhoudsstaat houten kwelschermen	<b>1. Kwelscherm aanwezig?</b> Ja, staal (50%) houten (10%) combi (20%) kwelscherm <b>2. Aantal kwelschermen?</b> Minimaal 3 <b>3. Scherm lengte onder de vloer?</b> Lengte staal 2,3-11 m <b>Vervolgstep</b> Onderhoudsstaat houten kwelschermen	

## Toetsing op Piping en Heave (STPH)

# Wat is met enige aannemelijkheid te zeggen over de kwelweglengte bij een gemaal?

Onbekenden:  
 1. Kwelscherm aanwezig?  
 2. Aantal kwelschermen?  
 3. Scherm lengte onder de vloer?  
 4. Onderhoudsstaat?

191 kunstwerken



## Toetsing op Piping en Heave (STPH)

# Wat is met enige aannemelijkheid te zeggen over de kwelweglengte bij een coupure?

Onbekenden:  
 1. Kwelscherm aanwezig?  
 2. Aantal kwelschermen?  
 3. Scherm lengte onder de vloer?  
 4. Onderhoudsstaat?

127 kunstwerken

Funderingstype	
Op staal	42 %
Palen	5 %
Onbekend	53 %

Met grote aannemelijkheid vast te stellen:

- Kwelscherm aanwezig?**  
Ja, staal (82%) of beton (18%)
- Aantal kwelschermen?**  
0 schermen 12%  
1 scherm 78%  
2 schermen of meer 10%
- Scherm lengte onder de vloer?**  
Lengte stalen scherm 2-6 m  
Lengte beton scherm 1-2,6 m

**Vervolgstap**  
Onderhoudsstaat houten/stalen kwelschermen

Met grote aannemelijkheid vast te stellen:

- Kwelscherm aanwezig?**  
Ja, staal of hout
- Aantal kwelschermen?**  
66% Stalen scherm 1  
33% Houten scherm 2 of meer
- Scherm lengte onder de vloer?**  
Lengte stalen scherm 3-5 m  
Lengte houten scherm 1,5-2 m

**Vervolgstap**  
Onderhoudsstaat houten/stalen kwelschermen

## Toetsing op Piping en Heave (STPH)

# Wat is met enige aannemelijkheid te zeggen over de kwelweglengte bij een inlaatsluis?

Onbekenden:  
 1. Kwelscherm aanwezig?  
 2. Aantal kwelschermen?  
 3. Scherm lengte onder de vloer?  
 4. Onderhoudsstaat?

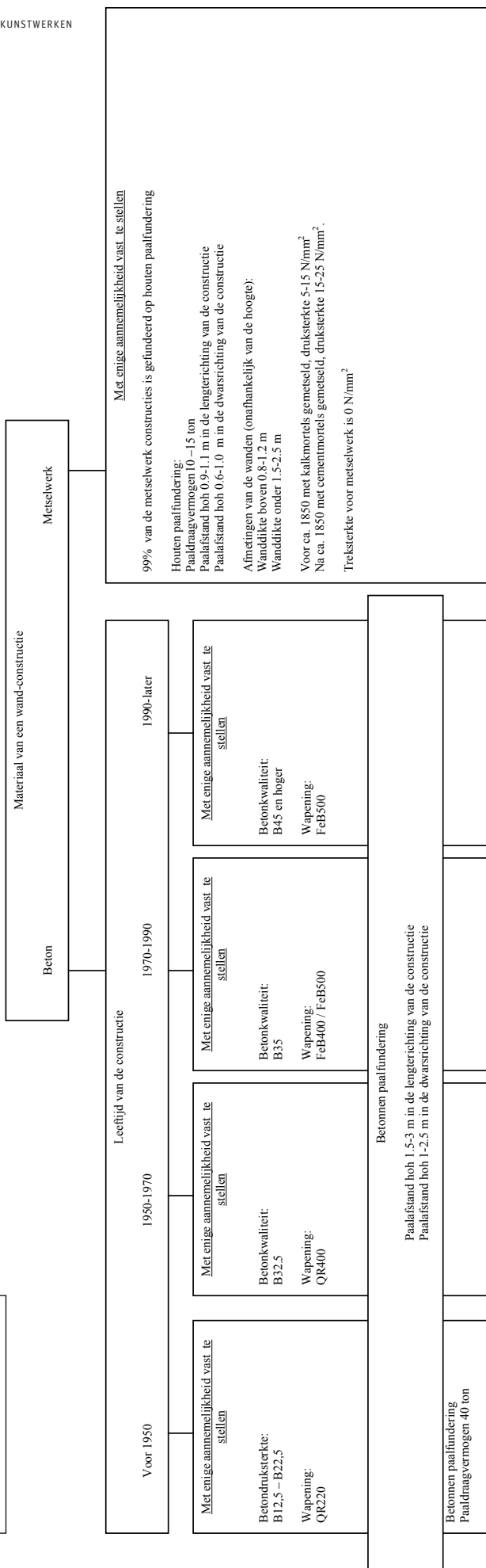
127 kunstwerken

Type constructiemateriaal van de wanden			
L-wand of wandconstructie	Buis	Metscherm gewelf of wandconstructie	Betonnen koker
2 %	22 %	6 %	25 %
<p><b>Geen nadere informatie beschikbaar</b></p>	<p>Funderingstype: Op staal 64% Op palen 36%</p> <p><b>Met grote aannemelijkheid vast te stellen:</b>            1. Kwelscherm aanwezig? Ja, staal (38%) of hout (46%) combinatie (15%)            2. Aantal kwelschermen? 1 tot 3            3. Scherm lengte onder de vloer? Lengte stalen scherm 4-5,75 m Lengte houten scherm 2-2,5 m  <b>Vervolgstep</b> Onderhoudsstaat houten/stalen kwelschermen</p>	<p>Funderingstype: Op houten palen</p> <p><b>Geen nadere informatie beschikbaar</b></p>	<p>Funderingstype: 50% op palen 50% op staal</p> <p><b>Met grote aannemelijkheid vast te stellen:</b>            1. Kwelscherm aanwezig? Ja, staal (50%) houten (10%) combi (20%) kwelscherm            2. Aantal kwelschermen? Staal: 3-4 Hout: 2-4            3. Scherm lengte onder de vloer? Lengte staal 3-5,5 m Lengte hout 3-5,8 m  <b>Vervolgstep</b> Onderhoudsstaat houten/stalen kwelschermen</p>
			45 %
			Onbekend

## Toetsing op Sterkte en Stabiliteit; Stabiliteit constructie (STCG)

# Wat is met enige aannemelijkheid te zeggen over de stabiliteit van een wandconstructie?

- Onbekenden:
1. Paaldraagvermogen
  2. Betondruksterkte
  3. Kwaliteit van de wapening
  4. Druksterkte metselwerk
  5. Kwaliteit van de voegmortels.
  6. Onderhoudsstaat



## BIJLAGE 3

# SYSTEEMFAALKANS

Hier zal in het algemeen uiteengezet worden hoe men de faalkans voor een systeem kan bepalen.

Veronderstellen we eerst een systeem van twee elementen. Het falen van een element is gedefinieerd als gebeurtenis  $E_1$  of  $E_2$ . De kans op het optreden van minstens één van de gebeurtenissen is:

$$\begin{aligned} P_f &= P(E_1 \cup E_2) = P(E_1) + P(E_2) - P(E_1 \cap E_2) \\ &= P(E_1) + P(E_2) - P(E_1)P(E_2 | E_1) \end{aligned} \quad (1)$$

Hieruit blijkt dat de systeem faalkans een functie is van zowel de faalkansen van de elementen als van een voorwaardelijke kans. De stochastische afhankelijkheid van het falen van de elementen is van belang.

Als de faalmechanismen stochastisch onafhankelijk zijn dan geldt voor de systeem faalkans:

$$P_f = P(E_1) + P(E_2) - P(E_1)P(E_2) \quad (2)$$

Als de gebeurtenissen niet onafhankelijk zijn, dan geldt een ander verhaal. Stochastische afhankelijkheid kan bijvoorbeeld voorkomen uit dezelfde belasting en wellicht uit een relatie met betrekking tot de sterkte-eigenschappen van de elementen. Veronderstel dat de elementen aan dezelfde belasting worden onderworpen, dan is voor elk element de faalkans als volgt te bepalen:

$$P(E_i) = P(R_i < S) \quad (3)$$

Als de gebeurtenissen  $E_1$  en  $E_2$  elkaar uitsluiten, dan reduceert vergelijking (1) tot:

$$P_f = P(E_1) + P(E_2) \quad (4)$$

Als het falen van het element 1 tevens het falen van element 2 impliceert, dan geldt:

$$P(E_1)P(E_2 | E_1) = P(E_2)P(E_1 | E_2) = \min(P(E_1), P(E_2)) \quad (5)$$

Er geldt immers:

$$P(E_1 | E_2) = \frac{P(E_1 \cap E_2)}{P(E_2)} \quad \text{en} \quad P(E_2 | E_1) = \frac{P(E_2 \cap E_1)}{P(E_1)} \quad (6)$$

De faalkans is in dit geval dan:

$$P_f = \max(P(E_1), P(E_2)) \quad (7)$$

In de gevallen waarbij de afhankelijkheid van de mechanismen van de elementen onbekend is, zoals in dit geval, dan ligt de faalkans van het systeem tussen de grenzen gegeven door (4) en (7):

$$P_f = \max(P(E_1), P(E_2)) \quad (8)$$









