

H.A. Schelfhout
Expert adviseur, Deltares



ing. J. van Noord
Senior projectleider, Water-
schap Vallei en Veluwe



B.H. Bokseveld
Projectleider, Van Heteren
Weg- en Waterbouw BV



ing. F.H.J. Tjhuis
Ontwerpleider, Nepocon
ingenieurs & adviseurs



ir. K. ten Pas
Constructeur, Nepocon
ingenieurs & adviseurs



ir. A.C. Nederpel
Nederpel, Dijk in
waterveiligheid



Ontwikkeling ontwerpmethode flexibele waterkering kern Spakenburg

Inleiding

De primaire waterkering in de historische kern van Spakenburg voldoet niet meer aan de eisen en moet worden versterkt. De waterkering is on-

derdeel van dijkkring 45 Gelderse Vallei met een huidige veiligheidsnorm van 1/1.250 per jaar (op basis van overschrijdingskansen, voor veiligheidseisen zie tekstkader 1. In het kader van

de overstap naar nieuwe normering op basis van overstromingskansen wordt de geplande versterking onderdeel van dijktraject 45-2 met een (voorlopige) veiligheidsnorm van 1/300 per jaar als signaalwaarde. Om te kunnen beoordelen of het plan ook aan de nieuwe veiligheidseisen voldoet is een controle uitgevoerd (zie tekstkader 2), waaruit blijkt dat het ontwerp daaraan ruim voldoet.

Tekstkader 1 - Ontwerputgangspunten en randvoorwaarden ontwerp waterkering

- Levensduur 100 jaar (civiele constructies en bassin) en 50 jaar (flexibele kering)
- Veiligheidsnorm dijkkring 45 (Gelderse Vallei): norm = 1/1.250 per jaar
- Toelaatbare kans op falen constructie conform [1] voor type II constructies: norm/200 = 1/250.000 (kerend naar binnen) per jaar en norm/20 = 1/25.000 (kerend naar buiten) per jaar
- Ontwerppeil = NAP +1,61 m (2065) resp. NAP +1,81 m (2115)
- Significante golfhoogte: $H_s = 0,30$ m
- Minimaal vereiste kerende hoogte: $H_k = \text{NAP} + 2,24$ m (2065) resp. $\text{NAP} + 2,41$ m (2115)
- Aanleghoogte keerwand = NAP +2,46 m
- Kadehoogte: NAP +1,64 m
- Maatgevend laagwater: MLW = NAP -1,5 m

Tekstkader 2 - Doorkijk naar invloed nieuwe normering op veiligheidseisen

Bij het voorontwerp is geverifieerd of de flexibele kering voldoet aan de veiligheidseisen op basis van het nieuwe ontwerpinstrumentarium OI2014v3 [7] met de volgende uitgangspunten:

- Toelaatbare kans op overstroming dijktraject 45-2 ($L = 27,8$ km) is $P_{\max} = \text{norm} \times 3 = 1/100$ per jaar
- Toelaatbare kans op constructief falen alle kunstwerken = 2% van P_{\max}
- Aantal kunstwerken (totaal 31 st) dat bijdraagt aan P_{\max} is $N_{\text{KW}} = 5$
- Per afzonderlijk kunstwerk gelden dan als eis voor constructief falen (STCO/STGC): 2% van $P_{\max} / N_{\text{KW}} = 1/25.000$ per jaar.

Op basis van de huidige norm en methodiek is de veiligheidseis voor STCO/STGC gelijk aan norm/200 = 1/250.000 per jaar voor STCO/STGC. Hieruit blijkt dat het ontwerp ook voldoet aan de veiligheidseis volgens de nieuwe normering en methodiek."

Figuur 1a - Flexibele kering niet-operationeel.



Figuur 1b - Flexibele kering operationeel.



Samenvatting

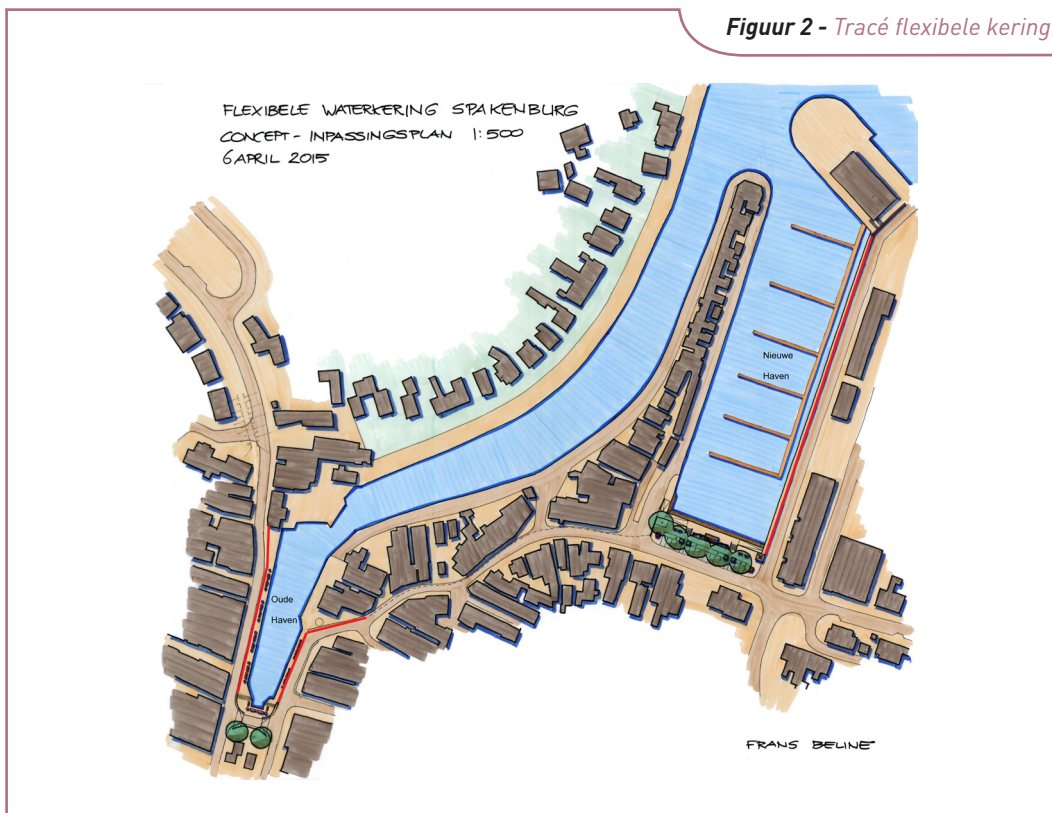
In de kern van Spakenburg moet de primaire waterkering worden versterkt. Het waterschap Vallei en Veluwe is opdrachtgever en heeft bij de aanbesteding gevraagd om een innovatieve oplossing in de vorm van een flexibele kering, die ook ruimtelijk beter inpasbaar is dan een gronddijk. Aan deze oplossing zijn specifieke veiligheidseisen gesteld, die deels afwijken van de vigerende leidraden en technische rapporten voor primaire waterkeringen. Door de aannemerscombinatie Van Heteren/Jansen Ven-

neboer is een opdrijvende kering voorgesteld, die voldoet aan de eisen. Het definitieve ontwerp is door intensieve samenwerking met de opdrachtgever, gemeente en deskundigen tot stand gekomen, waarbij flexibiliteit en maatwerk voor alle partijen het uitgangspunt was. In dit artikel wordt beschreven hoe bij het ontwerp gezamenlijk invulling is gegeven aan de sterkte en de stabiliteit van de bijzondere waterkerende constructies.

Vanwege de beperkte ruimte in de bebouwde kern is een traditionele versterking met een gronddijk zeer ingrijpend en moeilijk inpasbaar. Daarbij zijn vaste verticale constructies vanwege de aanwezige cultuur- historische waarden niet gewenst en is door het waterschap een flexibele

kering als uitgangspunt genomen. Daarom is bij de aanbesteding gevraagd om in te schrijven voor een innovatieve oplossing in de vorm van een flexibele kering, die permanent aanwezig is. De aannemerscombinatie Van Heteren/Jansen Venneboer heeft daar invulling aan gegeven

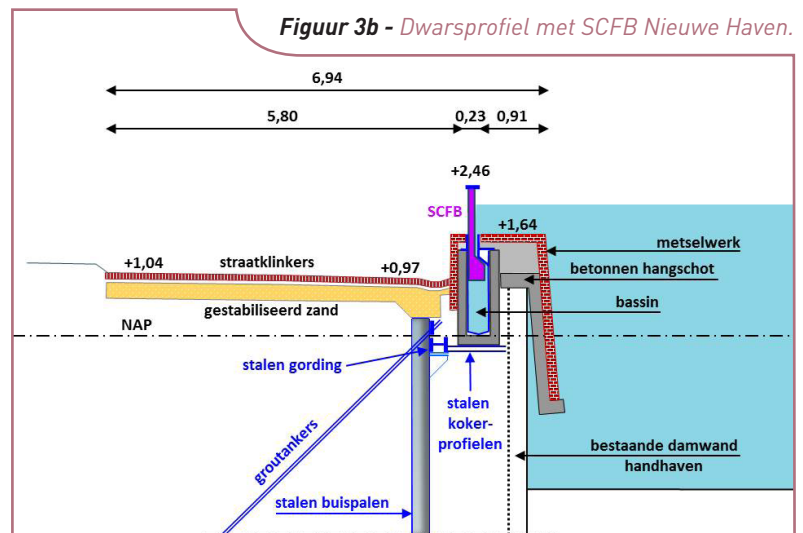
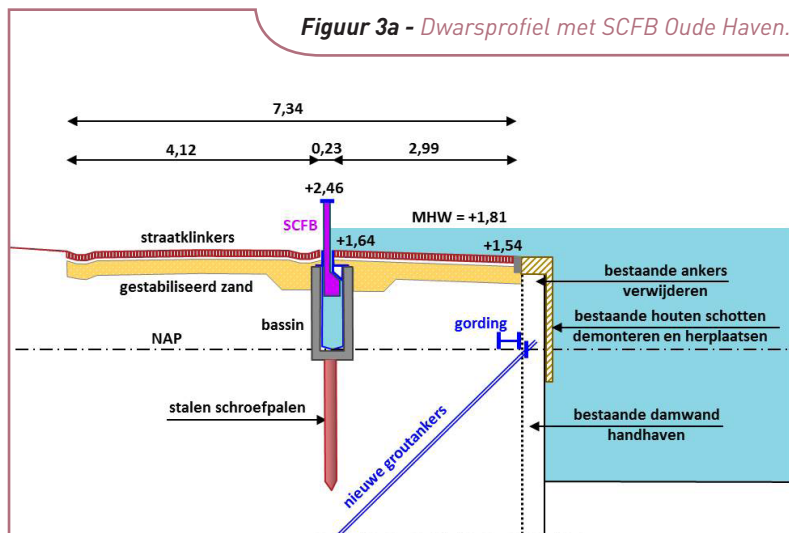
door middel van een opdrijvende keerwand: de Self Closing Flood Barrier (SCFB), die volledig wordt geïntegreerd in het maaiveld (zie figuur 1a). Enkel bij een stijgende waterstand zal de kering worden geactiveerd, doordat deze door de opwaartse druk van het water omhoog zal komen (zie figuur 1b).



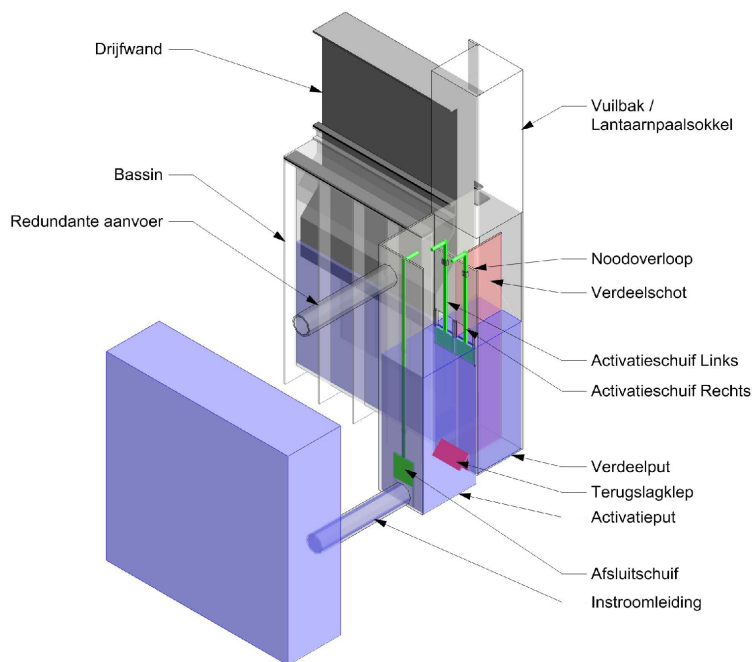
Samen innoveren en denken in oplossingen heeft geleid tot een veilig ontwerp dat aanpasbaar en optimaal passend in de omgeving is. Dit vertaalt zich met name in de gerealiseerde tracéwijziging (de kering ligt volledig buiten de rijbaan), de kraanopstelplaats (handhaving bestaande damwand door reductie bovenbelasting) en de verankering bij de Oude Haven (de bestaande authentieke kademuur blijft gehandhaafd door de verankering achter de damwand te realiseren; zie figuur 3a).

Proces

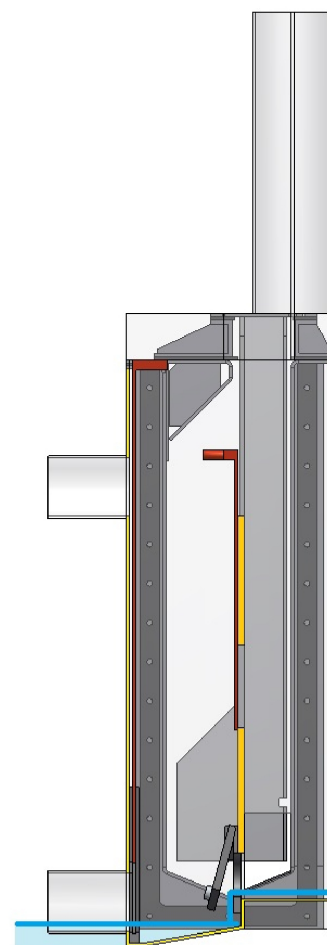
Het waterschap Vallei en Veluwe is opdrachtgever voor de aanleg van het versterkingsplan, dat door het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP-2) wordt gefinancierd. Bij de uitvraag naar de aanbieders zijn vanuit veiligheid, ruimtelijke inpassing, techniek en beheer specificaties opgesteld waaraan de oplossing moet voldoen. Omdat er nog geen specifieke veiligheidseisen voor flexibele keringen zijn, is uitgegaan van maatwerk, dat door Deltares nader is ingevuld. In het aanbestedingstraject



Figuur 4 - Componenten SCFB.



Figuur 5a - Kering inactief.



Tekstkader 3 - Formule correctiefactor op materiaalfactoren

$$\gamma_{m,corr} = \exp [0,8 \times (\beta_{eis} - \beta_{ref}) \times \sqrt{\{\ln (1 + V_r^2)\}}]$$

met:

- $\gamma_{m,corr}$ = correctiefactor op materiaalfactor Eurocode
- β_{eis} = vereiste betrouwbaarheidsindex voor referentieperiode van 50 jaar
- β_{ref} = referentiewaarde betrouwbaarheidsindex, volgens Reliability Class (RC2 of RC3) Eurocode
- V_r = variatiecoëfficiënt materiaalsterkte

is de aanbieder van de aannemerscombinatie integraal beoordeeld door een team met vertegenwoordigers van het waterschap, de gemeente Bunschoten en Deltares. Na de gunning volgde een nauwe samenwerking tussen de eerder betrokken partijen en een team van de aannemerscombinatie, onderaannemers (Nepocon ingenieurs & adviseurs en Nederpel Dijk in waterveiligheid) en leverancier (Aggères). De aanpak was stapsgewijs van grof naar fijn met als doel om aan de hand van een risico-kansen-dossier gezamenlijk te komen tot een duurzame, beheerbare en toekomst-vaste waterkering. Uitgangspunt daarbij is een planperiode 100 jaar voor onderbouw, de vervangbaarheid van de flexibele kering en een ontwerpmethodiek, die aansluit bij de huidige leidraden en technische rapporten voor primaire keringen en de Eurocode.

Principeplossing

De SCFB is in totaal 294 m lang en bestaat uit 3 secties (zie figuur 2), namelijk Oude Haven-

West (78 m), Oude Haven-Oost (60 m) en Nieuwe Haven (156 m). De constructie bestaat per sectie uit een aaneenschakeling van bassins met keermiddelen en putten, die in combinatie met een damwandconstructie langs de haven en het grondlichaam de waterkering vormt (zie figuur 3a en 3b). De uitgangspunten en randvoorwaarden voor het ontwerp van de waterkering zijn samengevat in tekstkader 1.

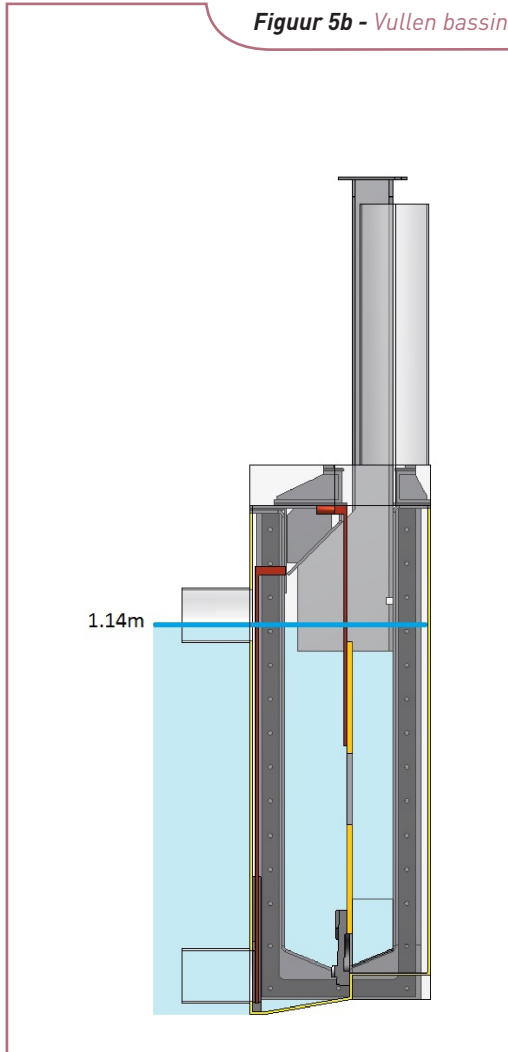
Sluiting SCFB

De flexibele kering is per sectie opgebouwd uit afzonderlijke elementen, bestaande uit een betonnen bassin met stalen bak, waarin de drijvende keerwand hangt. De elementen zijn gekoppeld via activatie-/vulputten met schuiven en kleppen voor de regulering van de waterinstroming (zie figuur 4). Elke vulput staat in verbinding met het buitenwater door middel van een lage en een hoge instroomleiding.

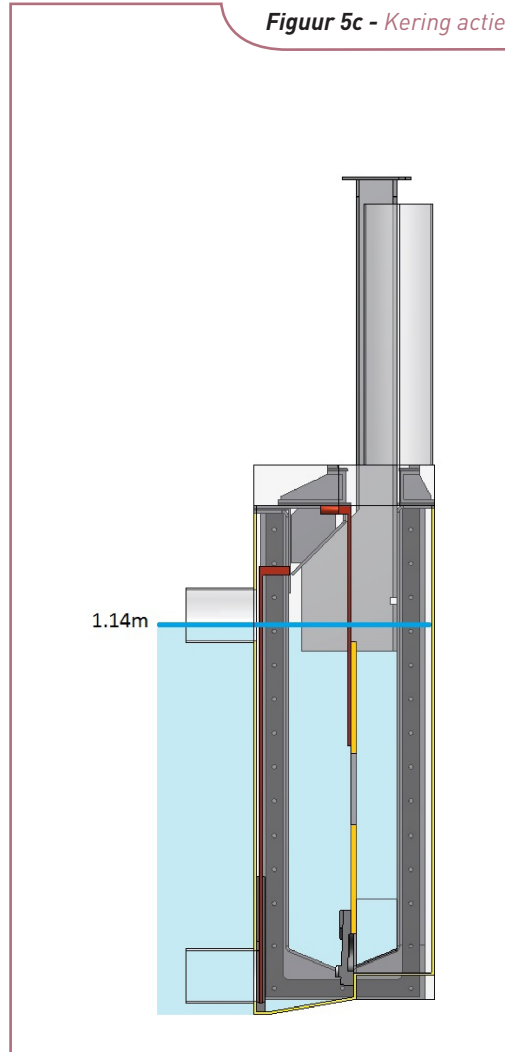
Het proces van opdrijven van de keerwand is weergegeven in de figuren 5a t/m 5d.

De instroomleidingen staan normaal open, waardoor het stijgende water de activatieput vult vanaf de onderste instroomleiding en de terugslagklep naar de verdeelpuut sluit. Bij een peil van NAP +0,30 m of hoger komen de keerwanden in de bassins door de opwaartse waterdruk omhoog. Als de waterstand in de activatieput NAP +0,50 m bereikt, komt via twee overlopen water in de beide compartimenten van de verdeelpuut en worden de aangrenzende bassins gevuld. Indien de stijging van het buitenwater niet snel genoeg gaat wordt het sluitproces versneld door water in een of meerdere activatieputten te pompen en de keerwand tijdig in de volledig actieve stand komt. De keerwand is in volledig actieve stand als het peil van NAP +1,14 m is bereikt. Als de waterstand daalt blijft de waterstand in de bassins minimaal NAP +1,14 m. Na het hoogwater wordt het systeem volledig geleidigd via de onderste instroomleiding. Het water zal dan via de verdeelpuut uit het bassin stromen, waardoor de terugslagklep onderin vanwege het drukverschil automatisch open gaat.

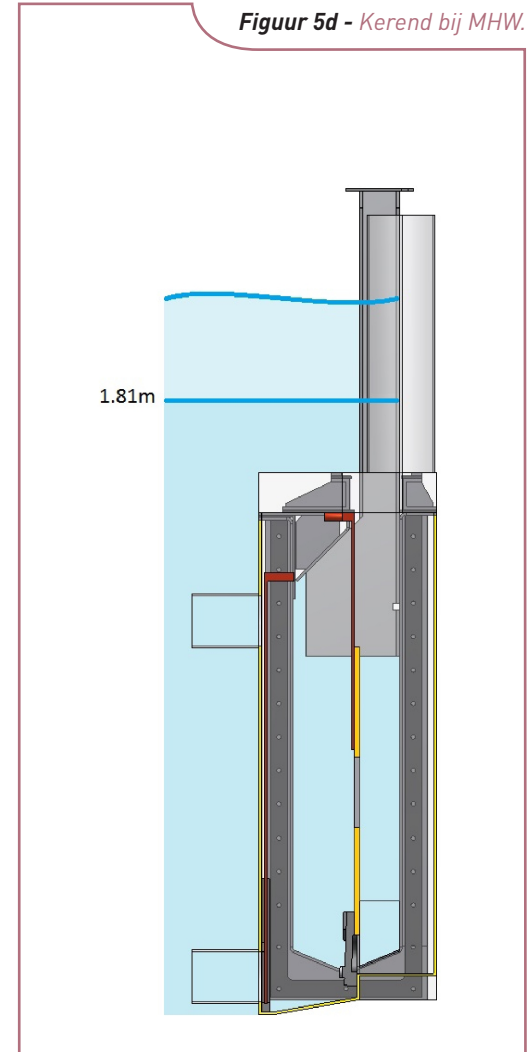
Figuur 5b - Vullen bassin.



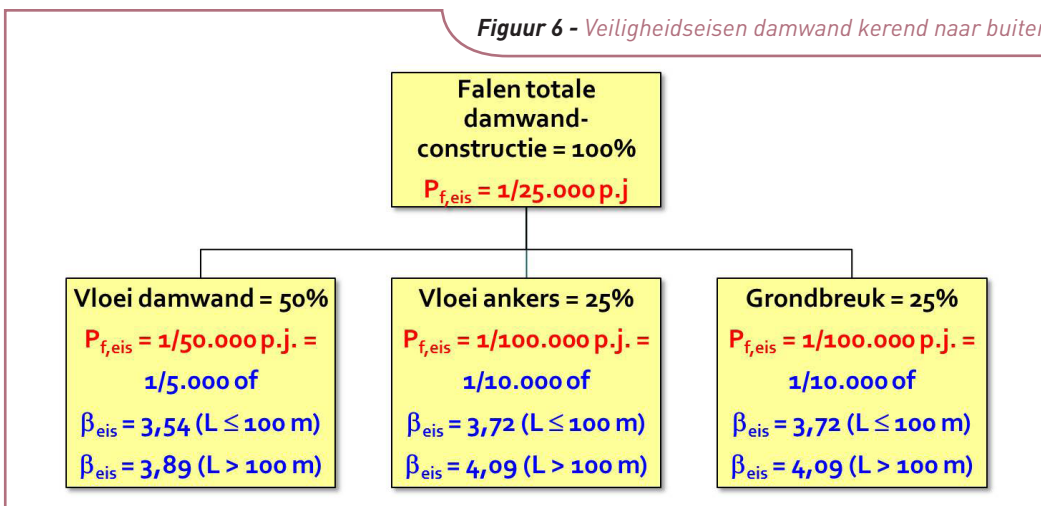
Figuur 5c - Kering actief.



Figuur 5d - Kerend bij MHW.



Figuur 6 - Veiligheidseisen damwand kerend naar buiten.



terwet, CUR 166 en de Eurocode. Dit heeft betrekking op faalkansen (jaarkansen versus levensduurkansen) en partiële veiligheidsfactoren. In onderling overleg is daarin een compromis gevonden door toepassing van correctiefactoren op de standaard materiaalfactoren volgens RC2 of RC3 van de Eurocode. Voor de dimensionering van de damwandconstructie is de situatie bij GLW (kerend naar buiten) maatgevend, waarvoor in lijn met de stabiliteitseisen voor dijken is uitgegaan van een 10 maal minder strenge eis dan bij MHW (kerend naar binnen) met een toelaatbare kans op falen van de constructie van norm/20 of 1/25.000 per jaar. Dit is de topeis voor het falen van de totale constructie. Voor de bepaling van de toelaatbare faalkansen per constructie-onderdeel is de topeis verdeeld over de faalmechanismen (zie figuur 6). Daarbij is voor de bepaling van de faalkansen voor de levensduur conform [1] een factor $f_N = 10$ in rekening gebracht, wat per faalmechanisme een 10 maal grotere faalkansen oplevert dan de jaarkansen. De faalkansen voor de levensduur (referentieperiode 50 jaar) is via een standaard normale verdeling omgerekend

Voor de bepaling van de faalkansen van de sluiting zijn risicosessies gehouden en is een uitgebreide faalkansanalyse van het totale systeem opgesteld. Om aan de toelaatbare kans op niet-sluiten van 10% van de norm en de sluitingsduur van maximaal 3 uur te voldoen moet vooraf worden gecontroleerd of het tracé van de flexibele kering obstakelvrij is. Vanwege

de kans op verstopping door vuil of ijsvorming is per bassin is een extra hoger gelegen toevoerleiding nodig. Mede daarom zijn de afzonderlijke bassins ook onderling gekoppeld.

Falen sterkte/stabiliteit damwand

Over de veiligheidsbenadering en eisen voor constructies zijn er verschillen tussen de Wa-

Tabel 1 - Materiaalfactoren voor dimensionering constructie-onderdelen damwand bij L > 100 m (kerend naar buiten).

Faalmechanisme	Sterkteparameter	β_{eis}	$\gamma_{m,ref}$ (bij RC2 of $\beta_{ref} = 3,8$)	V_r	$\gamma_{m,corr}$	$\gamma_{m,reken}$
Vloeien damwand	Vloeispanning	4,09	1,00	0,10	1,02	1,02
Vloeien ankers	Vloeispanning	4,29	1,00	0,10	1,04	1,04
Grondbreuk	Hoek inwendige wrijving (tg φ')	4,29	1,175	0,20	1,08	1,27
	Cohesie (c')		1,25	0,45	1,18	1,48

Tekstkader 4 - Vereiste stabiliteitsfactor

- Schadefactor berekend met formules uit [3]:

$$P_{loc,toel} = \frac{(0,1 \times norm)}{\left\{1 + \left(\alpha \times \frac{L}{l}\right)\right\} \times P_{f|inst}}$$

$$\beta_{eis} = \Phi^{-1} \{P_{loc,toel}\}$$

$$\gamma_n = 1 + \{0,13 \times (\beta_{eis} - 4,0)\}$$

met:

- norm = huidige veiligheidsnorm = 1/1.250 per jaar
- α = correlatiefactor = 0,033
- L = lengte dijkring = 60.000 m (defaultwaarde voor dijkvakbenadering)
- l = lengte afschuiving = 50 m
- $P_{f|inst}$ = 0,1 (afschuiving niet samenvallend met extreem hoogwater)
- $P_{loc,toel}$ = toelaatbare kans op lokale instabiliteit = 1/50.750 per jaar
- β_{eis} = vereiste betrouwbaarheidsindex = 4,11
- γ_n = schadefactor = 1,01

- Schematiseringsfactor $\gamma_b = 1,3$ (defaultwaarde) of 1,1 (geoptimaliseerd op basis van stappenplan van [3])
- Modelfactor $\gamma_d = 1,0$ (methode Bishop):
- Materiaalfactoren γ_m : conform [3] (impliciet in D-Geostability)
- Toelaatbare stabiliteitsfactor (berekend met D-Geostability): $F_{s,toel} = \gamma_n \times \gamma_b \times \gamma_d = 1,32$ (default)

naar een vereiste betrouwbaarheidsindex $\beta_{eis} = 3,54$ resp. 3,72. Deze waarden gelden voor de 2 secties bij de Oude Haven met een lengte L < 100 m. Voor de sectie bij de Nieuwe Haven is de lengte L > 100 m en geldt volgens [1] als eis $\beta_{eis} + 10\%$ of $\beta_{eis} = 3,89$, resp. $\beta_{eis} = 4,09$.

Bij het ontwerp van de damwand is ervoor gekozen om deze te dimensioneren op basis van [1] en [2] en partiële veiligheidsfactoren volgens de Eurocode met standaard materiaalfactoren $\gamma_{m,ref}$ als referentiewaarden. De vereiste betrouwbaarheidseis β_{eis} wordt gerealiseerd door toepassing van een correctiefactor $\gamma_{m,corr}$, die kan worden berekend met behulp van de formule uit [1] en [2] in tekstkader 3.

De rekenwaarden volgen uit $\gamma_{m,reken} = \gamma_{m,ref} \times \gamma_{m,corr}$. In verband met de ontwerp levensduur (referentieperiode 100 jaar) conform [2] de toelaatbare faalkans gedeeld door een factor 2, resulterend in een extra correctiefactor van $\beta_{eis} + 0,2$. De per faalmechanisme toe te passen factoren voor een damwand met een strekkingslengte van L > 100 m zijn samengevat in tabel 1. Omdat β_{eis} tussen β_{ref} van RC2 en RC3 ligt is gekozen voor β_{ref} bij RC2 als referentiewaarde.

Voor de beoordeling van de overall stabiliteit van de constructie is aansluiting gezocht bij de werkwijze voor de buitenwaartse macrostabiliteit van dijken volgens [3], die uitgaat van veiligheidseisen op basis van jaarkansen. Dit geeft bij toepassing van een schadefactor van

$\gamma_n = 1,01$, schematiseringsfactor van $\gamma_b = 1,3$ (default waarde), modelfactor van $\gamma_d = 1,0$ (methode Bishop) een toelaatbare stabiliteitsfactor van 1,32 (zie tekstkader 4) als toetswaarde voor de uitkomst van de stabiliteitsberekening met de software D-Geostability. Deze waarde geldt niet voor één deeltraject langs de Oude Haven, waar de stabiliteit kritisch is. Voor dat traject is op basis van het stappenplan van [3] een geoptimaliseerde schematiseringsfactor van $\gamma_b = 1,1$ afgeleid, wat resulteert in een toelaatbare stabiliteitsfactor van 1,12.

Voor de belastingfactoren is uitgegaan van de waarden conform [2] en [5], welke zijn samengevat in tabel 2a en 2b.

Voor het puntdraagvermogen, dwarskrachten, buigende momenten en ankerkrachten zijn de veiligheidsfactoren uit [2] toegepast. Voor de toelaatbare vervorming van de damwand in de uiterste grenstoestand is conform [7] uitgegaan van een eis van 1/50 van de lengte van de damplanken of $u_{grens} = 160$ mm en $u_{grens} = 100$ mm in de bruikbaarheidsgrenstoestand.

Corrosietoeslag

Voor de stalen constructie-onderdelen is conform [2] een corrosietoeslag na 100 jaar toegepast. Daarbij is tevens rekening gehouden met het advies van ENW [4] hierover naar aanleiding van de resultaten van recent corrosieonderzoek. De per constructie-onderdeel aan te houden waarden zijn weergegeven in Tabel 3.

De waarden van Tabel 3 zijn van toepassing op warmgewalste stalen profielen.

Falen sterkte/stabiliteit SCFB

Voor de dimensionering van de constructieve onderdelen is dezelfde benadering gevolgd als voor de damwand met als topeis norm/200 of 1/250.000 per jaar voor de situatie kerend naar binnen. Voor de bepaling van de eis per constructie-onderdeel is de topeis verdeeld over de faalmechanismen (zie figuur 7). Dit geeft voor alle secties (L < 100 m) een eis van $\beta_{eis} = 4,26$.

Tabel 2a - Belastingfactoren voor dimensionering constructie volgens Eurocode RC2/CUR 166.

Belastingfactoren	6.10a	6.10b	gunstig	verkeer	veranderlijk
Karakteristieke waarde (combinatiewaarde)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Frequente waarde (t.b.v. scheurvorming)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Quasi blijvende waarde	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
ULS (RC2)	1,35	1,20	0,90	1,35	1,50

Tabel 2b - Belastingfactoren geometrie volgens CUR 166.

Veiligheidsfactoren geometrie	RC1/RC2/RC3
Verhoging kerende hoogte	10% ($\approx 0,45$ m)
Maximale verhoging kerende hoogte	0,50 m
Variatie GWS passieve zijde	0,25 m
Variatie GWS actieve zijde	0,05 m

Tabel 3 - Corrosietoetslag voor stalen constructie-onderdelen .

Onderdelen staalconstructie	Corrosietoetslag (enkelzijdig, 100 jaar na aanleg)
Damwand waterzijde	1,4 mm 1)
Damwand landzijde	1,2 mm 2)
Gordingen (rondom) profiel)	1,4 mm 1)

1) conform [2] in direct contact met schoon, zoet buitenwater (rond de waterlijn)
 2) conform [4] voor ongeroerde schone grond permanent beneden de grondwaterspiegel

Voor de bepaling van de materiaalfactoren is gekozen voor referentiewaarden op basis van RC3 en zijn de correctiefactoren berekend met de formule in tekstkader 3. Voor de belastingfactoren is uitgegaan van de waarden volgens RC3 van de Eurocode. Daarbij dient te worden opgemerkt dat de Eurocode geen belastingfactor geeft voor een extreme belasting bij MHW. Hiervoor dient conform [1] een belastingfactor van $\gamma_H = 1,25$ (inclusief materiaalfactor) op de vervalbelasting bij MHW te worden toegepast. Omdat de waterkering in dit geval wordt ontworpen op een hogere buitenwaterstand (tot

bovenkant keerwand = NAP +2,46 m in plaats van tot MHW = NAP +1,81 m) is deze belastingfactor buiten beschouwing gelaten.

Conclusies

Het ontwerp van de flexibele kering was een flinke uitdaging voor alle betrokken partijen. Daarbij was de concrete invulling van de veiligheidsbenadering een belangrijk onderwerp. Binnen het project is in onderling overleg gezocht naar een correcte afstemming tussen de verschillende veiligheidseisen en benaderingen. Daartoe is een interactief proces doorlo-

pen, waarbij de faalkanseisen gezamenlijk zijn afgeleid. In een goede samenwerking tussen opdrachtgever, opdrachtnemer en kennisinstituut is gezocht naar een specifieke uitwerking van het ontwerp van een innovatieve kering voor deze locatie. Dit heeft voor de betrouwbaarheid sluiting een concrete invulling vooraf van veiligheidseisen en daarna het gezamenlijk doorgronden van alle risico's van het systeem opgeleverd. De veiligheidsbenadering/eisen voor constructies volgens de Waterwet, CUR 166 en de Eurocode zijn verschillend voor wat betreft de faalkanseisen en de partiële veiligheidsfactoren. In nauwe samenwerking is daarin een compromis gevonden door toepassing van correctiefactoren op de materiaalfactoren, die zijn gekoppeld aan de referentiewaarden van de veiligheidsklassen van de Eurocode en CUR 166. Op basis van deze methodiek is het mogelijk om met de specifieke veiligheidseisen voor waterkeringen aan te sluiten bij de conventionele rekenmethoden. Dit biedt kansen voor een bredere toepassing bij het ontwerp van toekomstige constructies in primaire waterkeringen.

Referenties

- [1] Leidraad Kunstwerken, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, Mei 2003
- [2] CUR 166 - Damwandconstructies, CUR Bouw en Infra, 6e herziene druk, Juli 2012
- [3] Technisch Rapport Grondmechanisch Schematiseren bij Dijken, Expertise Netwerk Waterveiligheid, 2012
- [4] Corrosietoetslag voor stalen damwanden in grond, ENW-T-14-C06 Aanvulling op adviesaanvraag RWSHWBP-2 van 15 april 2014 Advies ENW-T-14-c06, 15 april 2014
- [5] Eurocode 1 - Belastingen op constructies Deel 1: Algemene belastingen - Volumieke gewichten, eigen gewicht en opgelegde belastingen voor, Gebouwen, NEN-EN 1991-1-1+C1:2011 / NB:2011). Deel 2: Verkeersbelasting op bruggen, NEN-EN 1991-2+C1:2011 / NB:2011
- [6] Handreiking ontwerpen met overstromingskansen, Veiligheidsfactoren en belastingen bij nieuwe overstromingskansen-normen, Versie OI2014v3, Juli 2015
- [7] Ontwerp stabiliteitsschermen (type II) in primaire waterkeringen (groene versie), Ontwerprichtlijn voor WSRL, 13 maart 2013

Figuur 7 - veiligheidseisen sterktestabiliteit SCFB_kerend naar binnen.
