Deltares

Casussen

Integrale afweging vervangingsvarianten bij fictieve case oeverconstructie

KENNISPROGRAMMA
NATTE KUNSTWERKEN

Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Casussen

Integrale afweging vervangingsvarianten bij fictieve case oeverconstructie

Auteur(s)
Mark de Bel
Joost Breedeveld
Antonis Mavritsakis
Renger van de Kamp (Rijkswaterstaat)
Diego Allaix (TNO)

Casussen

Integrale afweging vervangingsvarianten bij fictieve case oeverconstructie

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Albert Barneveld
Referenties	--
Trefwoorden	--

Documentgegevens	
Versie	1.0
Datum	14-11-2024
Projectnummer	11207401-011
Document ID	11207401-011-HYE-0003
Pagina's	43
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)		
	Mark de Bel Joost Breedeveld Antonis Mavritsakis Renger van de Kamp Diego Allaix	

Samenvatting

Natte kunstwerken (zoals sluizen, stuwen, gemalen en damwanden) bereiken op een gegeven moment einde levensduur. Door bij verouderende natte kunstwerken tijdig in te grijpen, kan worden voorkomen dat de betrouwbaarheid, beschikbaarheid, onderhoudbaarheid en veiligheid van de waterinfrastructuur in het geding komen. Het komen tot goed onderbouwde beslissingen aangaande toekomstbestendige investeringen voor deze natte kunstwerken met einde levensduur vereist dat in de besluitvorming de beschikbare technische, functionele en economische kennis van de kunstwerken en de betreffende netwerken optimaal wordt benut. Daarnaast dient rekening gehouden te worden met effecten van socio-economische, klimatologische en beleidsmatige ontwikkelingen.

In het Kennisprogramma Natte Kunstwerken (KpNK) is ten behoeve van het doorlopen van de Regio-analyse en Planfase volgens de VenR-Doorklikplaat een iteratieve werkwijze ontwikkeld om beslismoment 1 (BM1 - Regioanalyse) en beslismoment 2 (BM2 - Planfase) goed en navolgbaar voor te bereiden en te onderbouwen. Kern van de iteratieve werkwijze is stapelbaarheid. Hiermee wordt een herhaling van processtappen bedoeld waarbij in iedere herhaling (iteratie) er meer en/of betere informatie wordt verkregen voor onderbouwing van keuzes. Er wordt stapsgewijs gewerkt, van grof naar fijn met voortschrijdend inzicht, om onderbouwd te komen tot VenR-beslissingen (hier de oplossingsrichting, varianten en voorkeursvariant). Verkregen informatie, uitgangspunten en beargumenteerde keuzes worden transparant en eenduidig opgeschreven zodat bij vervolgvragen in het VenR-proces hier op kan worden voortgebouwd. In de werkwijze wordt rekening gehouden met de verschillende functies en (onzekere) toekomstontwikkelingen (drivers). Er is bij de opzet van de werkwijze zoveel mogelijk gepoogd aan te sluiten bij de gangbare werkwijzen van Rijkswaterstaat.

De voorliggende kennisbijdrage vanuit Kennisprogramma Natte Kunstwerken (KpNK) is ontstaan uit een samenwerking tussen twee KpNK-werkgroepen. Enerzijds een groep technische experts vanuit werkpakket 1.2 "*Einde levensduur damwanden*" die kernvraag 1 (KV1) van een waterbeheerder “**Hoe lang gaat mijn kunstwerk nog mee?**“ willen beantwoorden. Anderzijds een groep economische experts vanuit werkpakket 3.1 ‘’*Integrale afweging VenR-opties*” die kernvraag 3 (KV3) van een waterbeheerder “**Hoe weeg ik VenR-opties af in termen van kosten en baten, nu of later?**” willen beantwoorden.

Dit heeft geleid tot een (fictieve) voorbeeldcase van een grove economische afweging tussen de (technische) opties aan het einde van de levensduur van een damwand als oeverconstructie langs een kanaal. Deze fictieve voorbeeldcase met verschillende VenR-varianten (i.e. combinaties van alternatieven) voor een verouderde damwandconstructie langs een kanaal laat een significant verschil in kosten zien.

De grove economische analyse laat ten eerste zien dat het traditionele Variant 1a (i.e. levensduur-verlenging door middel van het plaatsen van extra ankers) geen echt economisch voordeel biedt ten opzichte van het traditionele Variant 1c (i.e. rechtstreekse vervanging van de damwand). Eerstgenoemde heeft vergelijkbare totale kosten per kilometer (€ 6,5 miljoen resp. € 6,7 miljoen beiden voor een CEMT klasse Va kanaal), maar heeft in principe wel een hoger risico vanwege mogelijke vervanging van de damwand eerder dan de in ogenschouw genomen 25 jaar. In de Bijlage A is de case voor het verlengen van de levensduur verder uitgewerkt, en geïllustreerd met de *Value of Information* en het onderzoeken van de optimale monitoringsfrequentie. Ondanks dat de case studie in Bijlage A ook is gebaseerd op een virtuele omgeving, illustreren de berekeningen duidelijk de economische baten van monitoring.

Uit de economische analyse blijkt ook dat een gebruiksbeperking door middel van een beperking van de vaarsnelheid hoge maatschappelijke kosten heeft, en dat een snelheidsbeperking voor vaarwegen alleen gunstig is voor vaarwegen met een beperkte intensiteit van schepen hebben zonder dat er een significante economische impact is.

Inhoud

	Samenvatting	**4**
	Inhoud	**6**
1	**Inleiding**	**8**
1.4	Casussen; fictieve case oeverconstructie	10
1.5	Probleembeschrijving	11
1.6	Doelstelling	12
1.7	Leeswijzer	12
2	**Definities**	**13**
2.1	Einde levensduur	13
2.2	Opties en alternatieven	13
3	**Casestudie**	**14**
3.1	Beschrijving	14
3.2	Eisen	14
3.2.1	Huidige situatie	14
3.2.2	Toekomstige situatie	15
3.3	Varianten bij een CEMT-klasse Va vaarweg	16
3.3.1	VenR-opties en alternatieven	16
3.3.2	Scheiden realistische kansrijke en niet realistische VenR-alternatieven	19
3.3.3	Realistische kansrijke VenR-varianten in de tijd	20
3.3.4	Verdiepingsslag varianten levensduurverlenging	21
3.4	Varianten bij een CEMT-klasse VI vaarweg	21
3.4.1	VenR-opties en alternatieven	21
3.4.2	Scheiden realistische kansrijke en niet realistische VenR-alternatieven	22
3.4.3	Realistische kansrijke VenR-varianten in de tijd	22
3.4.4	Verdieping levensduurverlenging	23
4	**Economische beschouwingen**	**24**
4.1	Toelichting op werkwijze	24
4.2	Economische berekeningen van VenR-varianten	25
4.2.1	Uitgangspunten economische berekeningen	25
4.2.2	Kosten	25
5	**Conclusies**	**28**
6	**Referenties**	**29**
A	**Analyse levensduurverlenging**	**30**
A.1	Inleiding	30

A.2 Methodologie 30
A.3 Modellering 31
A.3.1 Samenvatting van de analyseaanpak 31
A.3.2 Engineering model 32
A.3.3 Corrosiemodel 33
A.3.4 Eigenschappen van damwandwanden als functie van corrosie 34
A.3.5 Betrouwbaarheidsmodel 35
A.3.6 Corrosiemetingen en statistische modellering 36
A.4 Resultaten 37
A.4.1 Resultanten van de faalkans analyse 37
A.4.2 Inzichten voor de economische waardeanalyse 38
A.4.3 Resultaten van de economische analyse 40
A.5 Conclusies 41
A.6 Referenties 42

1 Inleiding

1.1 Context Kennisprogramma Natte Kunstwerken

Sluizen, stuwen, gemalen, stormvloedkeringen en damwandconstructies zijn belangrijke assets (ook wel natte kunstwerken genoemd) voor het waterbeheer waar beheerders zoals Rijkswaterstaat en de waterschappen voor verantwoordelijk zijn. Gezien de ontwerphorizon, conditie en prestatie van deze natte kunstwerken in de waterinfrastructuur bereiken veel (onderdelen) van deze objecten de komende decennia het einde van hun levensduur (Rijkswaterstaat, 2022). Zij kunnen daardoor hun functies niet meer adequaat blijven uitvoeren. Zonder aanpassingen zal dit dan ten koste gaan van de betrouwbaarheid, beschikbaarheid, onderhoudbaarheid en/of veiligheid van de waterinfrastructuur. In sommige gevallen raakt het ook de veiligheid van de burger (bijvoorbeeld het niet-sluiten van een spuisluis of uitval van een gemaal). In het kader van goed assetmanagement staan beheerders als Rijkswaterstaat dan ook voor een grote opgave om tot toekomstbestendige (investerings-)beslissingen te komen bij het vervangen of renoveren (VenR) van deze kunstwerken. Sinds 2024 heet VenR Vernieuwing binnen Rijkswaterstaat. In dit rapport wordt de term VenR aangehouden.

Wanneer voor een nat kunstwerk einde levensduur in beeld komt, dient onderbouwd afgewogen te worden welke oplossingsrichting voor dit kunstwerk wordt gekozen: niets doen, levensduurverlengend onderhoud, VenR of nieuwe aanleg. Bij de onderbouwing dient goed in beeld te worden gebracht wat de functie van het natte kunstwerk in het netwerk en gebied is, naast effecten van socio-economische, klimatologische en beleidsmatige ontwikkelingen. Indien de oplossingsrichting VenR wordt voor het verouderde natte kunstwerk, dan heeft Rijkswaterstaat een uniform en systematisch werkproces opgesteld waarmee - vanaf de verkennende fase - een VenR-maatregel transparant en herleidbaar onderbouwd kan worden. De zogenoemde Doorklikplaat VenR visualiseert dit proces van de te doorlopen deelstappen en de op te leveren resultaten in dit werkproces.

In het Kennisprogramma Natte Kunstwerken (KpNK) ontwikkelen en bundelen Deltares, MARIN, TNO en Rijkswaterstaat de technische, functionele en economische kennis die nodig is om de besluitvorming omtrent de VenR-opgave bij de civiele en bewegende delen van natte kunstwerken effectief, efficiënt, transparant en toekomstbestendig te onderbouwen. De kennisontwikkeling in het KpNK draagt bij aan twee fasen van het VenR-proces, namelijk de Regioanalyse en Planfase, en vindt inhoudelijk plaats langs de volgende drie kernvragen:

1 Kernvraag 1: Hoe lang gaat mijn kunstwerk nog mee, zowel technisch als functioneel?
2 Kernvraag 2: Hoe kunnen oplossingsrichtingen[1] en varianten[2] voor VenR systematisch uitgewerkt en onderbouwd worden?
3 Kernvraag 3: Hoe weeg ik VenR-oplossingsrichtingen en -varianten in termen van kosten en baten tegen elkaar af?

1.1 Doel en doelgroep

In het KpNK is door Rijkswaterstaat en Deltares ten behoeve van het doorlopen van de Regioanalyse en Planfase volgens de VenR-doorklikplaat een iteratieve werkwijze ontwikkeld (zie het hoofdrapport over de iteratieve werkwijze (KpNK, 2024a)).

[1] VenR-oplossingsrichtingen: niets doen, levensduurverlengend onderhoud, vervangen en renoveren, en aanleg
[2] Een variant is hier een verdere uitwerking van een oplossingsrichting. Binnen het VenR-proces wordt toegewerkt naar een voorkeursvariant.

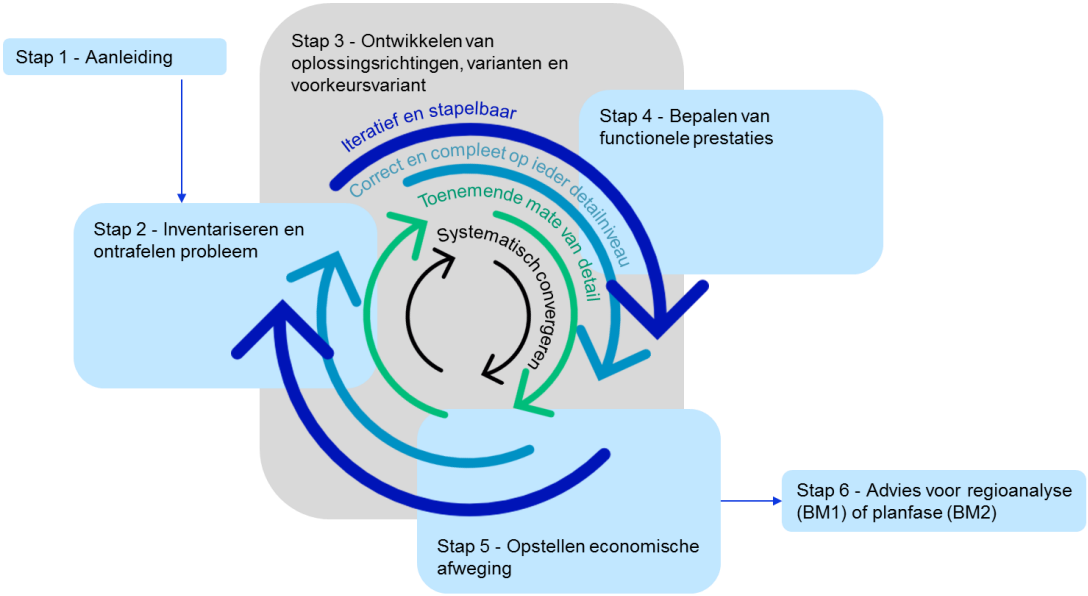
Deze iteratieve werkwijze heeft als doel te komen tot een goede onderbouwing van de te nemen beslissing. De aanpak kenmerkt zich door een stapelbare en stapsgewijze aanpak waarbij steeds meer in detail kan worden gegaan (zie ook Figuur 1-1).

Aan de hand van deze iteratieve werkwijze kunnen de adviezen met betrekking tot de oplossingsrichting(en) in de Regioanalyse en het daarbij behorende beslismoment 1 (BM1[3]) én de adviezen met betrekking tot de varianten in de Planfase en het daarbij behorende beslismoment 2 (BM2[4]) goed onderbouwd worden. Centraal in de iteratieve werkwijze staat de prestatie van een netwerk of kunstwerk - i.e. de mate waarin het voldoet aan de gestelde eisen en/of wensen. Op die manier wordt de functionele prestatie (KpNK, 2024d) gebruikt om het huidige en toekomstige functioneren van een nat kunstwerk of bijbehorend netwerk(deel) te bepalen, knelpunten op beide niveaus vast te stellen en (daarmee) systematisch oplossingsrichtingen en varianten uit te werken. Het concept van prestatie is uiteraard breder toepasbaar; bevindingen van het KpNK zijn daarom ook los van de iteratieve werkwijze te gebruiken.

De beschreven iteratieve werkwijze is bedoeld als hulpmiddel voor de teams (onder leiding van de betreffende regionale directie van Rijkswaterstaat) die gezamenlijk het werkproces volgens de VenR-Doorklikplaat gaan doorlopen bij bereiken van einde levensduur van een nat kunstwerk. Het biedt de VenR-coördinator van de regio een handvat voor een werkwijze die hij/zij kan volgen om systematisch te komen tot een goede onderbouwing van de oplossingsrichting (en) voor BM1 (Regioadvies) en varianten en voorkeursvariant voor BM2 (Planfase) in het VenR-werkproces.

1.2 Iteratieve werkwijze

De iteratieve werkwijze is schematisch weergegeven in Figuur 1-1.



Figuur 1-1 De KpNK werkwijze voor het uitwerken, onderbouwen en afwegen van oplossingsrichtingen en VenR-varianten.

[3] hierin gaat het om de vraag welke van de volgende oplossingsrichtingen op welk moment het meest passend is: niets doen, levensduurverlengend onderhoud, VenR of aanleg

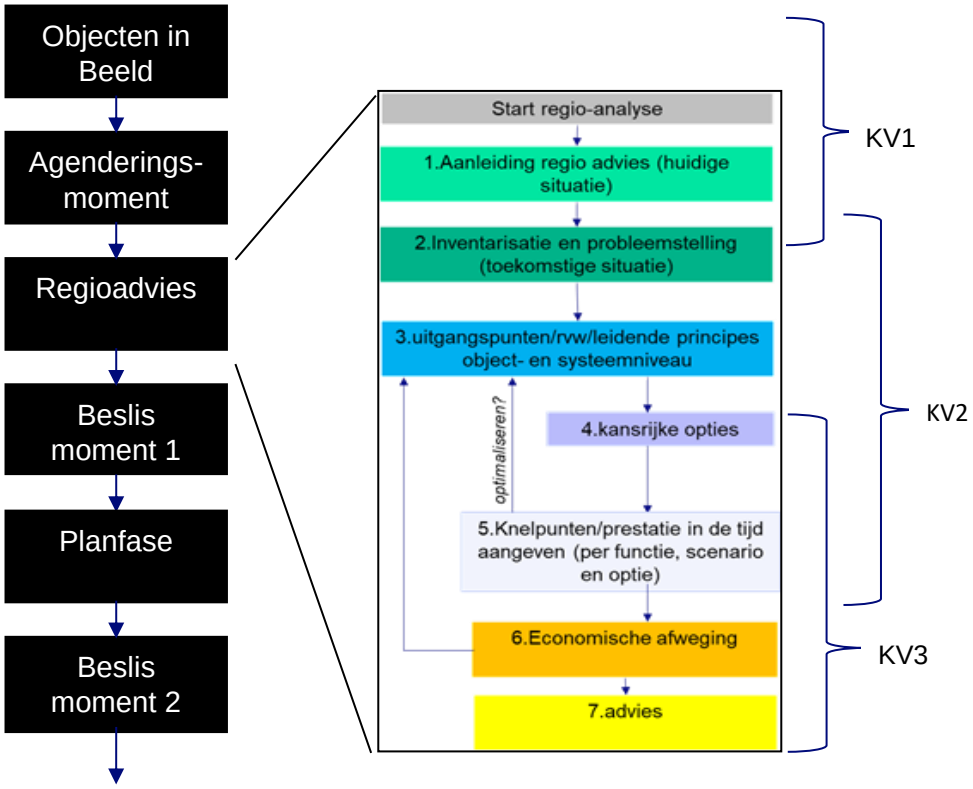
[4] hierin gaat het om de vraag welke van de verschillende realistische varianten de voorkeursvariant is

Doel van de iteratieve werkwijze is om voor een object wat einde levensduur bereikt onderbouwd te komen tot een oplossingsrichting in het Regioadvies (BM1) of tot varianten inclusief voorkeursvariant in de Planfase (BM2). Kern van de iteratieve werkwijze is stapelbaarheid. Hiermee wordt een herhaling van processtappen bedoeld waarbij in iedere herhaling (iteratie) er meer en/of betere informatie wordt verkregen voor onderbouwing van keuzes (stapelbaarheid). Er wordt stapsgewijs gewerkt, van grof naar fijn met voortschrijdend inzicht, om onderbouwd te komen tot VenR-beslissingen (hier de oplossingsrichting, varianten en voorkeursvariant). Verkregen informatie, uitgangspunten en beargumenteerde keuzes worden transparant en eenduidig opgeschreven zodat bij vervolgvragen in het VenR-proces hier op kan worden gebouwd. In de werkwijze wordt rekening gehouden met de verschillende functies en (onzekere) toekomstontwikkelingen (drivers). Er is bij de opzet van de werkwijze zoveel mogelijk gepoogd aan te sluiten bij de gangbare werkwijzen van Rijkswaterstaat (VenR-proces en -doorklikplaat).

Een uitgebreide beschrijving van de volledige iteratieve werkwijze is beschikbaar in een afzonderlijke rapportage (KpNK, 2024a). Voor de afzonderlijke Stappen 2, 3, 4 en 5 zijn separate rapporten beschikbaar.

1.3 Casussen; fictieve case oeverconstructie

De voorliggende kennisbijdrage vanuit Kennisprogramma Natte Kunstwerken (KpNK) is ontstaan uit een samenwerking tussen twee KpNK-werkgroepen. Enerzijds een groep technische experts vanuit werkpakket 1.2 "*Einde levensduur damwanden*" die Kernvraag 1 (KV1) van een waterbeheerder “**Hoe lang gaat mijn kunstwerk nog mee?**“ willen beantwoorden. Anderzijds een groep economische experts vanuit werkpakket 3.1 ‘*’Integrale afweging VenR-opties*” die Kernvraag 3 (KV3) van een waterbeheerder “**Hoe weeg ik VenR-opties af in termen van kosten en baten, nu of later?**” willen beantwoorden. Dit heeft geleid tot een (fictieve) voorbeeldcase van een grove economische afweging tussen de (technische) opties aan het einde van de levensduur van een damwand als oeverconstructie langs een kanaal.



Figuur 1-2 Door KpNK voorgestelde werkwijze binnen RWS Procesketen VenR.

KV1 richt zich op kennis- en toolontwikkeling voor aan het begin van het gehele besluitvormingsproces, zodat beheerders zich een beter beeld kunnen vormen over de daadwerkelijke (rest)levensduur van een object. Resultaten vanuit KV3 gericht op het transparanter, efficiënter en effectiever maken van het VenR-afwegingsproces landen pas veel verder in het besluitvormingsproces rondom een object.
De aspecten van Kernvraag 2 (KV2) komen in dit rapport niet echt aan bod, voor alle varianten worden dezelfde prestaties aangenomen, behalve dan het verschil in de CEMT klasse voor het kanaal zoals beschreven in de paragraven 3.3 en 3.4.

1.4 Probleembeschrijving

In de praktijk beperken afwegingen van waterbeheerders (bij Rijkswaterstaat) over de opties bij eindelevensduur van een damwandconstructie zich, zeker in de verkennende fase van het besluitvormingsproces (i.e. tot aan beslismoment 1), meestal tot het vergelijken van twee kansrijke opties:

- Een renovatie waarmee eerst de levensduur van de huidige constructie wordt verlengd of
- Een vervanging waarbij direct een nieuwe damwandconstructie wordt aangebracht.

Met een te beperkte blik op alle beschikbare opties in de verkennende fase ligt het gevaar op de loer dat er bij het kiezen voor een optie onvoldoende aandacht is voor de economische afweging. Hierdoor wordt niet altijd de meest toekomstbestendige optie gekozen. En hiermee neemt de kans op desinvesteringen in de infrastructuur toe.

1.5 Doelstelling

Doel van het voorliggende onderzoek is om met een voorbeeldcase voor een verouderde damwandconstructie een economische afweging vanuit een brede blik te schetsen. Dit is bedoeld voor beheerders van dit type constructies die in een regioanalyse (zie Figuur 1) een besluit moeten onderbouwen.

Hierin wordt voor alle (vanuit technisch én functioneel oogpunt) kansrijke VenR-opties een ruwe (i.e. +/- 50%) raming van realisatie- / beheer- / onderhoudskosten meegenomen, en niet alleen de eerder genoemde ‘usual suspects’. De case is fictief, maar realistisch genoeg om bruikbare input te leveren voor een MKBA-analyse. De case gaat uit van een te bereiken levensduurverlening van 100 jaar.

Dit rapport is een uitbreiding van het case rapport dat eind 2023 is opgeleverd. De uitbreiding betreft:

- Het beschouwen van het kanaal als CEMT-klasse VI (naast CEMT-klasse Va) vaarweg;
- Het meer in detail bekijken van Variant 3a en Variant 3b (zie sub-paragraaf 3.3.4 en Bijlage A) waarin levensduurverlenging wordt bereikt met behulp van meetdata uit inspecties (i.e. meting van de wanddikte);

1.6 Leeswijzer

In dit document worden in Hoofdstuk 2 eerst de definities van einde levensduur (zoals aangehouden in het KpNK), alsmede opties en alternatieven gegeven. Daarna wordt in Hoofdstuk 3 de casestudy beschreven als input voor de uiteindelijke MKBA-analyse in Hoofdstuk 4 en conclusies getrokken in Hoofdstuk 5. Bijlage A licht toe hoe bij de varianten met levensduurverlenging ‘op papier’ het actualiseren van de betrouwbaarheid van deze constructie op basis van corrosiemetingen van de wand tijdens de levensduur uitwerkt op de economische analyse.

2 Definities

2.1 Einde levensduur

Civiele kunstwerken worden meestal ontworpen voor een zichtperiode van 50 tot 100 jaar (ontwerplevensduur). Door verschillende omstandigheden kan de daadwerkelijke levensduur korter or langer zijn dan de ontwerplevensduur. Zo kunnen belastingen, belastingcombinaties en/of sterktedegradatie gedurende de zichtperiode hoger zijn dan verwacht. Qua (einde) levensduur zijn er de:

- **Technische** levensduur
- **Functionele** levensduur
- **Economische** levensduur

De **technische levensduur** is de periode waarover een kunstwerk (of een onderdeel daarvan) aan het wettelijk vereiste veiligheidsniveau of de afgesproken prestaties voldoet met regulier onderhoud (Allaix et al., 2023). Het bereiken van het einde technische levensduur wordt beoordeeld aan de hand van inspecties, herberekeningen en eisen voor betrouwbaarheid die in de huidige normen zijn vastgesteld. Bij damwandconstructies is degradatie van de stalen componenten, zoals de wand en het anker, de meest voorkomende reden voor het bereiken van het einde van de technische levensduur.

De **functionele levensduur** is de periode waarover de constructie één of meerdere functies conform de functionele eisen uitvoert (de Groot-Wallast et al., 2019). Het einde van de functionele levensduur van een damwandconstructie kan worden bereikt als bijvoorbeeld de verruiming van een kanaal (ten behoeve van de scheepvaartveiligheid) het vervangen van de constructie noodzakelijk maakt.

De **economische levensduur** is de periode waarover een kunstwerk (of een onderdeel daarvan) economisch rendabel is te onderhouden, waarbij wordt voldaan aan de gestelde eisen en normen waarop het is ontworpen (Rijkswaterstaat, 2022b).

Het einde van de technische levensduur speelt momenteel een primaire rol in het Prognoserapport (Rijkswaterstaat, 2022a). De definities van economische en functionele levensduur zijn op dit moment slechts gedeeltelijk geoperationaliseerd in de besluitvorming over Vervanging en Renovatie (VenR).

2.2 Opties en alternatieven

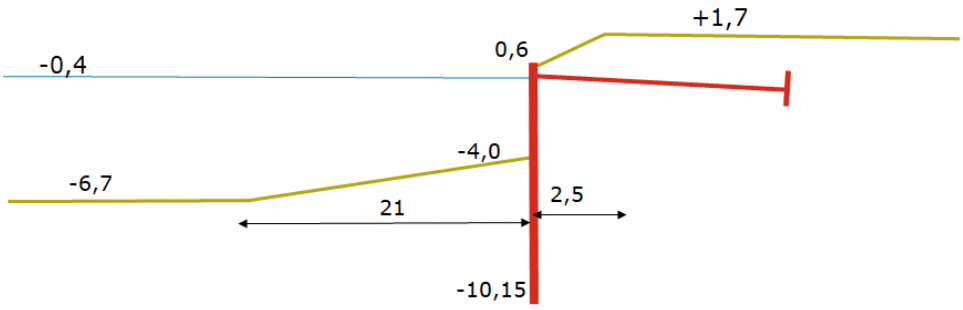
In lijn met de terminologie van Rijkswaterstaat worden binnen het KpNK de volgende **VenR-opties** onderscheiden: niets doen, instellen beperkende maatregelen, onderhoud, renovatie, verbetering, vervanging en sloop.

Bij elk van deze opties heeft men de keus uit één of meerdere **VenR-alternatieven**. Uitwerking richting een oplossingsrichting of **VenR-variant** gebeurt met een combinatie van alternatieven over eenzelfde zichtperiode. Per alternatief zijn er meerdere configuraties denkbaar, **VenR-varianten** genoemd.

3 Casestudie

3.1 Beschrijving

De casestudie richt zich op een damwandconstructie (zie dwarsdoorsnede in Figuur 3-1) langs een 1 km lange kanaalpand van een binnenwaterweg voor scheepvaart van CEMT-klasse Va of CEMT klasse VI met een breedte van 100 m en een waterdiepte van 6,3 m. Het aantal scheepspassages op dit kanaal betreft 25.000 per jaar. De kade bestaat uit overwegend kleilagen. De oeverconstructie heeft een kerende hoogte van 7,3 m en is uit 10,75 m lange Belval BZ7-planken en 12 m lange ankerstaven met ankerplaat 1 m x 1 m opgebouwd. De oeverconstructie is in 1980 aangebracht.



Figuur 3-1 Doorsnede van de huidige damwandconstructie en vaarwegprofiel.

Er wordt op basis van visuele inspecties in 2023 aangenomen, dat de damwandconstructie over de gehele lengte van 1 km in 2025 het einde van de technische levensduur zal hebben bereikt. Er is behoefte aan een oeverconstructie die de komende 100 jaar (tot 2125) naar behoren kan functioneren. In de regioanalyse moet worden onderbouwd welke VenR-varianten daarvoor het meest kansrijk zijn.

In Hoofdstuk 4 worden voor twee specifieke situaties de resultaten uit een economische beschouwing van verschillende VenR-varianten naast elkaar gezet voor het kanaal als:

- CEMT-klasse Va vaarweg (zie toelichting in Paragraaf 3.3)
- CEMT-klasse VI vaarweg[5] (zie toelichting in Paragraaf 3.4).

3.2 Eisen

3.2.1 Huidige situatie

Conform de voorgestelde werkwijze binnen RWS Procesketen VenR (zie Figuur 1) dient allereerst de huidige situatie te worden beschouwd; zie blok 1 “Aanleiding regio advies (huidige situatie)”.

In de huidige situatie heeft de damwandconstructie (zijnde een bouwwerk) zowel een constructieve functie binnen de oever als een rol in het faciliteren van het scheepvaartverkeer over het kanaal.

[5] N.B. De tweede situatie (voor het kanaal als een CEMT-klasse VI) is uitgewerkt nadat de economische beschouwing voor de eerste situatie is opgesteld en geanalyseerd. Dit heeft het mogelijk gemaakt om in de tweede situatie op basis van ervaring sneller zaken aan te nemen c.q. te parkeren.

Wat betreft de door het Bouwbesluit geëiste constructieveiligheid valt de constructie (volgens de Eurocode) in gevolgklasse CC2.

In de Eurocode wordt aan de gevolgklassen een betrouwbaarheid van de constructie gekoppeld die deze te allen tijden minimaal moet hebben. Op basis van geavanceerde analyses (inclusief grond - constructie interactie) kan deze betrouwbaarheid – en dus ook een afname hiervan in de tijd als gevolg van sterktedegradatie – worden vastgesteld. Dit soort informatie biedt de mogelijkheid om nadere verdieping in een economische analyse aan te brengen. Desondanks wordt daar in deze case nog niets mee gedaan.

Wat betreft de door Richtlijn Vaarwegen (Rijkswaterstaat, 2022c) geëiste scheepvaartveiligheid de volgende opmerkingen:

- Voor een vaarweg in CEMT-klasse Va, moet het vaarwegprofiel de volgende afmetingen hebben:
  - vaarbreedte: minimaal 43,2 m (krap), bij voorkeur 52,6 m (normaal)
  - vaardiepte: minimaal 4,6 m (krap), bij voorkeur 4,9 m (normaal)
- Voor een vaarweg in CEMT-klasse VI, moet het vaarwegprofiel de volgende afmetingen hebben[6]:
  - vaarbreedte: minimaal 97,2 m
  - vaardiepte: minimaal 5,6 m
- Conform de beschrijving bij Figuur 3-1 voldoet het huidige vaarwegprofiel aan de eisen voor de beide typen vaarwegen, zodat het kanaal geschikt is om met een normale vaarsnelheid te gebruiken.

Tot slot een aantal externe factoren die in werkelijkheid ook aan de orde zouden kunnen zijn, en dan in kansrijke VenR-opties en afweging meegenomen moeten worden. Voor deze voorbeeldcase zou dit de hoeveelheid opties en complexiteit echter teveel vergroten, en dus noemen we ze alleen:

- De oever maakt op dit moment geen onderdeel uit van een (regionale) waterkering, waardoor er geen eisen (vanuit de Waterwet) van kracht zijn wat betreft de bijdrage die de damwandconstructie levert aan de buitenwaartse macrostabiliteit van de kade.
- Er is nu geen sprake van een wegconstructie op de kade, die vereist dat de damwandconstructie een extra verkeersbelasting naar de ondergrond kan afdragen.
- Tot slot is er aangenomen dat er geen leidingen parallel aan de oever of (als zinker) door het kanaalprofiel lopen en worden beïnvloed door aanpassingen aan het kanaalprofiel en/of damwandconstructie.

3.2.2 Toekomstige situatie

In de voorgestelde werkwijze binnen RWS Procesketen VenR (zie Figuur 1) dient ook de toekomstige situatie te worden beschouwd; zie blok 2 “Inventarisatie en probleemstelling (toekomstige situatie)”.

In de toekomstige situatie zal de oever dezelfde rol in het faciliteren van scheepvaartverkeer over het kanaal houden. De eventuele damwandconstructie daarin – de huidige constructie na een levensduur verlengende maatregel of een nieuwe constructie – wordt geacht dezelfde constructieve functie binnen de oever te vervullen. Er is geen verandering van constructieve CC-klasse of CEMT-klasse voorzien. Ook voorzien we geen aanvullende eisen doordat de oever (al dan niet voorzien van een damwandconstructie) onderdeel van een waterkering of weglichaam wordt.

[6] Een klasse VI vaarweg moet minimaal voldoen aan het normaal profiel.

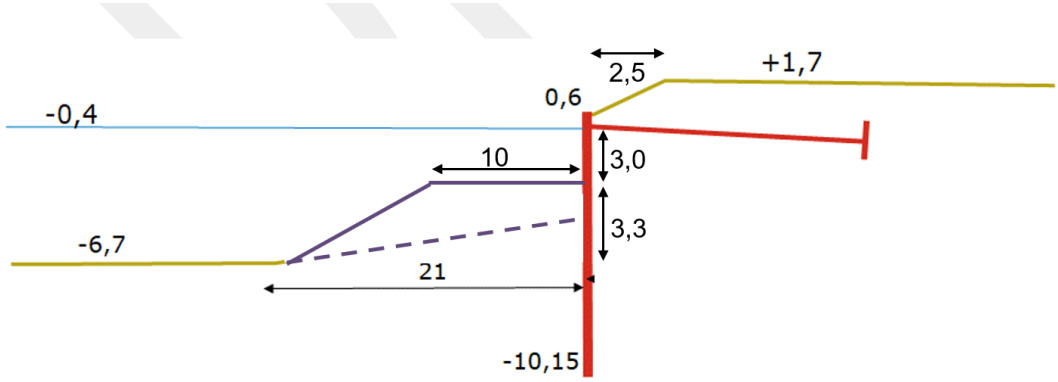
Voor deze situatie geldt voor alle kansrijke opties en alternatieven dat deze tot een oeverconstructie moeten leiden die voor een periode van ten minste 100 jaar (tot 2125) naar behoren moet functioneren.

3.3 Varianten bij een CEMT-klasse Va vaarweg

3.3.1 VenR-opties en alternatieven

De voor de levensduurverlenging of vervanging van de bestaande damwandconstructie in de oever beschouwde VenR-opties (en bijbehorende alternatieven) aan het einde van de levensduur zijn:

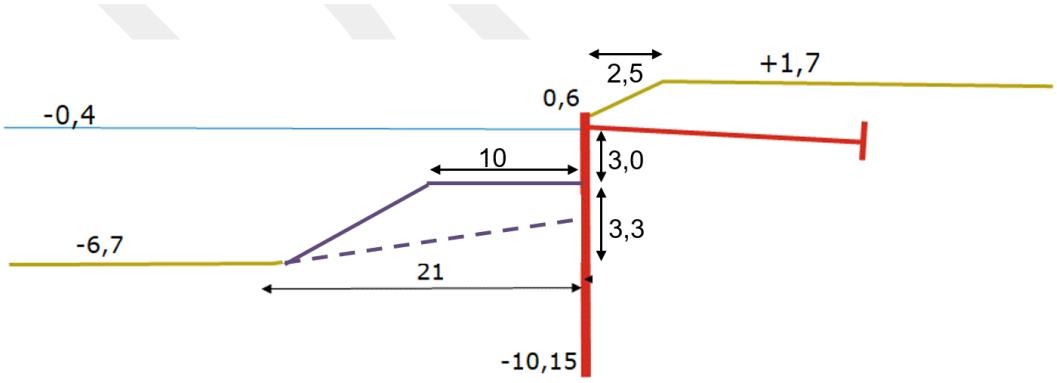
- Oplossingsrichting 1 – instellen gebruiksbeperkingen:
  - alternatief 1.1: verlagen toelaatbare vaarsnelheid kanaal
  - alternatief 1.2: verlagen toelaatbare CEMT-klasse kanaal door breedte-beperking[7]
  - alternatief 1.3: verlagen toelaatbare CEMT-klasse kanaal door diepte-beperking[8]
  - alternatief 1.4: verlagen toelaatbare bovenbelasting op damwandconstructie
- Oplossingsrichting 2 – levensduurverlenging (alleen bij einde technische levensduur) aan de hand van:
  - alternatief 2.1: mogelijkheden ‘op papier’ onderbouwen met informatie over bewezen sterkte (bijv. belastingen inclusief waterafstanden)
  - alternatief 2.2: mogelijkheden ‘op papier’ onderbouwen met monitoring van corrosie en plan voor inspecties en reparaties (zie ook verdere onderbouwing in appendix A)
  - alternatief 2.3: mogelijkheden ‘fysisch’ onderbouwen met proefbelastingen
  - alternatief 2.4: versterken huidige constructie (bijv. met extra ankers)
- Oplossingsrichting 3 – vervanging door teruggewonnen stalen damwanden (bijv. vanuit een andere locatie)
- Oplossingsrichting 4 – vervanging door nieuwe stalen damwandconstructie
- Oplossingsrichting 5 – vervanging door nieuwe damwandconstructie van ander materiaal (zie



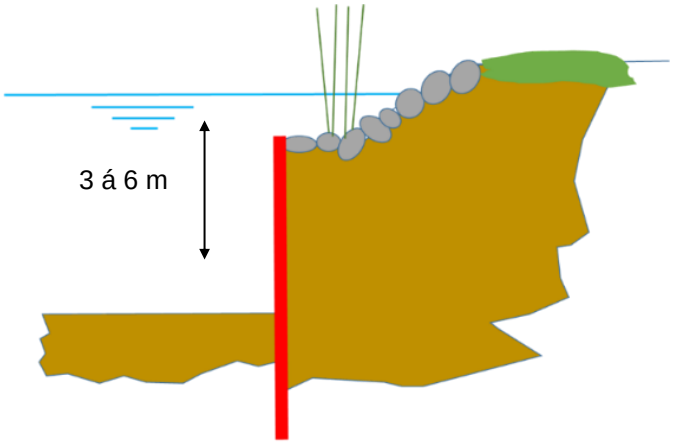
- Figuur 3-2):
  - alternatief 5.1: vervanging door nieuwe houten damwanden (inclusief steunberm)
  - alternatief 5.2: vervanging door nieuwe damwanden van (vezel versterkt) kunststof[9]
- Oplossingsrichting 6 – vervanging (geheel of gedeeltelijk) door een talud
  - alternatief 6.1:vervanging door hybride oever (zie Figuur 3-3)
  - alternatief 6.2a: vervanging door volledig talud zonder land acquisitie (zie Figuur 3-4)
  - alternatief 6.2b: vervanging door volledig talud met land acquisitie (zie Figuur 3-4)

[7] denk hierbij aan een onderwatertalud onder dezelfde helling en de teen verder van de oeverconstructie af;
[8] denk hierbij aan hetzelfde profiel dat niet op NAP -6,7 m maar op NAP -5,7 m is gelegen;
[9] bijv. (GID Milieutechniek B.V.)

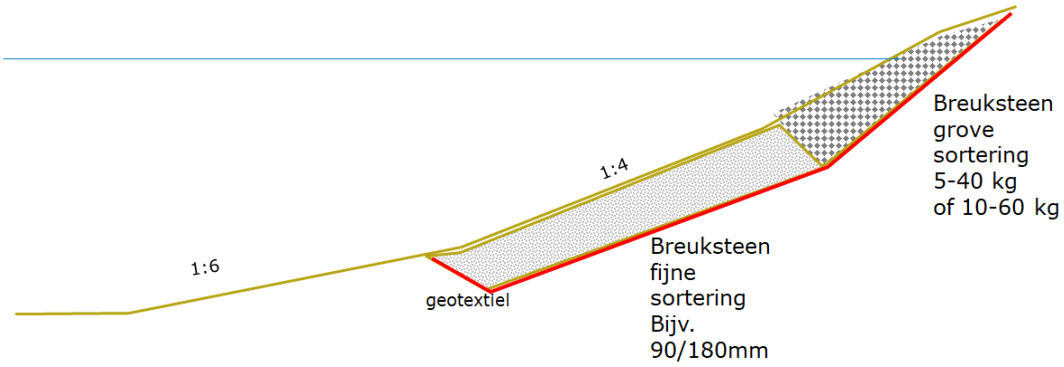
Het vervangen van de damwandconstructie door een nieuwe constructie van een ander materiaal kan dus alleen als ook de kerende hoogte wordt beperkt. In deze voorbeeldcase wordt ervan uitgegaan, dat bij zowel hout als (vezel versterkte) kunststof een kerende hoogte van maximaal 3 m haalbaar is. Een forse steunberm (zie Figuur 3-2) zou nodig zijn om de hogere oever voldoende stabiel te houden. De resulterende verlaging van de vaarbreedte kan mogelijk tot beperkingen voor de scheepvaart leiden.



Figuur 3-2 Doorsnede oever bij vervanging door wanden ander materiaal (inclusief een grove inschatting van de vereiste steunberm).



Figuur 3-3 Doorsnede hybride oever met een (bovenliggend) talud.



Figuur 3-4 Doorsnede volledige talud.

Met betrekking tot de genoemde VenR-opties en -alternatieven voor de oever zijn de uitgangspunten over levensduurverlenging en kosten in Tabel 3-1 nodig om een economische analyse mogelijk te maken.

Tabel 3-1 Investeringskosten en kosten voor beheer en onderhoud (BenO) en herinvesteringen bij opties en alternatieven over een periode van 100 jaar voor het kanaal als CEMT-klasse Va vaarweg.

#	VenR-alternatief	Levensduur -verlenging	Kosten [M€/km]	
		[jaar]	realisatie	BenO
1.1	verlagen toelaatbare vaarsnelheid [1)]	…	-	-
1.2	verlagen CEMT-klasse door beperking vaarbreedte	…	-	-
1.3	verlagen CEMT-klasse door beperking vaardiepte	…	-	-
1.4	verlagen toelaatbare bovenbelasting oeverconstructie	15	-	-
2.1	levensduurverlenging 'op papier' onderbouwen	15	0,10/50%	0
2.2	levensduurverlenging met monitoring onderbouwen	15	0,15/50%	0
2.3	levensduurverlenging met proefbelasting onderbouwen	25	-	-
2.4	levensduurverlenging via gerichte versterking (ankers)	25	3,1	0,06
3	vervanging door teruggewonnen stalen damwandplanken	75	3,6	0,9
4a	vervanging door nieuwe stalen damwandconstructie	75	5,0	1,1
4b	vervanging door nieuwe stalen damwandconstructie	100	5,7	0,2
5.1	vervanging door nieuwe houten damwandconstructie [2)]	33	-	-
5.2	vervanging door nieuwe kunststof damwandconstructie [2)]	50	-	-
6.1	vervanging door hybride oeverconstructie (hout)	100	3,5	1,3
	vervanging door hybride oeverconstructie (kunststof)	100	3,5	0,7
	vervanging door hybride oeverconstructie (staal)	100	4,8	0,1
6.2a	vervanging door volledig talud (zonder land acquisitie)	100	4,0	0,1
6.2b	vervanging door volledig talud (met land acquisitie)	100	4,4	0,1

[1)] *in dit alternatief wordt rekening gehouden met een verlaging van de vaarsnelheid met 5 km/u (van 12,5 naar 7,5 km/u);*
[2)] *dit alternatief vereist een steunberm en (daardoor) alleen als onderdeel van een hybride oeverconstructie (alternatief 6.1);*

3.3.2 Scheiden realistische kansrijke en niet realistische VenR-alternatieven

Op basis van de volgende uitgangspunten, randvoorwaarden en leidende principes – deze kunnen op zowel object- als netwerkniveau betrekking hebben – kan (vooruitlopend op nadere beschouwing) een scheiding worden gemaakt tussen de kansrijke en kansarme VenR-alternatieven:

Tabel 3-2 Overzicht uitgangspunten, randvoorwaarden en leidende principes bij kanaal als klasse CEMT Va vaarweg

	objectniveau	netwerkniveau
uitgangspunten	• geen onderdeel van waterkering; • geen wegconstructie op de kade • geen leiding parallel aan kade • geen leiding (zinker) onder kanaal	• vaarsnelheid mag verlaagd
randvoorwaarden	• geen ruimte voor kanaalverbreding • de oeverconstructie met een kade opgebouwd uit overwegend kleilagen heeft beperkte invloed op lekkage kanaalwater;	• vaardiepte minimaal 4,6 m (krap) • vaarbreedte minimaal 43,2 m (krap)
leidende principes	• constructie blijft gevolgklasse CC2 • toelaatbare bovenbelasting op oeverconstructie niet verlaagd;	• vaarwegklasse blijft CEMT Va • i.v.m. afvoercapaciteit moet het kanaal een voldoende doorstroom-oppervlak houden

Uit het overzicht in Tabel 3-2 volgt voor het klasse Va kanaal dat:

- Alternatief 1.2 en alternatief 1.3 niet realistisch zijn; de vaarwegklasse blijft onveranderd;
- Alternatief 1.4 niet realistisch is; de bovenbelasting op de oeverconstructie mag niet (verder) worden verlaagd;
- Alternatief 5.1 en alternatief 5.2 alleen realistisch zijn als onderdeel van een hybride oplossing met een (bovenliggend) talud; deze zijn meegenomen als VenR-variaties op alternatief 6.1.

3.3.3 Realistische kansrijke VenR-varianten in de tijd

De volgende kansrijke sets van VenR-alternatieven met een zichtperiode van 100 jaar (vanaf 2025) – in het vervolg duiden we deze aan als VenR-varianten – beschouwen we in de uiteindelijke grove economische beschouwing voor het kanaal als een klasse Va vaarweg binnen deze voorbeeldcase:

- Variant 1a-Va (‘traditioneel eerst constructieve levensduurverlenging’):
  - T=0 levensduurverlenging (optie 2; alternatief 2.4)
  - T=25 jaar vervanging door nieuwe stalen damwand (optie 4a, levensduur 75 jaar)
- Variant 1b-Va (‘traditioneel directe één-op-één vervanging’):
  - T=0 vervanging door nieuwe stalen damwand (optie 4b, levensduur 100 jaar)
- Variant 1c-Va (‘traditioneel directe één-op-één vervanging’):
  - T=0 vervanging door nieuwe stalen damwand (optie 4b, levensduur 75 jaar)
  - T = 75 vervanging door nieuwe stalen damwand (optie 4b, levensduur 75 jaar)
- Variant 2a-Va (‘*Business as Usual*’, alleen gebruiksbeperking aan vaarsnelheid’)
  - T=0 verlagen toelaatbare vaarsnelheid van 12,5 km/u naar 7,5 km/u
- Variant 3a-Va (‘eerst levensduurverlenging met monitoring, dan één-op-één vervanging’):
  - T=0 levensduurverlenging (optie 2; alternatief 2.2)
  - T=15 jaar vervanging door nieuwe stalen damwand (optie 4a, levensduur 75 jaar)
  - T=90 jaar vervanging door nieuwe stalen damwand (optie 4a, levensduur 75 jaar)
- Variant 3b-Va (‘eerst levensduurverlenging met monitoring, dan één-op-één vervanging’):
  - T=0 levensduurverlenging (optie 2; alternatief 2.2)
  - T=5 jaar vervanging door nieuwe stalen damwand (optie 4a, levensduur 75 jaar)
  - T=80 jaar vervanging door nieuwe stalen damwand (optie 4a, levensduur 75 jaar)
- Variant 4a-Va (‘directe vervanging met duurzame oplossing’):

  - T=0 vervanging door teruggewonnen stalen damwand (optie 3, levensduur 75 jaar)
  - T=75 jaarvervanging door teruggewonnen stalen damwand (optie 3, levensduur 75 jaar)
- Variant 4b-Va (‘directe vervanging door hybride oplossing met houten damwand’):
  - T=0 vervanging door hybride oplossing met houten damwand (optie 6.1 hout)
  - T=33 jaarvervanging nieuwe houten damwand (alternatief 5.1)
  - T=66 jaarvervanging nieuwe houten damwand (alternatief 5.1)
- Variant 4c-Va (‘directe vervanging door hybride oplossing met kunststof damwand’):
  - T=0 vervanging door hybride oplossing met kunststof damwand (optie 6.1 kunststof)
  - T=50 jaarvervanging nieuwe kunststof damwand (alternatief 5.2)
- Variant 4d-Va (‘directe vervanging door hybride oplossing met stalen damwand’):
  - T=0 vervanging door hybride oplossing met stalen damwand (optie 6, alternatief 6.1)
- Variant 4e-Va (‘directe vervanging door een volledig talud’):
  - T=0 vervanging door volledig talud (optie 6, alternatief 6.2)

3.3.4 Verdiepingsslag varianten levensduurverlenging

Bijlage A presenteert een analyse van de levensduurverlenging voor de fictieve oeverconstructie van verankerde damwand langs een kanaal. De analyse demonstreert het actualiseren van de betrouwbaarheid van deze constructie aan de hand van corrosiemetingen van de wand die tijdens de levensduur zijn verzameld. Deze analyse wordt toegepast in de context van varianten 3a en 3b.

3.4 Varianten bij een CEMT-klasse VI vaarweg

3.4.1 VenR-opties en alternatieven

De voor de levensduurverlenging of vervanging van de bestaande damwandconstructie beschouwde VenR-opties (en bijbehorende alternatieven) aan het einde van de levensduur bij CEMT-klasse VI zijn:

- Oplossingsrichting 1 - instellen gebruiksbeperkingen: in lijn met beschouwing klasse Va meegenomen;
- Oplossingsrichting 2 – levensduurverlenging (alleen bij einde technische levensduur) aan de hand van:
  - alternatief 2.1: mogelijkheden ‘op papier’ onderbouwen met informatie over bewezen sterkte (bijv. belastingen inclusief waterafstanden)
  - alternatief 2.2: mogelijkheden ‘op papier’ onderbouwen met monitoring van corrosie en plan voor inspecties en reparaties (zie ook verdere onderbouwing in appendix A)
  - alternatief 2.3: mogelijkheden ‘fysisch’ onderbouwen met proefbelastingen
  - alternatief 2.4: versterken huidige constructie (bijv. met extra ankers)
- Oplossingsrichting 3 - vervanging door teruggewonnen stalen damwanden niet uitgewerkt voor CEMT klasse VI;
- Oplossingsrichting 4 - vervanging door nieuwe stalen damwandconstructie referentie bij uitwerking CEMT klasse VI;
- Oplossingsrichting 5 - vervanging door nieuwe damwandconstructie van ander materiaal (zie Figuur 3-3) wordt voor CEMT klasse VI (vanwege de kerende hoogte bij een grotere vaardiepte) niet uitgewerkt;
- Oplossingsrichting 6 - vervanging (geheel of gedeeltelijk) door een talud
  - alternatief 6.1a; hybride oever nieuw (alleen stalen damwand)
  - alternatief 6.1b; hybride oever uit de bestaande damwand,
  - alternatief 6.2a: vervanging door volledig talud zonder land acquisitie (zie Figuur 3-4)
  - alternatief 6.2b: vervanging door volledig talud met land acquisitie (zie Figuur 3-4)

Met betrekking tot de genoemde VenR-opties en -alternatieven voor de oever worden de uitgangspunten over levensduurverlenging en kosten in Tabel 3-1 aangehouden bij de economische beschouwing.

3.4.2 Scheiden realistische kansrijke en niet realistische VenR-alternatieven

Op basis van de volgende uitgangspunten, randvoorwaarden en leidende principes – deze kunnen op zowel object- als netwerkniveau betrekking hebben – kan (vooruitlopend op nadere beschouwing) een scheiding worden gemaakt tussen de kansrijke en kansarme VenR-alternatieven:

Tabel 3-3 Overzicht uitgangspunten, randvoorwaarden en leidende principes bij kanaal als CEMT klasse VI vaarweg

	objectniveau	netwerkniveau
uitgangspunten	• geen onderdeel van waterkering; • geen wegconstructie op de kade • geen leiding parallel aan kade • geen leiding (zinker) onder kanaal	• vaarsnelheid mag verlaagd
randvoorwaarden	• geen ruimte voor kanaalverbreding • de oeverconstructie met een kade opgebouwd uit overwegend klei-lagen heeft beperkte invloed op lekkage kanaalwater;	• vaardiepte minimaal 5,6 m • vaarbreedte minimaal 97,2 m
leidende principes	• constructie blijft gevolgklasse CC2 • toelaatbare bovenbelasting op oeverconstructie niet verlaagd;	• vaarwegklasse blijft CEMT VI • i.v.m. afvoercapaciteit moet het kanaal een voldoende doorstroom-oppervlak houden

Uit het overzicht in Tabel 3-3 volgt voor het klasse VI kanaal dat:

- Alternatief 1.2 en alternatief 1.3 niet realistisch zijn; de vaarwegklasse blijft onveranderd;
- Alternatief 1.4 niet realistisch is; de bovenbelasting op de oeverconstructie mag niet (verder) worden verlaagd;
- Alternatief 5.1 en alternatief 5.2 zijn niet realistisch voor een CEMT VI klasse kanaal.
- Alternatief 6.1 alleen realistisch is met gebruik van een stalen damwand. Dit kan ook door gebruik te maken van de bestaande damwand wanneer met name het gedeelte bovenwater onvoldoende sterkte heeft, maar het gedeelte boven water wel voldoende sterkte heeft.

3.4.3 Realistische kansrijke VenR-varianten in de tijd

De volgende kansrijke sets van VenR-alternatieven met een zichtperiode van 100 jaar (vanaf 2025) – in het vervolg duiden we deze aan als VenR-varianten – beschouwen we in de uiteindelijke grove economische beschouwing voor het kanaal als een klasse VI vaarweg binnen deze voorbeeldcase:

- Variant 1a-VI (‘traditioneel eerst constructieve levensduurverlenging’):
  - T=0 levensduurverlenging (optie 2; alternatief 2.4)
  - T=25 jaar vervanging door nieuwe stalen damwand (optie 4a, levensduur 75 jaar)
- Variant 1b-VI (‘traditioneel directe één-op-één vervanging’):
  - T=0 vervanging door nieuwe stalen damwand (optie 4b, levensduur 100 jaar)
- Variant 3a-VI (‘eerst levensduurverlenging met monitoring, dan één-op-één vervanging’):
  - T=0 levensduurverlenging (optie 2; alternatief 2.2)

  - T=15 jaar vervanging door nieuwe stalen damwand (optie 4a, levensduur 75 jaar)
  - T=90 jaar vervanging door nieuwe stalen damwand (optie 4a, levensduur 75 jaar)
- Variant 3b-VI (‘eerst levensduurverlenging met monitoring, dan één-op-één vervanging’):
  - T=0 levensduurverlenging (optie 2; alternatief 2.2)
  - T=5 jaar vervanging door nieuwe stalen damwand (optie 4a, levensduur 75 jaar)
  - T=80 jaar vervanging door nieuwe stalen damwand (optie 4a, levensduur 75 jaar)
- Variant 4d-VI (‘directe vervanging door hybride oplossing met stalen damwand’):
  - T=0 vervanging door hybride oplossing met stalen damwand (optie 6, alternatief 6.1a nieuwe damwand en 6.1b met gebruikmaking van de bestaande damwand)
- Variant 4e-VI (‘directe vervanging door een volledig talud’):
  - T=0 vervanging door volledig talud (optie 6, alternatief 6.2a en 6.2b)

3.4.4 Verdieping levensduurverlenging

In bijlage A worden een methodiek beschreven van een levensduur verlengende aanpak (zie varianten 3a en 3b) die wordt gestuurd door corrosiemetingen van de wand tijdens de levensduur van een (fictieve) oeverconstructie. De methodiek illustreert het belang van monitoring van de damwand, en alhoewel de case fictief is laat deze wel de economische waarde van informatie zien die met de monitoring wordt verkregen.

4 Economische beschouwingen

4.1 Toelichting op werkwijze

In deze fictieve case over het vervangen van een damwandconstructie langs een kanaal lijkt de primaire functie van de constructie het faciliteren van scheepvaart. Dit zal dan waarschijnlijk ook de meest significante baten hebben. Hiervoor zijn er gegevens nodig over scheepvaart zoals intensiteit van de verschillende CEMT-klassen, ladingtypen, etc. Daarnaast kan ook waterbeheer een belangrijke functie zijn, zowel voor waterafvoer (bij hoogwater) en -aanvoer (bij droogte) via het kanaal als voor peilbeheer van het grondwater in de direct omgeving. In deze gevallen zullen dan het doorstroomdebiet en het voedende lengte (voor het grondwaterpeil) belangrijke indicatoren voor de prestatie zijn. Ook kunnen er nog andere belangrijke (neven)functies zijn zoals recreatie, natuur en beleving (door mensen).

Wel moet er voor de volledigheid ook een beschouwing worden gemaakt van de “externe” omgevingsfactoren, die mogelijk worden beïnvloed door een interventie (zie VenR-varianten). Dit is wel lastig, omdat dit een fictieve voorbeeldcase is. In de (huidige) beschrijving van de case is de omgeving niet meegenomen. Maar hier kan gedacht worden aan bijvoorbeeld “natuurwaarden” (mogelijk van invloed op gezondheid en/of recreatief gebruik) of overstromingsrisico. In het algemeen hebben interventies in een waterlichaam altijd wel invloed op de ecologie, waarin alternatieven onderling onderscheidend kunnen zijn, bv natuurvriendelijke oevers. De mate waarin een variant ‘maatschappelijk wordt gedragen’ wordt over het algemeen niet meegenomen in een afweging.

In Tabel 4-1 is een eerste opzet gemaakt van aspecten die een economische waarde kunnen hebben en hoe die mogelijk zijn te kwantificeren.

Tabel 4-1 Aspecten die bij afweging tussen varianten moet worden beschouwd.

Aspect	Beschrijving en mogelijke waardering
Materiaalgebruik	Tot welke realisatiekosten leidt het materiaalgebruik? En welke beheer- en onderhoudskosten brengt dit vervolgens over de zichtperiode met zich mee?
Vaardiepte	De bruikbare vaardiepte is bepalend voor de toelaatbare CEMT klasse. Een kleinere vaardiepte kan gebruiksbeperkingen voor de scheepvaart geven. Een lagere CEMT klasse (of lagere beladingsgraad) betekent lagere efficiëntie in transport, dus hogere transport kosten (vaartuigverliesuren).
Vaarbreedte	De bruikbare breedte van de vaarweg is bepalend voor de toelaatbare CEMT klasse. Een kleinere vaarbreedte kan gebruiksbeperkingen voor de scheepvaart opleveren. Ook dit aspect geeft lagere efficiëntie in transport, dus hogere transport kosten (bv kleinere schepen of lagere snelheid).
Waterbeheer (kanaal zelf)	Gemiddelde doorstroombaar oppervlak per m’ kanaalpand die nodig is om bij hoogwater voldoende afvoer en bij droogte voldoende aanvoer te realiseren.
Peilbeheer (omgeving)	Hoeveel lekkage van kanaalwater mag door oeverconstructie richting grondwater plaatsvinden i.v.m. schade aan de infrastructuur (i.e. bij weg op de kade) of landbouwgrond door ongewenste vernatting en verdroging?
Ecologie	De oeverconstructie kan grote invloed hebben op ecologische waarden (bv natuurvriendelijke oever). Vaak wel lastig om monetair te waarderen.
Omgeving	Afhankelijk van het effect, maar meestal goed te vertalen naar economische waarde, bv verlies/winst aan land (acquisitie) of meer/minder recreatie.

Aspect	Beschrijving en mogelijke waardering
Andere functies	Afhankelijk van functie, maar meestal te vertalen in een hoogte van risico of prestatie bij deze functie: • waterveiligheid: hoe ziet het kostenplaatje eruit om een wettelijk vereiste kans op overstromen met een bepaalde betrouwbaarheid te halen? • overige gebruiksfuncties: bruikbaarheid voor: – recreatievaart of andere recreatieve functie – wegconstructie aan hoge zijde – kabels & leidingen aan hoge zijde
Tijdshorizon	In principe moeten alle varianten dezelfde tijdshorizon beschouwen om vergelijkbaar te zijn. Economisch gezien kan een “verlenging levensduur” met horizon van 20 jaar niet worden vergeleken met een “nieuwe damwanden” wanneer niet ook de interventie ná de levensduurverlenging wordt meegenomen.

4.2 Economische berekeningen van VenR-varianten

4.2.1 Uitgangspunten economische berekeningen

Voor het uitvoeren van de grove economische analyse voor de oeverconstructie is een aantal uitgangspunten gebruikt die hieronder kort worden beschreven:

- gebruikte rentepercentage voor de berekeningen van alle civieltechnische zaken is 1,6 %[10]
- gebruikte rentepercentage voor de berekeningen van scheepvaartbaten is 2,25 %[11];
- de (gezamenlijke) zichtperiode of looptijd van alle alternatieven is 100 jaar;
- investeringskosten zijn bepaald door materiële kosten te vermenigvuldigen met een factor[12] 2;
- aangehouden is het prijsniveau 2023;
- VenR-varianten zijn de mogelijke interventies gebaseerd op de beschrijvingen in Paragraaf 3.3 bij CEMT-klasse Va en Paragraaf 3.4 bij CEMT klasse VI.

4.2.2 Kosten

Het uitgangspunt van de kostenberekeningen is Tabel 4-2, waarin de kosten per investering worden gegeven. In de beschrijving staat ook de gebruikte levensduur van de investering. Indien de levensduur van een investering korter is dan 100 jaar, dan wordt of de investering binnen de zichtperiode herhaald dan wel wordt er een investering gedaan die de totale looptijd op 100 jaar brengt. Bijvoorbeeld eerst een levensduur-verlengende interventie van 25 jaar, met daarna een investering met een levensduur van 75 jaar om tot een totaal van 100 jaar te komen.

Gebaseerd op de kosten en de beschrijvingen van de VenR-varianten in Paragraaf 3.3.3 zijn de volgende combinaties van investeringen geanalyseerd door middel van een LCC[13]. Er wordt in deze fase van de analyse nog niet gekeken naar mogelijke verschillen in baten die kunnen ontstaan door verschillen in prestaties van de alternatieven of verschillen in baten. Op basis van de kosten en de gebruikte uitgangspunten worden de totale kosten gepresenteerd in Tabel 4.2. De kosten zijn uitgedrukt in contante waarde, de kosten van de opeenvolgende investeringen verdisconteerd naar de waarde in 2023. De kosten zijn georganiseerd per alternatief met kleine variaties in materiaalkeuze en levensduur.

[10] https://www.rwseconomie.nl/discontovoet

[11] https://www.rwseconomie.nl/discontovoet

[12] Met deze factor wordt de “vertaling” gemaakt van materiaalkosten naar realisatiekosten door procentuele kosten toe te voegen voor ontwerp, supervisie, mobilisatie, etc. In deze grove economische analyse is voor een factor 2 gekozen.

[13] LCC = Life Cycle Costing, hierbij worden alleen de kosten van de alternatieven bekeken en wordt er (voorlopig) vanuit gegaan dat de technische prestatie van de alternatieven gelijk(waardig) zijn.

Tabel 4-2 Kosten (M€) en levensduur van investeringen voor kanaal als CEMT-klasse Va dan wel CEMT-klasse VI vaarweg.

Beschrijving	invest. (2023) CEMT Va	invest. (2023) CEMT VI
volledig talud zonder land acquisitie	4,0	4,6
volledig talud met land acquisitie	4,4	5,2
stalen damwand verankerd (75 jaar)	5,0	6,0
stalen damwand verankerd (100 jaar)	5,7	6,9
stalen damwand verankerd, gebruikte DW (75 jaar)	3,6	-
Hybride, staal (100jaar)	4,8	5,8
Hybride met hout (33 jaar)	3,5	-
Hybride met kunststof (50 jaar)	3,5	-
Steunberm	2,2	2,2
extra ankers	3,0	3,0

Tabel 4-3 Kosten (€ per km) varianten in contante waarde en looptijd 100 jaar voor kanaal als CEMT-klasse Va dan wel CEMT-klasse VI vaarweg.

Variant	Beschrijving	Kosten CEMT Va (M€/km)	Kosten CEMT VI (M€/km)
1a	Extra ankers (25 jaar) dan Stalen damwand (75 jaar)	6,5	7,1
1b	Stalen damwand verankerd (100 jaar)	5,9	7,1
1c	Stalen damwand verankerd (75 jaar)	6,7	8,0
2a	Langzamer varen (5.000 passages per jaar, 25 jaar)	0,7	0,7
2a	Langzamer varen (25.000 passages per jaar, 25 jaar)	3,5	3,5
2a	Langzamer varen (50.000 passages per jaar, 25 jaar)	7,1	7,1
3a	LDV (15 jaar), damwand	5,4	6,3
3b	LDV (5 jaar), damwand	6,2	7,3
4a	stalen damwand verankerd, gebruikte DW (75 jaar)	4,9	-
4b	Hybride met hout (33 jaar)	5,2	-
4c	Hybride met kunststof (50 jaar)	4,4	-
4d	Hybride, staal (100 jaar)	4,9	5,9
4e	volledig talud zonder land acquisitie	4,0	4,6
4f	volledig talud met land acquisitie	4,5	5,3

Uit de kosten per kilometer van de verschillende VenR-varianten in Tabel 4-3 kan een eerste selectie van kansrijke combinaties van VenR-opties en -alternatieven worden gemaakt:

- Het uitstellen van een investering door middel van Variant 2a '**langzamer varen**' blijkt erg duur te zijn op vaarwegen met een gemiddelde tot hoge aantal scheepspassages (25.000 tot 50.000 scheepspassages per jaar), waarbij alleen naar een uitstel van maximaal 25 jaar is gekeken, waarna alsnog een investering nodig is. Alleen indien het een vaarweg met een relatief lage gebruiksintensiteit (ongeveer 5.000 passages per jaar) is, dan kan een snelheidsbeperking over een beperkte periode een kansrijke variant zijn vanuit een economisch perspectief. Ook een levensduurverlenging door het Variant 1a '**extra ankers**' lijkt geen groot economisch voordeel te bieden ten opzichte van een rechtstreeks

vervanging met een nieuwe damwand. Voor de alternatieven zijn de kosten ongeveer gelijk met € 6,5 miljoen (CEMT Va) en € 7,1 miljoen (CEMT VI). Het **op papier onderbouwen** van een langere levensduur door onderzoek en/of monitoring lijkt economisch relevant voor beide klassen. Zelfs als de “verlengde levensduur” slechts 5 jaar is (Variant 3b), dan nog zijn de totale kosten lager dan het rechtstreeks vervangen met een nieuwe damwand (Variant 1b). Dit gaat overigens wel voorbij aan de logistieke uitdagingen van het organiseren van het onderzoek en de in principe onzekere uitkomst van het onderzoek. In Bijlage A wordt verder ingegaan op de onzekerheid en de (economische) waarde van monitoring.

- Een **volledig talud** (Variant 4e) is kansrijk wanneer er voldoende ruimte is om het extra ruimtegebruik tegen lage kosten te realiseren, bijvoorbeeld bij een binnenwaartse plaatsing van het talud, of wanneer extra grond tegen lage kosten kan worden verworven. Als weinig kosten worden gemaakt voor acquisitie van extra land, dan kan een talud tot 50% goedkoper zijn dan de plaatsing van een stalen damwand (€ 4,0 - € 5,3 miljoen voor een talud tegenover € 6,0 - € 7,1 miljoen voor CEMT Va/VI).
- Bij een variant ‘**stalen damwand**’ is de keuze voor gebruikte damwanden (Variant 4a) een voordelige keuze voor CEMT Va, als deze tegen lage kosten beschikbaar zijn (kosten zijn dan € 4,5 miljoen tegen € 6 miljoen voor een nieuwe damwand). Bij de keuze voor een stalen damwand lijkt de keuze voor een profiel dat 100 jaar meegaat (in plaats van de standaard 75 jaar) een economisch kansrijk variant als de extra kosten voor de hogere kwaliteit beperkt zijn tot circa 15% van de standaard kosten, er is dan een besparing van € 0,7 – 1,1 miljoen (voor klasse CEMT Va/VI).
- Een **hybride oplossing** voor de kanaaloever (Variant 4b t/m Variant 4d) is een economisch kansrijk variant, zeker wanneer het extra ruimtebeslag (minder dan bij een volledig talud) tegen lage kosten kan worden gerealiseerd (hybride oever € 4,1 – 4,9 miljoen tegen € 6 miljoen voor een oplossing met een damwand voor een CEMT Va). Het gebruik van hout of kunststof (echter hout of kunststof zijn niet mogelijk voor een klasse CEMT VI kanaal) zijn beide goedkoper dan een hydride oever met gebruik van stalen damwanden (€ 4,1 miljoen voor kunststof tegen € 4,9 miljoen voor een hybride oever met stalen damwand), ondanks de kortere levensduur van hout en kunststof. Voor een hybride oplossing in een klasse CEMT VI kanaal geeft een oplossing met stalen damwanden een besparing van € 1,2 miljoen. Voor beide klassen geldt dat de hybride oever veel goedkoper kan worden uitgevoerd wanneer de bestaande stalen damwand kan worden gebruikt in de hybride oplossing.

Voor deze fictieve voorbeeldcase is het niet mogelijk om nader in te gaan in mogelijke verschillen in baten per kilometer van de verschillende varianten. Het is duidelijk dat de varianten met een meer natuurvriendelijke oever (talud, hybride oever) beter zullen scoren op natuur-baten dan de varianten met een stalen damwand. Echter, wanneer deze varianten worden toegepast op een locatie waar kosten voor de aankoop van extra land hoog zijn, zullen de kosten per kilometer van deze varianten (en daarmee de totale kosten) ook toenemen. Bij een toepassing van deze typen van oeverconstructies in een realistische case kan er in meer detail worden gekeken naar deze, en andere, aspecten.

5 Conclusies

Deze fictieve voorbeeldcase met verschillende VenR- varianten (i.e. combinaties van alternatieven) voor een verouderde damwandconstructie langs een kanaal laat een significant verschil in kosten zien.

De grove economische analyse laat ten eerste zien dat het traditionele Variant 1a (i.e. levensduur-verlenging door middel van het plaatsen van extra ankers) geen echt economisch voordeel biedt ten opzichte van het traditionele Variant 1c (i.e. rechtstreekse vervanging van de damwand). Eerstgenoemde heeft vergelijkbare totale kosten per kilometer (€ 6,5 miljoen resp. € 6,7 miljoen beiden voor een CEMT klasse Va kanaal), maar heeft in principe wel een hoger risico vanwege mogelijke vervanging van de damwand eerder dan de in ogenschouw genomen 25 jaar.

Daarentegen leidt een levensduur-verlenging door monitoring of ‘op papier onderbouwen’ wel tot een significante besparing van de kosten per kilometer (Variant 3a met totale kosten € 4,5 miljoen), zelfs wanneer de uiteindelijke levensduur-verlenging kort is (Variant 3b met € 5,4 miljoen totale kosten). In de bijlage A is de case voor het verlengen van de levensduur verder uitgewerkt, en geïllustreerd met de *Value of Information* en het onderzoeken van de optimale monitoringsfrequentie. Ondanks dat de case studie in Bijlage A ook is gebaseerd op een virtuele omgeving, illustreren de berekeningen duidelijk de economische baten van monitoring.

Een variant met een talud is het alternatief met de laagste totale kosten per kilometer (€ 4,0 resp. € 4,6 miljoen voor klasse CEMT Va/VI). Deze variant heeft echter wel meer ruimte nodig dan een variant met een damwand, zodat kosten ook kunnen oplopen met de kosten die gemaakt moeten worden voor landacquisitie. Een hybride oplossing, die bestaat uit een gedeelte talud en gedeelte damwand, kan een goed alternatief zijn wanneer er minder ruimte beschikbaar is, met totale kosten per kilometer (variërend tussen de € 4,1 miljoen en € 4,9 miljoen) die liggen tussen de kosten van een talud (€ 4 - 5 miljoen) en een damwand (€ 6 – 7 miljoen). Zeker als het damwand-gedeelte wordt uitgevoerd met (vezel versterkte) kunststof. Een damwand zal de beste oplossing zijn in situaties met ruimtegebrek of hoge kosten van land.

Een gebruiksbeperking door middel van een beperking van de vaarsnelheid heeft zeer hoge maatschappelijke kosten, die over een periode van 25 jaar voor een druk gebruikte vaarweg kunnen oplopen tot € 7,3 miljoen per kilometer. Alleen voor vaarwegen met een rustige tot zeer rustige intensiteit van schepen kan dit worden gedaan zonder een significante economische impact te hebben.

6 Referenties

Allaix D.L., van de Kamp R., Brinkman H., Landwehr H. (2023). Kennisprogramma Natte Kunstwerken. Einde technische levensduur damwanden. Concept versie.

De Groot-Wallast I, van Twuiver H. (2019). Kennisprogramma Natte Kunstwerken. Functionele Levensduur. Inventarisatie relevante projecten. Deltares rapport 11200741-020, versie 1.0, 25 november 2019.

Deltares (2022). Raamwerk beslismomenten VenR stormvloedkeringen. Deltares rapport 11206063-000-HYE-0002, versie definitief, 31 maart 2022.

GID Milieutechniek B.V. Het technische en economische alternatief voor een stalen damwand. Een onderhoudsvrije en duurzame oplossing.

Rijkswaterstaat (2022a). Prognose rapport 2022. Vervanging en Renovatie. Prognose voor de periode 2023 tot en met 2050.

Rijkswaterstaat (2022b). Staat van de Infrastructuur Rijkswaterstaat. Rapport versie 1.00, 3 oktober 2022.

Rijkswaterstaat (2022c). Richtlijn Vaarwegen 2020. ISBN 978-90-9033423-3, 31 juli 2020.

Texeira A., Rippi K., Schweckendiek T., Brinkman H., Nuttall J., Hellebrandt L., Courage W. (2015). Natte Kunstwerken van de Toekomst. Soil-structure interaction Reliability analysis of a retaining wall.

A Analyse levensduurverlenging

A.1 Inleiding

Deze bijlage presenteert een analyse van de levensduurverlenging voor de fictieve oeverconstructie van verankerde damwand langs een kanaal. De analyse demonstreert het actualiseren van de betrouwbaarheid van deze constructie aan de hand van corrosiemetingen van de wand die tijdens de levensduur zijn verzameld. Deze analyse wordt toegepast in de context van varianten 3a en 3b (voor zowel de CEMT Va als de CEMT VI variant).

Corrosie bedreigt de integriteit van de constructie. In de loop van de tijd neemt de dikte van de wand af, waardoor de draagkracht afneemt en er mogelijk een onaanvaardbaar hoge kans op constructief falen ontstaat. De analyse stelt een aanpak voor om met corrosie om te gaan. Gedurende de levensduur van de constructie kan de invloed van corrosie via wanddiktemetingen worden gevolgd. Het verzamelen van een tijdreeks van dergelijke metingen maakt het mogelijk om een model te maken dat de ontwikkeling van corrosie in de tijd beschrijft. Hiermee kan een voorspelling worden gedaan van de hoeveelheid corrosie die tijdens de resterende levensduur van de constructie waarschijnlijk zal gaan optreden. Deze aanpak gebruikt dus wanddikte-metingen om de onzekerheid in voorspellingen over de stabiliteit van de constructie te verminderen, en maakt het mogelijk om ruim voor het einde van de levensduur mitigerende maatregelen te nemen.

In deze bijlage wordt eerst een onderbouwing van de methodologie gegeven, waarbij de toepassing in de context van Variant 3a en Variant 3b wordt uitgelegd. Daarnaast wordt getoond hoe de technische onderdelen van de analyse worden geïntegreerd met economische concepten, om op een robuuste manier ondersteuning te bieden bij de besluitvorming. Tot slot presenteert de bijlage de resultaten van de analyse, zoals toegepast in het fictieve geval, en trekt het relevante conclusies.

A.2 Methodologie

De analyse maakt gebruik van een methode om de betrouwbaarheid van de onderzochte damwand-constructie onder invloed van corrosie te actualiseren aan de hand van wanddiktemetingen op verschillende momenten gedurende de levensduur.

Ten eerste maakt de analyse gebruik van een rekenmodel van de damwandconstructie. Dit ‘engineering model’ krijgt als invoer de constructieve eigenschappen van de damwand en verankering, de invloed van corrosie op de damwand (i.e. de afname van de wanddikte), de geotechnische eigenschappen van de grond en de relevante belastingen (i.e. bovenbelasting en waterbelasting) en bepaalt als product de veiligheidsfactor van de constructie. Het rekenmodel wordt gegenereerd in D-SheetPiling (Deltares, n.d.).

Ten tweede worden in de studie de onzekerheden geïdentificeerd die van invloed zijn op de veiligheidsfactor van de damwandconstructie. In deze fictieve case wordt aangenomen dat de enige optredende onzekerheden zijn: i) de sterkte van de grond waarin de damwand is aangebracht en ii) de corrosie van de damwand gedurende de levensduur. Voor de onzekere grondsterkte wordt in de analyse uitgegaan van typische verdelingen van grondsterkteparameters. Voor de onzekere corrosie wordt een corrosiemodel gebruikt om de wanddikteafname aan het einde van de levensduur te voorspellen.

Om tot een representatief corrosiemodel te komen, worden de suggesties van EC (Gardner & Nethercot, 2005) voor corrosiemodellering in zoetwaterlichamen overgenomen. Voor de overige parameters (zoals bodemopbouw, belastingen en geometrie) worden conservatieve waarden gebruikt. Vervolgens wordt in de analyse een zogenaamd betrouwbaarheidsmodel van de damwandconstructie opgesteld, dat de onzekerheden verbindt met het rekenmodel en het mogelijk maakt om de betrouwbaarheid van de constructie te kwantificeren.

De analyse gaat verder met een economische beschouwing van de volgende varianten:

- **Variant 1**: Er vindt geen inspectie van corrosie plaats tijdens de levensduur van de damwandconstructie. Dit geeft een referentie voor de technische levensduur en economische waarde.
- **Variant 2**: Inspecties vinden plaats gedurende de levensduur van de damwandconstructie. Een statistische analyse van de wanddiktemetingen wordt uitgevoerd om het corrosiemodel te actualiseren, dat op zijn beurt wordt gebruikt om de voorspelling van de betrouwbaarheid van de damwand tijdens de resterende levensduur te actualiseren. De inspectiefrequentie wordt verondersteld jaarlijks te zijn. Dit kan echter een doelstelling van economische optimalisatie zijn.

Op basis van deze voorspelling kan de analyse voor de volgende beslissingen kiezen:

- Beslissing A. Er worden onderhoudsmaatregelen genomen om het effect van corrosie op de damwand gedurende de resterende levensduur te verminderen.
- Beslissing B. De damwand wordt geheel vervangen.
- Beslissing C. Er worden geen maatregelen genomen.

A.3 Modellering

A.3.1 Samenvatting van de analyseaanpak

De analyse volgt de volgende stappen om de betrouwbaarheid van de damwand in de tijd te beoordelen:

Stap 1. Modelleren tussen de structurele eigenschappen van de BZ17 damwand en het corrosieniveau (diktereductie)

Stap 2. Voer een PTK-analyse uit van de voorwaardelijke $P(F|C)$ per corrosieniveau over een corrosie rooster. Deze Pf omvat de onzekerheid van de bodemsterkte.

Stap 3. Stel het statistische/probabilistische corrosiemodel in:

a. Identificeer de basisvariabele volgens EC (C_{50}) en de a-priori verdeling.
b. Definieer het verband tussen C_{50} en corrosie op tijdstip t (C_t).
c. Definieer het meeting genererende model, omdat:
    i. de analyse is gebaseerd op synthetische metingen die kunnen voorkomen bij inspectie van de damwand, niet op echte metingen.
    ii. Het inverteren van dit model levert de waarschijnlijkheidsfunctie op die wordt gebruikt bij Bayesiaanse bijwerking.

Stap 4. Bereken de a-priori faalkans met behulp van de a-priori verdeling van C_{50}.

Stap 5. Bereken de a-posteriori faalkans met behulp van metingen. Daarom onderzoekt de analyse verschillende varianten waarin een andere waarde van C_{50} waar is. Er wordt dus een raster van C_{50}-waarden gegenereerd. Elke werkelijke waarde van C_{50} kan worden gebruikt om een tijdlijn met metingen te genereren en elk van het oneindige aantal tijdlijnen kan bij inspectie worden opgehaald. Daarom voert de analyse een Monte Carlo-Simulatie (MCS) uit, die verschillende potentiële tijdlijnen van waarnemingen simuleert die per keer kunnen worden opgehaald. werkelijke waarde van C_{50}. Het MCS volgt de stappen:

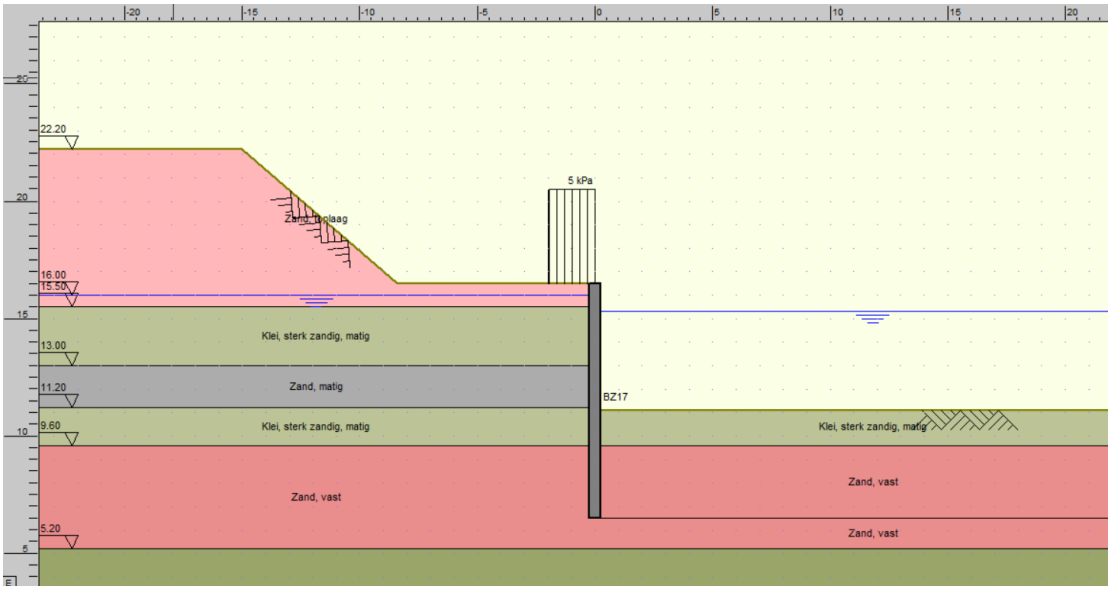
a. Per waarde van het veronderstelde C_{50}-raster:
    i. Per realisatie van de MCS:
        - Bereken de werkelijke faalkans.
        - Genereer een tijdlijn met metingen
        - Voer een Bayesiaanse update van C_{50} uit.
        - Bereken de faalkans over jaar 50-75 met de a-posteriori verdeling van C_{50}.
    ii. Bereken de faalkans over jaar 50-75 voor de echte C_{50} waarde door de MCS-realisaties te middelen.
b. Haal de tijdlijn van de faalkans op via het raster van echte C_{50}-waarden. Dit is de gemiddelde waarde over de MCS realisaties. De kwantielen van de MCS realisaties kunnen de 90% predictie interval schatten.

Stap 6. Beoordeel de economische waarde van inspectie.

Stap 7. Conclusies trekken.

A.3.2 Engineering model

Het rekenmodel is opgesteld aan de hand van een dwarsdoorsnede van een damwand voor een project van Rijkswaterstaat bij Anabrug. De bodemopbouw en geometrie van de dwarsdoorsnede worden Figuur A-1 weergegeven. De damwand is 10,0 m lang en heeft een Belval BZ7 doorsnede met de constructieve eigenschappen in Tabel A-1. De damwand wordt niet ondersteund door ankers. Het waterpeil aan de kanaalzijde staat op NAP+15,30 m, terwijl het aan de binnenzijde op NAP+16,00 m staat. Deze stand van de waterniveaus weerspiegelt een licht ongunstige situatie. Tenslotte wordt een uniforme belasting van 5kPa aangehouden op de bovenkant van de damwand.



Figuur A-1 Stratigraphy and geometry of the examined cross section.

Tabel A-1 Eigenschappen van Belval BZ7.

Constructieve eigenschap	Waarde
Area [cm^2/sheet]	83,2
W [cm^3/m]	1.670
I [cm^4/m]	25.050

De bodemopbouw bestaat uit een opeenvolging van meerdere zandlagen en een zandige kleilaag. In totaal omvat de doorsnede 4 verschillende grondlagen. De analyse richt zich op de langetermijn-stabiliteit van de constructie, dus de geotechnische berekening maakt gebruik van de gedraineerde schuifsterkte van de grond. De verdeling van de grondsterkte, beschreven door de hoek van inwendige wrijving en cohesie, wordt afgeleid door een database van triaxiaalproeven te analyseren die zijn uitgevoerd in het gebied van de damwand. Dit leidt tot een verdeling van de hoek van inwendige wrijving en cohesie per grondlaag zoals gegeven in Tabel A-2.

Tabel A-2 Verdelingen van grondsterkteparameters.

Grondlaag	Hoek van inwendige wrijving [°]	Cohesie [kPa]
Zand, toplaag	$N(38.9, 3.89^2)$	-
Klei, sterk zandig, matig	$N(35.9, 3.59^2)$	$N(7.45, 1.49^2)$
Zand, matig	$N(42.5, 4.25^2)$	-
Zand, vast	$N(46.1, 4.61^2)$	-

Alle andere kenmerken van het technische model (profielgeometrie, niveaus, waterdiepte, etc.) worden als deterministisch behandeld en nemen hun respectievelijke karakteristieke waarden aan.

A.3.3 Corrosiemodel

Het corrosiemodel geeft een verdeling van de potentiële hoeveelheid corrosie (op basis van wanddiktemetingen) als functie van de tijd. In de analyse is de hoeveelheid corrosie op tijdstip t (C_t) een stochastische variabele. Deze is gebaseerd op een andere stochastische variabele, de corrosie op 50 jaar (C_{50}).
Het verband tussen de twee wordt gegeven door het corrosiemodel (*Vergelijking 1*, vanuit EC), dat wordt geparametriseerd door C_{50}. Bovendien wordt een foutenmodel gebruikt om de onzekerheid bij het verzamelen van metingen weer te geven. Dit model is een normaal verdeling met gemiddelde C_t en een vooraf bepaald waarde voor standaardafwijking (σ_ε). Dus, corrosie metingen ($C_{t,obs}$) komen vanuit *Vergelijking 2*.

Vergelijking 1: Formulering van het corrosiemodel.

$$C_t = C_{50}\big(1 + 0.22\ (t - 50)\big), \qquad 50 \le t \le 75\ [jaar]$$

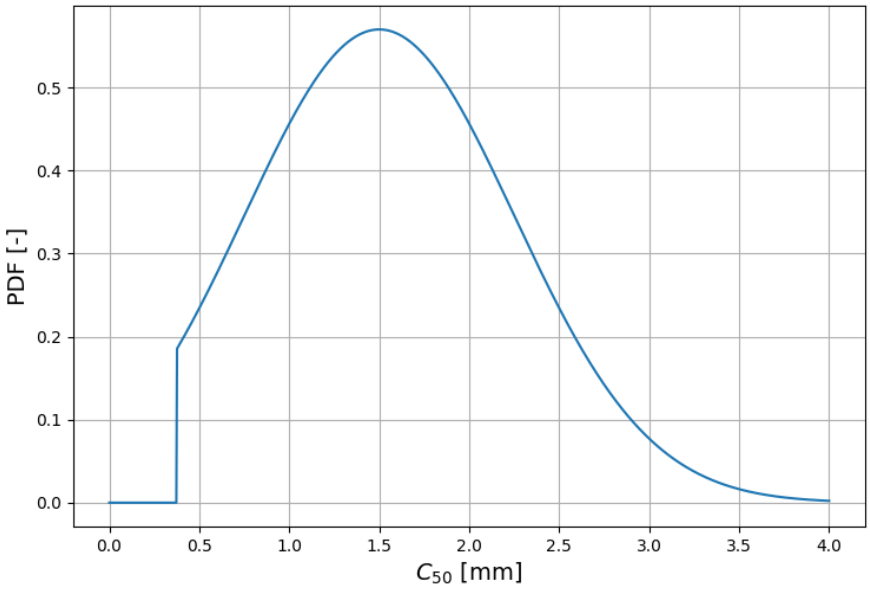
Vergelijking 2: Formulering van het corrosie metingen.

$$C_{t,obs} \sim N(C_t, \sigma_\varepsilon^2)$$

In deze analyse fungeert AAA als de basisvariabele, die de onzekerheid controleert en onderwerp is van Bayesiaanse bijwerken. Volgens *Vergelijking 3*, C_{50} volgt een normaal verdeling, met gemiddelde 1.5mm, coëfficiënt van variantie 0.5 en afgeknot op 0mm (Figuur A-2). Dit verdeling word gebruikt als de prior verdeling in de analyse.

Vergelijking 3: Prior verdeling van C_{50}.

$$C_{50} \sim TN(1.5, (1.5 * 0.5)^2, laag = 0)$$



Figuur A-2 Prior distribute van C_{50}.

A.3.4 Eigenschappen van damwandwanden als functie van corrosie

The analysis establishes a model that connects the corrosion of the sheet pile wall (C_t) (expressed as thickness reduction) with its structural properties; the moment of inertia I and the section modulus W. The model uses a corroded cross section of the BZ17 sheet pile wall for calculating the properties geometrically. This calculation leads to lower values than the ones given by the manufacturer, because the geometry of the sheet pile wall connection points has not been accounted correctly. Since not enough information is available about these points, this inconsistency is practically corrected by applying an increase factor (Equation and equation for I and W respectively). The calculation is performed over a grid of corrosion values, which is used in the reliability analysis.

De analyse levert een model op dat de corrosie van de damwand (C_t) (uitgedrukt als diktevermindering) verbindt met de structurele eigenschappen ervan; het traagheidsmoment I en de profielmodulus W). Voor het geometrisch berekenen van de eigenschappen wordt gebruik gemaakt van een gecorrodeerde doorsnede van de BZ17 damwand. Deze berekening leidt tot lagere waarden dan de door de fabrikant opgegeven waarden, omdat er niet goed rekening is gehouden met de geometrie van de damwandaansluitpunten. Omdat er over deze punten niet voldoende informatie beschikbaar is, wordt deze inconsistentie praktisch gecorrigeerd door een verhogingsfactor toe te passen (respectievelijk *Vergelijking 4* en *Vergelijking 5* voor I en W). De berekening wordt uitgevoerd op basis van een raster van corrosiewaarden, dat wordt gebruikt in de betrouwbaarheidsanalyse. . Uiteindelijk is de berekening van deze twee eigenschappen benaderend lineair ten opzichte van C_t.

Vergelijking 4: Correctie van de traagheidsmomentberekening voor de aansluitpunten..

$$I(c_t) = I_{c=c_t} * \frac{I_{c=0}}{I_{c=0,man}}$$

Vergelijking 5: Correctie van de sectiemodulusberekening voor de aansluitpunten..

$$W(c_t) = W_{c=c_t} * \frac{W_{c=0}}{W_{c=0,man}}$$

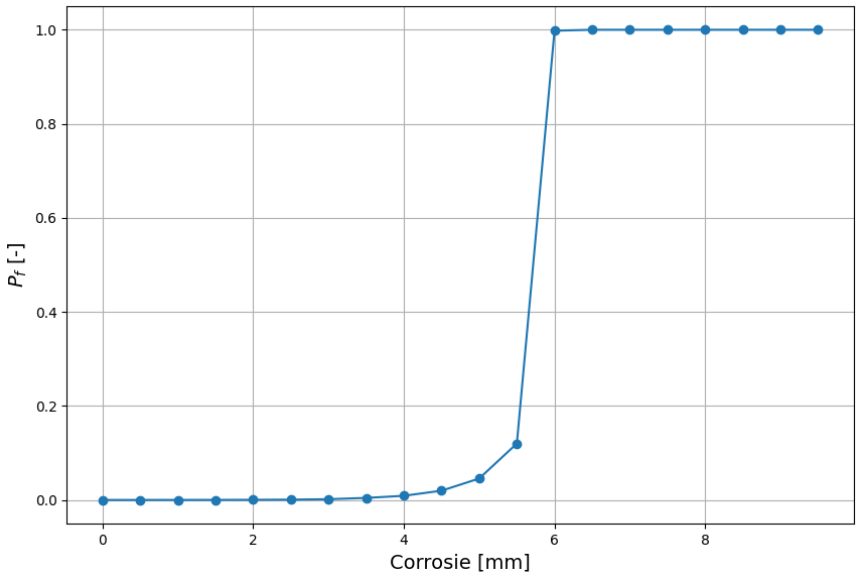
A.3.5 Betrouwbaarheidsmodel

Het betrouwbaarheidsmodel verbindt het rekenmodel om de veiligheidsfactor voor de damwandconstructie te berekenen met de onzekerheden die voor deze casus zijn aangenomen. Het maakt het mogelijk om inzicht te krijgen in hoe de onzekerheid van parameters (in dit geval de corrosie- en grondsterkteparameters) doorwerkt in de onzekerheid over de veiligheidsfactor voor de damwandconstructie. Om dit te bereiken wordt de First Order Reliability Method (FORM) gebruikt, die wordt uitgevoerd met behulp van de Probabilistic ToolKit (PTK) van Deltares (Brinkman, n.d.).

De onzekerheid over de grondsterkte wordt beschreven met de verdelingen van Tabel A.2. Om de vereiste rekeninspanning te beperken wordt voor de onzekerheid over de hoeveelheid corrosie een andere aanpak gekozen. Het betrouwbaarheidsmodel wordt aangepast om de betrouwbaarheidsindex (een maat voor de faalkans) van de constructie afhankelijk van de corrosiewaarde te berekenen. In deze analyse-opzet wordt corrosie eerst als afhankelijke parameter buiten de faalkansanalyse gehaald en later als stochast geïntegreerd. De berekende onzekerheid in de veiligheidsfactor is dus alleen afkomstig van grondsterkteparameters. Deze faalkans gegeven een bepaalde corrosiewaarde ($P(F|C)$) wordt berekend met behulp van FORM binnen de PTK. De voorwaardelijke faalkans wordt berekend over een raster van 20 corrosiewaarden tussen 0 en 9,5 mm (wat de maximaal mogelijke reductie is van de BZ17-doorsnede). De resultaten van conditionele $P(F|C)$ zijn te zien in Figuur A-3. Vervolgens wordt de overall betrouwbaarheid (inclusief onzekerheid in corrosie) berekend door de voorwaardelijke faalkans te integreren met de kansverdeling van de corrosie (*Vergelijking 6*, waarbij C de corrosievan de wanddikte is en $p(C)$ de kansdichtheid). Voor elk tijdstip in de levensduur van de wand voorspelt een corrosiemodel de verdeling van de corrosie, die vervolgens kan worden gebruikt om de betrouwbaarheid van de constructie te schatten met relatief weinig rekenwerk.

Vergelijking 6: Formulering van het corrosiemodel.

$$P(F) = \int_0^1 P(F|C)p(C)dC$$



Figuur A-3 Relatie tussen corrosie en faalkans.

Het voordeel van deze aangepaste opzet is, dat na het beoordelen van de voorwaardelijke betrouwbaarheid, het berekenen van de betrouwbaarheid van de constructie triviaal wordt. Het tijdrovende rekenproces van de PTK kan worden vermeden en het beoordelen van de betrouwbaarheid voor meerdere keren tijdens de levensduur van de damwand gaat aanzienlijk sneller. Het nadeel van deze aanpak is dat er meerdere iteraties van FORM nodig zijn voor het berekenen van de voorwaardelijke betrouwbaarheid over een raster van corrosiewaarden. In deze analyse wordt dit bereikt via de automatisering van de PTK-berekening van FORM. Ook is deze aanpak een benadering van de werkelijke betrouwbaarheidsschatting. Met een voldoende dicht rooster van corrosiewaarden zal de benaderingsfout naar verwachting onbeduidend zijn.

A.3.6 Corrosiemetingen en statistische modellering

Variant 2 gaat ervan uit dat tijdens de levensduur van de constructie via inspectie corrosiemetingen van de damwand worden verzameld. Deze metingen worden gebruikt om de corrosie op 50 jaar (C_{50}) te actualiseren en, vervolgens, om nieuwe voorspellingen te doen voor de hoeveelheid corrosie (C) tijdens de resterende levensduur van de damwand. Het bijwerken van de C_{50}, die is de basis-variabel van de analyse, gebeurt door middel van Bayesiaanse updating (Gelman et al., 2013), wat een statistische methode is voor het schatten van parameters door voorkennis en observaties te combineren.

Het resultaat van Bayesiaanse analyse is een bijgestelde (a posteriori) kansverdeling van C_{50}.Bayesiaanse inferentie wordt uitgevoerd door integratie van *Vergelijking 7*, waarbij p(C_{50}) en p'(C_{50}) respectievelijk de a priori en a posteriori verdelingen zijn, en $L(C_{50})$ is de waarschijnlijkheid (likelihood) van de metingen. De a-priori kansverdeling die door het model wordt aangenomen is de verdeling gedefinieerd op *Vergelijking 3*. Hierbij hebben we de intergraal numeriek bepaald omdat het berekenen van de likelihood in de gekozen aanpak in paragraaf A.3.4 weinig rekentijd kost.

Vergelijking 7: Bayesiaanse inferentie via integratie.

$$p'(C_{50}) = \int L(C_{50})\, p(C_{50}) dC_{50}$$

Om de posterieure verdeling van β af te leiden, wordt de kansverdeling van β bijgesteld met de beschikbare metingen door deze te wegen met de likelihood van de (hypothetische) metingen gegeven die corrosiesnelheid, zie Vergelijking 8. De methode veronderstelt onafhankelijkheid van de metingen, waarbij de waarschijnlijkheid geschat als het product van n individuele corrosiemetingen ($C_{obs,i}$) op tijdstippen t_i. De analyse geadopteerd een normaal verdeling om metingen te omschrijven (*Vergelijking 2*), dus f_N is de PDF voor de normaal verdeling.

Vergelijking 8: Formulering van de waarschijnlijkheid van het Bayesiaanse model.

$$\mathrm{L}(C_{50}) = \prod_{i=1}^{n} \mathrm{f_N}(\mathrm{C_{obs,i}}; C_{50}, \sigma_\varepsilon^2, t_i)$$

A.4 Resultaten

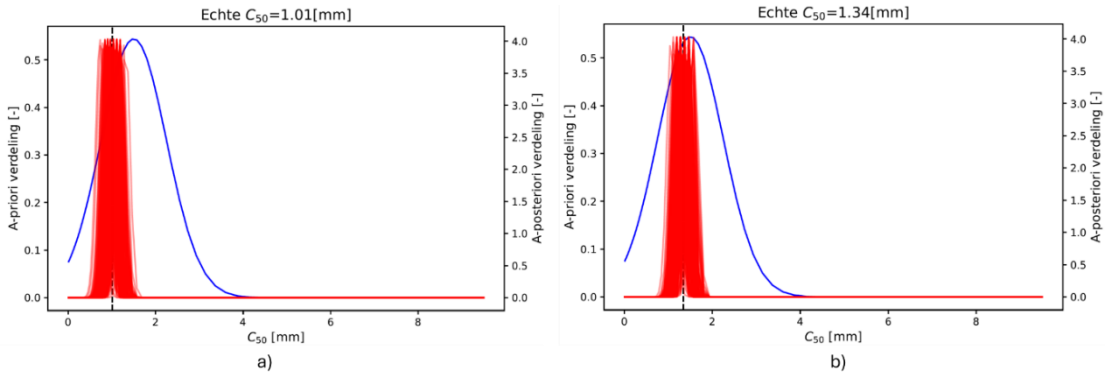
A.4.1 Resultanten van de faalkans analyse

De faalkansanalyse is uitgevoerd met behulp van de volgende parameters:

- Het raster met echte C_{50}-waarden varieerde van 0,1 mm tot 9,5 mm (maximale wanddikte voor de BZ17) en omvatte 100 intervallen.
- De MCS wordt uitgevoerd met 100 realisaties. Deze parameter kan worden geoptimaliseerd, rekening houdend met de rekentijd en de nauwkeurigheid van de resultaten.

In dit deel worden de resultaten van de faalkansanalyse gepresenteerd en worden de meest interessante cijfers belicht.

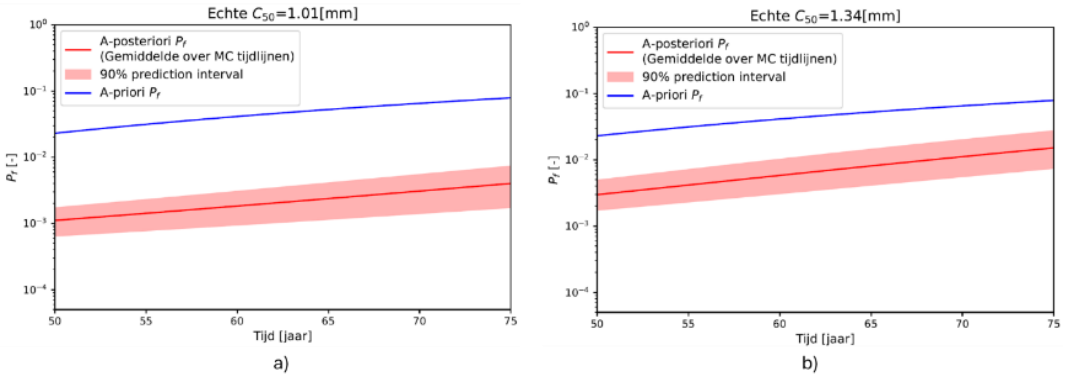
Figuur A-4 toont de a-priori verdeling van C_{50} (in blauw) en de a-posteriori verdeling verzameld in elk van de 100 realisaties van de MCS. Elke a-posteriori verdeling is verbonden met een van de tijdlijnen van metingen die binnen het MCS zijn gegenereerd. Deze resultaten worden weergegeven voor $C_{50} = 1.01$ mm, wat de waarde is aan het laagste uiteinde van het raster, en $C_{50} = 1.34$ mm, wat dichter bij het midden van het raster ligt. Het is duidelijk dat de afknotting van het raster het gedrag van de a-posteriori verdeling beïnvloedt. Terwijl voor $C_{50} = 1.34$ mm de a-posteriori de werkelijke waarde benadert, waarbij enkele discrepanties zich manifesteren als gevolg van de willekeur in de gegenereerde meettijdlijnen, bevindt de a-posteriori zich (zoals verwacht) systematisch aan de rechterkant van de werkelijke waarde voor $C_{50} = 1.01$ mm. Als gevolg hiervan verliest Bayesiaanse bijwerking de nauwkeurigheid bij het benaderen van de werkelijke waarde in dit variant.



Figuur A-4 A-priori verdeling van C_{50} (in blauw) en a-posteriori verdeling van C_{50} per MCS-realisatie voor echte C_{50}-waarden van: a) 1.01 mm en b) 1.34 mm (in rood).

Figuur A-5 toont de ontwikkeling van de a-priori, echte en a-posteriori faalkans in de loop van de tijd voor $C_{50} = 1.01$ mm en $C_{50} = 1.34$ mm. In theorie benadert de a-posteriori faalkanslijn de werkelijke faalkanslijn, vanwege de Bayesiaanse udpateringsstap. De twee lijnen zouden dus dicht bij elkaar moeten liggen, waarbij de verschillen alleen voortkomen uit het aantal MCS-realisaties en de meetfout, die de nauwkeurigheid van de Bayesiaanse bijwerking beïnvloeden. In het eerste geval vertonen de werkelijke en a-posteriori faalkansen verschillen, vanwege het in de vorige paragraaf besproken probleem van afknotting. Dit probleem leidt tot een overschatting van de faalkans bij Bayesiaanse updates, vooral in eerdere tijdstappen. Wanneer de werkelijke C_{50}-waarde de rasterrand verlaat, zoals in $C_{50} = 1.34$ mm, convergeren de twee lijnen. De a-priori faalkans is hetzelfde voor alle werkelijke waarden van C_{50}.

Voor lagere werkelijke waarden van C_{50} liggen zowel de werkelijke als de a-posteriori faalkanslijnen onder de a-priori faalkans. Dit suggereert dat bij inspectie, als de werkelijke C_{50} laag is, Bayesiaanse updates zullen concluderen dat de damwand zich beter gedraagt dan a-priori verwacht. Het tegenovergestelde geldt voor hogere werkelijke waarden van C_{50}, waarbij de ware en a-posteriori lijnen boven de a-priori lijn liggen.



Figuur A-5 priori, echte en a-posteriori faalkans tijdlijn (met predictie onzekerheid) voor C_{50}-waarden van: a) 1.01 mm en b) 1.34 mm (in rood).

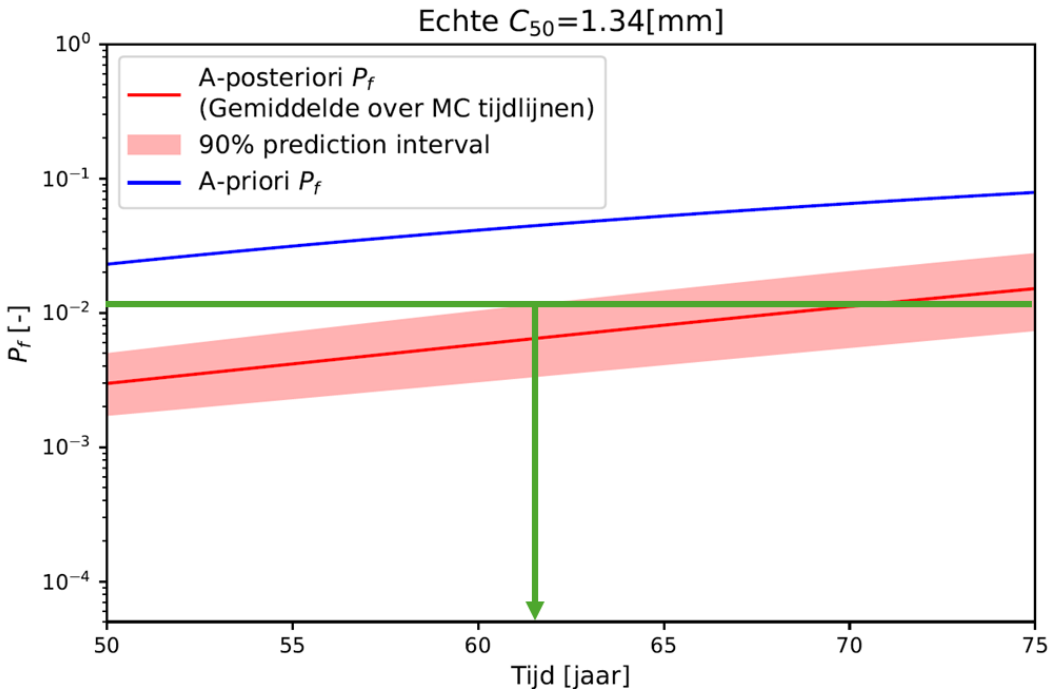
Het gedrag van de posterieure verdelingen en de tijdlijnen van de faalkans voor de rest van de werkelijke waarden van C_{50} kunnen worden waargenomen in de cijfers van het begeleidende document.

A.4.2 Inzichten voor de economische waardeanalyse

De resultaten van de faalkansanalyse kunnen worden gebruikt om inzichten te verkrijgen over de economische waardeanalyse. Deze laatste analyse richt zich op het afleiden van de economische waarde (nut) van een reeks beslissingen per waarde van de veronderstelde echte C_{50}. Vervolgens wordt het totale nut voor deze beslissingsset geschat als de verwachting over de C_{50}-waarden.

Het eerste besluit betreft de inspectiefrequentie. Er wordt aangenomen dat de frequentie wordt bepaald voordat de analyse start (in het jaar 50) en de resterende tijd constant blijft. De keuringen stoppen als de levensduurdoelstelling van 75 jaar wordt gehaald, of als de damwand wordt vervangen. Als gevolg hiervan zullen, in het geval dat de damwand wordt vervangen in een variant met een hoge waarde van echte C_{50}, de inspectiekosten lager zijn dan in een variant met een lagere waarde van echte C_{50}, waarbij vervanging niet plaatsvindt en inspecties plaatsvinden. doorgaan tot jaar 75.

Vervanging van damwandwanden wordt bepaald aan de hand van een beslisregel. De regel schrijft voor dat de wand moet worden vervangen wanneer de kans dat de faalkans de betreffende eis overschrijdt van een door de gebruiker gedefinieerde drempel. De methode achter deze beslisregel wordt duidelijk in het voorbeeld van Figuur A-6, dat is gebaseerd op Figuur A-5). De bovengrens van de faalkansonzekerheid weerspiegelt de faalkanswaarden die worden overschreden met een waarschijnlijkheid van 5%, zoals geschat door de MCS. Bij de analyse wordt uitgegaan van een faalkansvereiste van 0,01 en een waarschijnlijkheidsdrempel van 5% (de onzekerheidsgrenzen zijn dus getrokken met deze eis in gedachten). In dit geval moet vervanging plaatsvinden op 62 jaar, wanneer de bovengrens van de onzekerheidsmarge de faalkanseis raakt. In andere gevallen, waar dit niet binnen een tijdsbestek van 50-75 jaar gebeurt, vindt vervanging niet plaats.



Figuur A-6 Voorbeeld beoordeling vervangingstijd (voor 75 jaar).

Economische waarde van monitoring

De economische waarde van de methodiek wordt bepaald door het uitgangspunt dat vervanging van de damwand in jaar 0 plaatsvind (dus 50 jaar na installatie) en dat er een economische waarde zit in het uitstellen van de vervanging van de damwand. De economische waarde wordt dus bepaald door de waarde van het uitstellen van de investering, waarbij de economische waarde de samengestelde “rente” is bij een rentevoet van 1,6% over het totaal aan aantal jaren dat de investering wordt uitgesteld. Bij een investering van € 5 miljoen per kilometer damwand is de waarde van het uitstellen van de investering met 5 jaar dus 1,016^5 * € 5 miljoen = € 381.495. De verdisconteerde kosten worden berekend door Vergelijking 9, waar i de discontovoet en t de vervangingstijd is.

Vergelijking 9: Schatting van verdisconteerde kosten.

$$Discounted\ cost = Cost * \frac{1}{1+i}^{t-50}$$

De baten van het uitvoeren van de monitoring zijn dus de economische waarde van het uitstellen van de investering verminderd met de kosten van de monitoring.

Op deze manier kan de modellering van de faalkans en de onzekerheid in deze bepaling middels een analyse worden gebruikt om de economische waarde van monitoring te bepalen onder de aannames die in de vorige paragraven zijn beschreven. De resultaten van deze analyse zijn beschreven in de paragraaf A.3.

Waarde van informatie

De waarde van informatie (Value of Information - VoI) wordt berekend als het verschil tussen de verwachte economische waarde van het wel en niet toepassen van inspectie (Vergelijking 10, waar $E[V]$ de verwachte economische waarde is met inspectie en V_{pr} de a-priori economische waarde zonder inspectie). De eerste kan worden berekend door de economische waarde te schatten met behulp van de P_f-tijdlijn per veronderstelde ware C_{50} en te integreren met de eerdere waarschijnlijkheidsverdeling van C_{50} (Vergelijking 11, waar $V(C_{50})$ is de economische waarde per ware C_{50} en $p(C_{50})$ is de a-priori verdeling van C_{50}). Dit laatste is de economische waarde die is geschat met behulp van de a-priori P_f-tijdlijn (voorbeeld: Figuur A-5). De VoI is een functie van de inspectiefrequentie en kan worden gebruikt als maatstaf voor het optimaliseren van het interval tussen inspecties.

Vergelijking 10: Schatting van VoI.

$$VoI = E[V] - V_{pr}$$

Vergelijking 11: Schatting van verwachte economische waarde.

$$E[V] = \int V(C_{50})\, p(C_{50}) dC_{50}$$

A.4.3 Resultaten van de economische analyse

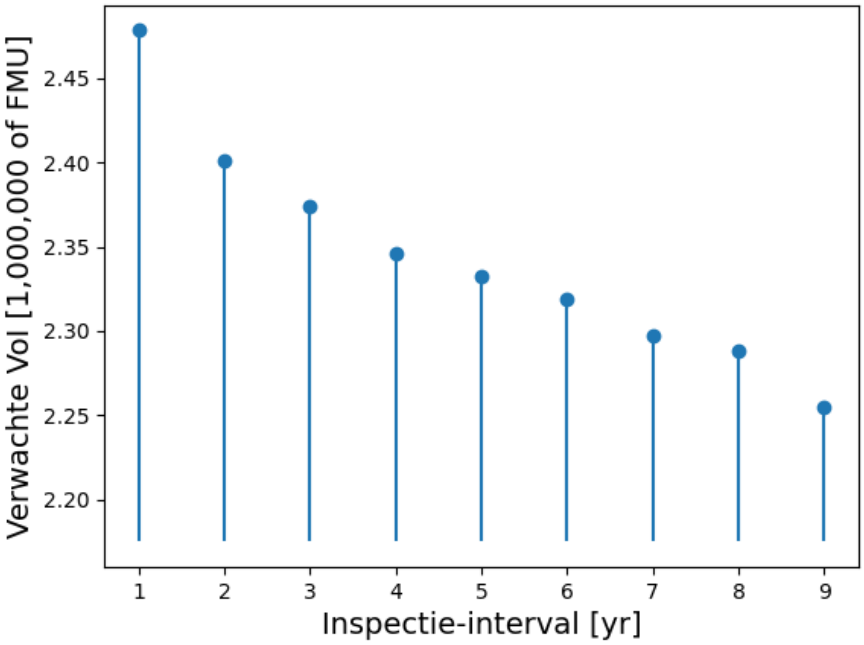
De analyse wordt uitgevoerd met behulp van de parameters uit Tabel A-2. De betrouwbaarheidseis wordt geselecteerd uit EC om een damwandstructuur in een kanaal met een hoog belang te weerspiegelen. De waarschijnlijkheid van het overschrijden van de betrouwbaarheidseis wordt gebruikt om de vervangingstijd te definiëren zoals voorgesteld in sectie A.4.2. De vervangings- en inspectiekosten zijn indicatief voor dit type infrastructuur. Ze worden uitgedrukt in fictieve monetaire eenheden (Fictional Monetary Units - FMU).

Tabel A-3 Parameters van de economische analyse.

Parameter	Waarde
Betrouwbaarheid vereiste [-]	2.5
Kans van overschrijding van de faalkans vereiste [-]	5%
Vervangingskosten [FMU]	5,000,000
Kosten voor de installatie van inspectieapparatuur [FMU]	20,000
Inspectiekosten [FMU]	10,000

De analyse wordt gebruikt om de inspectiefrequentie te optimaliseren door de VoI te maximaliseren. Zo wordt de VoI-berekening herhaald voor verschillende tijdsintervallen van inspectie. De resultaten worden weergegeven in Figuur A-6.

De analyse laat zien dat de verwachte VoI positief is voor alle inspectie-intervallen, wat aangeeft dat het toepassen van inspectie leidt tot een grotere economische waarde in vergelijking met het niet doen van inspectie. Ten tweede is de verwachte VoI in alle gevallen groter dan 2 miljoen FMU, wat suggereert dat het toepassen van inspectie aanzienlijke voordelen heeft. Er moet echter worden vermeld dat deze voordelen a priori gelden; wanneer er enkele metingen worden uitgevoerd, kan deze VoI worden gewijzigd. Als de corrosie bijvoorbeeld hoog is, wordt de damwand vervangen, wat dezelfde actie zou zijn als er geen inspectie wordt uitgevoerd. Dus de waarde van inspectie neemt in zo'n geval af. Niettemin is deze informatie niet a priori beschikbaar, dus de verwachte VoI is doelbewust voor het selecteren van de optimale strategie. Ten slotte is de optimale inspectiefrequentie 1 jaar, waarbij de analyse aantoont dat de maximale VoI wordt bereikt.



Figuur A-7 Verwachte VoI per inspectie-interval.

A.5 Conclusies

De analyse van deze bijlage liet zien hoe Bayesiaanse statistieken gecombineerd kunnen worden met damwandtechniek om corrosie-inspectiegegevens te gebruiken om de inspectiefrequentie in een fictief geval te optimaliseren. De analyse begon met het definiëren van een damwandmodel en het beoordelen van de fragiliteitscurve voor verschillende corrosieniveaus. Ook nam de analyse een algemeen geaccepteerd probabilistisch corrosiemodel over. Vervolgens werd een Bayesiaans statistisch model opgesteld, dat de parameters van het corrosiemodel kan bijwerken via corrosie-inspectiemetingen.

Al deze elementen werden gecombineerd in een Value of Information-analyse. De analyse onderzocht de bijgewerkte corrosiemodelparameters en de bijbehorende waarschijnlijkheid van falen voor verschillende scenario's van corrosiemetingen. Per scenario werd de economische waarde van het inspecteren en vervangen van de damwand beoordeeld. Uiteindelijk werd de verwachte economische waarde afgeleid en vergeleken met de respectieve waarde die zou zijn bereikt zonder enige inspectie. Deze vergelijking leidde tot de schatting van de Value of Information.

De analyse benadrukt dat het uitvoeren van inspecties de economische waarde van beslissingen met betrekking tot het vervangen van de damwand met ten minste 2 miljoen FMU kan verhogen. Uiteraard is dit resultaat verbonden met realistische maar fictieve kostenparameters die in de analyse zijn aangenomen. Ook kan met de analyse de optimale inspectiefrequentie worden bepaald, door te focussen op het maximaliseren van de Value of Information.

A.6 Referenties

Brinkman, R. (n.d.). *Probabilistic Toolkit (PTK)*. Deltares.

Deltares. (n.d.). *D-Sheet Piling*. Deltares.

Gardner, L., & Nethercot, D. (2005). *Designers' Guide to En 1993-1-1 Eurocode 3*. Ice Publishing.

Gelman, A., Carlin, J. B., Stern, H. S., Dunson, D. B., Vehtari, A., & Rubin, D. B. (2013). *Bayesian Data Analysis*. Chapman and Hall/CRC. https://doi.org/10.1201/b16018

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl