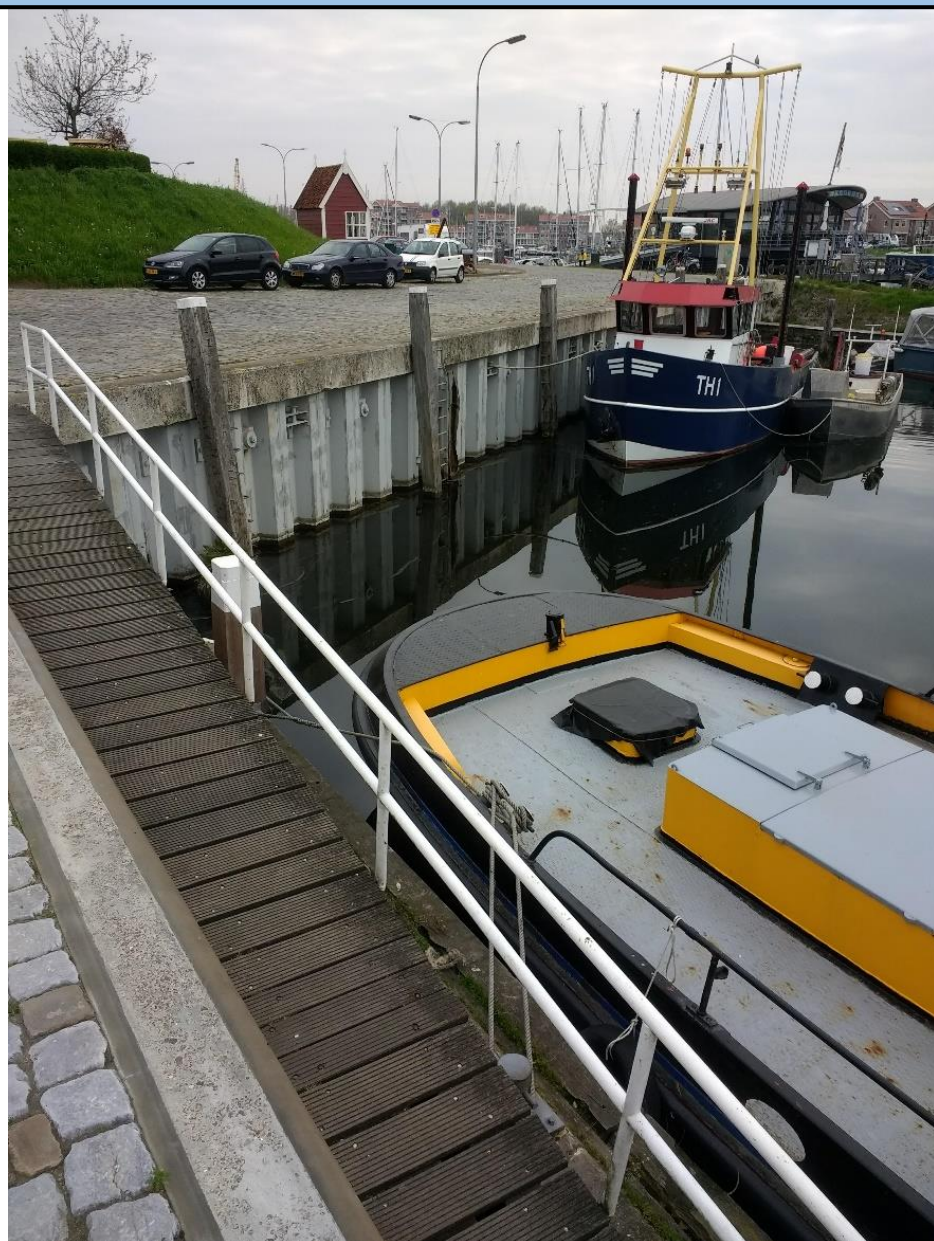


2019

Toepassen van kathodische bescherming in de haven van Tholen



Gerard Poortvliet

HZ University of Applied Sciences

Gemeente Tholen

4-8-2019

Toepassen van kathodische bescherming in de haven van Tholen

Afweging tussen verschillende levensduurverlengende onderhoudsvarianten op bestaande damwanden

Algemene informatie	
Status	Definitief
Datum	04-08-2019
Aantal Pagina's	51
Auteur	Gerard Poortvliet
Studentnummer	00071843
School	HZ University of Applied Sciences
Afstudeerbegeleider HZ	Piet Dekker
Bedrijfsbegeleiders	
<i>Gemeente Tholen</i>	
	Willem Jan de Voogd van der Straaten
	Martijn Westdorp
<i>Onderzoeksgroep Asset management</i>	
	Joachim de Keijzer

Voorwoord

Voor u ligt het onderzoeksrapport 'Toepassen van kathodische bescherming in de haven van Tholen'. In dit rapport worden de mogelijkheden van kathodische bescherming in de haven van Tholen onderzocht. Dit onderzoeksrapport is geschreven als afstudeerscriptie voor het afronden van de opleiding Civiele Techniek aan de HZ University of Applied Sciences. Daarnaast is dit onderzoek uitgevoerd voor de gemeente Tholen, die meer inzicht wil krijgen in de mogelijkheden van kathodische bescherming als onderhoudsmethode voor bestaande stalen damwanden. Dit ter verlenging van de levensduur van de stalen damwanden.

Gedurende het afstudeeronderzoek heb ik ondersteuning gekregen van diverse personen, die allen hebben bijgedragen aan een positief eindresultaat. Deze personen wil ik hier ook graag bedanken. Ik wil Willem Jan de Voogd van der Straaten en Martijn Westdorp van de gemeente Tholen bedanken voor de algemene begeleiding, het verstrekken van informatie en de kritische blik op mijn werk. Mede door deze begeleiding, heb ik het afstudeeronderzoek op een juiste manier kunnen afronden.

Ook bedank ik graag de personen die mij vanuit de HZ University of Applied Sciences hebben begeleid. Hierbij gaat dank uit naar Piet Dekker, die mij door het hele proces heeft begeleid als mijn afstudeerbegeleider. Zijn begeleiding heeft zich vertaald in een goede verloop van het afstudeertraject, alsook in een verbetering op de inhoud van het onderzoek.

Joachim de Keijzer wil ik bedanken voor de begeleiding die hij heeft gegeven vanuit de onderzoeksgroep assetmanagement van de HZ University of Applied Sciences. Deze begeleiding heeft er voor gezorgd dat ik de berekeningen t.b.v. de toetsing van de damwanden op een juiste wijze heb kunnen voltooien. Daarnaast gaat extra dank uit naar Joachim de Keijzer vanwege de hulp bij het verkrijgen van deze interessante en uitdagende afstudeeropdracht.

Als laatste wil ik ook alle externe specialisten bedanken die bij hebben gedragen aan dit onderzoek met inbreng van hun kennis. Hierbij gaat speciale dank uit naar Floris Vermerris van Rijkswaterstaat en de specialisten bij aannemer van der Heide.

Gerard Poortvliet

4 augustus 2019

Tholen

Samenvatting

In de gemeente Tholen zijn diverse havens met stalen damwanden. Deze stalen damwanden moeten worden onderhouden. De mogelijkheid om hiervoor kathodische bescherming te gebruiken kwam naar voren bij de plaatsing van een nieuwe damwand in de haven van Stavenisse. Op deze damwand is kathodische bescherming toegepast vanaf het moment dat deze damwand is geplaatst. In dit geval gaat het om het opgedrukte stroom systeem. Een ander alternatief op kathodische bescherming is het plaatsen van opofferingsanodes op een damwand. Beide systemen zijn gebaseerd op hetzelfde principe: door het verlagen van het elektrisch potentiaal van de stalen damwand, is er geen sprake van corrosie op de damwand.

Door de toepassing in Stavenisse ontstond de vraag of kathodische bescherming ook toegepast kan worden als levensduurverlengende onderhoudsmethode op bestaande stalen damwanden. Om dit te onderzoeken worden er diverse casestudy's behandeld bij de gemeente Tholen. Voor dit onderzoeksrapport worden specifiek de mogelijkheden van toepassing van kathodische bescherming in de haven van de stad Tholen onderzocht. Dit heeft geleid tot de volgende hoofdvraag: *In hoeverre is het technisch en economisch haalbaar om kathodische bescherming toe te passen als levensduurverlengende onderhoudsmethode voor stalen damwanden in de haven van Tholen?*

De oude haven van Tholen is op te delen in drie stukken: kade 1, kade 2 en kade 3. Hierbij zijn kade 1 en kade 3 vergelijkbaar met elkaar. Deze bestaan uit een stalen damwand, met daar achter een gording met ankerwand. Kade 2 bestaat uit een stalen damwand, waarbij er schroefinjectieankers aanwezig zijn in de deksloof boven de damwand. Hiermee is de damwand verankerd.

Deze drie kades zijn eerst getoetst op de huidige normering. Hierbij is de damwandplank zelf getoetst, als ook de gordingen en ankers. Deze zijn allen getoetst ter bepaling van de restlevensduur van de constructie. Voor het bepalen van de restlevensduur is de dikteafname door corrosie ingeschat. Aan de hand van te verwachte corrosie in de toekomst is de restlevensduur voor alle kades bepaald. Hierbij zijn meerdere doorsnedes over de lengte van de kade in acht genomen en getoetst. Een minimale restlevensduur van 40 jaar is hier naar voren gekomen voor de kades.

Vervolgens zijn er vier mogelijke onderhoudsvarianten uitgewerkt. Deze varianten zijn technisch allemaal mogelijk om uit te voeren in de haven van Tholen. Hierbij gaat het om de volgende vier varianten: nieuwe damwand (niet conserveren), coaten, opofferingsanodes en opgedrukte stroom.

De opgestelde varianten zijn vergeleken op kosten. Hierbij is de Netto Contante Waarde per variant berekend. Daarbij is een index van 2% toegepast over de kosten per jaar. Voor de vergelijking zijn per variant vier sub-varianten opgesteld. Hierbij verschillen deze varianten in levensduurverlenging door de onderhoudsmethode en/of in de totale tijdspan die in acht wordt genomen bij de variant.

Aan de hand van de kostenvergelijking kan worden gesteld dat het opgedrukte stroom systeem kostentechnisch het meest voordelig is. Daarbij is er wel sprake van een klein verschil qua kosten met opofferingsanodes. Coaten komt het minst voordelig uit de vergelijking.

Als moment van toepassen voor het opgedrukte stroom systeem wordt 2031 gegeven. De voornaamste reden hiervan is dat naar alle waarschijnlijkheid vanaf dit jaar het water in de haven van Tholen gaat verzilten. Hierdoor heeft de kathodische bescherming meer effect, dan in het huidige zoete water. Dit aangezien er dan sprake is van een meer optimale stroomgeleiding in het zoute water.

Concluderend kan de hoofdvraag worden beantwoord met de volgende beantwoording: het is zowel technisch als economisch zeer goed haalbaar om kathodische bescherming toe te passen als levensduurverlengende onderhoudsmethode voor stalen damwanden in de haven van Tholen.

Abstract

The municipality of Tholen has several marinas with steel sheet piles. Those steel sheet piles have to be maintained. The possibility of using cathodic protection came to mind, during the installation of sheet piles in the Marina of Stavenisse. On this sheet piles, cathodic protection has been used from the start. In this case, it is the impressed current system. Another alternative of cathodic protection is sacrificial anodes. Both systems are based on the same principle: by reducing the electrical potential of the sheet pile wall, there will be no corrosion on the sheet piles.

The application in Stavenisse raised the question whether cathodic protection can also be applied as a life-extending maintenance method on existing sheet piles. Several case studies are being examined at the municipality of Tholen to research this question. This research focusses on the possibilities of applying cathodic protection in the marina of the city Tholen. This has led the following main question:

- *To what extent is it technically and economically feasible to use cathodic protection as a life-extending maintenance method for steel sheet piles in the marina of Tholen?*

The old marina of Tholen can be divided into three parts: quay 1, quay 2, and quay 3. Quay 1 and quay 3 are comparable to each other. They exist out of steel sheet piles with a purlin and anchor wall behind it. Quay 2 exists out of steel sheet piles, wherein screw injection anchors are present in the deck gap above the sheet piles. This means that also this sheet pile is anchored.

Those three quays have been tested on the current standards. The sheet piles themselves have been tested, as well the purlins and anchors. They all have been tested to determine the remaining life of the structure. To determine the remaining life, the thickness decrease due to corrosion has to be estimated. The remaining life can be determined on the basis of the expected corrosion in the future. Multiple sections along the length of the quays have been taken into account and have been tested. A minimal remaining life of 40 years has been determined for the quays.

Subsequently, four possible maintenance variants have been elaborated. These variant are all technically possible. It concerns the following four variants: new sheet piles (no preserving), coating, sacrificial anodes, impressed current.

The variants have been compared on costs. For this, the net present value has been calculated. An index of 2% was applied to the costs per year. For the comparison, four sub-variants have been prepared per variant. These variant differ in lifetime extension due to the maintenance method and/or in the total time span that has been taken into account in the variant.

On the basis of the cost comparison, it can be stated that the impressed current system is most cost-effective. There is a slight difference in costs with the sacrificial anodes. Coating is the least advantageous in the comparison.

2031 is given as the moment of application for the impressed current system. The main reason for this is that, in all likelihood, the water in the marina of Tholen will start to become salt from this year on. This makes the cathodic protection more effective than in the current situation with fresh water. This is the case, because of a more optimal electrical current conduction in the salt water.

In conclusion, the main question can be answered with the following answer: it is both technically and economically very feasible to apply cathodic protection as a life-sustaining maintenance method for steel sheet piles in the marina of Tholen.

Inhoudsopgave

1.	Inleiding	1
1.1.	Opdrachtgever onderzoek.....	1
1.2.	Aanleiding.....	1
1.3.	Doel	3
1.4.	Onderzoeksvraag en deelvragen	3
1.5.	Afbakening onderzoek.....	4
1.6.	Leeswijzer	4
2.	Theoretisch kader.....	5
2.1.	Locatie gegevens	5
2.1.1.	Water	5
2.1.2.	Ondergrond	6
2.1.3.	Kades	6
2.2.	Stalen damwanden.....	12
2.2.1.	Profielen	13
2.2.2.	Aantasting.....	13
2.2.3.	Onderhoud	17
2.2.4.	Verankering	20
2.2.5.	Toetsing	21
2.2.6.	Damwanden in en nabij waterkeringen	26
3.	Methode.....	27
3.1.	Onderzoektype	27
3.2.	Onderzoeksmethode(s) per deelvraag.....	27
3.2.1.	Onderzoeksmethode deelvraag 1	27
3.2.2.	Onderzoeksmethode deelvraag 2	27
3.2.3.	Onderzoeksmethode deelvraag 3	28
3.2.4.	Onderzoeksmethode deelvraag 4	28
3.2.5.	Onderzoeksmethode deelvraag 5	28
3.2.6.	Onderzoeksmethode deelvraag 6	28
3.2.7.	Onderzoeksmethode deelvraag 7	29
3.2.8.	Onderzoeksmethode deelvraag 8	29
3.3.	Onderzoeksinstrumenten.....	29
4.	Resultaten en discussie	30
4.1.	Programma van eisen.....	30
4.1.1.	Eisen, randvoorwaarden en uitgangspunten	30
4.1.2.	Waardes/eisen per kade	31

4.2.	Toetsing damwand	31
4.2.1.	Kade 1	33
4.2.2.	Kade 2	34
4.2.3.	Kade 3	35
4.2.4.	Conclusie toetsing damwanden	36
4.3.	Onderhoudsvarianten	37
4.3.1.	Variant 1: nieuwe damwand 2058	37
4.3.2.	Variant 2: coaten 2031	37
4.3.3.	Variant 3: kathodische bescherming; opofferingsanodes 2031.....	38
4.3.4.	Variant 4: kathodische bescherming; opgedrukte stroom 2031.....	40
4.4.	Beoordeling onderhoudsvarianten	41
4.4.1.	Variant 1: nieuwe damwand 2058	41
4.4.2.	Variant 2: coaten 2031	42
4.4.3.	Variant 3: kathodische bescherming; opofferingsanodes 2031.....	43
4.4.4.	Variant 4: kathodische bescherming; opgedrukte stroom 2031.....	44
4.4.5.	Keuze variant	45
5.	Conclusie en aanbevelingen	47
5.1.	Conclusies	47
5.2.	Aanbevelingen	48
	Referenties	50

Bijlages

- Bijlage A: Bodemopbouw, sonderingen en inpeiling
- Bijlage B: Bestaande tekeningen
- Bijlage C: Toetsingsrapport kades
- Bijlage D: Overleggen + informatie specialisten
- Bijlage E: Bepaling Netto Contante Waarde
- Bijlage F: Ontwerp opgedrukte stroom systeem

Figurenlijst

Figuur 1: Stalen damwand in Stavenisse met kathodeverbinding	1
Figuur 2: Locatie haven bij Tholen (Google, 2018).....	2
Figuur 3: Stalen damwand in de haven van Tholen (Google, 2018).....	3
Figuur 4: Onderverdeling kadeconstructie (Google, 2018).....	7
Figuur 5: Gegevens BZ 350 profiel (Arbed, z.d.).....	8
Figuur 6: Bodembescherming langs kades (Feijtel, 1979a).....	9
Figuur 7: Gegevens BZ 17 profiel (Albers, 2018)	9
Figuur 8: Inheihogtes kade 2 (Feijtel, 1979a).....	10
Figuur 9: Doorsnede kade 2 (Feijtel, 1979b)	11
Figuur 10: Stalen damwand profielen (SBRCURnet e.a., 2013).....	13
Figuur 11: Zones voor damwanden in diverse wateromstandigheden (CUR Bouw & Infra, 2012)	14
Figuur 12: Overzicht opgedrukte stroom systeem.....	18
Figuur 13: Schroefinjectieanker (CUR Bouw & Infra, 2012)	20
Figuur 14: Overzicht te toetsen snedes per kade.....	32

Tabellenlijst

Tabel 1: Materiaal en lengte van kadeconstructie.....	6
Tabel 2: Overzicht gegevens kade 1	8
Tabel 3: Overzicht gegevens kade 2	10
Tabel 4: Overzicht gegevens kade 3	12
Tabel 5: Indicatie dikteafname (mm) van damwanden per situatie (CUR Bouw & Infra, 2012).....	13
Tabel 6: Indicatie dikteafname (mm) van damwanden in zoet/zout water (CUR Bouw & Infra, 2012).....	14
Tabel 7: Corrosiesnelheden in zoet en zout water per zijde damwand.....	15
Tabel 8: Waarde uniforme corrosie per zone per zijde damwand.....	15
Tabel 9: Opbouw lagen coating.....	18
Tabel 10: Bepaling gronddrukfactoren voor stalen damwanden	24
Tabel 11: Partiële factoren en toeslagen (CUR Bouw & Infra, 2012)	25
Tabel 12: Partiële factoren per ontwerpbenadering (CUR Bouw & Infra, 2012)	25
Tabel 13: Berekeningen t.b.v. dimensionering (CUR Bouw & Infra, 2012)	26
Tabel 14: Specifieke eisen/waardes per kade	31
Tabel 15: Resultaten toetsing Kade 1 snede 1	33
Tabel 16: Hertoetsing met behulp van Technosoft liggers	33
Tabel 17: Resultaten toetsing Kade 1 snede 2	33
Tabel 18: Hertoetsing met behulp van Technosoft liggers	34
Tabel 19: Resultaten toetsing Kade 2 snede 1	34
Tabel 20: Resultaten toetsing Kade 2 snede 2	34
Tabel 21: Resultaten toetsing Kade 2 snede 3	35
Tabel 22: Resultaten toetsing Kade 2 snede 1	35
Tabel 23: Hertoets met behulp van Technosoft liggers	35
Tabel 24: Totaal te coaten oppervlak.....	38
Tabel 25: Totaal te beschermen damwandoppervlak in contact met zout water	38
Tabel 26: Totaal te beschermen damwandoppervlak onder bodemniveau	39
Tabel 27: Netto Contante Waarde van alle varianten.....	46

1. Inleiding

In de inleiding zal beknopte informatie geven over de opdrachtgever van het onderzoek. Hiermee wordt meer context rondom de onderzoeksopdracht geschetst. Daarna zal de aanleiding van het project worden geschetst. De aanleiding leidt tot de geformuleerde probleemstelling. Deze probleemstelling wordt verwerkt in een hoofdonderzoeksvraag met bijbehorende deelvragen, waarbij het doel van dit onderzoek is om tot een duidelijk antwoord te komen op deze hoofdvraag.

1.1. Opdrachtgever onderzoek

Het onderzoek wordt uitgevoerd in opdracht van de gemeente Tholen. Binnen de gemeente Tholen wordt het onderzoek uitgevoerd op de afdeling openbare werken. De gemeente Tholen heeft een samenwerkingsverband met de onderzoeksgroep assetmanagement vanuit de HZ University of Applied Sciences. Deze onderzoeksgroep kijkt op het moment naar de mogelijkheden van toepassing van kathodische bescherming op bestaande stalen damwanden. Binnen de gemeente Tholen zijn er specifieke locaties met daarbij bestaande stalen damwanden, die worden gebruikt in dit onderzoek. Voor dit onderzoek wordt de haven van de stad Tholen onderzocht.



Figuur 1: Stalen damwand in Stavenisse met kathodeverbinding

1.2. Aanleiding

De HZ University of Applied Sciences heeft een onderzoeksgroep genaamd assetmanagement. De gemeente Tholen heeft de HZ benaderd of er binnen deze onderzoeksgroep onderzoek kan worden gedaan naar de mogelijkheden van kathodische bescherming op bestaande stalen damwanden. Dit is het begin geweest van een onderzoeksonderwerp dat van toepassing kan zijn op alle stalen damwanden/havens in de gemeente Tholen. In een vervolg stadium kan er mogelijk ook sprake zijn van toepassing op stalen damwanden in het hele Zeeuwse estuarium.

De aanvraag vanuit de gemeente Tholen kwam naar aanleiding van een project rondom een stalen damwand in een handelshaven binnen de gemeente. Bij Stavenisse moest een nieuwe damwand worden geplaatst. De benodigde dikte van de damwandplank kon op het desbetreffende moment niet worden geleverd. Hierdoor kwam de leverancier met het voorstel om een dunnere damwand met daarop kathodische bescherming toe te passen. De damwand met daarop één van de kathode verbindingen van de kathodische bescherming is terug te vinden in Figuur 1. Als vervolg hier op is de vraag bij de gemeente Tholen ontstaan of de kathodische bescherming ook kan toe worden gepast op bestaande stalen damwanden, om hiermee de theoretische en praktische levensduur te verlengen.

Voor het gehele onderzoek zullen diverse stalen damwanden binnen de gemeente Tholen worden onderzocht. Deze damwanden zijn aanwezig in verschillende havens. Daarbij verschillen deze ook qua opbouw van de constructie en in ouderdom. Binnen dit onderzoek worden de stalen damwanden in de haven in de stad Tholen zelf beschouwd. De locatie van deze haven is terug te vinden in Figuur 2. Het gaat hierbij om de verhoudingsgewijs kleine inham van de haven. Het grootste gedeelte van de haven is in erfpacht bij de watersportvereniging. Hier zijn echter geen damwanden stalen damwanden aanwezig. Hiermee valt het niet onder de scope van dit onderzoek. Het water in de haven was vroeger onderdeel van het water de Eendracht. Tegenwoordig sluit het water aan op het Schelde-Rijn kanaal. In de oude handelshaven zijn aan de noordzijde en westzijde stalen damwanden terug te vinden. Deze zijn gemarkeerd in Figuur 3. Het gaat hierbij om circa 265 meter aan stalen damwanden.



Figuur 2: Locatie haven bij Tholen (Google, 2018)

1.3. Doel

Het doel van dit onderzoek is om een indicatie te geven van de technische en economische haalbaarheid van de toepassing van kathodische bescherming om de levensduur van stalen damwanden te verlengen in de handelshaven van Tholen. Hiervoor worden diverse levensduurverlengende onderhoudsmethodes onderzocht. Hierbij wordt een vergelijking gemaakt tussen deze onderhoudsmethodes. Naast kathodische bescherming, is coaten een ander voorbeeld van een onderhoudsmethode. Op de damwanden in de haven van Tholen is ten tijde van plaatsing ook een coating toegepast.

1.4. Onderzoeksvraag en deelvragen

De mogelijke toepassing van kathodische bescherming als onderhoudsmethode op bestaande stalen damwanden is onderzocht. T.b.v. het onderzoek, is de technische uitvoerbaarheid van kathodische bescherming als ook de economische haalbaarheid van kathodische bescherming onderzocht. Dit alles heeft direct betrekking op de kades van de oude haven van Tholen. Aan de hand van deze probleemstelling is de volgende hoofdonderzoeksvraag opgesteld:

- *In hoeverre is het technisch en economisch haalbaar om kathodische bescherming toe te passen als levensduurverlengende onderhoudsmethode voor stalen damwanden in de haven van Tholen?*

Om tot antwoord van deze hoofdvraag te komen zijn diverse deelvragen opgesteld:

1. Hoe is de huidige kadeconstructie opgebouwd en wat is de huidige staat van deze constructie en omgeving?
2. Welke vormen van corrosie zijn er en welk negatief effect hebben deze?
3. Welke onderhoudsmethodes zijn er mogelijk voor bestaande stalen damwanden?
 - a. Hoe worden deze methodes uitgevoerd?
 - b. Wat zijn de bijbehorende life cycle kosten?
4. Aan welke eisen moeten de stalen damwanden in de haven van Tholen voldoen?
5. Voldoen de stalen damwanden aan de huidige en toekomstige eisen en richtlijnen en wat is daarbij de verwachte restlevensduur?
6. Welke onderhoudsvarianten kunnen er worden toegepast op de bestaande stalen damwanden op de locatie?
7. Wat is de optimale onderhoudsvariant voor de bestaande stalen damwanden ter verlenging van de levensduur, kijkend naar technische en economische aspecten?
8. Hoe ziet de optimale onderhoudsvariant voor de bestaande stalen damwanden er uit?



Figuur 3: Stalen damwand in de haven van Tholen (Google, 2018)

1.5. Afbakening onderzoek

T.b.v. het optimale verloop van dit onderzoek met het gewenste resultaat is een afbakening van het onderzoek van groot belang. Hieronder is de begrenzing van het onderzoek gegeven door middel van een opsomming van onderzoeksrandvoorwaarden:

- Onder aantasting van de damwand wordt binnen dit onderzoek aantasting door middel van corrosie bedoeld. Andere vormen van aantasting vallen niet onder dit onderzoek, tenzij expliciet vermeld.
- Dit onderzoek richt zich op bestaande stalen damwand constructies. Andere vormen van kadeconstructies, damwanden van ander materiaal of nieuwe stalen damwand constructies vallen niet binnen dit onderzoek.
- Binnen dit onderzoek valt alleen de oude haven in Tholen. Hierbij gaat het om drie verschillende stalen damwand constructies, zoals deze in het theoretisch kader zullen worden beschreven.

1.6. Leeswijzer

In hoofdstuk 2 is het theoretisch kader terug te vinden. Hier zijn de relevante resultaten van de literatuurstudie terug te vinden. Het theoretisch kader vormt de basis voor hoofdstuk 3, de methode. Hier worden de diverse onderzoeksmethodes toegelicht en de daarbij behorende onderzoeksinstrumenten. In hoofdstuk 4 worden de resultaten van het onderzoek getoond en bediscussieerd, waarna in hoofdstuk 5 wordt afgesloten met een conclusie en aanbevelingen. Gedetailleerde informatie is terug te vinden in de Bijlages, waar naar wordt verwezen in het onderzoeksrapport.

2. Theoretisch kader

In het theoretisch kader zal de theoretische fundering van dit onderzoek worden gepresenteerd. Hiervoor worden diverse begrippen toegelicht en wordt een overzicht gegeven van de benodigde gegevens. Binnen het theoretisch kader is een opsplitsing te vinden tussen gegevens m.b.t. de te onderzoeken locatie en gegevens met betrekking tot stalen damwanden in het algemeen.

2.1. Locatie gegevens

Zowel voor de toetsing van de damwand, alsook voor de aantasting van de damwand zijn de gegevens over de lokale omstandigheden van groot belang. De bekende gegevens worden hier gegeven en waar nodig toegelicht. Hierbij is er een onderscheid gemaakt tussen water, ondergrond en de kade.

2.1.1. Water

Diverse gegevens over het plaatselijke water zijn van belang voor het onderzoek. Hierbij is het waterpeil benodigd voor de toetsing van de damwand. Daarnaast is het van belang of er sprake is van zout of zoet water. Dit heeft invloed op de grootte van aantasting door corrosie op de damwand.

Waterpeil

De oude haven van Tholen ligt in het verlengde van het Volkerak-Zoommeer. Het huidige peil is daarbij variabel tussen NAP -0,10 m en NAP +0,15 m (Rijkswaterstaat Dienst Zeeland, 2011). Door de Oesterdam is er in de haven in Tholen geen sprake van een getij. Hierdoor is het waterpeil minder variabel (Rijkswaterstaat, z.d.-a).

Zoutgehalte

Het Volkerak-Zoommeer is een zoetwatermeer. Er is dus ook in de haven van Tholen sprake van zoetwater. Wel zijn er plannen om het Volkerak-Zoommeer te veranderen in een zoutwatermeer met daarbij een licht getij. Dit doormiddel van een inlaat in de Philipsdam (Jong, 2017).

Helemaal zoet kan het water echter niet genoemd worden. Rijkswaterstaat houdt het zoutgehalte in diverse locaties in Nederland bij. Op meetpunt rondom de haven van Tholen variëren de waardes zo tussen de 300 en 400 mg/l. Hierdoor wordt het water geclassificeerd als licht brak water (Rijkswaterstaat, z.d.-b). Aan de hand van deze gegevens, is er voor dit onderzoek gekozen om 10,00 kN/m³ aan te houden als belastingswaarde voor het water. Deze is benodigd voor de toetsing van de damwand. Voor de aantasting door corrosie van de damwand wordt een waarde geschat aan de hand van gegeven kengetallen voor een zoet en zout milieu uit de CUR 166 (CUR Bouw & Infra, 2012) .

Schepen

De oude haven van Tholen is geclassificeerd als CEMT II vaarweg (Rijkswaterstaat & Centrale Informatievoorziening (CIV), 2019). Deze scheepsafmetingen zijn in theorie maatgevend voor zaken zoals bolderbelastingen. Hierbij geldt een maximale lengte van 55 meter, een maximale breedte van 6,6 meter en een maximale diepgang van 2,6 meter. Het grootste schip in de haven is echter kleiner dan de grenswaarde van klasse CEMT II. Het grootste schip in de haven is 'de Morgenstond' (Boogaard, z.d.). Voor dit schip gelden de volgende afmetingen: een lengte van 42,82 meter, een breedte van 6,6 meter en een diepgang van 1,5 meter. Dit schip wordt als maatgevend beschouwd voor de haven, aangezien het niet de verwachting is dat er zich in de toekomst groter schepen zullen voordoen in de haven van Tholen.

2.1.2. Ondergrond

De grondopbouw is benodigd voor de toetsing van de damwand. Ook is de grondwaterstand van belang voor de toetsing van de damwand, alsook voor de aantasting van de damwand aan de landzijde.

Sondering/grondopbouw

In opdracht van de gemeente Tholen zijn in 2017 diverse sonderingen uitgevoerd door de aannemer van der Straaten. Dit t.b.v. onderhoudswerkzaamheden en vernieuwing van onderdelen bij de steigers in de haven (Van der Straaten, 2017).

In 1979 zijn er sonderingen uitgevoerd door de Grontmij (Grontmij n.v., 1980b). Dit t.b.v. van een aanpassing van één van de kades.

Deze bestaande sonderingen zullen worden gebruikt voor de toetsing van de haven. Een overzicht van de gebruikte sonderingen en bijbehorende locaties is terug te vinden in Bijlage A.

De hoogte van het maaiveld is op deze locatie NAP + 2,61 m op locatie 1 aan de noordzijde. Bij locatie 12 is deze hoogte NAP +2,66 m (Van der Straaten, 2017). Het maaiveld wordt daarom voor alle kades aangehouden op NAP +2,65 m.

Bodem inpeiling

De bodem van de oude haven is in 2017 ingepeild. Een overzicht hiervan is terug te vinden in Bijlage A. De bodem ligt op verschillende niveaus langs de kademuur. Naar schatting is er sprake van een variatie tussen NAP -2,00 m tot en met NAP -4,00 m voor het bodemniveau in de gehele haven (Hakkers, 2016).

2.1.3. Kades

De damwand constructies kunnen in drie onderdelen worden opgedeeld. Een opdeling hiervan is terug te vinden in Figuur 4. In Tabel 1 is gegeven van welk materiaal de kadeconstructie is gerealiseerd en daarbij ook de bijbehorende lengte. Bij kade 2 is er een steiger aanwezig aan de waterzijde van de kade. Bij kade 1 en 3 is dit niet het geval.

Tabel 1: Materiaal en lengte van kadeconstructie

Kade	Opbouw	Lengte (m)
1	Stalen damwand	48
2	Bovenzijde: Betonnen damwand Onderzijde: Stalen damwand	119
3	Stalen Damwand	98

Haalkommen/bolders

Op de stalen damwand bij kade 1 en kade 3 zijn haalkommen aanwezig. Op het loopvlak bij kade 2 zijn ook bolders aanwezig. Deze bolders en haalkommen moeten in theorie worden gedimensioneerd op een belasting van 150 kN. Dit omdat in de haven CEMT klasse II leidend is. Echter wordt er als maximale schip in deze haven uitgegaan van 'de Morgenstond' (zie paragraaf 2.1.1). Aan de hand van de afmetingen van dit schip kan de bolderkracht worden bepaald. Deze kunnen op de volgende wijze worden bepaald (Rijkswaterstaat, 2017):

- Schepen waarbij $L \cdot B \cdot T < 1000 \text{m}^3$:
 $F = 60 + (L \cdot B \cdot T) / 10 \text{kN}$
- Schepen waarbij $L \cdot B \cdot T > 1000 \text{m}^3$:
 $F = 150 + (L \cdot B \cdot T) / 100 \text{kN}$

Met de afmetingen van 'de Morgenstond' komt een waarde van minder dan 150 kN naar voren, namelijk 104kN. 104kN wordt dan ook aangehouden als bolderbelasting voor de toetsing van de kades. Wel moet de verdeling van deze kracht over de ankers worden bepaald t.b.v. de toetsing van de damwand.

Kerende functie

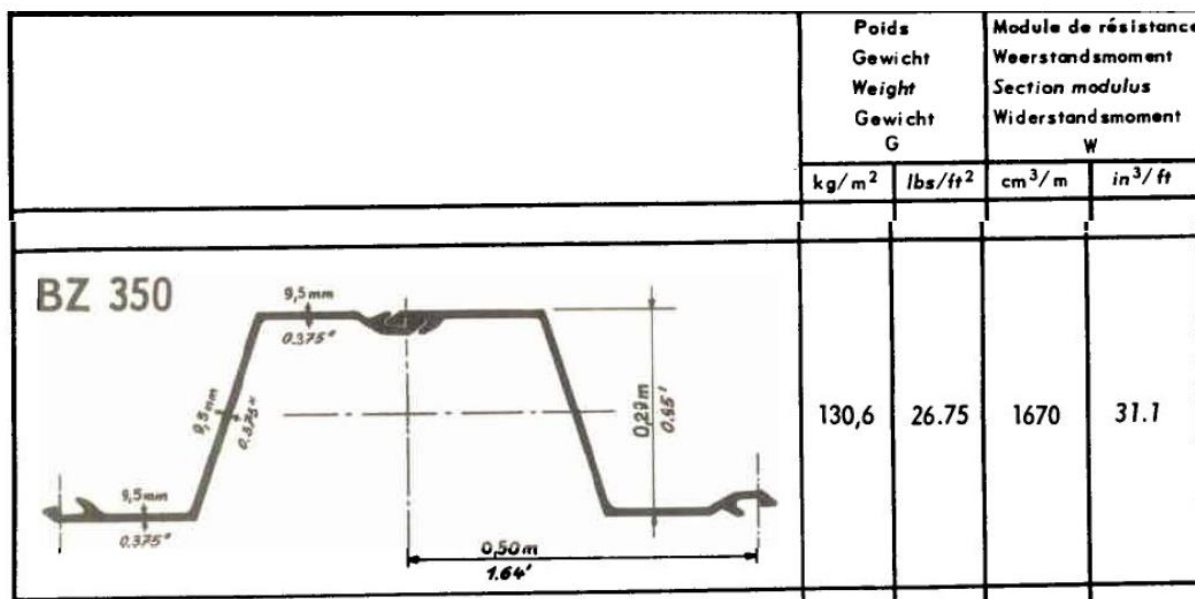
De damwandconstructie ligt binnen de veiligheidsmarge van de primaire waterkering. De daadwerkelijke primaire waterkering is de achterliggende dijk. Het gaat hierbij op een type c-kering, zoals deze beschreven is in de *hydraulische randvoorwaarden primaire waterkeringen categorie C*. Er is dus sprake van een primaire waterkering. De kering is onderdeel van dijkringgebied 27. Het toetspeil voor deze waterkering is NAP + 0,9 m (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2006).



Figuur 4: Onderverdeling kadeconstructie (Google, 2018)

Kade 1

Kade 1 is 48 meter lang. Op deze kade zijn 7 haalkommen terug te vinden. Hierbij varieert de afstand tussen de haalkommen tussen de 5 m en 7 m. Het bouwjaar van de damwand kan worden geschat. Op tekeningen uit 1967 is er nog geen damwand op de huidige locatie, zoals te zien op de tekeningen in Bijlage B. Op deze tekening komt alleen de bestaande betonnen damwand terug (Rijkswaterstaat Deltadienst, 1967). Op een tekening uit 1977 is de verankering van het damwand profiel terug te zien. Verder is uit deze tekening te halen dat de damwand uit een (Belval) BZ 350 profiel bestaat. De leeftijd van de damwand wordt aangenomen op 42 jaar oud (Dietz, 1977). De tekening met daarop de damwandverankering is ook terug te vinden in Bijlage B. Gegevens met betrekking tot het damwandprofiel BZ 350 profiel zijn terug te vinden in Figuur 5 (Arbed, z.d.).



Figuur 5: Gegevens BZ 350 profiel (Arbed, z.d.)

Aan de hand van metingen en een berekeningsrapport, opgesteld in 1980 kan worden gesteld dat de ankers zich bevinden op NAP +1,65 m. Het gaat hierbij om een ankerwand. Het bodemniveau van de damplanken is terug te vinden op NAP -6,65m (Grontmij n.v., 1980a). Deze maten zijn ook terug te vinden in Tabel 2.

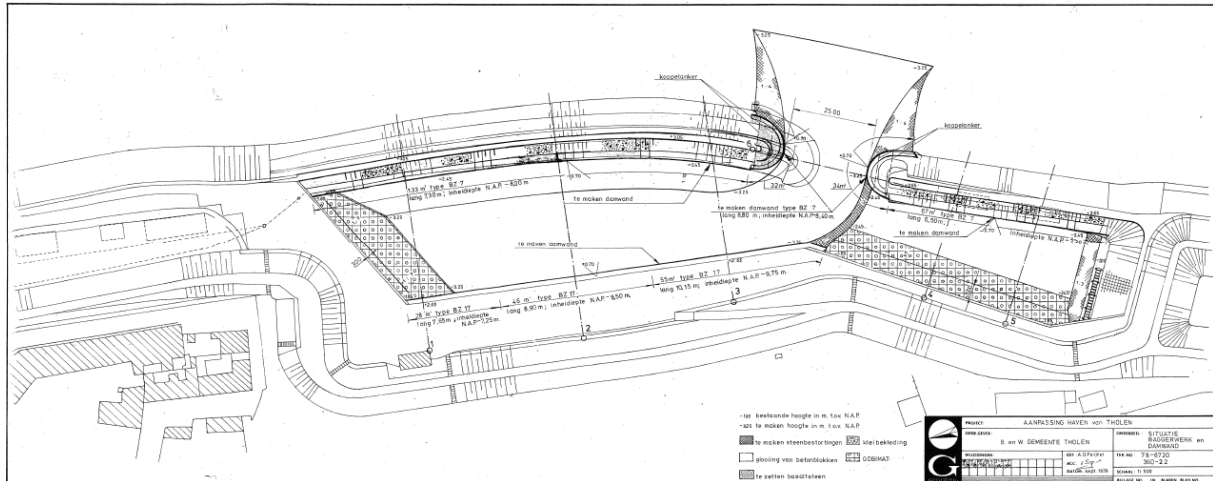
Tabel 2: Overzicht gegevens kade 1

Locatie Kade 1	t.o.v. NAP
Maaiveld landzijde	2,65 meter
Bodem niveau waterzijde	-1,85 meter
Inheinniveau stalen damwand	-6,65 meter
Hoogte verankering	1,65 meter

De grondopbouw is bepaald aan de hand van een sondering, uitgevoerd door aannemer van der Straaten in 2017. Aan de hand van deze sondering is een inschatting gemaakt van de grondopbouw aan de hand van tabellen uit de NEN 9997 (Nederlands Normalisatie-instituut, 2017). Zowel de grondopbouw als de sondering zijn terug te vinden in Bijlage A.

Het profiel van het toegepaste ankerschot is BZ 250. De ankerstangen hebben een doorsnede van 50 mm (Ø50 mm) (zie tekening Bijlage B). De hart op hart afstand van de verankering varieert tussen de 2,0 en 3,0 meter. Dit is zowel terug te vinden in de tekeningen als op de locatie zelf. De toegepaste gordingen zijn van het type UNP280. De gordingen op de locatie van het ankerschot zijn UNP260 (Dietz, 1977).

Aan de hand van de uitgevoerde controle berekening in 1979 is een advies gegeven voor een aanpassing aan het dwarsprofiel. Hiervoor is bodembescherming aangebracht (Feijtel, 1979a). Deze bescherming bestaat uit Gobi-matten. Na visuele inspectie op de locatie is geconstateerd dat de Gobi-matten nog steeds (deels) aanwezig zijn. In Figuur 6 is de locatie van de Gobi-matten terug te vinden. De tekening komt in groter formaat terug in Bijlage B.



Figuur 6: Bodembescherming langs kades (Feijtel, 1979a)

In 2016 is er door Iv-Infra een inspectie uitgevoerd. Hierbij zijn zowel de damwand als de steigers geïnspecteerd. De volgende bevindingen zijn aan de hand van deze inspectie naar voren gekomen (Albers, 2018):

- Betonnen deksloof vertoont geen schade
- Ankermoeren en ankerplaten vertonen geen gebreken
- De stalen damwanden vertonen hier en daar slechts oppervlakkige roestplekken maar er is nergens een indicatie van een (significante) materiaalafname

Kade 2

Kade 2 is circa 119 meter lang. De kade bestaat uit zowel een betonnen damwand, als ook een stalen damwand. Tussen de betonnen damwand en de stalen damwand is een betonnen loopvlak. Een overzicht met bijbehorende afmetingen is terug te vinden in Figuur 9 (Feijtel, 1979b). Aan de hand van de tekening kan worden geconstateerd dat de deksloof boven op de stalen damwand zich op NAP + 0,70 m bevindt. Het toegepaste damwandprofiel is BZ 17. Als anker is een schroefinjectieanker toegepast. Deze is bevestigd in de deksloof. Gegevens van het damwandprofiel BZ 17 zijn terug te vinden in Figuur 7.

Z-profiel	Weerstandsmoment	Traagheidsmoment	Breedte	Hoogte	Dikte	Dikte	Gewicht	Gewicht	Verf opp.
Arbed	cm ³ /m	cm ⁴ /m	mm	mm	mm	mm	(enkel)	per wand	2 zijdig
	W	I	B	h	e	alfa	kg/m	kg/m ²	m ² /m wand
BZ17	1670	25080	500	300	10,00	9,50	65,40	131,00	2,94

Figuur 7: Gegevens BZ 17 profiel (Albers, 2018)

De inheidiepte van de damwand verschilt over de lengte bij kade 2. Dit is te zien in dezelfde tekening als Figuur 6 (zie ook Bijlage B). In Figuur 8 is een uitvergroting te zien van een sectie van deze tekening, waarop de inheihogtes duidelijker te zien zijn (Feijtel, 1979a). De inheihogtes en diverse andere gegevens over kade 2 zijn samengevat in Tabel 3. In Bijlage A is de grondopbouw te vinden, met daarbij de bijbehorende sonderingen. Hierbij heeft elke sectie een andere sondering en dus ook een andere grondopbouw. Deze sonderingen zijn in 1980 uitgevoerd door de Grontmij (Grontmij n.v., 1980b). Aan de hand van deze sonderingen is een inschatting gemaakt van de grondopbouw aan de hand van NEN 9997 (Nederlands Normalisatie-instituut, 2017).

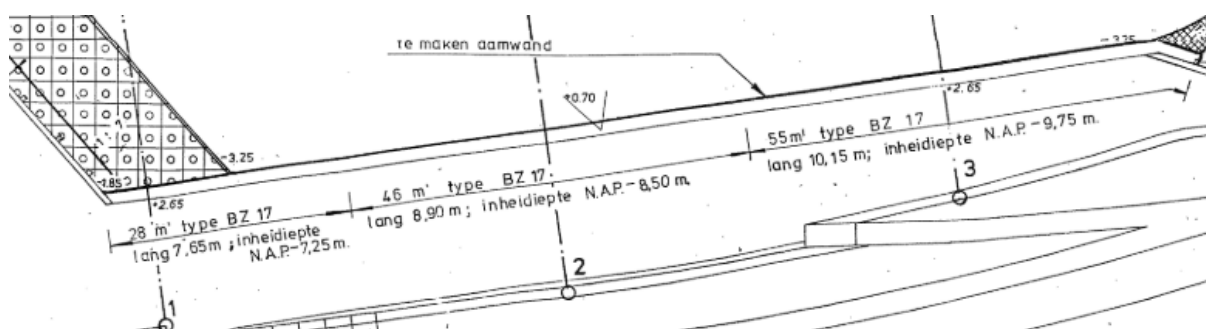
Tabel 3: Overzicht gegevens kade 2

Locatie Kade 2	t.o.v. NAP
Maaiveld landzijde (bovenkant deksloof stalen damwand)	0,70 meter
Bodem niveau waterzijde	Circa -3,00 meter (variërend per sectie)
Inheinniveau stalen damwand	Variërend (zie Figuur 8)
Hoogte verankering	In deksloof 0,4 meter

De wapeningsconfiguratie van de verankering en deksloof van de oude betonnen damwand zijn bekend. Deze zijn terug te halen uit de ontwerp-tekening (Centrale dienst Noord-Zeeland, 1952). Uit deze tekening kan ook worden geconcludeerd dat de betonnen damwand is gebouwd rond 1952. Aangezien dit onderzoek beperkt is tot de stalen damwanden, wordt de betonnen damwand hier verder buiten beschouwing gelaten. Alleen met betrekking tot belastingen en aansluiting op de stalen damwand wordt de betonnen damwand als relevant beschouwd.

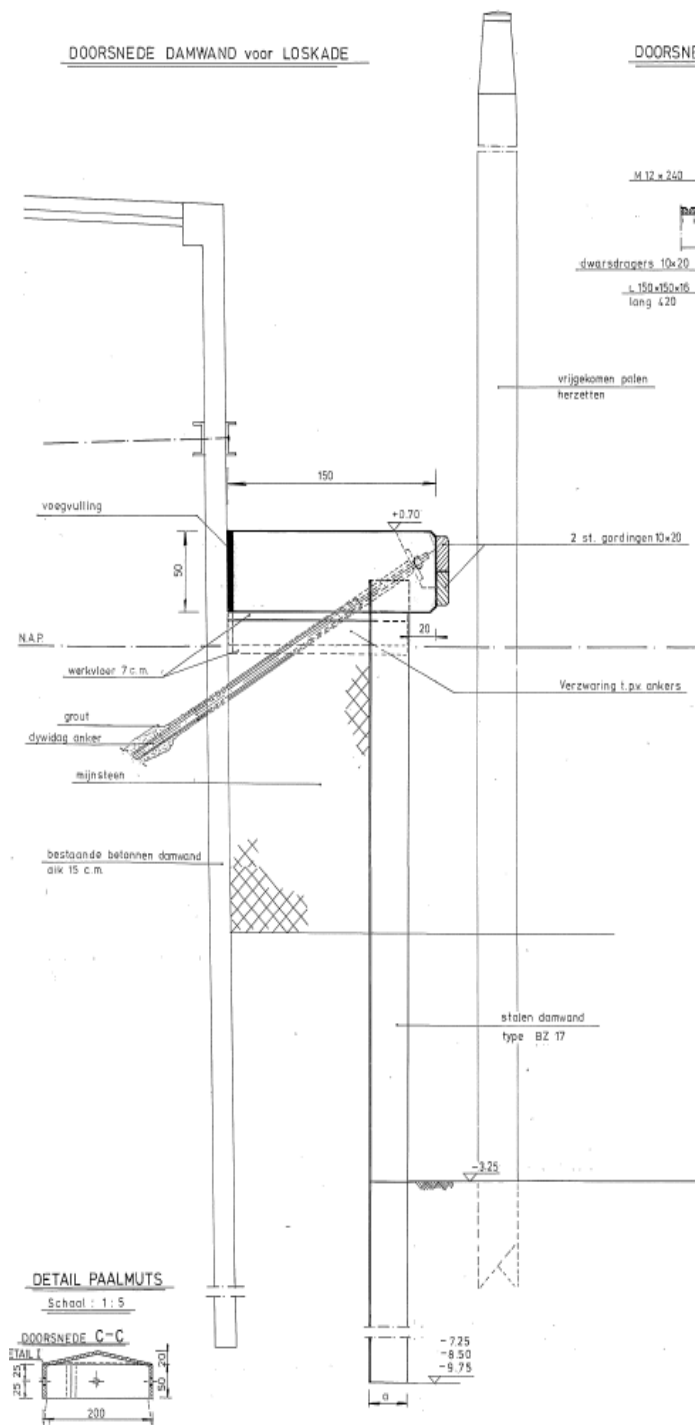
Volgens de ontwerpberekeningen is er geen bodembescherming aanwezig op locatie bij deze kadeconstructie, zoals ook terug is te zien in Figuur 6.

In 2016 is er door Iv-Infra een inspectie uitgevoerd. Hierbij zijn de steigers en damwanden geïnspecteerd. De volgende bevindingen zijn naar voren gekomen (Albers, 2018):



Figuur 8: Inheihogtes kade 2 (Feijtel, 1979a)

- De betonnen deksloof vertoont geen schades (geen scheuren of vervormingen)
- Ankermoeren en ankerplaten vertonen geen gebreken
- De stalen damwanden vertonen hier en daar slechts oppervlakkige roestplekken maar er is nergens een indicatie van een (significante) materiaalafname
- De betonnen damwanden zijn in goede staat, er zijn geen afgebroken stukken of andere gebreken zichtbaar



Figuur 9: Doorsnede kade 2 (Feijtel, 1979b)

Kade 3

Kade 3 is circa 99 meter lang. Op de stalen damwand bevinden zich haalpenen. De h.o.h. afstand van deze stalen bolders varieert tussen de 5 en 7 meter. Ook qua overige afmetingen en profielen gelden dezelfde afmetingen als voor kade 1 (zie eerder deze paragraaf). Dit kan worden gecontroleerd op locatie.

Aan de hand van een berekeningsrapport, opgesteld in 1980 kan worden gesteld dat de ankers zich bevinden op NAP +1,65 m. Het bodemniveau van de damplanken is terug te vinden om NAP -8,65m (Grontmij n.v., 1980a). Deze maten zijn ook terug te vinden in Tabel 4. De grondopbouw met bijbehorende sondering is terug te vinden in Bijlage A. Aan de hand van de sonderingen is een inschatting gemaakt van de grondopbouw aan de hand van NEN 9997 (Nederlands Normalisatie-instituut, 2017).

Tabel 4: Overzicht gegevens kade 3

Locatie Kade 3	t.o.v. NAP
Maaiveld landzijde	2,65 meter
Bodem niveau waterzijde	-1,85 meter
Inheinniveau stalen damwand	-8,65 meter
Hoogte verankering	1,65 meter

Aan de hand van de uitgevoerde controle berekening is een advies gegeven voor een aanpassing aan het dwarsprofiel. Hiervoor is bodembescherming aangebracht (Feijtel, 1979a). Deze bescherming bestaat uit Gobi-matten. In Figuur 6 is de locatie van de Gobi matten terug te vinden (zie ook Bijlage B). Net als bij kade 1 kan na visuele inspectie worden geconstateerd dat deze bodembescherming aanwezig is.

Op kade 3 bevindt zich een hijskraan voor het hijsen van goederen en schepen van de kade naar het water en andersom. Deze kraan is buiten gebruik. Hier wordt verder in dit onderzoek van uit gegaan. De kraan wordt niet meegenomen in verdere berekeningen en beschouwing (bijv. als bovenbelasting).

De staat van de damwand is vergelijkbaar met kademuur 1.

2.2. Stalen damwanden

De kathodische bescherming zal alleen op stalen damwanden worden toegepast. Daarom wordt hieronder alleen de theoretische achtergrond voor stalen damwanden geschetst. Hierbij worden de volgende onderwerpen behandeld: mogelijke profielen, mogelijke aantasting door corrosie van de damwand, onderhoudsmethodes en toetsing van de damwand. In de CUR aanbeveling 69 wordt de volgende definitie van een stalen damwandprofiel gegeven (CUR, 1999):

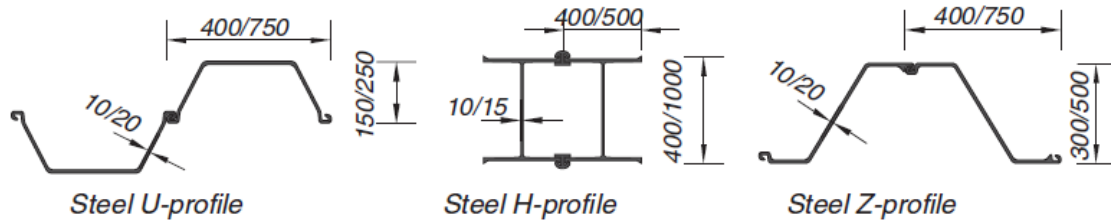
“een warmgewalst of koudgevormd element van staal, in langsricting voorzien van verbindingen (sloten)”

In het tweede deel van de CUR 166 wordt een damwandconstructie als volgt omschreven (CUR Bouw & Infra, 2012):

“Daar waar een sprong in de hoogteligging van het oppervlak van de bodem in stand wordt gehouden door middel van verticaal, naast elkaar in de grond geplaatste slanke constructie-elementen van staal, beton, hout of een ander vast bouw materiaal, is sprake van een damwandconstructie”

2.2.1. Profielen

Voor stalen damwanden zijn diverse profielen mogelijk. Het grootste onderscheid is te maken tussen U-profielen en Z-profielen. Deze zijn terug te vinden in Figuur 10 (SBRCURnet, Municipality Rotterdam, & Port of Rotterdam, 2013). Hiernaast bestaat er ook nog een omega profiel en een plat damwand profiel (CUR Bouw & Infra, 2012). In de oude haven van Tholen is een Z profiel toegepast.



Figuur 10: Stalen damwand profielen (SBRCURnet e.a., 2013)

2.2.2. Aantasting

Stalen damwanden kunnen op diverse manieren worden aangetast. De voornaamste aantasting is het gevolg van corrosie. Hierbij zijn er diverse soorten corrosie te onderscheiden (CUR Bouw & Infra, 2012):

- Elektrochemische corrosie
- Corrosie door zwerfstromen
- Biocorrosie
- Putcorrosie

De corrosiesnelheid hangt af van het milieu waar de damwand zich in bevindt. Daarmee heeft dit ook per locatie een verschillend effect op de bijbehorende dikte van de damwand. Tabel 5 en Tabel 6 geven een indicatie van de afname van de damwanddikte door corrosie per blootgestelde zijde van de damwandplank. Bij Tabel 5 gaat dit om vlakken, blootgesteld aan grond. Bij Tabel 6 gaat het om vlakken blootgesteld aan water. Hierbij zijn er diverse situaties beschouwd en beoogde levensduren beschouwd (Nederlands Normalisatie-instituut, 2006).

Tabel 5: Indicatie dikteafname (mm) van damwanden per situatie (CUR Bouw & Infra, 2012)

Beoogde levensduur (jaar)	5 ***)	25 ***)	50	75	100
Ongeroerde, schone bodem	0,00	0,30	0,60	0,90	1,20
Verontreinigde bodem, geroerde grond	0,15	0,75	1,50	2,25	3,00
Zure bodem (veen, moeras)	0,20	1,00	1,75	2,50	3,25
Onverdichte aanvullingsgrond (klei, zand) **)	0,18	0,70	1,20	1,70	2,20
Onverdicht, agressief ophoogmateriaal (bodemas, slakken, sintels)	0,50	2,00	3,25	4,50	5,75

*) Uit EC 3 deel 5. Genoemde waarden zijn ter oriëntatie. Werkelijke waarden zijn afhankelijk van lokale omstandigheden.

**) Corrosiesnelheden zijn in verdichte ophogingen lager dan in onverdichte. Voor verdichte ophogingen moeten de gegeven waarden door 2 gedeeld worden.

***) Getallen voor 5 en 25 jaar zijn gebaseerd op metingen. De overige waarden zijn geëxtrapoleerd.

Tabel 6: Indicatie dikteafname (mm) van damwanden in zoet/zout water (CUR Bouw & Infra, 2012)

Beoogde levensduur (jaar)	5 ***)	25 ***)	50	75	100
Schoon, zoet water (rond de waterlijn)	0,15	0,55	0,90	1,15	1,40
Sterk verontreinigd zoet water (rond de waterlijn)	0,30	1,30	2,30	3,30	4,30
Zout water in gematigd klimaat (spatzone en laag waterzone)	0,55	1,90	3,75	5,60	7,50
Zout water in gematigd klimaat (permanent onderwaterzone)	0,25	0,90	1,75	2,60	3,50

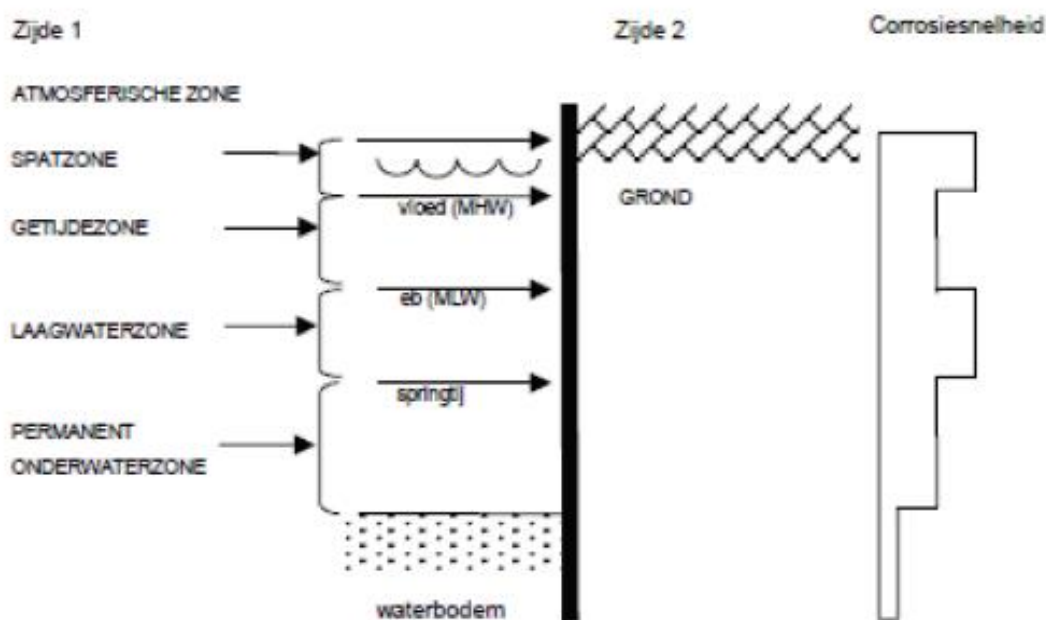
*) Uit EC 3 deel 5. Genoemde waarden zijn ter oriëntatie. Werkelijke waarden zijn afhankelijk van lokale omstandigheden.

**) In water met getijdebeweging treden de hoogste corrosiesnelheden op ter hoogte van de spatzone en de laag waterzone, zie figuur 9.1.

***) Getallen voor 5 en 25 jaar zijn gebaseerd op metingen. De overige waarden zijn geëxtrapoleerd.

Er zijn op de damwand diverse zones te onderscheiden. Deze komen naar voren in Figuur 11. Per zone kan de corrosie zeer verschillen. Voor de atmosferische zone zijn de volgende waardes aangenomen (Nederlands Normalisatie-instituut, 2006):

- Normale atmosferische condities 0,01 mm/jaar
- Mariene omstandigheden (nabij de zee) 0,02 mm/jaar



Figuur 11: Zones voor damwanden in diverse wateromstandigheden (CUR Bouw & Infra, 2012)

In Tabel 7 zijn de corrosiesnelheden per zone van de damwand te zien. Hierbij is een onderscheid gemaakt tussen zoet en zout water. Hierbij gaat het om de corrosiesnelheid per zijde. Deze waarden zijn afkomstig uit de richtlijnen ontwerpen betonnen constructies (ROBK) (Rijkswaterstaat Bouwdienst, 2006).

Tabel 7: Corrosiesnelheden in zoet en zout water per zijde damwand

Zone	Corrosiesnelheid zoet water (mm/jaar)	Corrosiesnelheid zout water (mm/jaar)
Atmosferische zone	0,012	0,050
Getij/splashzone	0,012	0,120
Onderwaterzone	0,012	0,026
In de grond zone	0,012	0,014

In Tabel 8 zijn de waardes te zien volgens CUR publicatie 211 kademuren. Hierbij gaat het om de waarden voor de uniforme corrosie. Deze zijn hoger dan de eerder gegeven waarden. Bij deze waarden is uitgegaan van een zout milieu (SBRCURnet e.a., 2013).

Tabel 8: Waarde uniforme corrosie per zone per zijde damwand

Zone	Corrosiesnelheid zout water (mm/jaar)
Atmosferische zone	0,050 à 0,1
Spatzone	0,150 à 0,4
Getijdezone	0,1 à 0,25
Laag water zone	0,1 à 0,25
Onderwater zone	0,05 à 0,2
Bodem	0,02 à 0,05

De algemene corrosie wordt ook wel uniforme corrosie genoemd. De uniforme corrosiesnelheid is vaak goed in te schatten. De belangrijkste aspecten voor de grootte van corrosie zijn (CUR Bouw & Infra, 2012):

- Hoeveelheid zuurstof op het metaaloppervlak
- Zuurstofreductiereactie
- Beschermende werking van de laag ijzeroxide

Buitenom deze aspecten is de locatie van de damwand erg belangrijk, kijkend naar de verticale positie van de damwand t.o.v. de waterlijn (CUR Bouw & Infra, 2012).

Algemene corrosie

Corrosie kan worden beschouwd als een elektrochemisch proces en is gebaseerd op twee reacties (CUR Bouw & Infra, 2012)

- Bij de anode zijde, de positieve pool, gaat ijzer als Fe^{2+} in oplossing
- Bij de kathode zijde, de negatieve pool, wordt zuurstof, onder invloed van water verminderd tot hydroxide ionen. Daarbij ontstaat neerslag van ijzerhydroxide ($\text{Fe}(\text{OH})_2$). Onder de invloed van zuurstof kan ijzerhydroxide worden omgezet in roest (Fe_2O_3) en water (H_2O).

Dankzij de metalen damwand is er sprake van een verbinding tussen de anode en de kathode. Hier binnen speelt de elektrochemische reactie zich af. De kathode en anode vormen samen met een deel van de damwand en water met daarin de ionen een corrosiecel. Om het corrosieproces door te laten gaan moet er zuurstof (O_2) uit de atmosfeer worden toegevoegd. Het proces waarbij de zuurstof uit de atmosfeer zich in het water verspreidt verloopt echter zeer langzaam. Hier is dus sprake van een tegenstelling: het water is benodigd voor het proces, maar belemmert even goed de aanvoer van zuurstof. De meeste corrosie zal dan ook plaatsvinden op locatie waar het oppervlak afwisselend nat

en droog is. Hierbij kan de conclusie worden getrokken dat er op de spatzone en getijzone (zie Figuur 11) de meeste corrosie aanwezig zal zijn. Aangezien er in de haven van Tholen geen getij aanwezig is en een klein verschil in waterstand, is de getijzone zeer gering in de haven. Daarnaast kan de golfslag effect hebben op de grote van de spatzone. Echter is er in de haven in Tholen ook amper sprake van golfslag. Op het moment dat het water in de haven zout wordt, zal er naar alle waarschijnlijkheid wel een getij ontstaan. Het is nog onbekend welk exacte verschil in waterstand dit oplevert.

In de aanwezigheid van chloride in het water versnelt het corrosieproces zich. Hier is vaak sprake van in zout water. De aanwezige chloride-anionen verdringen de hydroxide-anionen. Zo ontstaat er ijzerhydroxide en daarnaast ook het goed oplosbare ijzerchloride. Bij ijzerchloride is geen sprake van een corrosieremmende laag, maar deze stof gaat geheel in oplossing (CUR Bouw & Infra, 2012).

Als er sprake is van een zuur milieu (lage pH waarde) wordt het corrosie-proces helemaal niet meer afgeremd. De hydroxide-ionen worden dan weggevangen door het zuur. Hierdoor is er geen neerslag meer van ijzerhydroxide (CUR Bouw & Infra, 2012).

Putcorrosie

Bij putcorrosie, ook wel lokale corrosie, is de aantasting door corrosie geconcentreerd op specifieke plaatsen. Hierdoor kan de corrosiesnelheid op deze plaatsen zeer hoog zijn. Er zijn diverse mechanismen, waardoor putcorrosie kan voorkomen. Over het algemeen geldt voor deze processen dat de oplosreactie van het metaal op een klein oppervlak plaatsvindt. De zuurstofreductiereactie verloopt daarentegen op het gehele omringende oppervlak. Op deze manier vindt de corrosie voornamelijk op één locatie plaats, waarbij de totale snelheid niet afneemt. In veel gevallen neemt deze snelheid zelfs toe. Zo ontstaan er in een korte tijd grote wanddikte-afnames op specifieke locaties (CUR Bouw & Infra, 2012). Dit is niet het geval in de haven van Tholen.

Corrosie door zwerfstromen

Zwerfstromen zijn het gevolg van elektromagnetische velden. Deze lopen via de grond. Doormiddel van geleidende objecten, bijv. kabels en leidingen of stalen damwanden, kunnen deze zwerfstromen weer uittreden. Dit fenomeen komt vaak voor in de omgeving van tram- en spoorbanen. Ook kan het proces optreden zonder de aanwezigheid van elektrische installaties. Zo kan het proces in een stalen damwand voorkomen als gevolg van een kathodische beschermingsinstallatie (zie paragraaf 2.2.3) op een afgemeerd schip (CUR Bouw & Infra, 2012).

Dankzij zwerfstromen kan metaal worden opgelost op de plaatsen waar de stromen het metaal verlaten. Op de locaties in de damwand waar de stroom de damwand verlaat treedt materiaalverlies op. Hier kan uiteindelijk een gat ontstaan. Ter indicatie geeft de CUR 166 de volgende waarde van aantasting: er wordt 9,12 kg ijzer opgelost, bij de aanwezigheid van een zwerfstroom van 1 Ampère voor 1 jaar (CUR Bouw & Infra, 2012).

Galvanische corrosie

Bij combinatie van diverse metalen of legeringen in een waterkerende constructie zullen vaak corrosieproblemen voor doen. Dit komt door het verschil in corrosiepotentiaal ten opzichte van het water of zeewater. Als er bij twee legeringen een duidelijk verschil is in corrosie potentiaal en deze zijn ook elektrisch geleidend met elkaar verbonden, zal het meest onedele metaal (het metaal dat het snelst corrodeert) versneld oplossen (CUR Bouw & Infra, 2012). Dit kan bijv. optreden rondom de bronzen schroef van een permanent gemeerd schip. Hierbij kan dit effect op de scheepshuid, maar ook op een niet gecoate of beschadigde damwand optreden.

Biocorrosie

Er ontstaat steeds meer bewijs, waaruit kan worden geconcludeerd dat hoge corrosiesnelheden worden veroorzaakt door anaerobe sulfaatreducerende bacteriën (Defranq, 2015). Dit wordt in de literatuur ook wel ALWC genoemd: Accelerated low water corrosion. Dit is een vorm van biocorrosie rond de laagwaterzone (CUR Bouw & Infra, 2012).

Er wordt een specifiek milieu gecreëerd onder een biofilm. Een biofilm is een afsluitende laag van bacteriën. Een vergelijking kan worden gemaakt met tandplak. In dit specifiek milieu gaat het staal versneld in oplossingen (CUR Bouw & Infra, 2012).

Mosselen en algen die op stalen oppervlakten aanwezig zijn veroorzaken, voor zover nu bekend, geen corrosie. Wel bieden dezen huisvesting aan diverse bacteriën. Hierdoor kan de corrosiesnelheid als nog worden vergroot (Jongbloed & van der Toorn, 2004; US Army Corps of Engineers, 1998)

De reguliere maatregelen tegen corrosie (zie paragraaf 2.2.32.2.3), zoals coatings en verven kunnen biocorrosie in de hand werken. Deze methodes maken namelijk de hechting van micro-organismen aan de damwand mogelijk. Ook kunnen ze de groei stimuleren.

Om biocorrosie te voorkomen moeten de leefomstandigheden voor de bacteriën zo worden aangepast dat de bacterie zich niet verder kunnen handhaven op de stalen damwand. Kathodische bescherming is een methode waarmee biocorrosie bijna helemaal kan worden voorkomen. Door kathodische bescherming wordt namelijk de zuurgraad (hoge pH waarde) aan het staaloppervlak verhoogd. In het basische milieu dat hierdoor ontstaat, kunnen de sulfaatreducerende bacteriën zich slecht ontwikkelen. Ook zorgt de kathodische bescherming er voor dat het fysisch-chemische corrosieproces niet optreedt (CUR Bouw & Infra, 2012).

2.2.3. Onderhoud

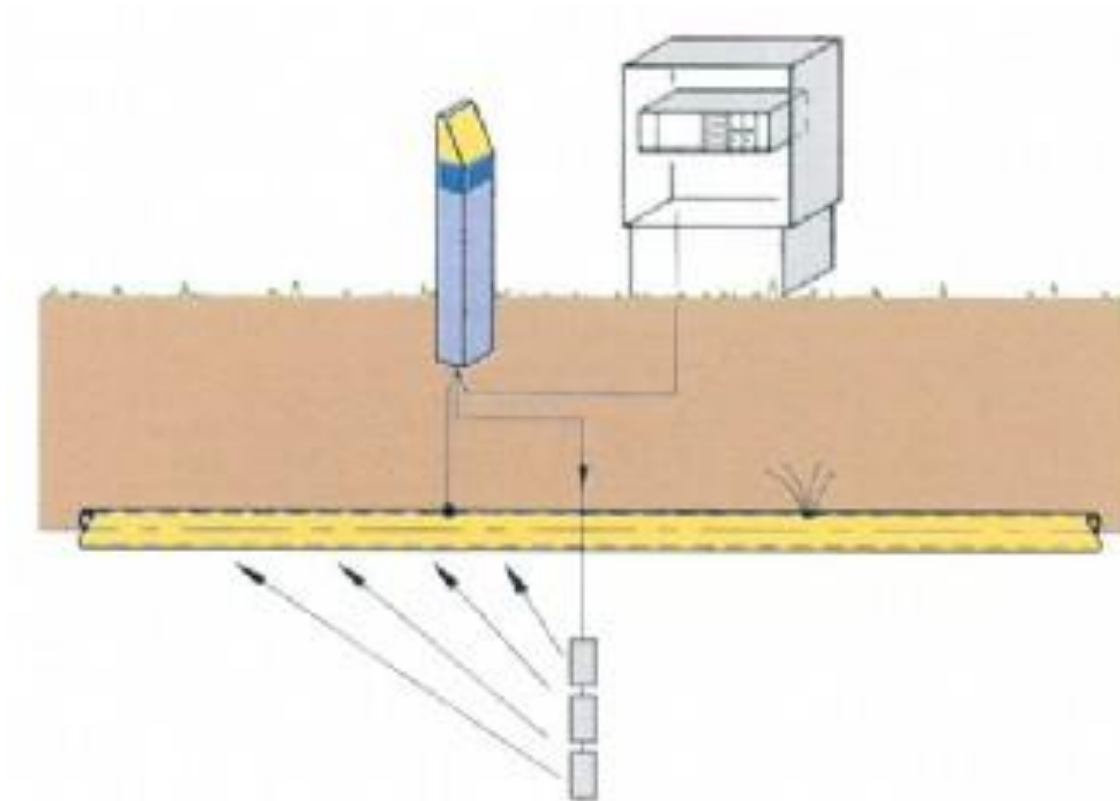
Er zijn diverse onderhoudsmethodes die kunnen worden toegepast op stalen damwanden. Dit is in de meeste gevallen als bescherming tegen corrosie. Voorbeelden van anticorrosie maatregelen zijn:

- Kathodische bescherming
- Anti-corrosiecoatings
- Zinklaag of aluminiumlaag

Kathodische bescherming

Bij kathodische bescherming kan er onderscheid worden gemaakt tussen de passieve en de actieve zijde. Op het moment dat bijvoorbeeld aluminium metallisch verbonden wordt met het staal, zal het meer onedele aluminium in oplossing gaan. Hierdoor wordt het corrosieproces van het staal gestopt. Er zijn diverse alternatieven op kathodische bescherming. Zo kan aluminium worden aangebracht in de vorm van zogenaamde broodjes. In dit geval is er sprake van een opofferingsanode (OOA). Dit wordt ook wel passieve kathodische bescherming genoemd. Zink, aluminium en magnesium kunnen hier voor worden toegepast. Toepassingen met zink en magnesium gebeurt vaker onder zoetwater-omstandigheden (CUR Bouw & Infra, 2012).

Naast de passieve methode kan ook de actieve kathodische bescherming toe worden gepast. Hierbij wordt de damwand beschermd met behulp van een gelijkrichtinstallatie en 'inerte anodes'. Deze tasten de wand niet zelf aan. Bij deze methode wordt door gebruik van 'opgedrukte stroom (OS) het potentiaal van staal verlaagd (CUR Bouw & Infra, 2012). Een overzicht een opgedrukt stroom systeem is terug te vinden in Figuur 12.



Figuur 12: Overzicht opgedrukte stroom systeem (van der Heide, z.d.)

Anti-corrosiecoatings

Door toepassing van anti-corrosiecoatings kan het corrosieproces tot wel 20 jaar worden vertraagd. Echter wordt in de praktijk vaak 10 jaar aangehouden als levensduurverlenging door coaten. Hierbij moet wel voor het aanbrengen van de coating het staal worden gestraald met grit tot de normreinheidswaarde 'SA 21/2'. Voor het toepassen van coatings zijn diverse verschillende systemen mogelijk. Meestal wordt een 2- of 3 laags systeem toegepast. De lagen met bijbehorende opbouw zijn terug te vinden in Tabel 9 (CUR Bouw & Infra, 2012).

Tabel 9: Opbouw lagen coating

Laag	Dikte (µm)	Bestanddelen
1 laag primer	60-70	Fosfaat- of zinkstofprimer (t.b.v. hechting aan staal)
1 tussenlaag coating	150	Op basis van epoxyhars of polyurethaanhars
1 toplaag coating	150	Op basis van epoxyhars of polyurethaanhars

Een goede bescherming tegen corrosie wordt gegeven door de afsluitende epoxyhars laag. Een mogelijk alternatief is een verfsysteem op epoxybasis (CUR Bouw & Infra, 2012). Er zijn richtlijnen voor de locatie van de bedekking met coating op de damwandplank. Indien de damwand in contact staat met de grond, dient het gedeelte dat in contact staat met de grond tot 0,6 meter daar boven, voor plaatsing van de damwand, te worden gecoat. Als de damwand zich in water bevindt, bedekt de coating het deel van de spatzone tot circa 1,5 meter onder de laagwaterzone (CUR Bouw & Infra, 2012).

Zinklaag

Als er sprake is van zeer corrosieve omstandigheden, bijv. in een zout milieu, kan er worden gekozen om een stalen damwand permanent te verzinken. Ten behoeve hiervan wordt de gehele damwandplank ondergedompeld in vloeibaar zink. Ook wel thermisch verzinken genoemd. Bij deze toepassing bestaat het gevaar dat de damwandplank gaat vervormen. Dit komt door de temperatuur in het zinkbad. Deze is circa 800 – 900 °C. Ook bestaat de mogelijkheid dat er te veel zink in het slot van de damwand terecht komt. Dit kan tijdens het heien van de damwand te veel wrijving veroorzaken. De sloten moeten daarom ook na het verzinken worden gereinigd, in hoeverre dit mogelijk is (CUR Bouw & Infra, 2012). Deze methode kan niet worden toegepast op bestaande stalen damwanden.

Aluminiumdeklaag

Naast een zinklaag kan ook een aluminium deklaag toe worden gepast. Dit hangt samen met zeer hoge kosten. Het aanbrengen van dit systeem vindt plaatst door thermische spuiten in een daarvoor geconditioneerde ruimte. De zogenaamde ALU-laag, heeft als belangrijkste eigenschap dat hij door zijn sterke galvanische eigenschap ten opzichte van de stalen damwand, een mechanische beschadiging in het systeem zal herstellen als er sprake is van een lokale beschadiging. Ook heeft dit systeem van nature al een grote weerstand tegen mechanische beschadigingen en daarbij ook een relatief hoge levensduur (CUR Bouw & Infra, 2012).

Keuze van onderhoudsmethode

De keuze van onderhoudsmethodiek hangt van diverse factoren af. Zo kunnen sommige methodes enkel worden toegepast voor het installeren van de damwand. Andere factoren die invloed hebben op de keuze van het onderhoudssysteem zijn (CUR Bouw & Infra, 2012):

- De te verwachten corrosie
- De omvang van de aangevallen zones, die beïnvloedt wordt door de spatzone en de getijdebeweging
- De levensduur van de constructie
- De eventuele esthetische eisen
- De kosten van investering en onderhoud.
- Milieueisen

Levensduur

Een stalen damwand kan een variërende levensduur hebben. Daarbij zijn er ook verschillende soorten levensduur die in beschouwing kunnen worden genomen. Deze worden hieronder opgesomd en toegelicht, zoals deze in de CUR 166 staan benoemd (CUR Bouw & Infra, 2012):

- De constructieve of technische levensduur, die wordt bepaald door het moment waarop een te geringe betrouwbaarheid met betrekking tot de functieervulling zich voordoet;
- De economische levensduur, die wordt bepaald door het moment waarop rente plus afschrijving voor de vervanging goedkoper wordt dan onderhoud;
- De maatschappelijke levensduur, die wordt bepaald door externe oorzaken, zoals een andere bestemming of verzwaring van gebruikerseisen.

2.2.4. Verankering

In veel gevallen is er sprake van een vorm van verankering bij stalen damwanden. De meest voorkomende soorten van verankering zijn (CUR Bouw & Infra, 2012):

- Ankerwand
- Schroefanker
- Gegrout anker (grout anker)
- Trekpalen
- Stempeling

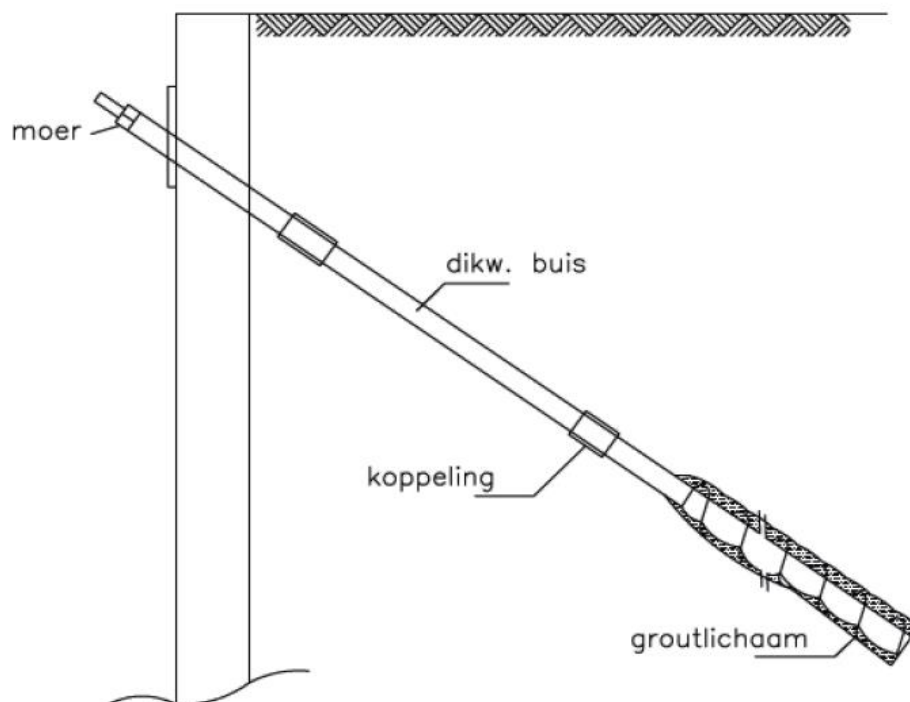
Bij de haven in Tholen zijn twee vormen van verankering toegepast. Bij kade 1 en 3 is een ankerwand toegepast. Bij kade 2 is een schroefinjectieanker toegepast met daarbij een groutlichaam. Het anker is bevestigd in de deksloof. Ten behoeve van het onderzoek worden alleen deze twee vormen van verankering hier onder besproken.

Ankerwand

Als er achter de damwand voldoende ruimte beschikbaar is, kan er voor worden gekozen om ankerschotten of –wanden toe te passen als verankering. Deze zijn op enige afstand achter de damwand aangebracht. De verbinding met de damwand wordt gemaakt doormiddel van ankerstangen, ook wel legankers genoemd (CUR Bouw & Infra, 2012). De verankeringskening is terug te vinden in Bijlage B.

Schroefinjectieankers

Een voorbeeld van een schroefinjectieanker is terug te vinden in Figuur 13. Dit type anker bestaat uit een cilindrisch lichaam dat in de grond is gevormd. Over het algemeen heeft dit een diameter van ca. 100 à 450 mm. De ankerkracht verplaatst zich door een dikwandige buis naar het groutlichaam (CUR Bouw & Infra, 2012).



Figuur 13: Schroefinjectieanker (CUR Bouw & Infra, 2012)

2.2.5. Toetsing

Voor de toetsing van de stalen damwand is een stappenplan opgesteld in de CUR 166. Dit stappenplan wordt toegepast op dit onderzoek. In deze paragraaf wordt de informatie gegeven die van toepassing is op de toetsing van de damwand en waar nodig toegelicht. Ook moet worden benoemd dat het hier gaat om de toetsing van een bestaande damwand en niet het ontwerp van een nieuwe damwand. Hierdoor hoeft de minimale inbeddingsdiepte niet meer te worden bepaald. Ook zijn de dimensioneringsberekeningen niet van toepassing omdat de dimensies van de bestaande damwand als vast staan. De toetsing van de damwand kan opgedeeld worden in verschillende onderdelen (CUR Bouw & Infra, 2012):

- Stabiliteit van de damwand
- Falen van het ankersysteem (hieronder valt de Kranz stabiliteit)
- Grondbreuk (indien dit van toepassing is)
- Totaal stabiliteitsverlies
- Vervormingen op de damwand en achterliggend terrein

Het stappenplan gaat uit van een verend ondersteund ligger model. Naast deze mogelijkheid, kan de damwand ook worden getoetst aan de hand van de eindige elementen methode. Beide methodes worden hieronder toegelicht. Ook worden methodes toegelicht waarmee de maximale gronddruk kan worden bepaald.

Eindige elementen methode (EEM)

Binnen de CUR 166 wordt de toepassing van de eindige-elementenmethode (EEM) beschreven als het toepassen van een computermodel, waarmee spanningen en vervormingen in een grondmassief en de constructie-elementen die zich daarin bevinden, bijvoorbeeld de damwand, ankerstaven etc. kunnen worden berekend. Door het toepassen van de EEM wordt niet alleen de verplaatsing op de locatie van de damwand berekend, maar ook voor de grond achter de damwand. De EEM wordt daarom vaak toegepast als er zich in de nabije omgeving van de damwand andere objecten bevinden die gevoelig zijn voor vervormingen van de grond, die door het realiseren van de nieuwe constructie kunnen ontstaan (CUR Bouw & Infra, 2012).

Verend ondersteunde ligger methode

Bij deze methode wordt de damwand beschouwd als een ligger. Deze methode, waarvan een variant door Blum is bedacht (ook wel methode van Blum genoemd), schematiseert een statisch onbepaald systeem van de damwand en de grond daar om heen, tot een statisch bepaald rekenmodel. Er wordt daarvoor aangenomen dat alleen de sterkte van de grond invloed heeft. Dit houdt dus in dat het vervormingsgedrag van de grond en damwandstijfheid geen enkele invloed hebben op de uitkomst van de berekening (CUR Bouw & Infra, 2012).

Methode van Coulomb en Methode van Culmann

Voor de bepaling van de maximale gronddruk zijn diverse methodes beschikbaar. In de meeste gevallen worden de methode van Coulomb en de methode van Culmann toegepast. De methode van Coulomb neemt aan dat er een recht vlak aanwezig is tussen de actieve en passieve zone (CUR Bouw & Infra, 2012).

De methode van Culmann is eveneens gebaseerd op de theorie van Coulomb. Echter is het bij deze methode door de grafische aanpak, mogelijk om bijv. de invloed van het hellende terrein en lokaal aangrijpende terreinbelastingen mee te nemen (CUR Bouw & Infra, 2012).

Toetsing moment

T.b.v. toetsing van de sterkte van de damwand, moet de damwand worden getoetst op het moment. Hierbij moet het grootste optredende moment (M_d) voldoen aan de sterkte van de plank (M_u). Deze toetsing is materiaal gebonden. In het geval van dit onderzoek gaat het alleen om stalen damwanden. Bij stalen damwanden moet de toetsing worden aangehouden, hoe deze in de NEN-EN 1993 (Eurocode 3) staat beschreven. Er wordt van uitgegaan dat alleen in de uiterste vezel de vloeispanning mag worden bereikt. Er is daarom sprake van een elastische toetsing van de wand. Dit gaat volgens de volgende formule (CUR Bouw & Infra, 2012):

$$M_d = \frac{\beta_B * W_{el} * f_y}{\gamma_{m:st}}$$

waarbij:

β_B = factor voor het mogelijke effect van scheve buiging (voornamelijk bij U-profielen aanwezig)

W_{el} = elastisch weerstandsoment van de dwarsdoorsnede in mm^3/m

f_y = nominale (representatieve) waarde van de vloeispanning in N/mm^2

$\gamma_{m:st}$ = materiaalfactor, waarde voor staal is 1,0

Toetsing dwarskracht en normaalkracht

De damwanden in de haven van Tholen worden niet specifiek getoetst op dwarskracht en normaalkracht. Dit omdat het hier om een toetsing gaat van een bestaande damwand en niet om het ontwerp van een nieuwe. Er bevinden zich geen specifieke normaalkrachten op de damwand, buitenom de gebruikelijke algemene bovenbelasting. Aangezien het hier gaat om Z-profielen bij damwanden die lang in zoetwater zonder getij hebben gestaan, is het ook niet aannemelijk dat de dwarskracht maatgevend is. Dit omdat er geen sprake is van een aanzienlijk hogere reductie van de plankdikte in de spatzone, als gevolg van corrosie (CUR Bouw & Infra, 2012).

Toetsing ankerkrachten

De ankerstijfheid moet groot genoeg zijn om aan de grootste waarde van de ankerkracht ($P_{\max}$) te voldoen. Hierbij moet over de waarde van $P_{\max}$ een extra waarde worden uitgevoerd om de uiteindelijke rekenwaarde te bepalen. Voor de toetsing van de gording, waar alle ankers aan verbonden zijn, geldt het volgende:

$$P_d = 1,1P_{\max}$$

Voor de rekenwaarde t.b.v. van de toetsing van de ankerstaaf geldt het volgende:

$$P_d = 1,25P_{\max}$$

Vervolgens dienen de rekenwaarde van de belasting getoetst te worden aan de rekenwaarde van de sterkte. Als er sprake is van een verankerde damwand (ook het geval in Tholen), dient de stabiliteit ook volgens 'Kranz' te worden geverifieerd (zie hieronder) (CUR Bouw & Infra, 2012).

Daarnaast dient ook te worden getoetst of de herverdelingscapaciteit voldoende is bij de mogelijke uitval van één van de ankers. Dit om te voorkomen dat de hele damwandconstructie zal bezwijken bij de uitval van één anker. Bij deze toetsing wordt er uitgegaan van een 'buitengewone ontwerpsituatie' (BGT-berekening). Alle partiële belasting- en materiaalfactoren zijn dan ook gelijk aan 1,0. Alle geometrische toeslagen zijn gelijk aan 0,0.

Toetsing vervorming

Per kade sectie is er sprake van een andere toelaatbare doorbuiging (u_{grens}). De berekende damwanduitbuiging u_{max} moet hier aan voldoen. Voor deze eis zijn de richtlijnen van uit de Bouwdienst Rijkswaterstaat aangehouden (CUR Bouw & Infra, 2012):

- De toelaatbare horizontale vervorming is 1/200 van de te keren hoogte, waarbij een maximum van 50mm geldt

Toetsing Kranz-stabiliteit

Aangezien het in Tholen gaat om verankerde damwand, moet ook de stabiliteit volgens 'Kranz' worden getoetst. Hierbij wordt de mogelijke afschuiving langs het glijvlak beschouwd. De weerstand van de grond tussen het anker en de damwand kan worden bepaald met behulp van de 'Kranz' methode. Hierbij moet uiteindelijk de minimale benodigde lengte (L_{app}) worden aangegeven waar aan het anker moet voldoen, zodat het volgende geldt:

$$1,5 P_{max} \leq P_{Kr;rep}$$

Waarbij:

P_{max} = grootste waarde van de ankerkracht

$P_{Kr;rep}$ = maximaal leverbare ankerkracht volgens 'Kranz', bepaald aan de hand van karakteristieke waarden voor de grondeigenschappen

Totale stabiliteit

De totale stabiliteit moet worden bepaald. Met diverse methodes kan deze worden bepaald (bijv. methode van Bishop). Hierbij moet de uiteindelijke stabiliteitsfactor minimaal 1,0 zijn. In de praktijk wordt vaak 1,3 als norm aangehouden, vanwege veiligheidsoverwegingen.

Veiligheidsnormering t.b.v. toetsing damwand

Voor damwand constructies zijn er drie veiligheidsklassen. Deze zijn conform NEN-EN 1990. In het geval van de haven Tholen is de zwaarste veiligheidsklasse van toepassing: CC3/RC3. Hierbij gaat het om gevolgklasse 3 en betrouwbaarheidsklasse 3. Deze veiligheidsklasse is van toepassing omdat de kademuuren in de contreien van een primaire waterkering liggen. De ankerwanden van kade 1 en 3 bevinden zich zelfs in de primaire waterkering. Uitgaande van een referentieperiode van 50 jaar en de veiligheidsklasse, kan voor de β -factor voor de uiterste grens toestand (UGT) een waarde van 4,3 worden aangehouden (CUR Bouw & Infra, 2012).

Naast de veiligheidsklassen zijn er ook drie mogelijke ontwerpbenaderingen. In de Nederlandse bijlage van Eurocode 7 wordt uitgegaan van ontwerpbenadering 3 (OB3) (Nederlands Normalisatie-instituut, 2017). Deze wordt dan ook als leidend gezien voor de damwandconstructies in de haven van Tholen (CUR Bouw & Infra, 2012).

Aangezien het hier om een bestaande damwand gaat, zal er voor de toetsing van de damwand alleen de gebruiksfase worden behandeld, aangezien de bouwphase niet meer van toepassing is. Hierbij worden de rekenwaarden en karakteristieke waarden (behorend bij de gekozen veiligheidsklasse en ontwerpbenadering) toegepast (CUR Bouw & Infra, 2012).

Belastingen

Er is onderscheid te maken tussen verschillende belastingen. De voornaamste onderverdeling kan worden gemaakt tussen belastingen door grond en boven- en verkeersbelastingen. Voor de belasting

van de gronddruk moet rekening worden gehouden met de volgende parameters (CUR Bouw & Infra, 2012):

- Bovenbelasting op de grond naast de grondkerende constructie
- De grondwaterstand
- Het volumieke gewicht van de grond γ
- De schuifsterkte van de grond, uitgedrukt in de hoek van inwendige wrijving ϕ' , de cohesie c' en de ongedraineerde schuifsterkte c_u
- De wrijving tussen de wand en grond δ
- De helling van de achterzijde van de wand
- Het niveau en de helling van het grondoppervlak aan beide zijden van de wand
- De beweging en vervorming van de wand ten opzichte van de grond
- Indien relevant, zwellings, bijvoorbeeld door de gekeerde grond

Op alle drie de kades is geen sprake van opslag van goederen. Wel is er een hijsmast aanwezig op kade 3. Verder verplaatst zich over de kades voornamelijk verkeer. Hierbij gaat het voornamelijk om auto's, fietsers en wandelaars. Als terreinbelasting wordt dan ook een gelijkmatig verdeelde belasting van 10 kPa aangehouden (CUR Bouw & Infra, 2012).

Veiligheidsfactoren en parameters

Voor de wandwrijvingshoek δ worden de richtlijnen, te vinden in **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**, aangehouden door de bouwdienst van Rijkswaterstaat (CUR Bouw & Infra, 2012).

Tabel 10: Bepaling gronddrukfactoren voor stalen damwanden

Grondsoort	Waarde δ en ϕ'
Grind (korrel > 8mm)	$\delta = 0$
Grof zand (korrel > 2mm)	$\delta = 1/3 \phi'$
Zand (korrel < 2mm)	$\delta = 2/3 \phi'$
Leem	$\delta = 1/2 \phi'$
Klei	$\delta = 1/3 \phi'$

De rekenwaarden van de diverse parameters kunnen worden bepaald aan de hand van Tabel 11. Hierbij worden de waardes voor de partiële factoren van RC3 aangehouden. Met deze factoren kunnen de uiteindelijke rekenwaardes worden bepaald voor de parameters die terug zijn te vinden in de tabel. Hierbij gaat het om constructies met een ontwerplevensduur van 50 jaar (CUR Bouw & Infra, 2012). In Tabel 12 is een overzicht terug te vinden van alle partiële factoren voor de damwandberekening. Hierbij zijn alleen de waardes uit de Eurocode 7 getoond, omdat ontwerpbenadering 3 uit de Eurocode wordt aangehouden. Hierbij moet worden vermeld, dat deze tabel gericht is op Risicoklasse 2. Dit betekent, dat alle parameters met 10% moeten worden verhoogd om te voldoen aan de normen van risicoklasse 3 (CUR Bouw & Infra, 2012).

Tabel 12: Partiële factoren per ontwerpbenadering (CUR Bouw & Infra, 2012)

	Parameter	EC 7 OB 1		EC 7 OB 2	EC 7 OB 3
		Set 1.1	Set 1.2		
Veiligheidsniveau (referentieperiode 50 jaar)		$\beta = 3,8$ (RC 2) ¹⁾			
Belasting factoren (A)	permanent, ongunstig	1,35	1	1,35	1
	permanent, gunstig	1	1	1	1
	variabel, ongunstig	1,5	1,3	1,5	1,3
	variabel, gunstig	0	0	0	0
	kracht op gording, ankerschot en groutlichaam	-	-	-	-
	kracht op ankerstaaf en stempel	-	-	-	-
Materiaal factoren (M)	$\tan \varphi'$ ³⁾	1	1,25	1	1,25
	γ	1	1	1	1
	c'	1	1,25	1	1,25
	c_u	1	1,4	1	1,4
Factoren op weerstand (R)	draagkracht en grondweerstand ⁴⁾	1	1	1,4	1
	weerstand voorgespannen anker	1,1	1,1	1,1	1
Aanpassing geometrie	kerende hoogte [m]	+10% (max 0,5m)	+10% (max 0,5m)	+10% (max 0,5m)	+10% (max 0,5m)
Aanpassing grondwater stand	hoge zijde [m]	2)	2)	2)	2)
	lage zijde [m]	2)	2)	2)	2)

¹⁾ voor RC1 en RC3 de belastingfactor 10% verlagen respectievelijk verhogen.

²⁾ Geen waarde gegeven in EC 7.

³⁾ In de 3^e druk van CUR 166 werd de partiële factor direct op de wrijvingshoek φ' gezet. ^{l)hoogte worden} tervoorende lagen

⁴⁾ Bedoeld wordt de draagkracht van een fundering en de passieve weerstand.

Ten behoeve van de dimensionering van de damwand zijn diverse berekeningen benodigd. Deze zijn terug te vinden in Tabel 13.

De BGT (bruikbaarheidsgrenstoestand) is terug te vinden in berekening 6.5. Hieruit volgen uiteindelijk de representatieve waarden voor vervormingen en krachten. Om tot de rekenwaarde te komen, moeten deze worden vermenigvuldigd met een factor van 1,2. Dit kan worden vertaald in de volgende formules (CUR Bouw & Infra, 2012):

$$M_{s;d} = 1,2 \cdot M_{s;rep}$$

$$D_{s;d} = 1,2 \cdot D_{s;rep}$$

$$P_{max} = 1,2 \cdot P_{rep}$$

Hierbij staan M en D voor de snedekrachten en P voor de ankerkracht (CUR Bouw & Infra, 2012).

Tabel 13: Berekeningen t.b.v. dimensionering (CUR Bouw & Infra, 2012)

Nr.	Grenstoestand	Beddingsconstante	Rekenwaarde grondwaterstand lage zijde (zie tabel 3.7)
6.1	UGT	laag	$\frac{\mu + \gamma\sigma}{15}; \mu + \Delta$ hoge grondwaterstand
6.2	UGT	hoog	$\max(\mu + \gamma\sigma; \mu + \Delta)$ hoge grondwaterstand
6.3	UGT	laag	$\min(\mu - \gamma\sigma; \mu - \Delta)$ lage grondwaterstand
6.4	UGT	hoog	$\min(\mu - \gamma\sigma; \mu - \Delta)$ lage grondwaterstand
6.5	BGT	laag	-
Verklaring afkortingen met synoniemen			
UGT = uiterste grenstoestand			BGT = bruikbaarheidsgrenstoestand
ULS = <i>Ultimate Limit State</i> (= UGT)			SLS = <i>Serviceability Limit State</i> (= BGT)
In een UGT-berekening worden de partiële factoren en toeslagen volgens tabel 12 gebruikt			In een BGT-berekening zijn alle partiële factoren gelijk aan 1,0 en alle toeslagen gelijk aan 0,0.

2.2.6. Damwanden in en nabij waterkeringen

Nabij de stalen damwanden in de oude haven van Tholen bevindt zich een primaire waterkering. Voor damwanden in of nabij een primaire waterkering, gelden speciale randvoorwaarden. Deze zijn opgesomd in de CUR 166. Hieronder is een overzicht terug te vinden van de voor dit onderzoek relevant zijnde randvoorwaarden (CUR Bouw & Infra, 2012):

- Voor damwanden in primaire waterkeringen geldt een planperiode van 100 jaar. Dit is meer dan voor de meeste andere damwanden (circa 50 jaar). Dit hangt samen met de lange levensduur van dijken de grote impact van het vervangen van damwanden in dijken
- Bij het ontwerp/de toetsing dient rekening te worden gehouden met de randvoorwaarden aan het einde van de planperiode. Voor primaire waterkeringen betekent dit, dat de voorspelling dient te worden gedaan van de waterstanden over 100 jaar, alsmede voor de kruin- en bodemdaling in die periode
- Voor de grondwaterdruk tegen de damwand dient te worden gerekend met een waterpeil tot aan de bovenkant van de damwand, tenzij aangetoond kan worden dat de (freatische) waterlijn tijdens het maatgevend hoog water lager is. Bij tijdelijke damwanden (bouwput) mag worden uitgegaan van lagere waterstanden, mits kan worden aangetoond dat er voldoende voorzieningen zijn getroffen om bij het onverwacht optreden van hogere waterstanden water aan de ander zijde van de damwand (in de bouwput) in te laten zonder daarbij de veiligheid van de dijk aan te tasten.
- Bij ontwerpberoekeningen bij dijken dient op de kruin een ongedraineerde verkeersbelasting van 15 kN/m² over een breedte van 2,5 m te worden aangenomen. Bij de beschouwing van de binnenwaartse stabiliteit tijdens maatgevend hoogwater mag worden uitgegaan van 13 kN/m²
- Bij damwanden in waterkeringen kunnen bijzondere belastingen een rol spelen zoals golfklappen, stroming bolderkrachten of aanvaarbelastingen
- Bij toepassing van stalen damwanden dienen maatregelen te worden genomen in verband met corrosie.

3. Methode

In het hoofdstuk Methode zullen de gekozen onderzoeksmethodes worden beschreven. Hierbij wordt toegelicht om wat voor soort onderzoek het gaat. Als achtergrond wordt hier de informatie van het theoretisch kader toegepast. Bij deze gekozen onderzoeksmethodes worden de te gebruiken onderzoeksinstrumenten benoemd.

3.1. Onderzoektype

Het gehele onderzoek kan worden beschouwd als een adviserend onderzoek. Voor dit adviserende onderzoek, wordt er één casestudy uitgevoerd. De hoofdvraag bij dit onderzoek is:

- *In hoeverre is het technisch en economisch haalbaar om kathodische bescherming toe te passen als levensduurverlengende onderhoudsmethode voor stalen damwanden in de haven van Tholen?*

Het antwoord op deze vraag vormt een advies over de toepasbaarheid van kathodische bescherming in de haven Tholen. Uit dat advies moet blijken of het technisch en economisch haalbaar is om kathodische bescherming toe te passen als levensduurverlengende onderhoudsmethode. Hierbij zal ook een indicatie worden gegeven van mogelijke uitvoering van een kathodisch beschermingssysteem.

3.2. Onderzoeksmethode(s) per deelvraag

In deze paragraaf zal per deelvraag worden beschreven welke onderzoeksmethode(s) wordt toegepast.

3.2.1. Onderzoeksmethode deelvraag 1

De eerste deelvraag is als volgt opgesteld:

1. Hoe is de huidige kadeconstructie opgebouwd en wat is de huidige staat van deze constructie en omgeving?

Het onderzoek wat benodigd is voor deze deelvraag kan worden gezien als een beschrijvend onderzoek. Het uit te voeren onderzoek voor deze deelvraag bestaat uit twee onderdelen: deskresearch en observatieonderzoek. Hierbij ligt de focus op deskresearch, aangevuld met bezoeken op de locatie voor missende informatie.

3.2.2. Onderzoeksmethode deelvraag 2

De tweede deelvraag is al volgt opgesteld:

2. Welke vormen van corrosie zijn er en welk negatief effect hebben deze?

Het onderzoek wat benodigd is voor deze deelvraag kan worden gezien als een beschrijvend onderzoek. Het uit te voeren onderzoek bestaat hierbij voornamelijk uit deskresearch. Indien informatie niet te vinden is, kunnen ook interviews met specialisten toe worden gepast. Daarnaast moet de gevonden informatie worden geïmplementeerd in het onderzoek. Ten behoeve hiervan kan op de locatie van de haven worden gekeken naar sporen van aantasting op de damwand. Hiervoor zal ook naar uitgevoerde damwandinspecties worden verwezen.

3.2.3. Onderzoeksmethode deelvraag 3

De derde deelvraag is als volgt opgesteld:

3. Welke onderhoudsmethodes zijn er mogelijk voor bestaande stalen damwanden?
 - a. Hoe worden deze methodes uitgevoerd?
 - b. Wat zijn de bijbehorende life cycle kosten?

Het onderzoek wat benodigd is voor deze deelvraag kan worden gezien als een beschrijvend onderzoek. Het uit te voeren onderzoek bestaat hierbij uit deskresearch en consultatie van ervaringsdeskundigen in het veld van damwandonderhoud. Hierbij kunnen beide methodes worden toegepast op beide sub deelvragen. Hierbij kan de consultatie van ervaringsdeskundige worden uitgevoerd als een interview ter aanvulling van de opgedane informatie door de deskresearch.

3.2.4. Onderzoeksmethode deelvraag 4

De vierde deelvraag is als volgt opgesteld:

4. Aan welke eisen moeten stalen damwanden in de haven van Tholen voldoen?

Het onderzoek wat benodigd is voor deze deelvraag kan worden gezien als een beschrijvend onderzoek. Hiervoor kan weer de combinatie worden gemaakt tussen deskresearch en consultatie van een ervaringsdeskundige. Enerzijds zijn er vanuit de literatuur eisen en normeringen waaraan de damwand moet voldoen. Deze bestaan uit functionele eisen, belastingen, etc. Anderzijds kunnen er eisen zijn, die vanuit de gemeente naar voren komen. Hiervoor kunnen intern interviews worden uitgevoerd. Uiteindelijk komt hier een programma van eisen uit voort voor de toetsing van de bestaande damwand en het onderhoud van de damwand.

3.2.5. Onderzoeksmethode deelvraag 5

De vijfde deelvraag is als volgt opgesteld:

5. Voldoen de stalen damwanden aan de huidige en toekomstige eisen en richtlijnen en wat is daarbij de te verwachte restlevensduur?

Het onderzoek wat benodigd is voor deze deelvraag kan worden gezien als een toetsend onderzoek en is de vervolgstap op deelvraag 4. Ten behoeve van deelvraag 5 zal de damwand moeten worden getoetst op de bij deelvraag 4 gevonden eisen. Ten behoeve van deze toetsing zal een simulatie moeten worden uitgevoerd in computersoftware. Hiervoor zal 'D-sheet piling' worden gebruikt. Ter controle van de software, zal ook een handberekening worden uitgevoerd ter bepaling van de grondspanningen. Dit zal worden gedaan voor één te toetsen snede. Ten behoeve van de toetsing wordt in beide gevallen gekeken naar toetsing van de stalen damwanden zelf, de stalen gordingen en de bijbehorende ankers. Voor de verdeling van bolderkrachten op de ankers, zullen modellen worden gemaakt in 'Technosoft liggers'. Ook zal Technosoft liggers worden gebruikt, t.b.v. een extra toetsing van de ankers en gordingen, indien een eerste toetsing van dezen te conservatief blijkt.

Deze toetsingen zullen meerdere keren plaats vinden, namelijk per maatgevende doorsnede. Een onderverdeling tussen de kades wordt aangehouden, zoals deze in het theoretisch kader is geschetst.

3.2.6. Onderzoeksmethode deelvraag 6

De zesde deelvraag is als volgt opgesteld:

6. Welke onderhoudsvarianten kunnen er worden toegepast op de bestaande stalen damwanden op deze locatie?

Het onderzoek wat benodigd is voor deze deelvraag kan worden gezien als exploratief onderzoek. Hierbij worden de opties voor het onderhoud van de stalen damwand beschouwd. Ten behoeve hiervan wordt een klein kwalitatief onderzoek uitgevoerd. Dit kan worden gezien als een vertaling van de verkregen informatie en data in onderhoudsvarianten. De daadwerkelijke toetsing/keuze van onderhoudsvarianten volgt aan de hand van deelvraag 7 (zie paragraaf 3.2.7).

3.2.7. Onderzoeksmethode deelvraag 7

De zevende deelvraag is als volgt opgesteld:

7. Wat is de optimale onderhoudsvariant voor de bestaande stalen damwanden ter verlenging van de levensduur, kijkend naar technische en economische aspecten?

Het onderzoek wat benodigd is voor deze deelvraag kan worden gezien als een toetsend onderzoek. Hierbij wordt er onderzocht welke onderhoudsvariant de meest optimale is. De toetsing bestaat uit een bepaling van de life cycle kosten per onderhoudsvariant. Hieruit volgt een Netto Contante Waarde (NCW) per onderhoudsvariant. Dit zijn de totale kosten voor het bezit/gebruik van een product, gedurende de levensduur.

3.2.8. Onderzoeksmethode deelvraag 8

De achtste deelvraag is als volgt opgesteld:

8. Hoe ziet de optimale onderhoudsvariant voor de bestaande stalen damwanden er uit?

Deelvraag 8 kan worden gezien als het vervolg op deelvraag 7. Hierbij is deelvraag 8 de vertaling van deelvraag 7 in een tekening. Hierbij zal ten minste één van de damwanden worden getekend met daarop mogelijk de toegepaste kathodische bescherming. Deze tekening zal worden gemaakt met behulp van AutoCAD.

3.3. Onderzoeksinstrumenten

Hier worden de benodigde onderzoeksinstrumenten opgesomd, die voortkomen uit de sub onderzoeken t.b.v. de deelvragen:

- De onderzoeker
 - T.b.v. observatieonderzoek op locatie
- D-Sheet piling
 - T.b.v. toetsing damwand, gordingen en ankers
- Technosoft Liggers
 - T.b.v. verdeling bolderkracht
 - T.b.v. extra toetsing gordingen en ankers
- Bepaling Netto Contante Waarde
 - T.b.v. toetsing economische haalbaarheid onderzoek varianten
- AutoCAD
 - T.b.v. uitvoering tekening van stalen damwand

4. Resultaten en discussie

In het hoofdstuk resultaten en discussie zullen diverse eindproducten en bevindingen worden getoond. Deze zijn opgedeeld in: Programma van Eisen, Toetsing Damwand, Onderhoudsvarianten, beoordeling onderhoudsvarianten. Per onderdeel wordt het eindresultaat vertoont. Voor extra toelichting zal per paragraaf worden verwezen naar de bijbehorende bijlages.

4.1. Programma van eisen

De bestaande damwanden in de haven van Tholen dienen te worden getoetst. Dit t.b.v. de restlevensduur bepaling van de damwanden. Voor deze toetsing is een programma van eisen benodigd. Dit programma van eisen bestaat uit directe eisen, randvoorwaarden, uitgangspunten en kade specifieke waardes waaraan de toetsing moet voldoen. Deze zullen hieronder worden opgesomd. Voor meer toelichting en de referenties bij de eisen wordt verwezen naar Bijlage C.

4.1.1. Eisen, randvoorwaarden en uitgangspunten

Eisen

- De damwand moet voldoen aan de zwaarste veiligheidsklasse (CC3/RC3)
- De damwand moet worden getoetst aan de hand van ontwerpbenadering 3
- De maximale bolderkracht is 104 kN
- De rekenwaarde van het moment (M_d) dient te worden getoetst aan de sterkte van de plank ($M_{u,red}$)
- De gordingen, bijbehorend aan de damwandconstructie dienen te worden getoetst
- De ankers dienen te worden getoetst
- De herverdelingscapaciteit bij ankeruitval dient te worden getoetst
- De maximale horizontale vervorming van de damwand is gelijk aan 1/200 van de maximale te keren hoogte
- De ankerstabiliteit moet worden geverifieerd volgen de methode van Kranz

Randvoorwaarden

- De hoogste waterstand in de haven van Tholen is NAP +0,15 m
- De laagste waterstand in de haven van Tholen is NAP -0,10 m
- Het water in de haven van Tholen kan worden geclassificeerd als licht brak water.
- De damwanden bij kade 1 en 3 bestaan uit BZ 350 profielen
- De damwand bij kade 2 bestaat uit BZ 17 profielen
- De gordingen bij kade 1 en 3 bestaan uit UNP 280 profielen
- De karakteristieke waarden van de grondeigenschappen zijn bepaald aan de hand van de NEN 9997
- Aan de waterzijde kade 1 en 3 is bodembescherming te vinden, bestaande uit Gobi matten
- De staalklasse van de ankers bij kade 1 en 3 is S355
- De ankers bij kade 1 hebben een doorsnede van 50mm
- De ankers bij kade 3 hebben een doorsnede van 55 mm

Uitgangspunten

- De maximale grondwaterstand is aangenomen is aangenomen op NAP + 1,0 m voor kade 1 en 3 en NAP + 1,5 m voor kade 2
- Aangenomen wordt dat het water in de haven vanaf 2031 zout water wordt
- 'De Morgenstond' wordt aangenomen als grootste schip in de haven en is daarmee maatgevend voor de bolderbelasting

- Voor de bovenbelasting worden twee waardes aangenomen: een uniforme bovenbelasting van 10kN/m² over de gehele landzijde of 15 kN/m² over 3 meter
- Er wordt aangenomen dat de damwanden zich van 1977 t/m 1986 in zout water hebben bevonden. In de periode daarop in licht brak water.
- De inspectie van IV infra wordt als leidend beschouwd voor de huidige staat van de damwand
- De reductie van de dikte van de damwand is bepaald aan de hand van kengetallen in de CUR 166
- Er wordt voor de damwanden in de haven van Tholen uitgegaan van uniforme corrosie
- De staalklasse voor de damwanden is aangenomen op S240
- De staalklasse voor de gordingen is aangenomen op S235
- De wapening in de betonnen deksloof is aangenomen op een oppervlakte van 900mm² en een staalklasse fe500b
- De betonklasse van de deksloof in kade 2 is aangenomen op C20/25
- De staalklasse van de ankers in kade 2 is aangenomen op Y 1770

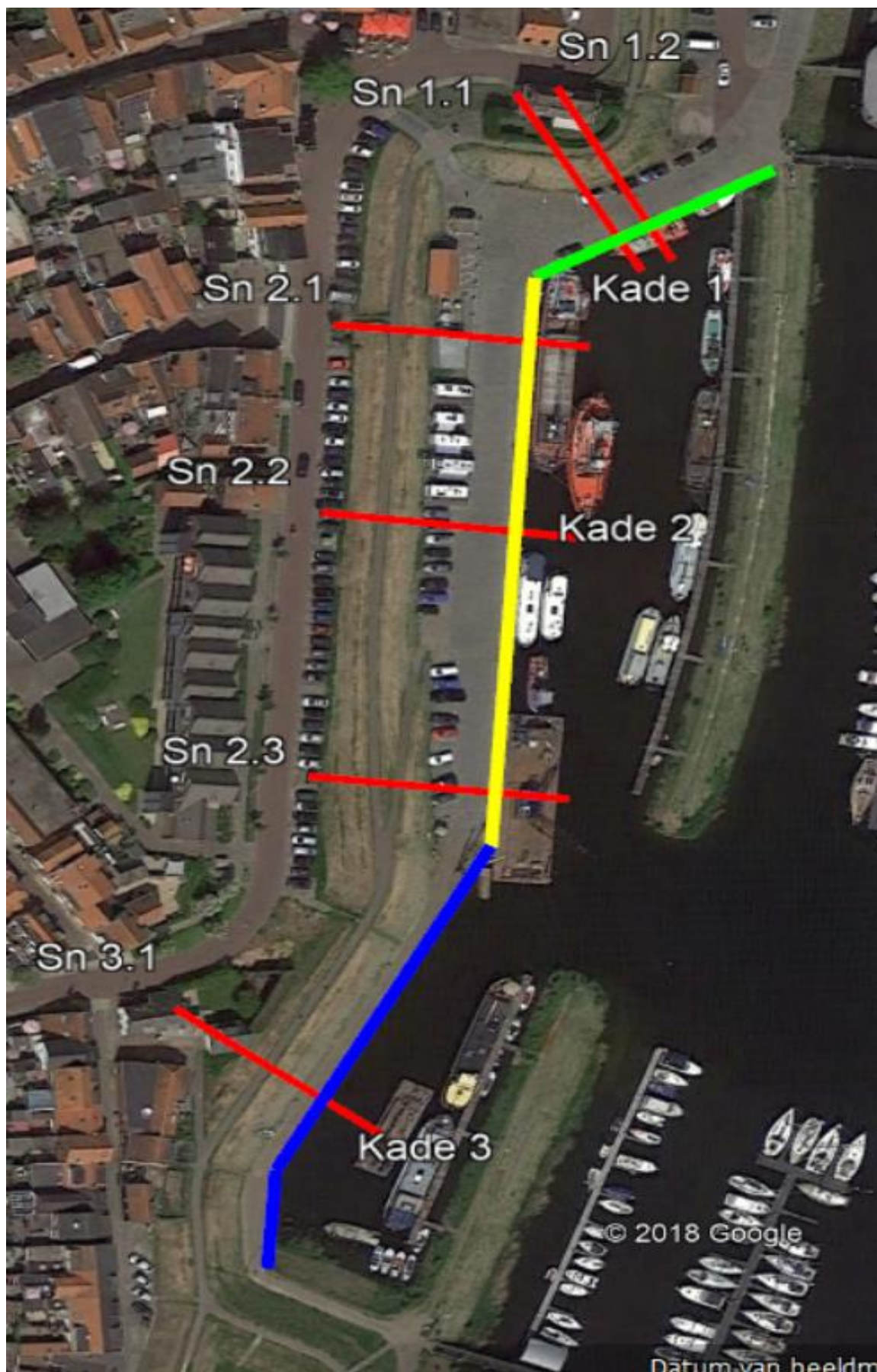
4.1.2. Waardes/eisen per kade

Tabel 14: Specifieke eisen/waardes per kade

Omschrijving	Eis/Waarde kade 1	Eis/Waarde kade 2	Eis/Waarde Kade 3
Bolderbelasting ter plaatse van snede 1	66 kN	52 kN	67
Bolderbelasting ter plaatse van snede 2	52 kN	52 kN	--
Bolderbelasting ter plaatse van snede 3	--	52 kN	--
Sterkte, toelaatbaar moment damwand (M_d)	317,3 kNm	333,5 kNm	317,26
Sterkte, toelaatbaar moment gording (M_d)	116,6kNm	160 kNm	116,6 kNm
Toelaatbare ankerkracht	669,2 kN	921 kN	812,8 kN
Maximale doorbuiging	22,5 mm	18,5 mm	22,5 mm

4.2. Toetsing damwand

Alle kades zijn getoetst aan de toelaatbare waardes (zie paragraaf 4.1). Het volledige toetsingsrapport met meer uitgebreide toelichting is terug te vinden in Bijlage C. In deze paragraaf zullen de resultaten worden besproken en de daaruit naar voren komende conclusies. Alle kades met de bijbehorende te toetsen snedes zijn terug te zien in Figuur 14. Aan de hand van het toetsen van de damwand wordt de restlevensduur bepaald van: de damwand, de gordingen en de ankers. De resultaten zullen hier per snede worden gegeven.



Figuur 14: Overzicht te toetsen snedes per kade

4.2.1. Kade 1

Voor kade 1 zijn twee sneden getoetst. Dit omdat op voorhand niet kan worden gezegd welke maatgevend is. De locatie van deze getoetste snedes is terug te vinden in Figuur 14. Alle andere gegevens, benodigd voor de toetsing van de snedes zijn terug te vinden in Bijlage C.

In Tabel 15, Tabel 16, Tabel 17 en Tabel 18 zijn de resultaten van de toetsingen per snede terug te vinden. Hierbij is de unity check gegeven. Deze kan worden bepaald door het maximaal optredende moment te delen door het gereduceerd toelaatbare moment. Daarnaast is ook de bijbehorende bepaalde restlevensduur gegeven.

Snede 1

Tabel 15: Resultaten toetsing Kade 1 snede 1

Onderdeel	Unity Check	Restlevensduur (jaren)
Damwand	0,47	44
Gording		
Algemene toetsing	0,50	Honderden jaren
Ankeruitval	3,79*	--
Ankers		
Algemene toetsing	1,00	0
Ankeruitval	1,1*	--
Kranz-stabiliteit	0,51	N.V.T.

***Nogmaals getoetst met behulp van Technosoft liggers**

Tabel 16: Hertoetsing met behulp van Technosoft liggers

Onderdeel	Unity Check	Restlevensduur (jaren)
Gording		
Ankeruitval	3,32	--
Ankers		
Ankeruitval	0,96	83

Snede 2

Tabel 17: Resultaten toetsing Kade 1 snede 2

Onderdeel	Unity Check	Restlevensduur (jaren)
Damwand	0,48	43
Gording		
Algemene toetsing	0,31	Honderden jaren
Ankeruitval	1,52*	--
Ankers		
Algemene toetsing	0,60	Honderden jaren
Ankeruitval	0,66	Honderden jaren
Kranz-stabiliteit	0,51	N.V.T.

***Nogmaals getoetst met behulp van Technosoft liggers**

Tabel 18: Hertoetsing met behulp van Technosoft liggers

Onderdeel	Unity Check	Restlevensduur (jaren)
Gording		
Ankeruitval	1,21	---

4.2.2. Kade 2

Voor kade 2 zijn drie sneden getoetst. Dit omdat op voorhand niet kan worden gezegd welke maatgevend is. De locatie van deze getoetste snedes is terug te vinden in Figuur 14. Alle andere gegevens, benodigd voor de toetsing van de snedes zijn terug te vinden in Bijlage C.

In Tabel 19, Tabel 20 en Tabel 21 zijn de resultaten van de toetsingen per snede terug te vinden. Hierbij is de unity check gegeven. Deze kan worden bepaald door het maximaal optredende moment te delen door het gereduceerd toelaatbare moment. Daarnaast is ook de bijbehorende bepaalde restlevensduur gegeven.

Snede 1

Tabel 19: Resultaten toetsing Kade 2 snede 1

Onderdeel	Unity Check	Restlevensduur (jaren)
Damwand	0,42	49
Gording		
Algemene toetsing	0,20	N.V.T. (Betonnen deksloof, geen stalen gording)
Ankeruitval	0,77	N.V.T. (Betonnen deksloof, geen stalen gording)
Ankers		
Algemene toetsing	0,39	Honderden jaren
Ankeruitval	0,45	Honderden jaren
Kranz-stabiliteit	0,68	N.V.T.

Snede 2

Tabel 20: Resultaten toetsing Kade 2 snede 2

Onderdeel	Unity Check	Restlevensduur (jaren)
Damwand	0,55	40
Gording		
Algemene toetsing	0,22	N.V.T. (Betonnen deksloof, geen stalen gording)
Ankeruitval	0,84	N.V.T. (Betonnen deksloof, geen stalen gording)
Ankers		
Algemene toetsing	0,43	Honderden jaren
Ankeruitval	0,49	Honderden jaren
Kranz-stabiliteit	0,97	N.V.T.

Snede 3

Tabel 21: Resultaten toetsing Kade 2 snede 3

Onderdeel	Unity Check	Restlevensduur (jaren)
Damwand	0,54	49
Gording		
Algemene toetsing	0,22	N.V.T. (Betonnen deksloof, geen stalen gording)
Ankeruitval	0,83	N.V.T. (Betonnen deksloof, geen stalen gording)
Ankers		
Algemene toetsing	0,43	Honderden jaren
Ankeruitval	0,48	Honderden jaren
Kranz-stabiliteit	0,93	N.V.T.

4.2.3. Kade 3

Voor kade 3 is één snede getoetst. Kade 3 is maar op één snede getoetst, aangezien de kade hetzelfde is over het verloop van de hele lengte. De locatie van deze getoetste snede is terug te vinden in Figuur 14. Alle andere gegevens, benodigd voor de toetsing van de snede zijn terug te vinden in Bijlage C.

In Tabel 22 en Tabel 23 zijn de resultaten van de toetsingen per snede terug te vinden. Hierbij is de unity check gegeven. Deze kan worden bepaald door het maximaal optredende moment te delen door het gereduceerd toelaatbare moment. Daarnaast is ook de bijbehorende bepaalde restlevensduur gegeven.

Snede 1

Tabel 22: Resultaten toetsing Kade 2 snede 1

Onderdeel	Unity Check	Restlevensduur (jaren)
Damwand	0,49	43
Gording		
Algemene toetsing	0,55	Honderden jaren
Ankeruitval	4,11*	--
Ankers		
Algemene toetsing	0,89	123
Ankeruitval	0,98	16
Kranz-stabiliteit	0,67	N.V.T.

*Nogmaals getoetst met behulp van Technosoft liggers

Tabel 23: Hertoets met behulp van Technosoft liggers

Onderdeel	Unity Check	Restlevensduur
Gording		
Ankeruitval	3,18	--
Anker		
Ankeruitval	0,76	Honderden jaren

4.2.4. Conclusie toetsing damwanden

Uit de toetsing kan worden geconcludeerd dat de damwandplanken nog voldoen aan de huidige norm. Hierbij varieert de restlevensduur tussen de 40 en 49 jaar. Hierbij moet worden aangetekend dat er aan de landzijde van de damwandplank is uitgegaan van de corrosiesnelheid bij ongeroerde schone grond. Hierbij is er uitgegaan de grondopbouw van de sondering. Deze grond is als ongeroerd te beschouwen. Echter is er wel sprake van een grindkoffer achter de damwand t.b.v. van drainage. Dit zou kunnen worden beschouwd als onverdichte aanvullingsgrond. Dit zou betekenen dat de corrosiesnelheid aan de landzijde tweemaal zo veel zal zijn. Dit vertaald zich in een vermindering van de restlevensduur van de damwandplank van circa 5 jaar. Voor de ankers en gordingen gaat dit om een vermindering van circa 30 tot 40 jaar.

De gordingen voldoen ook aan de huidige normering, wanneer ankeruitval niet wordt beschouwd. Hierbij hebben de gordingen nog een constructieve restlevensduur van honderden jaren. Als er sprake is van ankeruitval is de herverdelingscapaciteit van de gording niet voldoende bij de toetsingen van kade 1 en kade 3. De gordingen zullen dan niet meer constructief voldoen. Het risico op ankeruitval wordt niet als groot beschouwd. De ankers bevinden zich bij kade 1 en 3 minimaal één meter onder het maaiveld, waarbij de ankerwand zich in of nabij de achterliggende dijk bevindt. Het is niet aannemelijk dat er veel grondwerkzaamheden plaats vinden in de omgeving van de dijk, die dient als primaire waterkering.

De ankers voldoen aan de huidige normering. Daarbij is ook de herverdelingscapaciteit bij ankeruitval in beschouwing genomen. Hiervoor is voor kade 1 snede 1 een minder conservatieve toetsing uitgevoerd met behulp van Technosoft. Hier uit komt een restlevensduur van 83 jaar. De resultaten van de toetsing van de ankers zonder ankeruitval zijn gebaseerd op een meer conservatieve toetsing. Hierdoor wordt de 83 jaar beschouwd als de restlevensduur voor de ankers van kade 1 ter hoogte van snede 1. Enkele waardes bij andere kades en snedes liggen lager. Hier wordt ook 83 jaar als restlevensduur beschouwd, aangezien de restlevensduur van kade 1 snede 1 nog minder was bij de conservatieve toetsing.

Kijkend naar de resultaten van alle toetsingen, kan worden geconstateerd dat de restlevensduur van de damwandplanken leidend is voor de restlevensduur van de gehele kadeconstructie, wanneer er geen sprake is van ankeruitval.

4.3. Onderhoudsvarianten

Om te beoordelen of kathodische bescherming een economisch haalbare onderhoudsvariant voor de haven van Tholen is worden er diverse varianten vergeleken. Deze varianten zullen worden vergeleken op kosten t.o.v. van de levensduurverlenging. Hiervoor wordt de Netto Contante Waarde bepaald (NCW). Het gaat hierbij om de volgende vier varianten:

- Variant 1: Nieuwe damwand 2058
- Variant 2: Coaten 2031
- Variant 3: Kathodische bescherming; Opperingsanodes 2031
- Variant 4: Kathodische bescherming; Opgedrukte stroom 2031

De varianten staan hieronder toegelicht en uitgewerkt. Per variant zijn er vier sub-varianten ter vergelijking van de kosten. Bij deze sub-varianten is rekening gehouden met verschillende levensduurverlenging als gevolg van de onderhoudsmethodes. Ook zijn er verschillende tijdstermijnen voor de kosten in acht genomen. Deze verschillende sub-varianten worden verder toegelicht in paragraaf 4.4. Het gaat hierbij om vier sub-varianten per hoofdvariant. Dit geeft een totaal van zestien varianten.

4.3.1. Variant 1: nieuwe damwand 2058

Naast het toepassen van onderhoudsmethodes als coaten of een vorm van kathodische bescherming, kan er ook voor worden gekozen om geen levensduurverlengende maatregel toe te passen. Het gevolg hiervan is dat er eerder een nieuwe damwand zal moeten worden geplaatst.

Aangezien uit de toetsing is gebleken dat de restlevensduur van de damwand 40 jaar is, moet voor het jaar 2059 een nieuwe damwand worden geplaatst. Voor deze variant wordt 2059 aangehouden als vervangingsjaar voor de damwanden. Hierbij is er voor gekozen om alle damwanden op één moment te vervangen, zodat er niet enkele jaren later weer werkzaamheden hoeven plaats te vinden.

Bij de diverse sub-varianten worden verschillende levensduren voor de damwand (50 of 70 jaar) in acht genomen. Ook worden de varianten op langere termijn onderzocht. Hierbij wordt een langere periode beschouwd, waarin twee maal vervanging van de damwand is meegenomen.

4.3.2. Variant 2: coaten 2031

Een mogelijke conserveringsmethode is coaten. Hierbij wordt voor deze variant de lagen opbouw aan gehouden, zoals deze is beschreven in Tabel 9 in het theoretisch kader. Voor deze variant wordt er uitgegaan van een coating over het gehele oppervlak van de damwanden. Om deze werkzaamheden te kunnen voltooien, kan de ruimte voor de kades droog worden gezet. Dit kan doormiddel van een droogzetkuip. Een andere optie is werken met behulp van een schip en duikers.

De theoretische levensduurverlenging door het toepassen van een coating wordt ingeschat op minimaal 10 jaar. Hierbij is uitgegaan van de informatie die uit het overleg met een deskundige bij Rijkswaterstaat naar voren kwam (zie Bijlage D). Bij de verschillende sub-varianten zal 10 of 15 jaar worden toegepast als levensduurverlenging door coating.

Aangezien er nu nog coating aanwezig is op de damwand, wordt er gekozen om een nieuwe coating toe te passen vanaf 2031. Ook is 2031 een geschikt jaar, aangezien er vanaf dit jaar sprake is van zout water.

Het aantal vierkante meters te coaten gebied is terug te vinden in Tabel 24.

Tabel 24: Totaal te coaten oppervlak

Kade	Lengte (m)	Kerende hoogte (m)	Te coaten gebied (m ² /m)	Totaal te coaten oppervlak (m ²)
Kade 1	48	4,5	1,44	311,
Kade 2	119	3,00 (gemiddeld)	1,44	514
Kade 3	98	4,5	1,44	635
Totaal				1460

4.3.3. Variant 3: kathodische bescherming; opofferingsanodes 2031

Als onderhoudsmethode kan o.a. één van de vormen van kathodische bescherming worden gekozen: opofferingsanodes. Voor deze variant zullen aluminium anodes worden aangebracht op de kade. Er kan worden gekozen tussen aluminium anodes, zink anodes of magnesium anodes. Hierbij worden zink anodes in de praktijk amper nog toegepast, vanwege strengere milieunormen. Magnesium anodes worden voornamelijk in extreme situaties of bijv. bij offshore installaties toegepast. Hierdoor is uiteindelijk de keuze gevallen op aluminium anodes. Deze zullen worden geplaatst in 2031. Vanaf dit jaar zal het water naar alle waarschijnlijkheid zout zijn, waardoor de anodes meer zullen renderen. Daarbij is het ook de verwachting dat er sprake zal zijn van een klein getij. Dit vertaalt zich in een hogere waterstand. Hierdoor is er sprake van een groter nat oppervlak op de damwand. Hierdoor heeft de kathodische bescherming een groter oppervlak om te beschermen. Voor het gebied boven de waterlijn heeft kathodische bescherming geen effect. In deze variant wordt er op dit gedeelte van de damwand geen onderhoudsmethode toegepast.

De levensduur van opofferingsanodes wordt voor deze variant ingeschat op minimaal 25 jaar. Dit is een getal wat in de praktijk vaak voorkomt. Hierbij hangt dit uiteraard wel af van de grootte van de anodes. Ook volgt dit uit overleggen met specialisten (zie Bijlage D). Voor de sub-varianten ter beoordeling wordt ook meegenomen dat de anodes wellicht langer meegaan. Daarom wordt er ook gerekend met een levensduurverlenging van 30 jaar als gevolg van de opofferingsanodes.

Door de anodes gaat er stroom lopen van de anodes naar de damwand. Aan de hand van de hoeveelheid benodigde stroom, kan de hoeveelheid anodes worden bepaald. Voor deze variant is een inschatting gemaakt van het benodigd aantal aluminium anodes. Hiervoor is het oppervlak bepaald, waarop de anodes worden toegepast. Hierbij gaat het om het oppervlak dat onder de hoogste waterstand ligt. Hierbij is uitgegaan van de huidige hoogste waterstand, aangezien een toekomstige hoge waterstand op het moment niet te voorspellen is. Deze waterstand is NAP +0,15 m. Het totaal te beschermen damwandoppervlak door kathodische bescherming is terug te vinden in Tabel 25 en Tabel 26. Hierbij is een opdeling gemaakt tussen oppervlak wat in contact staat met het zeewater en oppervlak dat zich onder het bodemniveau aan de waterzijde bevindt.

Tabel 25: Totaal te beschermen damwandoppervlak in contact met zout water

Kade	Lengte (m)	Hoogte bodem tot hoogste waterstand (m)	Lengtefactor (m/m)	Totaal te beschermen damwandoppervlak (m ²)
Kade 1	48	2	1,44	138
Kade 2	119	3,15	1,44	540
Kade 3	98	2	1,44	282
Total				960

Tabel 26: Totaal te beschermen damwandoppervlak onder bodemniveau

Kade	Lengte (m)	Bodemniveau waterzijde (mNAP)	Inheidiepte damwand (mNAP)	Lengtefactor (m/m)	Totaal te beschermen damwandoppervlak (m ²)
Kade 1	48	-1,85	-6,65	1,44	332
Kade 2	119	-3,00 (gemiddeld)	-8,75 (gemiddeld)	1,44	985
Kade 3	98	-1,85	-8,65	1,44	960
Totaal					2277

Aan hand van het staaloppervlak kan de benodigde hoeveelheid stroom worden ingeschat. Voor staaloppervlak dat in contact staat met het bodemoppervlak geldt een waarde van 20mA/m². Voor staaloppervlak in contact met zeewater wordt een onderscheid gemaakt tussen de stroombehoefte aan het begin, de gemiddelde stroombehoefte en de eind waarde. Hierbij zijn dit de volgende waarden van toepassing (DNVGL, 2017; Gulikers, 2000):

- i_{begin} = 200 mA/m²
- $i_{\text{gemiddeld}}$ = 100 mA/m²
- i_{eind} = 130 mA/m²

Deze waarden gelden voor een gematigde temperatuur en voor dieptes tot 30 meter. Aan de hand van deze waarden kan de totale stroombehoefte worden berekend.

Bij de bepaling van de totale stroombehoefte kan ook een waarde in acht worden genomen voor de coating die aanwezig is op de damwand. Deze factor wordt in dit geval op 1,0 aangehouden. Dit houdt in dat de beschadigingsgraad van de huidige al aangebrachte coating 100% is. Dit is niet het geval, maar ten behoeve van een objectieve vergelijking wordt er vanuit gegaan dat er geen coating aanwezig is op de damwand. Ook gaat het bij deze variant om het jaar 2031. Er zal dan dus sowieso minder over zijn van de huidige coating dan nu.

De stroombehoefte kan nu worden bepaald:

- Staaloppervlak in contact met zout water
 - $i_c \text{ begin}$ = $200 \times 960 \times 1,0 = 192000 \text{ mA} = 192 \text{ A}$
 - $i_c \text{ gemiddeld}$ = $100 \times 960 \times 1,0 = 96000 \text{ mA} = 96 \text{ A}$
 - $i_c \text{ eind}$ = $130 \times 960 \times 1,0 = 124800 \text{ mA} = 124,8 \text{ A}$
- Staaloppervlak in contact met bodemoppervlak
 - $i_c = 20 \times 2277 \times 1,0 = 45540 \text{ mA} = 45,5 \text{ A}$

De volledige stroombehoefte kan worden bepaald door de beide waarden op te tellen:

- $i_c \text{ begin}$ = $192 + 45,5 = 237,5 \text{ A}$
- $i_c \text{ gemiddeld}$ = $96 + 45,5 = 141,5 \text{ A}$
- $i_c \text{ eind}$ = $124,8 + 45,5 = 170,3 \text{ A}$

Aan de hand van de stroombehoefte, kan het aantal anodes worden bepaald. Hierbij is het materiaal aluminium. De volgende gegevens gelden voor aluminium:

- Elektrochemische effectiviteit: ϵ = 2500 Ah/kg
- Ontwerp potentiaal: E = -1050 mV
- Soortelijke massa aluminium: 2800 kg/m³
- Anoderendementfactor: u = 0,85
- Aangehouden levensduur: t_r = 25 jaar

Aan de hand van deze gegevens kan de benodigde hoeveelheid anodemassa worden berekend:

- $M_{Al} = i_c \text{ gemiddeld} \times t_r \times (365,25 \times 24) / (u \times \epsilon)$
- $M_{Al} = 141,5 \times 25 \times (365,25 \times 24) / (0,85 \times 2500) = 14593 \text{ kg}$

In de praktijk wordt vaak een marge van 20% over deze waarde aangehouden, wat de volgende waarde oplevert:

- 17944 kg

Nu de hoeveelheid anodemassa bekend is, kan het aantal anodes worden bepaald. Hierbij wordt er aangehouden dat er gemiddeld in elke kas een anode aanwezig moet zijn. De damwand is 265 meter lang, waarbij ook elke meter een kas aanwezig is.

Uitgaande van deze ene anode per kas. Geeft dit $17944/265 = 67 \text{ kg/ per anode}$.

Bij de berekeningen voor de anodes is een anoderendementfactor van 0,85 aangehouden. Deze factor hangt af van de vorm van de anode. In een zout milieu worden vaak kleinere anodes toegepast. In zoet milieu vaak langere anodes. Aangezien het hier om een zout milieu gaat, zullen er kleinere anodes worden toegepast. Hierbij is de anoderendementfactor 0,85.

4.3.4. Variant 4: kathodische bescherming; opgedrukte stroom 2031

Als laatste variant wordt opgedrukte stroom toegepast als onderhoudsmethode. Hierbij is een spanningsbron benodigd. Voor deze variant is het havenkantoor bij de haven aangehouden als locatie voor de spanningsbron. Er is voor het havenkantoor gekozen, aangezien op deze locatie de stroomkast beschermd zou kunnen staan.

Voor het ontwerp van het opgedrukte stroom systeem is het toegepaste systeem in Stavenisse als referentie aangehouden. Voor het opgedrukte stroom systeem in Stavenisse gelden de volgende waardes: een spanning van 2,79 V en een elektrische stroom van 8,20 A. Bij deze variant is het opgedrukte stroom door 7 staven bevestigd aan de damwanden. Onder aan deze staven loopt een anodendraad horizontaal voorlangs de kade, zodat de stroom zich kan verplaatsen over de gehele kade.

De situatie in Tholen is vergelijkbaar, maar niet identiek. De stroombehoefte voor het opofferingsysteem is hetzelfde als voor de variant met opofferingsanodes (zie paragraaf 4.3.3), dus:

- $i_c \text{ gemiddeld} = 141,5 \text{ A}$

Naast de gemiddelde stroombehoefte is ook de maximale stroombehoefte relevant. Dit voor de keuze van de anodes voor het opgedrukte stroomsysteem. Deze is ook hetzelfde als voor de opofferingsanodes (zie paragraaf 4.3.3):

- $i_c \text{ eind} = 170,3 \text{ A}$

Voor deze variant wordt er uitgegaan van *Mixed Metal oxide* anodes (MMO anodes) Deze anode heeft de capaciteit om aan de maximale stroombehoefte te voldoen. Voor het opgedrukte stroomsysteem geldt over het algemeen een levensduur van minimaal 25 jaar in de praktijk (zie Bijlage D). Bij de sub-varianten ter beoordeling van de varianten is gerekend met 25 jaar en 30 jaar.

4.4. Beoordeling onderhoudsvarianten

De varianten worden met elkaar vergeleken door een kostenoverzicht. Er zal daarvoor een vergelijking tussen meerdere sub-varianten worden gemaakt. Per variant zijn er 4 sub-varianten. Hierbij is uitgegaan van andere levensduren voor de onderhoudsmethodes en/of een andere totale levensduur van de damwandconstructie. Dit kan worden beschouwd als een gevoeligheidsanalyse over de berekening van de kosten.

Hierbij zal voor elke sub-variant de Netto Contante Waarde (NCW) worden bepaald. Hiervoor is een disconteringsvoet (ook wel rente of index) aangehouden, om de berekende prijzen te vertalen naar de Netto Contante Waarde. Voor de disconteringsvoet is een waarde van 2% aangehouden. Deze index is gebaseerd op de huidige markt en gebaseerd op informatie van de afdeling financiën van de gemeente Tholen. Alle prijzen zijn exclusief BTW. In de deze paragraaf zullen de resultaten van de vergelijking tussen de onderhoudsvarianten worden gegeven. De berekening is terug te vinden in de Excelsheet in Bijlage E.

4.4.1. Variant 1: nieuwe damwand 2058

Voor variant 1 zijn er vier sub-varianten:

- Variant 1A-1
- Variant 1A-2
- Variant 1B-1
- Variant 1B-2

De uiteindelijke kosten van alle varianten zijn terug te vinden in paragraaf 4.4.5 in Tabel 27. Algemene kosten die van toepassing zijn op alle sub-varianten van variant 1 zijn (gebaseerd op overleg met specialist bij Rijkswaterstaat (zie bijlage D)):

- € 5000/m¹ damwand

Hieronder worden de verschillende varianten toegelicht.

Variant 1A-1

Bij variant 1A-1 is er uitgegaan van één nieuwe damwand. Deze levert 50 jaar levensduurverlenging op. Dit wordt beschouwd als de minimale levensduur van een damwand. Deze wordt bij deze variant geplaatst in 2059. Dit jaar is gebaseerd op de toetsing van de bestaande damwand. In totaal geeft dit een levensduur van minimaal 90 jaar voor de kadeconstructie.

Variant 1A-2

Variant 1A-2 is in de basis hetzelfde als variant 1A-1. Echter is er hier uitgegaan van een levensduur van 70 jaar voor de damwand. Dit brengt de totale levensduur voor de kadeconstructie op minimaal 110 jaar. De gemiddelde onderhoudskosten zijn hier per jaar dus minder dan bij variant 1A-1, aangezien dezelfde prijs meer levensduurverlenging oplevert. Er is bij deze sub-variant uitgegaan van een langere levensduur, aangezien 50 jaar kan worden gezien als een minimale levensduur. Het is dus goed mogelijk dat een nieuwe damwand langer mee gaat. Dit is erg afhankelijk van de lokale omstandigheden door de jaren heen.

Variant 1B-1

Bij variant 1B-1 is er uitgegaan van een langere tijdsperiode. Hierbij is uitgegaan van een tijdspan van minimaal 140 jaar. Dit betekent dat er na 90 jaar nogmaals een damwand wordt geplaatst. Zodoende is deze variant uiteraard duurder. Dit komt zowel door de langere tijdspan, als ook door de kosten voor een damwand die verder in de toekomst nog hoger liggen. Dit vanwege de jaarlijkse indexatie met 2 procent, waardoor de Netto Contante Waarde toeneemt.

Variant 1B-2

Variant 1B-2 is in de basis hetzelfde als variant 1B-1. Echter wordt bij deze variant (net zoals bij variant 1A-2) uitgegaan van een langere levensduur voor een nieuwe damwand. Deze levensduur is 20 jaar meer (70 in totaal). Aangezien bij deze variant van twee damwanden achter elkaar wordt uitgegaan, geeft dit een langere levensduur van plus 40 jaar. Dit maakt de totale levensduur van de kadeconstructie minimaal 180 jaar.

4.4.2. Variant 2: coaten 2031

Voor variant 2 zijn er vier sub-varianten:

- Variant 2A-1
- Variant 2A-2
- Variant 2B-1
- Variant 2B-2

De uiteindelijke kosten van alle varianten zijn terug te vinden in paragraaf 4.4.5 in Tabel 27. Algemene kosten die van toepassing zijn op alle sub-varianten van variant 2 zijn (gebaseerd op overleg met specialist bij Rijkswaterstaat (zie bijlage D)):

- €90/m² te coaten oppervlak
- €3000 per dag per duiker
- €2000 per dag per werkschip

Hieronder zal de variatie in varianten worden toegelicht.

Variant 2A-1

Bij variant 2A-1 wordt er uitgegaan van een levensduur van 10 jaar voor een coating. Hierbij wordt elke 10 jaar coating toegepast, tot circa dezelfde levensduur is bereikt als die bij variant 1A-1 (90 jaar). 10 jaar wordt hier aangehouden, omdat dit een minimale levensduur is die vaak in de praktijk terug komt. De coating wordt toegepast vanaf 2031. Dit omdat er nu nog coating aanwezig is op de damwand. Ook omdat het water vanaf dat jaar zout is. Hierdoor heeft de coating een groter effect. Deze variant geeft een totale levensduur voor de kadeconstructies van minimaal 92 jaar.

Variant 2A-2

Variant 2A-2 heeft dezelfde opzet als variant 2A-1. Echter wordt er hier van uitgegaan dat de coating langer meegaat. Daarom wordt er met een levensduur van 15 jaar gerekend voor de coating. Hierdoor hoeft er minder vaak gecoat te worden en zijn de kosten dus lager dan bij variant 2A-1. Er wordt bij deze variant 15 jaar aangehouden, aangezien 10 jaar wordt beschouwd als een minimum voor de levensduur van de coating. Het is dus mogelijk dat de coating langer mee zal gaan. De totale levensduur van de kades is minimaal 102 jaar. Dit is om en nabij hetzelfde als de 110 jaar bij variant 1A-2, zodat de vergelijking met deze variant kan worden gemaakt.

Variant 2B-1

Bij variant 2B-1 wordt een langere levensduur dan bij variant 2A-1 beschouwd. Hierbij wordt 140 jaar (zie variant 1B-1) aangehouden als referentie. Er wordt bij deze variant (net zoals bij variant 2A-1) uitgegaan van 10 jaar levensduurverlenging als gevolg van de coating. De uiteindelijke levensduur van de kadeconstructie is minimaal 142 jaar.

Variant 2B-2

Variant 2B-2 gaat uit van de levensduur die volgt uit variant 1B-1 (180 jaar). Hierbij wordt er voor de coating gerekend met 15 jaar als levensduur. De uiteindelijke levensduur van de kadeconstructie is minimaal 177 jaar bij deze variant.

4.4.3. Variant 3: kathodische bescherming; opofferingsanodes 2031

Voor variant 3 zijn er vier sub-varianten:

- Variant 3A-1
- Variant 3A-2
- Variant 3B-1
- Variant 3B-2

De uiteindelijke kosten van alle varianten zijn terug te vinden in paragraaf 4.4.5 in Tabel 27. Algemene kosten die van toepassing zijn op alle varianten 3 zijn (gebaseerd op overleg met specialisten bij een aannemer die kathodische bescherming toepassen (zie Bijlage D):

- €5/kg voor materiaal anodes
- €100/per stuk voor aanbrengen anodes
- €750/per jaarlijkse inspectie

Hieronder zullen alle sub-varianten van variant 3 worden toegelicht.

Variant 3A-1

Bij variant 3A-1 wordt er uitgegaan van een levensduur van 25 jaar voor de opofferingsanodes. De anodes zullen dus elke 25 jaar moeten worden vervangen. Dit wordt bij deze variant gedaan tot de levensduur van circa 90 jaar is bereikt voor de kadeconstructies. Dit om de vergelijking te kunnen maken met variant 1A-1 (90 jarige levensduur). De anodes worden aangebracht in 2031. Dit omdat het effect van de anodes groter is in zout water, vanwege de betere elektrische geleiding in zout water. In totaal is de levensduur voor de kades bij deze variant minimaal 112 jaar.

Variant 3A-2

Variant 3A-2 is op dezelfde wijze opgebouwd als variant 3A-1. Echter wordt er hier van uitgegaan dat de anodes langer zullen meegaan. Er wordt uitgegaan van een levensduur van 30 jaar voor de anodes. Hierdoor moeten de anodes minder vaak worden vervangen en zijn de totale kosten dus lager. Er wordt bij deze variant 30 jaar aangehouden, aangezien 25 jaar een minimale levensduur is. Het is dus goed mogelijk dat de anodes in de praktijk langer mee zullen gaan. De totale levensduur van de kadeconstructie is bij deze variant minimaal 102 jaar. Dit is om en nabij hetzelfde als de 110 jaar van variant 1A-2. Zodoende kan er een goede vergelijking worden gemaakt tussen de varianten.

Variant 3B-1

Bij variant 3B wordt een langere levensduur dan bij variant 3A-1 beschouwd. Hierbij wordt er uitgegaan van een benadering van 140 jaar (zie variant 1B-1) als levensduur voor de gehele kadeconstructie. Er wordt bij deze variant (net zoals bij variant 3A-1) uitgegaan van 25 jaar levensduurverlenging als gevolg van de opofferingsanodes. De uiteindelijke levensduur is minimaal 162 jaar voor de gehele kadeconstructie.

Variant 3B-2

Variant 3B-2 gaat uit van de levensduur die volgt uit variant 1B-1 (180 jaar). Hierbij wordt er voor de anodes gerekend met een levensduur van 30 jaar. De uiteindelijke minimale levensduur van de kades is 192 jaar.

4.4.4. Variant 4: kathodische bescherming; opgedrukte stroom 2031

Voor variant zijn er vier sub-varianten:

- Variant 4A-1
- Variant 4A-2
- Variant 4B-1
- Variant 4B-2

De uiteindelijke kosten van alle varianten zijn terug te vinden in paragraaf 4.4.5 in Tabel 27. Algemene kosten die van toepassing zijn op alle varianten 4 zijn (gebaseerd op overleg met specialisten bij een aannemer die kathodische bescherming toepassen (zie Bijlage D):

- €425/m¹ als indicatie voor een opgedrukt stroom systeem
- €750/per jaarlijkse inspectie
- €0,25/kWh voor stroomkosten

Hieronder zullen alle sub-varianten van variant 4 worden toegelicht.

Variant 4A-1

Bij variant 4A-1 wordt er uitgegaan van een levensduur van 25 jaar voor het opgedrukte stroom systeem. Het systeem zal dus elke 25 jaar (deels) moeten worden vervangen. Dit wordt bij deze variant gedaan tot de levensduur ongeveer hetzelfde is als van variant 1A-1 (90 jaar). Het opgedrukte stroomsysteem wordt aangebracht in 2031. Dit omdat het effect van het systeem dan groter is door beter elektrische geleiding in zout water. In totaal is de levensduur voor de kades bij deze variant minimaal 112 jaar.

Variant 4A-2

Variant 4A-2 is op dezelfde wijze opgebouwd als variant 4A-1. Hier is echter uitgegaan van een langere levensduur voor het opgedrukte stroom systeem. Er wordt namelijk uitgegaan van 30 jaar i.p.v. 25 jaar. Hierdoor moet het systeem minder vaak worden vervangen en zijn de totale kosten dus lager. Er wordt hier van 30 jaar uitgegaan, aangezien 25 jaar kan worden beschouwd als een minimale levensduur. Het is dus goed mogelijk dat het systeem in de praktijk langer mee zal gaan. De totale levensduur van deze variant is minimaal 102 jaar voor de kadeconstructie. Dit is om en nabij hetzelfde als de 110 jaar van variant 1A-2.

Variant 4B-1

Bij variant 4B-1 wordt er een langere levensduur dan bij variant 3A-1 beschouwd. Hierbij wordt 140 jaar gezien als de indicatie voor deze variant (zie variant 1B-1). Er is bij deze variant (net zoals bij variant 4A-1) uit gegaan van 25 jaar levensduurverlenging als gevolg van het opgedrukte stroom systeem. De uiteindelijke totale levensduur is minimale 162 jaar voor de kade.

Variant 4B-2

Variant 4B-2 gaat uit van een levensduur die volgt uit variant 1B-1 (180 jaar). Hierbij wordt er voor het opgedrukte stroomsysteem gerekend met een levensduur van 30 jaar. De uiteindelijk levensduur is minimaal 192 jaar voor de kades.

4.4.5. Keuze variant

Voor elke sub-variant is de Netto Contante Waarde berekend. Deze zijn terug te vinden in Tabel 27. Aan de hand van deze kosten kan worden geconcludeerd dat variant 4 met het opgedrukte stroom systeem de goedkoopste variant is. Hierbij is het kosten verschil met variant 3 (opofferingsanodes) minimaal. Als er wordt uitgegaan van een scenario waarbij de opofferingsanodes langer zouden meegaan dan verwacht, zou deze variant per jaar levensduurverlenging bijvoorbeeld al voordeliger zijn. Wat echter niet is meegenomen in de variantenstudie is het feit dat een opgedrukt stroom systeem naar alle waarschijnlijkheid niet compleet hoeft te worden vervangen. Hierbij is het meer waarschijnlijk dat het gaat om de vervanging van specifieke onderdelen. Dit is goedkoper dan de vervanging van een geheel systeem. Zodoende is het aannemelijk dat de daadwerkelijke kosten nog lager uit zullen vallen bij de onderhoudsvariant met opgedrukte stroom.

Verder kan worden geconcludeerd dat coaten kostentechnisch het minst rendabel is. Het is daarom niet aan te raden om in de toekomst coaten toe te passen als onderhoudsmethode.

Kijkend naar de kosten moet wel worden benoemd dat de kosten hier zijn bepaald aan de hand van kengetallen. De daadwerkelijke kosten kunnen hierdoor per variant juist hoger of lager uitvallen. Het algemene beeld wat ontstaat door deze kosten vergelijking is wel onderscheidend genoeg om duidelijke conclusies te kunnen trekken.

Naast de kosten heeft een opgedrukt stroom systeem nog een voordeel t.o.v. onderhoud door middel van opofferingsanodes. De belasting op het milieu is minder bij een opgedrukt stroom systeem t.o.v. opofferingsanodes. Bij opofferingsanodes zal het aluminium van de anodes zich namelijk mengen met het water. Bij een opgedrukt stroom systeem is het verlies van materiaal minimaal en daarmee dus ook de negatieve belasting op het lokale milieu. Dit in tegenstelling tot een systeem met opofferingsanodes.

Ook heeft een opgedrukt stroom systeem voordelen, op het gebied van esthetiek. Het systeem zit merendeels onder water. Hierdoor hangt het niet in het zicht en verstoort het niet het algemene beeld van de haven. Als er opofferingsanodes zouden worden geplaatst, zijn deze over de hele damwand terug te zien. Voornamelijk met het toekomstige lage water (als er weer sprake zal zijn van een getij). Dit geeft esthetisch gezien een minder beeld ten opzichte van een opgedrukt stroom systeem.

Naast deze argumenten zijn er ook extra punten die de keuze voor één van de vormen van kathodische bescherming kunnen beargumenteren. Door het toepassen van kathodische bescherming (variant 3 of 4) kan toekomstige biocorrosie verminderd worden of geheel worden tegengegaan. Aangezien het water in de haven naar alle waarschijnlijkheid zout zal worden, zal dit ook nieuwe flora en fauna aantrekken. Door deze nieuwe flora en fauna zou mogelijk biocorrosie kunnen ontstaan (zie paragraaf 2.2.2). Kathodische bescherming kan deze biocorrosie tegen gaan door de hoge zuurgraad die ontstaat als gevolg van kathodische bescherming.

Ook komt er met het nieuwe zoute milieu een klein getij in de haven. Hierdoor zal de hoogste waterstand vermoedelijk hoger komen te liggen. Hierdoor heeft de kathodische bescherming effect op een groter nat oppervlak.

In Bijlage F is een mogelijk ontwerp van het opgedrukte stroom systeem terug te vinden.

Tabel 27: Netto Contante Waarde van alle varianten

		Nieuwe damwand(en)	Coaten	Opofferingsanodes	Opgedrukte stroom
		Variant 1A-1	Variant 2A-1	Variant 3A-1	Variant 4A-1
Circa 90 jaar levensduur conservatieve inschatting kosten	Levensduur	90	92	112	112
	Netto Contante Waarde	€ 2.868.286,82	€ 4.651.518,43	€ 1.699.804,85	€1.675.710,86
	Gemiddeld per jaar	€ 31.869,85	€ 50.559,98	€ 15.176,83	€ 14.961,70
	Gemiddeld per maand	€ 2.655,82	€ 4.213,33	€ 1.264,74	€ 1.246,81
		Variant 1A-2	Variant 2A-2	Variant 3A-2	Variant 4A-2
Circa 110 jaar levensduur niet- conservatieve inschatting kosten	Levensduur	110	102	102	102
	Netto Contante Waarde	€ 2.868.286,82	€ 3.756.629,56	€ 1.110.862,11	€ 1.099.048,73
	Gemiddeld per jaar	€ 26.075,33	€ 36.829,70	€ 10.890,80	€ 10.774,99
	Gemiddeld per maand	€ 2.172,94	€ 3.069,14	€ 907,57	€ 897,92
		Variant 1B-1	Variant 2B-1	Variant 3B-1	Variant 4B-1
Circa 140 jaar levensduur conservatieve inschatting kosten	Levensduur	140	142	162	162
	Netto Contante Waarde	€ 10.588.533,28	€ 14.550.309,72	€ 5.035.627,95	€ 4.964.250,11
	Gemiddeld per jaar	€ 75.632,38	€ 102.466,97	€ 31.084,12	€ 30.643,52
	Gemiddeld per maand	€ 6.302,70	€ 8.538,91	€ 2.590,34	€ 2.553,63
		Variant 1B-2	Variant 2B-2	Variant 3B-2	Variant 4B-2
Circa 180 jaar levensduur niet conservatieve inschatting kosten	Levensduur	180	177	192	192
	Netto Contante Waarde	€ 14.340.166,95	€ 19.184.588,19	€ 7.712.863,49	€ 7.630.841,62
	Gemiddeld per jaar	€ 79.667,59	€ 108.387,50	€ 40.171,16	€ 39.743,97
	Gemiddeld per maand	€ 6.638,97	€ 9.032,29	€ 3.347,60	€ 3.312,00

5. Conclusie en aanbevelingen

In het hoofdstuk conclusie en aanbevelingen zullen de conclusies behorend bij de gegeven resultaten worden opgesomd. Vervolgens zullen aan de hand van de gemaakte conclusies diverse aanbevelingen worden gegeven.

5.1. Conclusies

Naar aanleiding van deskresearch, locatiebezoeken en eerder uitgevoerde inspecties kan worden geconcludeerd dat zowel de kadeconstructies als ook de omgeving nog in goede staat zijn. Dit komt voornamelijk doordat de kadeconstructies jarenlang in licht brak water hebben gestaan. Hierdoor is er geen sprake van extreme corrosie op de kades in de haven van Tholen. De kades bestaan uit damwanden van BZ profielen, waar hier en daar oppervlakkige corrosie is terug te vinden. Daarbij zijn kade 1 en 3 opgebouwd uit een BZ 350 profiel met daarachter een gording en ankerwand. Kade 2 uit een BZ 17 profiel met daarop een betonnen deksloof. De verankering bestaat uit een schroefinjectieanker.

Op de damwanden heeft door de loop van de jaren corrosie plaatsgevonden. Voorbeelden van diverse vormen van corrosie zijn: algemene (elektrochemische) corrosie, putcorrosie, corrosie als gevolg van zwerfstromen, biocorrosie. Hierbij is er geen indicatie van één van de laatste drie vormen van corrosie. Er is dus alleen sprake van algemene elektrochemische corrosie. Deze corrosie heeft een negatief effect op de dikte van de damwand. Er is in het verleden niet gemeten hoe dik de damwand nog is. De dikteafname is dan ook bepaald aan de hand van kengetallen in de CUR 166.

Tijdens het onderzoek zijn verschillende onderhoudsmethoden getest op technische en economische haalbaarheid. Deze methodes waren: niet conserveren (nieuwe damwand), coaten, opofferingsanodes, opgedrukte stroom systeem. Deze methodes zijn allen mogelijk op bestaande damwanden. Een indicatie van de bijbehorende kosten is naar voren gekomen na overleg met specialisten (zie Bijlage D).

Aan de hand van de eisen (zie Bijlage B) is bepaald of de damwand nog constructief voldoet en wat de restlevensduur van de damwand is. Hierbij is de damwandplank zelf getoetst, alsook de achterliggende gordingen en ankers. Uit de toetsing is geconcludeerd dat de damwanden constructief gezien nog minimaal 40 jaar meegaan. Hierbij is rekening gehouden met het feit dat het water naar alle waarschijnlijkheid in 2031 zout wordt in de haven van Tholen.

Kijkend naar de economische aspecten, kan worden geconcludeerd dat opgedrukte stroom, één van de kathodische beschermingsmethodes, financieel gezien het meest voordelig is (zie Tabel 27). Hierbij moet worden aangetekend dat het kosten verschil met opofferingsanodes (een andere kathodische beschermingsmethode) minimaal is. Hierbij is niet meegenomen dat bij vervanging van een opgedrukt stroom systeem het niet waarschijnlijk is dat alle onderdelen moeten worden vervangen. Dit leidt tot een extra besparing in kosten. Ook zijn er naast de economisch aspecten technische aspecten, die in het voordeel spreken van het opgedrukte stroom systeem en kathodische bescherming in het algemeen als onderhoudsmethode voor de damwanden. In 2031 wordt het water in de haven namelijk naar alle waarschijnlijkheid zout. Dit vergroot de effectiviteit van kathodische bescherming. Ook zorgt dit zoute water ervoor dat er nieuwe flora en fauna aanwezig kan zijn in de haven. Deze nieuwe flora en fauna zou kunnen leiden tot biocorrosie. Kathodische bescherming kan biocorrosie voorkomen door het zure milieu dat ontstaat als gevolg van kathodische bescherming. Met het zout worden van het water in 2031, ontstaat ook een klein getij. Hierdoor komt de hoogste waterstand vermoedelijk hoger te liggen. Zodoende ontstaat er meer nat oppervlak op de damwand en is er dus meer oppervlak waarop kathodische bescherming effect heeft.

De hoofdvraag van dit onderzoek was:

- *In hoeverre is het technisch en economisch haalbaar om kathodische bescherming toe te passen als levensduurverlengende onderhoudsmethode voor stalen damwanden in de haven van Tholen?*

Als antwoord op deze vraag kan worden gesteld dat het technisch en economisch zeer goed haalbaar is om kathodische bescherming toe te passen als levensduurverlengende onderhoudsmethode voor stalen damwanden in de haven van Tholen.

5.2. Aanbevelingen

Naar aanleiding van het uitgevoerde onderzoek zijn diverse aanbevelingen naar voren gekomen. Deze zullen hieronder worden opgesomd met daaronder toelichting.

- Toepassen opgedrukte stroom systeem 2031

Aan de hand van de toetsing van de damwanden is te constateren dat de damwanden minimaal nog 40 jaar meegaan. Als onderhoud voor de damwanden is het opgedrukte stroom systeem economische en technisch gezien het meest voordelige onderhoudssysteem. 2031 is een goed jaar voor de toepassing van dit systeem. Dit omdat er van af dit jaar sprake is van zout water in de haven, wat de effectiviteit van de kathodische bescherming vergroot. Indien er in een ander jaar sprake is van verzilting van het water, is het aan te bevelen om het systeem in dit jaar toe te passen.

Er bestaat ook de mogelijkheid om het onderhoud uit te stellen tot na 2031. Echter zullen de kosten dan hoger zijn, aangezien de Netto Contante Waarde per jaar toeneemt door de jaarlijkse indexatie over de waarde. De levensduurverlenging als gevolg van het opgedrukte stroom systeem is minimaal 25 jaar. Hierbij maakt niet uit, wanneer dit wordt toegepast. Zodoende is het aan te raden dit zo vroegtijdig toe te passen vanaf het moment dat er sprake is van zout water.

Indien het opgedrukte stroom systeem wordt toegepast is het aan te raden om te bepalen hoe het systeem moet worden aangelegd bij kade 2. Bij kade 1 en 3 kan de benodigde bekabeling voor het systeem achter de kade worden geplaatst. Bij kade 2 is dit ook mogelijk, echter moet wel worden onderzocht op welke wijze dit het meest effectief kan worden gedaan. Boven op kade 2 ligt namelijk het betonnen loopvlak waar rekening mee moet worden gehouden. Ook moet de kabel aan de landzijde door de stalen damwand van kade 1 heen om terecht te komen achter kade 2.

- Diktemeting uitvoeren op de damwanden

De restlevensduur van de bestaande stalen damwanden is nu bepaald aan de hand van richtlijnen uit de CUR 166. Deze waarde geven een indicatie van de dikteafname, echter hoeft deze niet overeen te komen met de realiteit. De dikteafname is van groot belang voor het bepalen van de restlevensduur van de damwand. Een andere dikteafname dan de aangenomen waarden uit de CUR 166, leidt ook tot een andere restlevensduur. Het is daarom aan te raden om een diktemeting te laten uitvoeren.

- Onderzoek naar kraan op de kade

Op kade 3, de meest zuidelijke kade, bevindt zich een permanente kraan voor het hijsen van zaken van het water naar de landzijde en andersom. Deze lijkt niet meer in gebruik te zijn. Het is aan te bevelen om te onderzoeken of deze kraan nog wordt gebruikt. Indien deze kraan nog wel wordt gebruikt, vertaalt zich dit in een extra belasting op kade 3. Dit kan mogelijk een negatief effect hebben op de restlevensduur van deze kade.

- Kosten specificeren door middel van offerte aanvraag

De huidige kosten zijn gebaseerd op kengetallen, gegeven door experts. Deze kunnen worden beschouwd als een goede richtlijn voor de kosten. Dit geldt zeker voor het maken in een onderscheiding tussen de diverse onderhoudsmethodes. Voor de bepaling van de daadwerkelijke kosten is het echter aan te raden om offertes aan te vragen voor beide systemen van kathodische bescherming. Dit heeft twee grote voordelen. Enerzijds zijn de kosten die met deze offertes worden bepaald meer gespecificeerd op de specifieke locatie i.p.v. algemene kengetallen. Zodoende zal deze prijs een nog eerlijker beeld geven van de daadwerkelijke kosten voor kathodische bescherming in de haven van Tholen. Anderzijds heeft het aanvragen van specifieke offertes zin, aangezien het verschil in kosten minuscule is tussen de beide onderhoudsvarianten van kathodische bescherming.

- Vervolgonderzoek op het gebied van milieu vervuiling

In de huidige maatschappij wordt het steeds van groter belang om rekening te houden met de invloed van keuzes op de omgeving en het milieu. Dit is bij dit onderzoek niet in beschouwing genomen. Het is interessant om dit in een vervolgonderzoek wel mee te nemen. Hierbij kan bijvoorbeeld de benodigde CO² uitstoot worden beschouwd, die nodig is voor het uitvoeren van beide kathodische beschermingssystemen.

Referenties

- Albers, T. S. (2018). *Oude Haven Tholen Eindrapportage vervangingswerkzaamheden*. Sliedrecht. Arbed. (z.d.). Arbed Profiel-tabel.
- Boogaard, A. (z.d.). ms Morgenstond. Geraadpleegd 10 juni 2019, van <http://www.morgenstondtholen.nl/msmorgenstond.htm>
- Centrale dienst Noord-Zeeland. (1952). *Maken van een betonnen havenbeschoeiing*. Tholen: Gemeente Tholen.
- CUR. (1999). *CUR-aanbeveling 69*. Gouda.
- CUR Bouw & Infra. (2012). *166 Damwandconstructies*. Gouda: Stichting CURNET.
- Defranq, J. (2015). Bacteriën kunnen een rol spelen bij corrosieprocessen. *Land+Water*, 1/2(februari).
- Dietz, G. (1977). Haventerrein Tholen Damwandverankering. Rijkswaterstaat directie bruggen.
- DNVGL. DNVGL-RP-B401 Cathodic protection design (2017).
- Feijtel, A. D. (1979a). *Aanpassing Haven van Tholen situatie baggerwerk en Damwand*. De Bilt: Grontmij.
- Feijtel, A. D. (1979b). *Aanpassing haven van Tholen Steigerdetails en Damwand*. De Bilt: Grontmij.
- Google. (2018). Google earth pro.
- Grontmij n.v. (1980a). *Grondmechanisch rapport betreffende damwanden langs de haven van Tholen*. De Bilt.
- Grontmij n.v. (1980b). *Sonderingen en boringen ten behoeve van de damwanden langs de haven van Tholen*. De Bilt.
- Gulikers, J. J. W. (2000). *Kathodische beschermingssystemen voor stalen damwanden*. Utrecht.
- Hakkers. (2016). *Tholen Keermiddel en dijkverzwaring Botshoofd*. Werkendam.
- Jong, L. de. (2017). *Aanvulling Natuureffectstudie en MER*. Amersfoort.
- Jongbloed, P., & van der Toorn, A. (2004). -. *Land + Water*, 5.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat. (2006). *Hydraulische Randvoorwaarden primaire waterkeringen categorie c*. Den Haag.
- Nederlands Normalisatie-instituut. Eurocode 3: Ontwerp en berekening van staalconstructies (2006). Nederland.
- Nederlands Normalisatie-instituut. Eurocode 7: Geotechnische ontwerp van constructies - Deel 1: Algemene regels (2017). Nederland.
- Rijkswaterstaat. (z.d.-a). Oesterdam. Geraadpleegd 24 april 2019, van <https://www.rijkswaterstaat.nl/water/waterbeheer/bescherming-tegen-het-water/waterkeringen/deltawerken/oesterdam.aspx>
- Rijkswaterstaat. (z.d.-b). Zoutgehalte - Rijkswaterstaat Waterinfo. Geraadpleegd 25 april 2019, van <https://waterinfo.rws.nl/#!/kaart/zouten/>
- Rijkswaterstaat. (2017). *Richtlijnen Vaarwegen 2017 Kader verkeerskundig vaarwegontwerp*. Rijswijk.

Rijkswaterstaat Bouwdienst. (2006). *Richtlijnen voor het Ontwerpen van Betonnen Kunstwerken*. Utrecht.

Rijkswaterstaat, & Centrale Informatievoorziening (CIV). (2019). *Vaarwegen in Nederland*. Utrecht.

Rijkswaterstaat Deltadienst. (1967). *Haven van Tholen Profielen*. Rijkswaterstaat Deltadienst.

Rijkswaterstaat Dienst Zeeland. (2011). *Notitie Werkateliers Haven van Tholen*. Tholen.

SBRCURnet, Municipality Rotterdam, & Port of Rotterdam. (2013). *Quay Walls*. (J. G. De Gijt & M. L. Broeken, Red.) (2th ed.). Rotterdam: CRC Press/Balkema.

US Army Corps of Engineers. (1998). *Corrosion rates of ferrous metals associated with zebra mussel infestation*. Vicksburg: Zebra Mussel Research Program.

van der Heide. (z.d.). *Opgedrukt stroomsysteem*. Geraadpleegd 22 juli 2019, van <https://www.vanderheide.nl/diensten/beschermen/opgedrukt-stroomsysteem>

Van der Straaten. (2017). *Rapport geotechnisch bodemonderzoek*. Hansweert.