



# Differentiatie in betrouwbaarheid van kadeconstructies

**Afstudeerrapport**

Mike Smit

14-06-2016

Versie 1.0



## TITELBLAD

|                     |   |                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                     |
|---------------------|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Titel               | : | Differentiatie voor kademuurconstructies in de betrouwbaarheidsklasse van de Eurocode                                                                                                                                     |                                                                                                                                     |
| Datum publicatie    | : | 14 Juni 2016                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                     |
| Status              | : | Definitieve eindrapportage                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                     |
| Onderwijsinstelling | : | Hogeschool Rotterdam                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                     |
| Instituut           | : | Instituut voor Gebouwde Omgeving                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                     |
| Opleiding           | : | Civiele Techniek                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                     |
| Afstudeerbedrijven  | : | Havenbedrijf Rotterdam<br>Wilhelminakade 909<br>3072 AP Rotterdam<br>+31 (0) 10 - 2521010<br><a href="mailto:info@portofrotterdam.com">info@portofrotterdam.com</a>                                                       | Arcadis<br>Lichtenauerlaan 100<br>3062 ME Rotterdam<br>+31 (0) 10 - 253 222<br><a href="mailto:info@arcadis.nl">info@arcadis.nl</a> |
| Bedrijfsbegeleiders | : | Ir. A. A. Roubos (Alfred)<br><a href="mailto:Aa.roubos@portofrotterdam.com">Aa.roubos@portofrotterdam.com</a><br><br>Ing. H. Voogt (Henk)<br><a href="mailto:H.Voogt@portofrotterdam.com">H.Voogt@portofrotterdam.com</a> | Ir. S. Azzouzi (Saïd)<br><a href="mailto:Said.azzouzi@arcadis.com">Said.azzouzi@arcadis.com</a>                                     |
| Docent begeleider   | : | Ir. H. J. Dommershuijzen (Harry)<br><a href="mailto:H.j.dommershuijzen@hr.nl">H.j.dommershuijzen@hr.nl</a>                                                                                                                |                                                                                                                                     |
| Tweede lezer        | : | Ing. A. Westerduin (Aart)<br><a href="mailto:A.westerduin@hr.nl">A.westerduin@hr.nl</a>                                                                                                                                   |                                                                                                                                     |
| Auteur              | : | Dhr. M. Smit (Mike)                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                     |
| Studentnummer       | : | 0850116                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                     |
| E-mail              | : | <a href="mailto:smitmike123@gmail.com">smitmike123@gmail.com</a><br><a href="mailto:0850116@hr.nl">0850116@hr.nl</a>                                                                                                      |                                                                                                                                     |
| Telefoonnummer      | : | +31 (0) 6 - 21147002                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                     |



## SUMMARY

Both Port of Rotterdam and Arcadis Design and Consultancy feel that the current frameworks for assessing the reliability of quay wall, as these are applied in the current Eurocode, are not entirely fitting. The classification of reliability in the used framework is often subjective and not adjusted for marine infrastructure, such as quay walls, jetties and dolphins.

The main goal of this study is to investigate the usefulness of a differentiation of the Eurocodes. If a differentiation proves useful, further investigation into the form of the differentiation will be held. This is established by the following research question: *“In what way can an optimisation of the reliability classes of the Eurocode be implemented, in which the consequences of failure are taken into consideration?”*.

In order to answer the question, various sub-studies have been conducted. This includes a literature review and interviews with professionals in the field of quay walls. This shows there are discrepancies between the standards and guidelines. It also appears that the applied standards, wherein the reliability classes are suggested, have been withheld for a relative long period; this as it wasn't considered as fitting for marine structures. The different failure mechanisms of quay wall constructions each have different possible effects, according to the respondents of the interviews and questionnaires.

Subsequently a modified framework for assessing the reliability of quay walls has been proposed. This assessment framework has been tested by a smaller group of experienced professionals. This shows not only that through this interpretation, the professionals differ in opinion of the reliability of quay wall, but also that different failure mechanisms and effects play a key role.

The influences for a reference project of the modified framework have been examined. This shows that in this case, the marginal construction cost of the quay walls with regards to the reliability are relatively small. This indicates that a small investment in the reliability of quay wall results in a significant increase in reliability, with fewer unexpected costs that arise from possible failure mechanisms of quay wall.

The outcome of the sub-studies regarding the modified framework show that a differentiation in the reliability classes would contribute to ensure that the quay walls can be designed with a better economical understanding and insight. In addition, the economic optimum seems to indicate that the present construction is designed to be rather conservative than optimistic.

A first exploration with a questionnaire was conducted. The interpretation of the questionnaire, in conjunction with the economic optimum, seems to indicate that quay walls are underestimated with regard to the target reliability index.

On this basis, it is recommended to set up a follow-up study in which the same method is expanded. The linking of these results with other reference projects and locations could further support the results of this study.

## SAMENVATTING

Binnen zowel het Havenbedrijf Rotterdam als het Ingenieursbureau Arcadis leeft het gevoel dat het huidige toetsingskader voor de betrouwbaarheid van kademuurconstructies, zoals deze wordt gehanteerd in de Eurocode, niet geheel passend is. De classificatie van betrouwbaarheid is in deze optiek vaak subjectief en niet aangepast voor constructies in de maritieme infrastructuur, zoals kademuurconstructies, jetties en dolphins.

Het doel van dit onderzoek is het nut van een differentiatie van de Eurocode te onderzoeken. Indien het blijkt van de differentiatie, zal deze onderbouwd worden. Hiervoor is de volgende onderzoeksvraag opgesteld: *“Op welke manier kan het raamwerk uit de Eurocode ten aanzien van betrouwbaarheid worden geoptimaliseerd voor het beoordelen en classificeren van kadeconstructies, rekening houdend met de consequenties van falen”*.

Om tot een antwoord van deze onderzoeksvraag te komen zijn verschillende deelonderzoeken gehouden, waaronder een literatuuronderzoek en interviews met ervaren experts. Hieruit blijkt dat onderlinge discrepanties zitten in de normen en richtlijnen. Ook blijkt dat de toegepaste normen, waarin de betrouwbaarheidsklassen worden aangehouden, lang is afgehouden omdat deze niet passend werd geacht voor kademuurconstructies. De verschillende manieren waarop kademuurconstructies kunnen falen heeft verschillende effecten, zo blijkt uit de interviews en vragenlijsten die zijn afgenomen met de ervaren experts.

Aan de hand van de bevindingen is een aangepast toetsingskader voorgesteld. Dit toetsingskader is middels de bovengenoemde vragenlijst ingevuld door een kleinere groep van ervaren experts. Uit de resultaten blijkt niet alleen de ervaren experts andere meningen hebben over de betrouwbaarheidsklassen van kademuurconstructies, maar ook dat verschillende faalmechanismen en de effecten hiervan een grote rol in spelen in de betrouwbaarheid van kademuren.

Voor een referentieproject is gekeken wat de invloeden van het nieuwe toetsingskader zijn. Hieruit blijkt dat in dit geval de marginale kosten van de kademuurconstructies met betrekking tot de betrouwbaarheid relatief laag zijn. Dit duidt aan dat bij het referentieproject een kleine investering in de kademuurconstructie zorgt voor een relatief hogere betrouwbaarheid, met mogelijk minder onverwachte faalkosten tijdens de levensduur.

Uit de antwoorden van de deelonderzoeken blijkt dat een differentiatie in de betrouwbaarheidsklassen er voor zou kunnen zorgen dat met een beter inzicht kan worden ontworpen, wat als resultaat heeft dat kademuurconstructies met meer economisch inzicht kunnen worden ontworpen. Hoewel dit één referentieproject betreft, lijkt het berekende economisch optimum aan te duiden dat momenteel deze constructie eerder te conservatief dan te optimistisch is ontworpen.

De resultaten van de vragenlijst in combinatie met het economisch optimum lijken aan te duiden dat momenteel de betrouwbaarheid van kademuurconstructies mogelijk onderschat wordt. De constructies zijn dus mogelijk te conservatief ontworpen.

Op basis hiervan wordt aanbevolen om een vervolgonderzoek in te stellen waarbij eenzelfde methode breder en diepgaander wordt uitgezet. Koppeling van de resultaten met andere referentieprojecten en -locaties zouden de resultaten uit dit onderzoek verder kunnen ondersteunen.



## VOORWOORD

Voor u ligt het afstudeerrapport van het onderzoek ‘*Differentiatie in betrouwbaarheid van kadeconstructies*’. Het onderzoek naar de relatie tussen betrouwbaarheid en kademuurconstructies is uitgevoerd in samenwerking met het Havenbedrijf Rotterdam en Arcadis. Dit rapport is geschreven in het kader van mijn afstuderen van de opleiding Civiele Techniek aan de Hogeschool Rotterdam en in opdracht van het Havenbedrijf Rotterdam. Gedurende de periode van februari 2016 tot en met juni 2016 is het onderzoek uitgevoerd.

De betrouwbaarheid van kademuurconstructies is een relevant en actueel onderwerp binnen de constructieve waterbouw. Het gevoel dat verificatie van betrouwbaarheid onvoldoende of niet optimaal is, wordt over het algemeen breed gedragen binnen de sector. Uit interesse naar de toepasbaarheid van het huidige beoordelingskader, en nieuwsgierigheid naar mogelijke verbeteringen, is dit onderzoek opgezet.

Aan het onderzoek is met veel plezier en toewijding gewerkt en mede mogelijk gemaakt door de kennis en hulp van verschillende personen. Mijn dank gaat dan ook uit naar iedereen, bij zowel het Havenbedrijf Rotterdam, Arcadis, als bij de andere betrokken firma’s, die dit onderzoek mede mogelijk hebben gemaakt.

Graag wil ik de betrokkenen bij het onderzoek bedanken. Dit onderzoek is grotendeels door de gemeenschappelijke inbreng mogelijk gemaakt. Ook wil ik mijn begeleiders bedanken, Alfred Roubos, Saïd Azzouzi, Henk Voogt en Harry Dommershuijzen. Door jullie kennis en de vakinhoudelijke passie die jullie met mij deelden, is dit onderzoek mede tot stand gekomen.

Rotterdam, 14 Juni 2016

Mike Smit



Figuur 1: Sluisjesdijk en Waalhaven Noordzijde met de Nieuwe Maas links en Waalhaven rechts. De rand tussen stad en haven. (Swart)





## INHOUDSOPGAVE

|           |                                                                                                             |           |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>  | <b>Inleiding .....</b>                                                                                      | <b>1</b>  |
| 1.1       | Nut en noodzaak .....                                                                                       | 1         |
| 1.2       | Probleembeschrijving .....                                                                                  | 1         |
| 1.3       | Onderzoeksvraag en deelvragen .....                                                                         | 2         |
| 1.4       | Doelstelling .....                                                                                          | 2         |
| 1.5       | Globale werkwijze .....                                                                                     | 3         |
| 1.6       | Afbakening .....                                                                                            | 4         |
| 1.7       | Leeswijzer .....                                                                                            | 4         |
| <b>2</b>  | <b>Kademuren en betrouwbaarheid .....</b>                                                                   | <b>5</b>  |
| 2.1       | Verschillende typen kademuurconstructies .....                                                              | 5         |
| 2.2       | De typen in Rotterdam .....                                                                                 | 6         |
| 2.3       | Betrouwbaarheid .....                                                                                       | 7         |
| <b>3</b>  | <b>De verhoudingen van normen en richtlijnen .....</b>                                                      | <b>9</b>  |
| 3.1       | De verhoudingen van de internationale normen en richtlijnen .....                                           | 9         |
| 3.2       | Nederlandse normen en handboeken .....                                                                      | 10        |
| 3.3       | Onderlinge verhoudingen van de betrouwbaarheid .....                                                        | 11        |
| <b>4</b>  | <b>Alternatief toetsingskader .....</b>                                                                     | <b>13</b> |
| 4.1       | Reden tot aanpassing .....                                                                                  | 13        |
| 4.2       | Basis van het toetsingskader .....                                                                          | 13        |
| 4.3       | Opbouw van het alternatief toetsingskader .....                                                             | 14        |
| 4.4       | Afwijkingen en de betrouwbaarheidsindex .....                                                               | 16        |
| <b>5</b>  | <b>Maatgevende oorzaken van falen .....</b>                                                                 | <b>17</b> |
| 5.1       | Interviews .....                                                                                            | 17        |
| 5.2       | Faalmechanismen .....                                                                                       | 17        |
| 5.3       | Oorzaken van opgetreden situaties .....                                                                     | 19        |
| 5.4       | Oorzaken van verwachte situaties .....                                                                      | 21        |
| 5.5       | Bevindingen .....                                                                                           | 21        |
| <b>6</b>  | <b>Maatgevende gevolgen .....</b>                                                                           | <b>23</b> |
| 6.1       | Vragenlijst .....                                                                                           | 23        |
| 6.2       | Resultaten vragenlijst .....                                                                                | 24        |
| <b>7</b>  | <b>Eerste verkenning van de economische effecten van een differentiatie op de<br/>betrouwbaarheid .....</b> | <b>27</b> |
| 7.1       | Referentieproject .....                                                                                     | 27        |
| 7.2       | Uitgevoerde berekeningen .....                                                                              | 29        |
| 7.3       | Indicatie van de relatie tussen kosten en betrouwbaarheid .....                                             | 30        |
| 7.4       | Verkenning van de kosten van het uitvallen van een ligplaats .....                                          | 31        |
| <b>8</b>  | <b>Conclusie .....</b>                                                                                      | <b>34</b> |
| <b>9</b>  | <b>Aanbevelingen .....</b>                                                                                  | <b>40</b> |
| <b>10</b> | <b>Bibliografie .....</b>                                                                                   | <b>43</b> |



## INDEX

### Figuren

|                                                                                                                                                                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figuur 1: Sluisjesdijk en Waalhaven Noordzijde met de Nieuwe Maas links en Waalhaven rechts. De rand tussen stad en haven (Swart).                                                                          | VII |
| Figuur 2: Realisatie kademuur van de SIF-terminal, te Rotterdam (Frolke).                                                                                                                                   | 2   |
| Figuur 3: Verschillende typen kademuurconstructies, van links naar rechts: een gewichtsmuur, een damwandconstructie, een overdekt talud op palen en een constructie met een ontlastvloer. (SBRCURnet, 2013) | 6   |
| Figuur 4: Verdeling van de typen kademuurconstructies in beheer van het Havenbedrijf Rotterdam.                                                                                                             | 6   |
| Figuur 5: Systeembetrouwbaarheid volgens partiële veiligheidsfactoren.                                                                                                                                      | 8   |
| Figuur 6: Schematische weergaven van de faalmechanismen van kademuurconstructies. Hierin is (A) een dam- of combiwandconstructie en (B) een constructie met een ontlastvloer.                               | 18  |
| Figuur 7: Maatgevende oorzaken van falen of afkeuren volgens de interviews.                                                                                                                                 | 19  |
| Figuur 8: Maatgevende gevolgen van falen of afkeuren volgens de interviews.                                                                                                                                 | 20  |
| Figuur 9: Verwachte oorzaken van falen of afkeuren volgens de interviews.                                                                                                                                   | 21  |
| Figuur 10: Opgetreden methoden van falen volgens de interviews.                                                                                                                                             | 22  |
| Figuur 11: Verwachte methoden van falen volgens de interviews                                                                                                                                               | 22  |
| Figuur 12: Luchtfoto van de aanleg van de LNG Breakbulk Terminal (Smiet).                                                                                                                                   | 27  |
| Figuur 13: Opbouw van het berekeningsmodel, D-Sheet Piling.                                                                                                                                                 | 29  |
| Figuur 14: Relatie tussen de kosten en de betrouwbaarheidsindex voor de gemiddelde constructiekosten, indirecte downtime kosten met een aanname van €150.000 per dag en de som hiervan.                     | 32  |

### Tabellen

|                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabel 1: Onderlinge verhoudingen van de betrouwbaarheid.                                                           | 12 |
| Tabel 2: Voorgesteld toetsingskader.                                                                               | 15 |
| Tabel 3: Gerelateerde betrouwbaarheidsindexen aan het toetsingskader.                                              | 16 |
| Tabel 4: Gezamenlijke uitkomsten van de vragenlijst voor sociale consequenties van falen en menselijke veiligheid. | 24 |
| Tabel 5: Gezamenlijke uitkomsten van de vragenlijst voor sociaaleconomische consequenties van falen.               | 25 |
| Tabel 6: Gezamenlijke van de uitkomsten vragenlijst voor milieukundige consequenties van falen.                    | 26 |
| Tabel 7: Verhouding tussen de maatgevende ankerkrachten, momenten en gebruikte betrouwbaarheidsindex.              | 29 |
| Tabel 8: Berekende kosten in relatie tot de betrouwbaarheidsniveau's uit het toetsingskader.                       | 30 |
| Tabel 9: De relatie tussen de grof geschatte faalkanskosten en de betrouwbaarheidsindex.                           | 31 |
| Tabel 10: Gevoeligheidsanalyse van de invloed op de betrouwbaarheid (-optimum).                                    | 32 |





# 1 INLEIDING

## 1.1 Nut en noodzaak

Het Havenbedrijf Rotterdam N.V. heeft naar eigen schatting 71,5 strekkende kilometer aan kademuurconstructies in bezit. Deze haveninfrastructuur bestaat uit een enorme diversiteit qua vormen en bouwjaren.

Als eigenaar is het Havenbedrijf Rotterdam N.V. verantwoordelijk voor adequate havenconstructies en de instandhouding hiervan. Zeker om een optimale benutting van het havengebied te verwezenlijken, is het van belang dat de betrouwbaarheid van deze constructies voldoende is en realistisch wordt benaderd en beoordeeld. Veel maritieme infrastructuur nadert namelijk het einde van de ontwerplevensduur, wat overigens nog niet wil zeggen dat dit het einde levensduur is, waardoor de komende jaren geavanceerde constructieve (probabilistische) beoordelingen voorzien worden indien met de levensduur op een veilige en verantwoorde manier wil verlengen.

Wanneer de betrouwbaarheid van de constructies wordt overschat, zou het mogelijk zijn dat de constructies uitvallen terwijl dit niet voorzien is, of kan een onveilige situatie ontstaan. Voldoende (menselijke-) veiligheid van de kadeconstructie in een operationeel havengebied wordt als zeer belangrijk ervaren. Als de betrouwbaarheid onderschat wordt zullen constructies onnodig worden afgekeurd. Hierdoor worden kadeconstructies niet meer optimaal gebruikt, of moeten nieuwe constructies worden verwezenlijkt terwijl de vroegere constructie nog voldoet.

In beide gevallen zullen extra, dan wel onverwachte of onnodige, kosten zijn gemoeid. Om deze kosten te voorkomen en veiligheid te garanderen is het van belang dat het toetsingskader goed is afgestemd op de werkelijkheid. Aangezien het verschil tussen de verwachtingen die in een toetsingskader zijn benoemd en de daadwerkelijke prestaties van kademuren aanzienlijke financiële gevolgen kan hebben.

## 1.2 Probleembeschrijving

In de huidige normen en richtlijnen wordt momenteel gesteld dat de consequenties van falen van civiele en bouwkundige constructies gerelateerd zijn aan enerzijds menselijk leed en anderzijds economische verliezen. De vraag is of er geen verdere differentiatie nodig is in dit toetsingskader voor het toetsen en beoordelen van kademuren.

Volgens de huidige ontwerpregels voor civiele en bouwkundige constructies moet een constructie, of een onderdeel daarvan, worden getoetst op basis van het risico- en consequentieprofiel voor wat betreft de economische schade in het geval van falen.

De vraag die kan worden gesteld of deze aanpak zonder meer kan worden toegepast op bestaande kademuurconstructies, of dat hiervoor een aangepast toetsingskader nodig is.

### 1.3 Onderzoeksvraag en deelvragen

Voor het uitvoeren van het onderzoek luidt de hoofdonderzoeksvraag als volgt:

- *Op welke manier kan het raamwerk uit de Eurocode ten aanzien van betrouwbaarheid worden geoptimaliseerd voor het beoordelen en classificeren van kadeconstructies, rekening houdend met de consequenties van falen?*

De deelvragen zijn als volgt:

- *Hoe verhouden de nationale- en internationale ontwerpmethodes (voor kademuurconstructies) zich tot elkaar ten aanzien van betrouwbaarheid van constructies?*
- *Wat zijn de maatgevende oorzaken waarom een kademuurconstructie niet meer aan de gewenste functionaliteit kan voldoen?*
- *Wat zijn de maatgevende gevolgen van het optreden van een faalmechanisme bij een kademuurconstructie?*
- *Wat zijn de economische effecten van een differentiatie van het toetsingskader?*

### 1.4 Doelstelling

Met het uitvoeren van dit onderzoek wordt in kaart gebracht of het huidige toetsingskader, zoals het momenteel middels de betrouwbaarheidsklassen in de Eurocode geschiedt, passend is voor kademuren in het Rotterdams havengebied; Of dat hier een verdere differentiatie in nodig is ten aanzien van betrouwbaarheid, zoals dat in andere normen en richtlijnen reeds is opgenomen.

Mocht blijken dat er verdere differentiatie nodig is dan zal een alternatief toetsingskader worden voorgesteld voor het beoordelen van de betrouwbaarheid van kademuren.



Figuur 2: Realisatie kademuur van de SIF-terminal, te Rotterdam (Frolke).

## 1.5 Globale werkwijze

Om vast te stellen op wat voor een manier een optimalisatie middels een differentiatie kan worden gemaakt, is het onderzoek verdeeld in een aantal deelonderzoeken. Het onderzoek bestaat in hoofdlijnen uit de hieronder genoemde punten, opvolgend verder toegelicht.

- Een literatuurstudie naar de huidige nationale- en internationale normen en richtlijnen. De nadruk ligt op relevantie voor kademuurconstructies, en verificatie van de betrouwbaarheid;
- Interviews met deskundigen/experts op het gebied van kademuurconstructies in Rotterdam.
- Er is een vragenlijst opgesteld en gehouden met een groep ervaren experts, waarbij het voorgestelde toetsingskader, voor een referentieproject, is ingevuld naar visie van experts;
- Er is voor het eenzelfde referentieproject per betrouwbaarheidsklasse uit het voorgestelde toetsingskader een doorsnede berekend; Hierbij zijn de marginale kosten van de doorsneden van de kademuurconstructie bepaald.

Het onderzoek bevat een literatuurstudie naar de huidige nationale en internationale normen en richtlijnen op het gebied van betrouwbaarheid. Door de literatuurstudie wordt inzicht verkregen in de ontwikkelingen van de gebruikte methodieken voor het ontwerpen en realiseren van kademuren. Door deskundigen op het gebied van Rotterdamse kademuren te interviewen is een overzicht van de verwachten en daadwerkelijk opgetreden faalmechanismen van kademuren gemaakt.

Een voorgesteld toetsingskader is getoetst middels het uitvoeren van de twee opvolgende deelvragen. Hierbij is het toetsingskader toegepast bij een referentieproject door deze in de vorm van een vragenlijst door experts te laten bepalen. Ook zijn voor het referentieproject de marginale kosten bepaald, met als resultaat dat een eerste inzicht is verworven naar de daadwerkelijke effecten van het toepassen van het toetsingskader.

Tevens is, hoewel dit buiten de originele scope van het onderzoek viel, een globale inschatting gemaakt van de gerelateerde faalkosten van de kademuurconstructie het betreffende referentieproject. Hiermee is, in combinatie met de kosten van de verschillende betrouwbaarheidsniveaus, een schatting van het mogelijk economisch optimum bepaald van de betrouwbaarheidsklasse van het referentieproject.

De oorspronkelijke opzet van het onderzoek bevatte tevens een onderzoek naar de ontwikkelingen omtrent de ontwerpmethoden en veiligheidsfilosofieën van kademuren in Rotterdam. Dit was onderdeel van het onderzoek aangezien een van de doelen was om bestaande kademuren bij dit onderzoek te betrekken. Uiteindelijk de keuze is gemaakt deze constructies niet verder bij het onderzoek te betrekken. Hierdoor is dit deel van het onderzoek minder relevant gebleken. Om deze reden zijn enkel nog de relevante delen van dit deelonderzoek aan dit verslag bijgevoegd. Het onderzoek naar deze ontwerpmethoden is echter nog wel bijgevoegd aan het bijlagenverslag van dit onderzoek. Voor verdere interesse wordt u naar de bijlagen verwezen.

## 1.6 Afbakening

Bij het opstellen van een gedifferentieerd toetsingskader is enkel gebruik gemaakt van gegevens uit relevante normen en richtlijnen. Er zijn geen probabilistische analyses of berekeningen toegepast.

Ook is bij de uitvoering van het onderzoek uitsluitend gekeken naar de inpassing van het toetsingskader. Hierbij zullen geen nieuwe kaders worden opgesteld voor het toepassen van betrouwbaarheid in relatie tot het ontwerp van kademuurconstructies.

Waar aangenomen, is als referentiegebied uitsluitend gekeken naar het Rotterdamse havengebied. Als referentieperiode is hier een periode tussen 1940 en 2015 gekozen, waar niet expliciet anders staat vermeld.

## 1.7 Leeswijzer

Ter verduidelijking van de strekking van het onderzoeksonderwerp wordt in hoofdstuk 2 korte informatie gegeven over kademuurconstructies, de relatie met de Rotterdamse haven hiervan en de definitie van betrouwbaarheid. Hoofdstuk 3 gaat verder op de methoden omtrent betrouwbaarheid in nationale- en internationale normen en richtlijnen. Als alternatief hierop wordt in hoofdstuk 4 een alternatief toetsingskader hiervoor voorgesteld en beargumenteerd. Hoofdstuk 5 zal in gaan op de oorzaken van faalmechanismen, waar hoofdstuk 6 juist op de gevolgen hiervan in zal gaan. De economische effecten op de betrouwbaarheid van een differentiatie van het toetsingskader worden globaal geschetst in hoofdstuk 7. De conclusie zal worden behandeld in hoofdstuk 8, met hier op volgend in hoofdstuk 9 de aanbevelingen.



## 2 KADEMUREN EN BETROUWBAARHEID

Allereerst zal een korte beschrijving van verschillende typen kademuren worden gegeven. Ter informatie vindt hier ook een koppeling met de Rotterdamse haven plaats. Hier wordt in gegaan op de hoeveelheid kademuren in het Rotterdamse havengebied.

Een uitleg omtrent de definitie van betrouwbaarheid is tevens gegeven. Een goed beeld van deze definitie is aangeraden voor een verder begrip van de bevonden resultaten in het verdere verslaglegging. Mocht u verdere uitleg omtrent dit thema wensen, wordt u gerefereerd naar het gebruik in normen en richtlijnen zoals de ISO2394 en de Eurocode 0.

### 2.1 Verschillende typen kademuurconstructies

Kademuren zijn er in veel verschillende soorten. Ook zijn kademuren geometrisch onderling erg afwijkend. Dit is geheel onderhevig aan het precieze gebruik van de kademuur, de lokale omstandigheden en de keuzes die zijn gemaakt gedurende het ontwerptraject.

In Nederland bestaan twee<sup>1</sup> relevante richtlijnen omtrent kademuur. Allereerst is er CUR-richtlijn 186 “Binnenstedelijke Kademuren” (Roubos & Grotegoed, 2014). Ten tweede is er CUR-richtlijn 211 “Quay Walls” (SBRCURnet, 2013) voor kademuren in het algemeen. In de richtlijnen worden vier hoofdtypen aan kademuren gegeven, met elk verschillende subtypen. Van elk van de verschillende types is weergegeven in figuur 3.

#### 2.1.1 Gewichtsmuren

Bij dit type constructie wordt de grond kerende functie verkregen door het eigen gewicht van de constructie, soms tevens bevorderd door het gewicht van de bovenliggende grondmassa. Voorbeelden van deze type constructies zijn gewichtsmuren, de L-wand, de caissonwand, de celwand en versterkte grondlichamen (SBRCURnet, 2013).

#### 2.1.2 Dam- of combiwandconstructies

Een damwand verkrijgt zijn grond kerende functie door mobilisatie van passieve gronddruk, de stijfheid van de muur en veelal gecombineerd met het verankeringssysteem. Voorbeelden hiervan zijn verankerde damwanden, combi-wanden, diepwanden en bouwkuipen (SBRCURnet, 2013).

#### 2.1.3 Constructies met een ontlastvloer

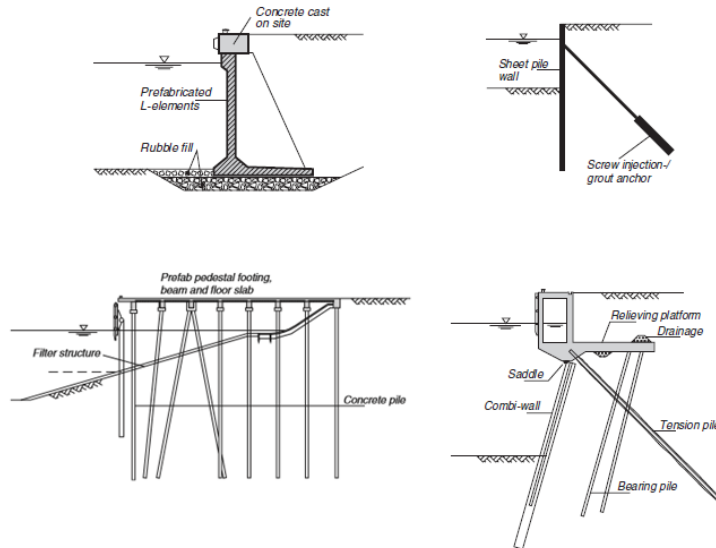
Deze constructie is in feite ook een damwandconstructie. Bij dit type worden de krachten op de onderliggende kerende muur gereduceerd door een ontlastvloer. Deze vloer draagt middels paalfunderingen de bovenliggende belasting af naar de ondergrond. Er wordt onderscheid gemaakt tussen constructies met een hoge- en een dieper gelegen ontlastvloer (SBRCURnet, 2013).

#### 2.1.4 Overdekt talud op palen

Deze constructies zijn vergelijkbaar met steigerconstructies. Het bestaat uit een dek, of vloer, gefundeerd op palen, die de lasten diep naar de ondergrond overbrengen. De grond loopt onder de vloer onder een helling af (SBRCURnet, 2013).

---

<sup>1</sup> Bij het analyseren van kademuurconstructies zou over het algemeen ook CUR 166 “Damwanden” worden beschouwd. In de laatste druk hiervan wordt echter direct verwezen naar CUR 211 “Quay Walls” in het geval van kademuurconstructies. Hierom wordt de CUR 166 buiten beschouwing gelaten.



**Figuur 3: Verschillende typen kademuurconstructies, van links naar rechts: een gewichtsmuur, een damwandconstructie, een overdekt talud op palen en een constructie met een ontlastvloer. (SBRCURnet, 2013)**

## 2.2 De typen in Rotterdam

Middels een database van het Havenbedrijf Rotterdam is de totale lengte van alle kademuurconstructies in Rotterdam bepaald. Hieruit blijkt dat er in een totale strekkende lengte van 71,5 kilometer aan kademuuren is in het Rotterdams havengebied.

Dit is verder onder te verdelen in strekkende kilometers per kademuurtype. Wanneer hier naar wordt gekeken kunnen de conclusies uit figuur 4 worden getrokken. Het is aannemelijk dat de constructies bestaande uit een overdekt talud op palen grotendeels in de ongeclassificeerde typen zit, of eventueel in de onderbouw met een damwandconstructie. Deze is echter niet traceerbaar.

Respectievelijk is er een geschatte lengte van 36 kilometer aan dam- of combiwandconstructies, 20 kilometer aan constructies met ontlastvloeren, 14 kilometer aan gewichtsmuren en een overige 1,5 kilometer aan overige constructies.



**Figuur 4: Verdeling van de typen kademuurconstructies in beheer van het Havenbedrijf Rotterdam.**

## 2.3 Betrouwbaarheid

### 2.3.1 Wat is betrouwbaarheid?

Constructies worden gerealiseerd om een gegeven functie te vervullen. Om deze functie te vervullen moet de constructie voldoen aan de gestelde eisen. Constructies worden tevens ontworpen voor een bepaalde periode, ook wel de ontwerplevensduur van het object genoemd. De gerealiseerde constructies zijn onderhevig aan veranderende situaties met de daarbijhorende belastingen. Door deze verandering in belastingen, in combinatie met de veroudering van de constructie, zou het kunnen voorkomen dat de constructie niet meer voldoet aan de gestelde eisen. Hiermee is de constructie dan gefaald, aangezien de functie niet langer kan worden vervuld.

De kans dat de constructie door omstandigheden faalt bestaat gedurende de hele levensduur van de constructie. Het is niet mogelijk om constructies redelijkerwijs ten ontwerpen en realiseren om elke omstandigheid gedurende zijn gehele levensduur te doorstaan (Nederlands Normalisatie-Instituut, 2002). Hierbij wordt opgemerkt dat een constructie altijd dus een bepaalde faalkans heeft.

Deze faalkans is niet alleen van cruciaal belang bij het ontwerpen en realiseren van nieuwe constructies, maar ook bij het toetsen en beoordelen van bestaande constructies. In beide gevallen moet een constructie aan een faalkanseis voldoen.

De faalkanseis, waar de constructies aan moeten voldoen, wordt in de normen en richtlijnen vastgelegd en gerepresenteerd als een indexcijfer van de betrouwbaarheid. De faalkans heeft een directe relatie met de betrouwbaarheidsindex. Deze relatie wordt hieronder in formulevorm weergegeven:

$$\beta = -\phi^{-1}(p_f) \quad [1]$$

Hierin wordt opgemerkt dat  $\beta$  de betrouwbaarheidsindex representeert [-],  $\phi^{-1}(\cdot)$  een inverse normaalverdeling is en  $p_f$  de faalkans van de constructie is [%].

Hoewel de faalkans veelal in een klein, procentueel getal wordt weergegeven, is de betrouwbaarheidsindex vaker een getal wat beter werkbaar is en meer inzicht geeft. Hierom wordt de betrouwbaarheidsindex zowel nationaal als internationaal gebruikt als indicator.

De betrouwbaarheid van een constructie heeft een koppeling met de gebruikte referentieperiode. Constructies krijgen een referentieperiode voor het ontwerp hiervan, ook wel de ontwerplevensduur genoemd. Voor de nieuwbouw van (waterbouwkundige-) constructies is dat over het algemeen 50 jaar. Tijdens verbouw of reparatie is dit een ontwerplevensduur van 1 jaar (Nederlands Normalisatie-Instituut, 2002).

Deze differentiatie in betrouwbaarheidsindexen heeft als gevolg dat verbouw of reparatie aan een hoger veiligheidsniveau moeten voldoen. Voor het omrekenen van de faalkansen, en dus niet tijdsgebonden betrouwbaarheid niveaus, in relatie tot de wisselende referentieperiode wordt de onderstaande formule gebruikt.

$$P_{d;t_{ref}} = 1 - (1 - P_{t_1})^{t_{ref}} \approx \frac{P_{t_1} \cdot t_{ref}}{t_1} \quad [2]$$

Hierin is  $P_{d;t_{ref}}$  de faalkans [-] voor de gewenste referentieperiode,  $P_{t_1}$  de faalkans [-] bij de oorspronkelijke referentieperiode,  $t_{ref}$  de gewenste referentieperiode [jaren] en  $t_1$  de oorspronkelijke referentieperiode [1 jaar].

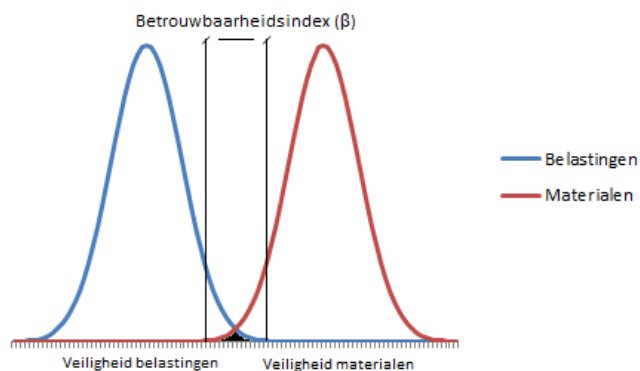
### 2.3.2 Partiële veiligheidsfactoren en de betrouwbaarheidsindex

Hedendaags worden veelal de betrouwbaarheidsindexen gebruikt om een vereist veiligheidsniveau van een constructie te waarborgen. Dit wordt gedaan door de betrouwbaarheid om te rekenen naar partiële factoren. Deze partiële factoren worden in het ontwerp gebruikt om de juiste marge te houden tussen de sterkte van de constructie en de optredende belastingen.

Ontwerpen worden getoetst door middel van constructieve berekeningen. In deze berekeningen worden onzekerheden ondervangen. Dit wordt enerzijds gedaan door het gebruik van diverse belastinggevallen. Bij het gebruik van belastinggevallen wordt gekeken naar uiterste, zelden optredende, situaties waar de constructie tegen moet kunnen. Hierbij kan worden gedacht aan verschillende (extreem lage, of hoge) waterstanden of hoge belastingen. Door het meenemen van een dergelijke extreme belasting vindt dus een eerste waarborging van de veiligheid plaats.

In de berekeningen zelf vindt de verdere borging van de betrouwbaarheid plaats. De berekeningen worden gedaan met representatieve waarden. Deze reken waarden worden bepaald door karakteristieke waarden voor deze gevallen, in combinatie met partiële factoren. De karakteristieke waarden zijn empirisch aangetoonde waarden voor de belastingen en krachten welke optreden bij bepaalde situaties. Deze zijn vastgelegd in de geldende normen en richtlijnen.

Partiële factoren worden op elk van de relevante onderdelen, en dus waarden, toegepast. Hierbij kan worden gedacht aan bijvoorbeeld de materialen, de belastingen op de constructieonderdelen en omgevingseigenschappen zoals grond en water. Door al deze gedeelde, partiële, veiligheden op de variabele toe te passen, komt men op een optimale, verdeelde betrouwbaarheid. Dit is gerepresenteerd in figuur 5. Dit wordt ook wel het semi-probabilistisch ontwerpen genoemd (Nederlands Normalisatie-Instituut, 2002).



Figuur 5: Systeembetrouwbaarheid volgens partiële veiligheidsfactoren.

Door het gebruik van partiële factoren wordt veiligheid op elk gedefinieerde onzekerheid genomen. Dit is weergegeven in figuur 5. Belastingen kunnen op willekeurige waarden hebben; Dit kan dan ook extreem zijn. Door hier een veiligheid op te zetten, kunnen deze worden opgevangen. Ook de kwaliteit van de materialen van constructies kunnen tegenvallen. Eveneens kan dit worden opgevangen door veiligheid hier op te zetten. In het geval van uitersten en extremen, zal een wisselwerking tussen de veiligheden van de materialen en de belastingen plaatsvinden. Het gedeelte tussen de intersectie is de betrouwbaarheid van de constructie. De partiële factoren van elk van de systeemonderdelen worden bepaald door een omrekening van de betrouwbaarheidsindex.



## 3 DE VERHOUDINGEN VAN NORMEN EN RICHTLIJNEN

Ten behoeve van het onderzoek is een literatuurstudie gedaan van de relevante normen en richtlijnen. Om tot een mogelijke optimalisatie te komen met betrekking op de huidige betrouwbaarheidclassificering is het van belang dat onderzocht is hoe deze momenteel functioneerd.

Hierom is in het bijlageverslag een literatuurstudie toegevoegd waarin dit uitgebreid aan bod komt. In dit hoofdstuk zal de relevante literatuur aan bod komen, met de focus op de behandelen van de betrouwbaarheid in elk van de documenten. Bij verdere interesse omtrent dit onderwerp wordt u doorverwezen naar het relevante deel in het bijlagenverslag.

### 3.1 De verhoudingen van de internationale normen en richtlijnen

Om een goed beeld te verwerven van de huidige verhoudingen van de normen en richtlijnen zijn de relevante literatuur tegen elkaar uit gezet. Er is een selectie gemaakt uit de meest relevante internationale literatuur.

Hierbij is gekeken naar de volgende normen en richtlijnen:

- EN1990, Eurocode 0 – Grondslagen van het constructief ontwerp (Nederlands Normalisatie-Instituut, 2002);
- ISO2394, General Principles on reliability for structures (ISO2394, 1998) (ISO2394, 2015);
- JCSS, Probabilistic Modelcode 1 (Faber & Vrouwenvelder, 2001);
- British Standard (British Standard, 2015);
- Recommendations for Maritime Works (Ministerio de Fomento, 2002);
- Recommendations of the committee for Waterfront Structures, harbours and Waterways (Grabe, 2012);
- The Technical Standards and Commentaries for port and Harbour Facilities in Japan (Japanse Normalisation Organisation).

Hierbij is de afweging gemaakt om gerenommeerde, internationale aanbevelingen omtrent ontwerpmethodieken maritieme infrastructuur zo veel mogelijk bij het onderzoek te betrekken. De keuze om de Eurocode hierbij te betrekken is omdat deze momenteel als handvat dient bij het ontwerp van de Rotterdamse maritieme infrastructuur, dan wel niet middels de Nederlandse bijlagen. De internationale richtlijn wordt verwacht om een helder toetsingskader te bieden wat internationaal geaccepteerd is. Er is gekozen om een verdiepingsslag te maken op de Eurocode en de ISO door een belangrijk achtergronddocument hiervan in de analyse mee te nemen.

De overige richtlijnen zijn geselecteerd op basis van aanbevelingen. Zo is de British Standard een veel toegepaste ontwerpstandaard bij internationale projecten, in Nederland wordt de EAU veel gebruikt. De Spaanse- en Japanse richtlijnen hebben een specifiek toetsingskader voor maritieme infrastructuur.

In ISO2394 wordt gebruik gemaakt van een indeling met vijf consequentieklassen. De Eurocode is gebaseerd op de ISO, maar heeft niet alle klassen overgenomen. De Eurocode gebruikt maar drie van deze vijf consequentieklassen. Belangrijk is om vast te tellen dat deze klassen uit de ISO2394 en EN1990 overeenkomen.

De British Standard en de Spaanse ROM sluiten aan op de Eurocode. In de ROM wordt de mogelijkheid gegeven om afzonderlijk naar economische- en sociale consequenties van falen

te kijken, en hier de betrouwbaarheidsklasse op te bepalen. Eveneens wordt er bij de Japanse richtlijn, de OCDI, eenzelfde mogelijkheid gegeven middels keuzevrijheid in het hanteren van veiligheidsfilosofie. Net als de EN1990 is de OCDI gebaseerd op ISO2394, maar ten aanzien van classificaties omtrent betrouwbaarheid zijn er grote verschillen. De EAU gaat reeds uit van een alternatieve ontwerpbenadering, waar de nadruk wordt gelegd op de optredende lasten op de constructie.

## 3.2 Nederlandse normen en handboeken

In dit literatuuronderzoek zijn ook verschillende Nederlandse normen en richtlijnen vergeleken. Het betreft:

- De Nederlandse bijlagen van de Europese Norm (Eurocode 0 – Grondslagen van het constructief ontwerp, NEN1990) (Nederlands Normalisatie-Instituut, 2002);
- SBRCUR-publicatie 166: “Damwandconstructies” (CUR166) (SBRCURnet, 2014);
- SBRCUR-publicatie 186: “Binnenstedelijke Kademuren” (CUR186) (SBRCURnet, 2014);
- SBRCUR-publicatie 211: “Quay Walls” (CUR211) (SBRCURnet, 2013).

De veiligheidsfilosofie van CUR166 “Damwandconstructies” is vergelijkbaar met CUR211 “Quay Walls”. Het is wel op te merken dat voor damwanden gebruik wordt gemaakt van andere betrouwbaarheidsindexen, welke opgedeeld worden middels een verdeling van de faalkansruimte voor verschillende faalmechanismen.

Hoewel in CUR186 “Binnenstedelijke Kademuren” in wordt gegaan hoe om wordt gegaan met ontwerp en betrouwbaarheidsmethodieken van (oudere) binnenstedelijke kademuren, zijn de Nederlandse bijlagen van de Eurocode en CUR211 “Quay Walls” het meest relevant voor de toepassingen omtrent betrouwbaarheid. Elk van de Nederlandse normen verwijzen naar de Eurocode wanneer over betrouwbaarheid wordt gesproken. Alle bouwwerken in Nederland dienen te voldoen aan de Eurocode, waardoor de Nederlandse nationale appendix hiervan erg belangrijk is wanneer het gaat om betrouwbaarheid van kademuurconstructies in Nederland.

In CUR211 “Quay walls” is echter wel een toepassing van de beschrijvingen en voorbeelden van de betrouwbaarheidsklassen toegespitst op kademuurconstructies. Hier worden ‘simpele’ constructies met een kerende hoogte van minder dan 5 meter in klasse 1 van de Eurocode ingedeeld, typische kademuurconstructies in klasse 2 van de Eurocode ingedeeld en kademuren welke als primaire waterkering of voor overslag van gevaarlijke stoffen dienen in klasse 3 van de Eurocode ingedeeld. De onderbouwing waarom de betrouwbaarheid van de kade afhankelijk is van de “kerende hoogte” is niet bekend en mogelijk onjuist.

### 3.2.1 Toepassing betrouwbaarheid

In Nederland wordt de betrouwbaarheid toegepast middels de specificaties uit de Eurocode. Door classificatie van objecten krijgen deze feitelijk een betrouwbaarheidsindexen. Middels deze betrouwbaarheidsindexen krijgen deze constructies partiële veiligheidsfactoren toegewezen, zoals uitgelegd in paragraaf 2.3.2. De veiligheid en betrouwbaarheid wordt verdeeld over zowel de optredende lasten, als de krachten die de constructie op kan nemen, door de toepassing van deze factoren.

### 3.2.2 Verschillen in ontwerpfilosofie tussen 'toen en nu'

Zoals in de globale werkwijze (paragraaf 1.5) is beschreven, was vooraf aan het onderzoek het besluit genomen om onderzoek te verrichten naar verschillende ontwerpmethoden en de invloed op betrouwbaarheid en veiligheid van kademuurconstructies. Dit had als doel het onderzoek meer op bestaande kademuurconstructies te focussen. Aangezien deze toevoeging, omwille van de omvang, niet meer aan de studie is toegevoegd, is dit deel van het onderzoek ook niet relevant voor dit hofodverslag. Het verrichte onderzoek naar de verschillende ontwerpmethoden in relatie tot de veiligheid en betrouwbaarheid van Rotterdamse kademuurconstructies is wel bijgevoegd in bijlageverslag.

Inzicht in de ontwikkeling van de veiligheidsfilosofie is van essentieel belang bij het beoordelen van bestaande constructies. Meer informatie is te vinden in het bijlageverslag. Verder is het te vermelden dat tot 2006 is afgezien van het toepassen van betrouwbaarheidsklassen. Er werd tot 2006 nog met de EUA1990 gerekend. Hierin waren geen partiële veiligheidsfactoren en betrouwbaarheidsklassen opgenomen. Vanaf 2006 is NEN6700 aangehouden en pas vanaf 2013 is met de verhoogde betrouwbaarheidsindex van EN1990 gerekend. Ter vervanging hiervan zijn kademuurconstructies berekent middels de voorschriften uit de E.A.U. Dit heeft zich zo ontwikkeld omdat er discussie was over de toepasbaarheid van de partiële factoren zoals in de Nederlandse voorschriften werd gegeven.

### 3.3 Onderlinge verhoudingen van de betrouwbaarheid

De resultaten van paragrafen 3.1 en 3.2 zijn verwerkt in tabel 1. Hierin is aangegeven hoe elk van de classificaties wordt aangeduidt en welke betrouwbaarheidsindexen hier aan worden gekoppeld voor referentieperioden van een en vijftig jaar.

Hierbij is bewust gekozen voor een verzameling van de internationale richtlijnen tot een gezamenlijk indeling. Op te merken valt dat deze richtlijnen veelal eigen methodieken hebben, echter conformeren deze zich aan de Eurocode. Hierbij is dus het geval dat wanneer er aan de Eurocode wordt voldaan, tevens de internationale richtlijnen voldoen.

In de OCDI zijn geen vereiste betrouwbaarheidsklassen opgenomen. Hierdoor is het niet mogelijk om deze Japanse richtlijn op te nemen in het overzicht met de verhoudingen. Dit komt omdat deze geheel eigen methodieken heeft omtrent het omgaan met betrouwbaarheid en een minimale betrouwbaarheid ter indicatie opgeeft. Wel conformeert de OCDI zich aan de ISO-richtlijnen. De ISO-richtlijnen zijn wel opgenomen in de tabel. Middels conformatie aan deze richtlijn zal tevens aan de OCDI worden voldaan.

Tabel 1: Onderlinge verhoudingen van de betrouwbaarheid.

| Classificatie                                                             |         |         |          |          |         |
|---------------------------------------------------------------------------|---------|---------|----------|----------|---------|
| ISO2394:2015                                                              | Class 1 | Class 2 | Class 3  | Class 4  | Class 5 |
| ISO2394:1998                                                              | Small   | Some    |          | Moderate | Great   |
| JCSS                                                                      |         | Minor   | Moderate | Large    |         |
| NEN1990                                                                   |         | RC1/CC1 |          | RC2/CC2  | RC3/CC3 |
| CUR 211                                                                   |         | RC1/CC1 |          | RC2/CC2  | RC3/CC3 |
| BS/ROM/EAU                                                                |         | RC1/CC1 |          | RC2/CC2  | RC3/CC3 |
| Betrouwbaarheidsindexen ( $\beta$ ) met een referentieperiode van 1 jaar  |         |         |          |          |         |
| ISO2394:2015                                                              | -       | 4.2     | 4.4      | 4.7      | -       |
| ISO2394:1998                                                              | -       | -       |          | -        | -       |
| JCSS 1                                                                    |         | 4.2     | 4.4      | 4.7      |         |
| NEN1990                                                                   |         | 4.2     |          | 4.7      | 5.2     |
| CUR 211                                                                   |         | 4.2     |          | 4.7      | 5.2     |
| BS/ROM/EAU                                                                |         | 4.2     |          | 4.7      | 5.2     |
| Betrouwbaarheidsindexen ( $\beta$ ) met een referentieperiode van 50 jaar |         |         |          |          |         |
| ISO2394:2015                                                              | -       | -       | -        | -        | -       |
| ISO2394:1998                                                              | 2.3     | 3.1     |          | 3.8      | 4.3     |
| JCSS 1                                                                    |         | -       | -        | -        |         |
| EN1990                                                                    |         | 3.3     |          | 3.8      | 4.3     |
| CUR211                                                                    |         | 3.3     |          | 3.8      | 4.3     |
| BS/ROM/EAU                                                                |         | 3.3     |          | 3.8      | 4.3     |

## 4 ALTERNATIEF TOETSINGSKADER

Dit hoofdstuk gaat over een opzet van het voorgesteld toetsingskader. Dit toetsingskader is gemaakt naar aanleiding van het literatuuronderzoek. Er zal worden begonnen met een uiteenzetting van de oorsprong van het opgezette toetsingskader. Vervolgens zal het toetsingskader zelf worden weergegeven en zullen de afwijkingen met normen en richtlijnen worden besproken. Mocht u verdere informatie over dit toetsingskader willen, kunnen deze worden teruggevonden in het bijlagenverslag. Hierbij zal bij de vragenlijsten omtrent het toetsingskader nader worden ingegaan op het toetsingskader zelf.

### 4.1 Reden tot aanpassing

Als opvolging van de literatuurstudie is in overleg besproken om een alternatief toetsingskader voor te stellen. Wanneer er naar de verschillende documenten wordt gekeken kan worden geconcludeerd dat uniformiteit mist ten aanzien van de classificatie van de betrouwbaarheid van maritieme constructies. Er zijn verschillen tussen de Eurocode 0, ISO2394, Probabilistic Modelcode 1 en handboeken. Dit gebrek aan uniformiteit zou in praktijk kunnen leiden tot discussies.

Daarnaast lijkt een interpretatieverschil aanwezig tussen de opstellers van de originele normen en hoe dit wordt vertaald in de praktijk. Dit verschil komt door mogelijk door het feit dat de Eurocodes zijn ontwikkeld op basis voor gebruik voor gebouwen en bruggen. Bij het overbrengen van de Eurocodes als algemeen stellende norm, is hierbij geen rekening gehouden met maritieme constructies. Deze constructies zijn niet een op een vergelijkbaar met de originele constructies waar de Eurocodes op zijn gebaseerd. Een grote afwijking hierin is mogelijk de consequenties van falen. De consequenties van het falen van een brug of gebouw zijn niet vergelijkbaar met het optreden van een faalmechanisme bij een kademuurconstructie.

Om deze redenen is een nieuw toetsingskader opgesteld. Aansluitend op de Eurocode en overeenkomend met de achtergronddocumenten hiervan, onder andere de ISO2394 en de Probabilistic Modelcode 1.

### 4.2 Basis van het toetsingskader

Uit de uiteenzetting van elk van de literatuurstudie is te zien dat er ook enkele discrepanties zijn wanneer en meerdere toetsingskader worden gebruikt. Dit was de motivatie om een alomvattend toetsingskader voor te stellen. Hier zijn de meest relevante normen en richtlijnen omtrent de classificatie van de betrouwbaarheid van kademuurconstructies gebruikt. Dit zijn de volgende documenten:

- EN1990, Eurocode 0 – Basis of Structural Design (Nederlands Normalisatie-Instituut, 2002);
- ISO2394, International Standard – General Principles on reliability for structures (ISO2394, 2015);
- JCSS – Probabilistic Modelcode 1, (Faber & Vrouwenvelder, 2001);

Op basis hiervan is dan ook het toetsingskader opgezet. Tevens is een koppeling gemaakt met de indirecte faalkosten, zoals weergegeven in de leidraad voor secundaire waterkeringen. Hierin is een indicatie van de indirecte faalkosten weergegeven voor het falen van waterkeringen. Aangezien de indirecte faalkosten voor het falen van een kademuur grote consequenties kunnen hebben, is besloten deze indicatie in het voorgestelde toetsingskader mee te nemen (STOWA, 2015).

### 4.3 Opbouw van het alternatief toetsingskader

De opbouw van het toetsingskader, weergegeven in tabel 2, bestaat uit drie delen. De onderverdeling voor de consequenties ten opzichte van menselijke veiligheid, sociaal-economische gevolgen en milieukundige gevolgen zijn aangehouden omdat deze structuur in elk van de normen terug komt.

Verder is de opbouw van de ISO2394:2015 zo veel mogelijk aangehouden en aangevuld, aangezien deze breed gedragen richtlijn de meeste classificaties heeft. Dit geeft het meeste ruimte met betrekking tot de daadwerkelijke classificering per kademuurconstructie.

Het toetsingskader is in drie delen opgebouwd. Deze komen overeen met de classificatiecriteria uit de bron documenten. Het eerste deel betreft sociale consequenties en menselijke veiligheid. Hierbij is een directe link gemaakt met de classificering van de ISO2394, welke eenzelfde verwoording gebruikt bij de classificatie. Ook komt dit overeen met de classificatie van de Eurocode.

Het tweede onderdeel betreft de sociaaleconomische consequenties. Hier wordt allereerst in gegaan op de economische consequenties van falen, middels eenzelfde aanduiding als in de ISO2394. Bij de beschrijving van de sociaaleconomische gevolgen, waar aan zowel directe materiele schade kan worden gedacht als aan effecten op de terminal en het achterliggend distributiegebied, komt eveneens in verwoording overeen met de ISO2394. De directe faalkosten worden in de Probabilistic Modelcode 1 middels verhouding tot de faalkosten uitgerekend. Deze verhouding [q] komt tot stand door de realisatiekosten en directe faalkosten door de realisatiekosten te delen. In de Leidraad voor kunstwerken in Secundaire Waterkeringen (STOWA) wordt tot een betrouwbaarheidsclassificatie gekomen door de indirecte faalkosten te berekenen. Dit is in het nieuwe toetsingskader meegenomen, waarin de indirecte faalkosten kunnen worden gezien als downtime kosten van de terminal, door het bijvoorbeeld niet of gedeeltelijk kunnen gebruiken van een ligplaats of deel van de terminal.

Als derde onderdeel zijn de milieukundige consequenties ingedeeld volgens de verwoordingen zoals in de ISO2394 wordt weergegeven. Ook dit eerste onderdeel komt overeen met de verwoording zoals weergegeven in de Eurocode.

Voor de definitieve keuze van de betrouwbaarheidsklasse, volgend uit het alternatief toetsingskader, is bewust geen uitspraak over gedaan. Momenteel kan het toetsingskader worden gezien als aanvullend middel en is het nog niet bindend. Aan de onderlinge objecten zijn ook geen verhoudingen gegeven. Gebruikers zijn vrij om over de resultaat van de invulling van het toetsingskader te discussiëren. Er kan voor de meest maatgevende klasse worden gekozen, een gemiddelde of andere waarde. Dit is tot op heden aan de gebruikers zelf.

Het kan opvallen dat er een alternatieve aanduidingen is gekozen voor de betrouwbaarheidsklassen, klassen A tot en met E. Dit is bewust gedaan om aan te geven dat het een daadwerkelijk afwijkend toetsingskader is dan de bestaande kaders in de normen en richtlijnen. Ook is er voor gekozen om het toetsingskader Engelstalig te houden. Deze keuze is gemaakt om zo dicht mogelijk bij de originele tekst te blijven, zoals deze in de codes is weergegeven. Hierdoor worden subjectieve inbrengen bij het opstellen van het toetsingskader zo veel mogelijk geminimaliseerd.



Tabel 2: Voorgesteld toetsingskader.

| Social consequences of failure and safety of human life                    |                                                                                   |                                                                                                                |                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                              |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Class                                                                      | A                                                                                 | B                                                                                                              | C                                                                                                                                                             | D                                                                                                                                                                                                                         | E                                                                                                                                                                            |
| Risk level life safety given structural failure                            | Negligible or low                                                                 | Some                                                                                                           | Considerable                                                                                                                                                  | High                                                                                                                                                                                                                      | Very high                                                                                                                                                                    |
| Description of consequences regarding life safety given structural failure | Predominantly injuries. Expected number of fatalities / disabilities less than 1. | Expected number of fatalities / disabilities less than 5.                                                      | Expected number of fatalities/ disabilities less than 50.                                                                                                     | Expected number of fatalities/ Disabilities less than 500.                                                                                                                                                                | Expected number of fatalities/disabilities more than 500.                                                                                                                    |
| Social-Economic consequences of failure                                    |                                                                                   |                                                                                                                |                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                              |
| Class                                                                      | A                                                                                 | B                                                                                                              | C                                                                                                                                                             | D                                                                                                                                                                                                                         | E                                                                                                                                                                            |
| Economic damage safety given structural failure                            | Negligible or small                                                               | Some                                                                                                           | Considerable                                                                                                                                                  | Great                                                                                                                                                                                                                     | Very great                                                                                                                                                                   |
| Description of social economic consequences given structural failure       | Predominantly insignificant material damages.                                     | Material damages and functionality losses of significance for owners and operators and low or no social impact | Material losses and functionality losses of societal significance, causing regional disruptions and delays in important societal services over several weeks. | Disastrous events causing severe losses of societal services and disruptions and delays at national scale over periods in the order of months.                                                                            | Catastrophic events causing losses of societal services and disruptions and delays beyond national scale over periods in the order of years.                                 |
| Direct costs of failure                                                    | q < 2                                                                             | q ≈ 2                                                                                                          | q = 2-5                                                                                                                                                       | q = 5-10                                                                                                                                                                                                                  | q > 10                                                                                                                                                                       |
| Indirect costs of failure                                                  | < € 8 mln.                                                                        | € 8-80 mln.                                                                                                    | € 80-250 mln.                                                                                                                                                 | > € 250 mln.                                                                                                                                                                                                              | -                                                                                                                                                                            |
| Environmental consequences of failure                                      |                                                                                   |                                                                                                                |                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                              |
| Class                                                                      | A                                                                                 | B                                                                                                              | C                                                                                                                                                             | D                                                                                                                                                                                                                         | E                                                                                                                                                                            |
| Environmental damage given structural failure                              | Negligible or small                                                               | Some                                                                                                           | Considerable                                                                                                                                                  | Great                                                                                                                                                                                                                     | Very great                                                                                                                                                                   |
| Description of environmental consequences given structural failure         | Predominantly insignificant environmental damages.                                | Damages to the qualities of the environment of an order which can be restored completely in a matter of weeks. | Damages to the qualities of the environment limited to the surroundings of the failure event and which can be restored in a matter of weeks.                  | Significant damages to the qualities of the environment contained at national scale but spreading significantly beyond the surroundings of the failure event and which can only be partly restored in a matter of months. | Significant damages to the qualities of the environment spreading significantly beyond national scale and which can only be partly restored in a matter of years to decades. |

## 4.4 Afwijkingen en de betrouwbaarheidsindex

Wanneer tabellen 1 en 2, de onderlinge verhoudingen van de normen en richtlijnen en het voorgesteld toetsingskader zelf, zijn enige afwijkingen te benoemen.

Er zijn er missende gaten omtrent de betrouwbaarheidsindexen ingevuld en is een betrouwbaarheidsindex aangepast. Dit is gedaan middels formules [1] en [2], hieronder weergegeven middels een voorbeeldberekening. De voorbeeldberekening betreft de omrekening van de jaarlijkse betrouwbaarheid van klasse C naar een ontwerplevensduur van 50 jaar.

Betrouwbaarheidsklasse E voor een referentieperiode van 50 jaar is aangepast van 4,3 naar 4,4 aangezien deze middels een controleberekening op 4,4 uit gekomen. Dit resultaat zal verder overleg behoeven met de origineel schrijvers van de normen en richtlijnen.

De voorbeeldberekening is als volgt:

$$\beta = -\phi^{-1}(p_f) \quad [1]$$

$$P_{d;t_{ref}} = 1 - (1 - P_{t_1})^{t_{ref}} \approx \frac{P_{t_1} \cdot t_{ref}}{t_1} \quad [2]$$

Betrouwbaarheidsklasse  $\beta = 4,4$  heeft een faalkans van  $P_{t_1} = 5,41 \cdot 10^{-6}$ . Omrekenen middels formule 2 geeft het volgend:

$$P_{d;t_{ref}} = 1 - (1 - 5,41 \cdot 10^{-6})^{50} \approx \frac{5,41 \cdot 10^{-6} \cdot 50}{1} \approx 2,8 \cdot 10^{-4}$$

Deze faalkans kan om worden gerekend naar een betrouwbaarheidsindex middels formule 1, zo als volgt weergeven:

$$\beta = -\phi^{-1}(2,8 \cdot 10^{-4}) \approx 3,45$$

Hierbij is dus bepaald dat de betrouwbaarheidsindex voor klasse C met een levensduur van 50 jaar circa 3,45 bedraagt.

Tabel 3: Gerelateerde betrouwbaarheidsindexen aan het toetsingskader.

| Class                           | Reliability indexes quay-wall structures |               |                |               |               |
|---------------------------------|------------------------------------------|---------------|----------------|---------------|---------------|
|                                 | A                                        | B             | C              | D             | E             |
| Annual reliability (1 year)     | $\beta = 3,5$                            | $\beta = 4,2$ | $\beta = 4,4$  | $\beta = 4,7$ | $\beta = 5,2$ |
| Lifetime reliability (50 years) | $\beta = 2,3$                            | $\beta = 3,2$ | $\beta = 3,45$ | $\beta = 3,8$ | $\beta = 4,4$ |

## 5 MAATGEVENDE OORZAKEN VAN FALEN

In dit hoofdstuk zal er worden in gegaan op de maatgevende oorzaken van falen. Er wordt verwacht dat een mogelijke optimalisatie in het toetsingskader kan worden aangebracht door het individueel beoordelen van de betrouwbaarheid van elk van de faalmechanismen. Hierom is gekeken naar de maatgevende oorzaken van falen.

Ten behoeve van dit onderzoek is een interview met verschillende professionals opgezet. Hierbij is gevraagd naar opgetreden- en verwachte situaties. Deze zijn verder onderverdeeld naar oorzaak, faalmechanisme en gevolg. Voor verdere verdieping omtrent het onderzoek wordt verwezen naar het relevante deel van het bijlagenverslag.

### 5.1 Interviews

Om de maatgevende oorzaken waarom een kademuurconstructie niet meer aan zijn gestelde eisen kan voldoen, is een kwantitatief onderzoek opgezet middels verschillende interviews.

Deze methode is gekozen omdat er geen alomvattende database aanwezig is waarin de opgetreden faalmechanismen van kademuurconstructies zijn beschreven. De kennis hiervan is vooral aanwezig bij de destijds betrokken deskundigen.

Hierom zijn 20 ervaren deskundige geïnterviewd, met als doel zo veel mogelijk opgetreden situaties te verzamelen en zo veel mogelijk inzichten van de experts te verweven omtrent de verwachte situaties. Er zijn diverse professionals betrokken bij het interview, om de inbreng zo breed mogelijk te houden. Hierom zijn zowel opdrachtgevers, aannemers, ontwerpdeskundigen, beheerders als consultants bij dit onderzoek betrokken.

Mocht u verdere interesse hebben naar een verdieping van dit onderzoek, wordt u verwezen naar het relevante deel van het bijlagenverslag.

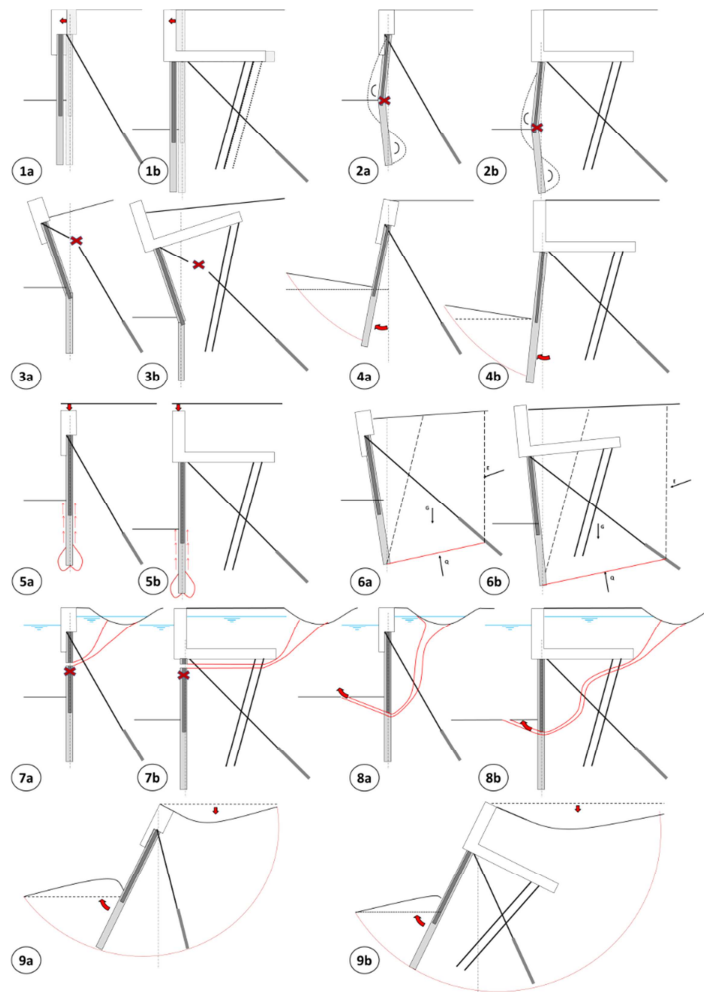
### 5.2 Faalmechanismen

Een afzonderlijk faalmechanisme kan verschillende oorzaken hebben (o.a. overbelasting, degradatie, ontwerp- en bouwfouten, extreme waterstanden, bodemerosie door schroefstralen, een combinatie hiervan et cetera). De gevolgen de faalmechanismen resulteren in buitensporige deformaties, zettingen of zakkingen. Sommige mechanismes waarschuwen of worden gemonitord, andere kunnen plotseling/onverwacht optreden. De consequenties van falen ten aanzien van menselijke veiligheid en economische schade kunnen per mechanisme aanzienlijk verschillen. In het deelonderzoek over de gehouden interviews, toegevoegd aan het bijlageverslag, wordt verder in gegaan op de faalmechanismen van kademuurconstructies.

Middels CUR 186 “Binnenstedelijke Kademuuren (Roubos & Grotegoed, 2014) zijn onderstaande faalmechanismen opgesteld. Hierin hebben lichtelijk aanpassingen plaatsgevonden, om eenduidigheid te houden.

1. Buitensporige horizontale deformaties.
2. Constructief bezwijken van grond kerende wand door vloeï/breuk uiterste vezel door combinatie van moment, dwarskracht en normaalkracht al dan niet met corrosie;
3. Bezwijken van de verankering:
  - a. Bezwijken ankerstaaf door vloeï of breuk;
  - b. Overschrijden van het trekdraagvermogen van het groutlichaam (slipcriterium);
  - c. Overschrijden door laterale belasting door zakkende grond op ankerstang;
  - d. Overschrijden grondweerstand ankerwand.
4. Overschrijden van de passieve horizontale grondweerstand;
5. Overschrijden van het verticaal draagvermogen van de ondergrond bij dragende damwanden;
6. Overschrijden van de Kranz-stabiliteit (bij verankeringen);
7. Plotselinge zakkingsen door geometrische opening grond kerende wand (lokale pitting).
8. Plotselinge zakkingsen onder- en achterloopsheid en piping (HYD).
9. Overschrijden van de algehele (macro)stabiliteit.

In figuur 6 zijn de faalmechanismen schematisch weergegeven van zowel een kademuurconstructie bestaande uit een dam- of combiwand (a), als een kademuurconstructie met een ontlastvloer (b).



**Figuur 6: Schematische weergaven van de faalmechanismen van kademuurconstructies. Hierin is (A) een dam- of combiwandconstructie en (B) een constructie met een ontlastvloer.**

### 5.3 Oorzaken van opgetreden situaties

Er kunnen verschillende oorzaken zijn voor het optreden van faalmechanismen. Hierbij kan worden gedacht aan bijvoorbeeld misbruik van de constructie in de vorm van overbelasting of ander scheepsformaten, afname van de sterkte van de constructie in de loop van de tijd, slotopeningen als resultaat van een onjuiste uitvoering of ontwerpfouten. Onder ontwerpfouten vallen bijvoorbeeld het niet juist ontwerpen van het anker, de bodembescherming of andere cruciale punten zoals de onderlinge verbindingen.

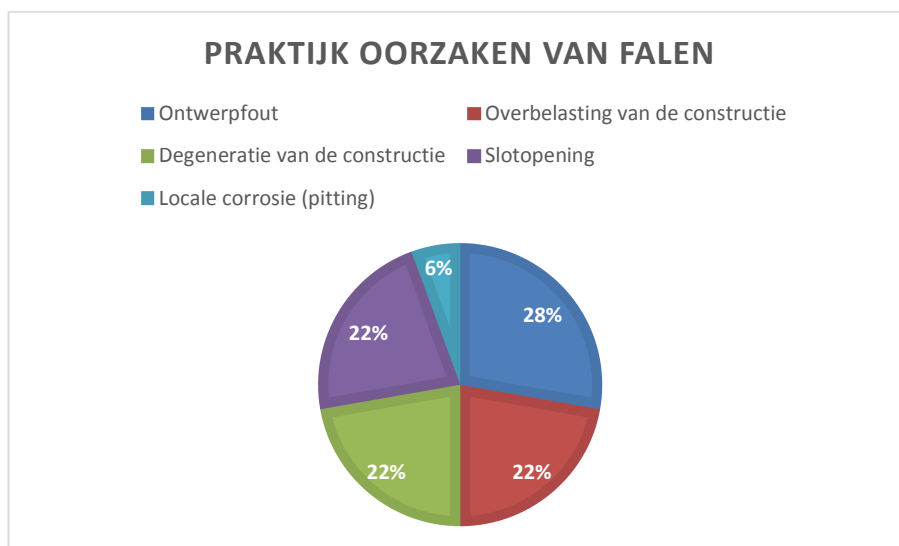
Tijdens de interviews is gevraagd naar de gefaalde kademuren en kademuren welke niet meer aan de gestelde eisen voldeden, en dus werden afgekeurd. Als resultaat hiervan zijn in totaal 17 situaties gevonden waarbij een van deze criteria is toegekend.

Deze situaties zijn onderverdeeld in mechanismen middels de beschrijvingen van de experts. Hierbij is een onderverdeling gemaakt in maatgevende oorzaken, mechanismen en gevolgen van falen.

Van de 17 situaties zijn er twee situaties bevonden waarbij de constructie daadwerkelijk constructief is bezweken. Hierbij is een van de kademuren ingestort en heeft een van de kademuren hevige schade ondervonden.

Dit betreft voor het ingestorte geval de Van Benthum kade. Hierbij heeft hevige degeneratie van de constructie opgetreden, waardoor de sterkte van de constructie dermate af nam dat de constructie uiteindelijk is bezweken en ingestort. Hierbij speelde overbelasting van het terrein ook een bijrol. Dit was tevens een private kade, welke niet in door het Havenbedrijf Rotterdam in gebruik was. Tevens heeft het havenbedrijf hier veelvuldig voor gewaarschuwd.

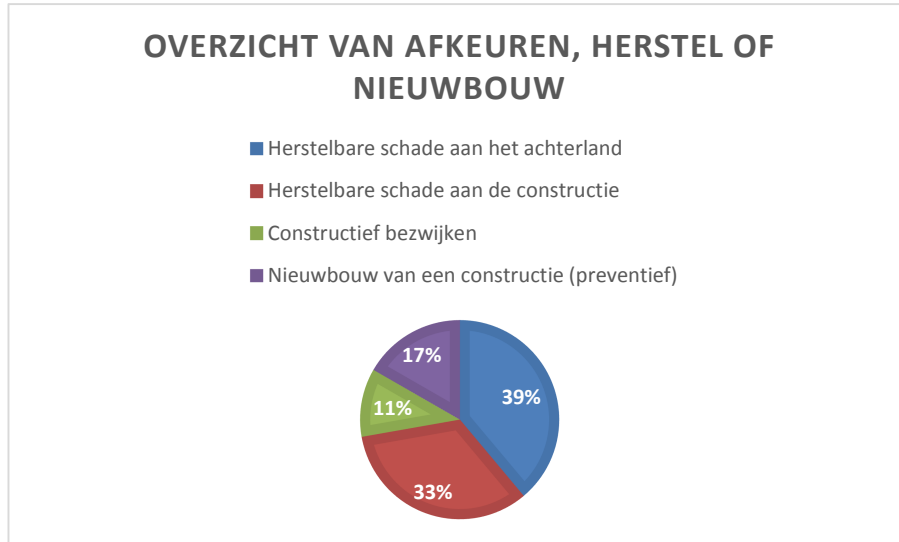
Het andere geval betreft de recentelijk gefaalde Maaskade. Hierbij is de oude constructie, welke al ver voor vorige eeuw dateert, ook hevig gedegenererd. De constructie is nog steeds bruikbaar, echter is een deel constructief bezweken wanneer met een schip een te harde aanvaring is opgetreden, waardoor de gewichtsmuur van de paalfundering is afgebroken. Door het ontbreken van een anker, ofwel een ontwerpfout, heeft ervoor gezorgd dat door het afbreken van de fundering de constructie gedeeltelijk voorover is gekanteld. In figuur 7 is te zien wat de maatgevende oorzaken van falen zijn.



Figuur 7: Maatgevende oorzaken van falen of afkeuren volgens de interviews.

Wanneer naar figuur 8 wordt gekeken kunnen de effecten hiervan worden beschouwd. Hierbij is te zien dat de twee eerdergenoemde kademuren constructief zijn bezweken. De overige gevallen waren echter allen of preventief afgekeurd overige gevallen trad echter enkel schade op, wat in alle gevallen gerepareerd is kunnen worden.

Tevens is in de interviews is gevraagd of hier menselijk leed is bij opgetreden, wat in geen van de gevallen is gebeurd.



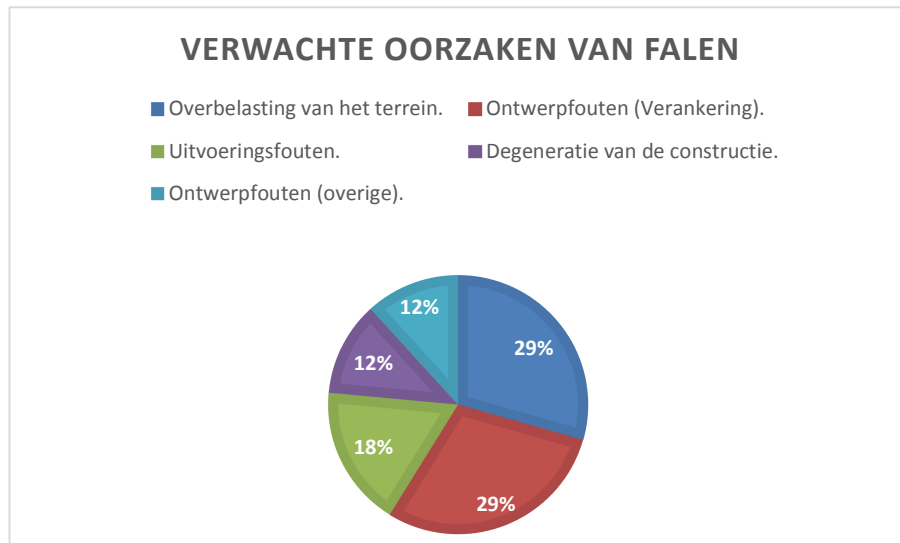
**Figuur 8: Maatgevende gevolgen van falen of afkeuren volgens de interviews.**



## 5.4 Oorzaken van verwachte situaties

Bij het houden van de interviews van de professionals is gevraagd naar de verwachte faalmechanismen van de Rotterdamse kademuren. Hierbij zijn zowel oorzaken als methoden van falen benoemd. Om dit verschil te verwerken zijn de benoemde verwachte methoden van falen omgewerkt naar de oorzaken hiervan.

Deze oorzaken zijn terug te koppelen naar dezelfde drie oorzaken zoals deze benoemd zijn bij de opgetreden faalmechanismen. In figuur 9 is te zien hoe de verhoudingen zijn van de oorzaken van de verwachte situaties.



Figuur 9: Verwachte oorzaken van falen of afkeuren volgens de interviews.

## 5.5 Bevindingen

De opgetreden en verwachte oorzaken komen goed overeen; Dit is logisch met de ervaren professionals die zijn geïnterviewd. Deze hebben gezamenlijk een goed beeld van de oorzaken die spelen bij het optreden van faalmechanismen.

Op te merken is dat een groot deel hiervan faalmechanismen zijn die door menselijke fouten komen. Zowel ontwerp- als uitvoeringsfouten, zoals tegenvallende grondslagen, het falen van relevante cruciale constructieonderdelen, slotopeningen tijdens de uitvoering en overbelasting van de constructie zijn terug te leiden naar menselijke oorzaken. Dit aangezien de overbelasting wordt veroorzaakt door een grotere bovenbelasting dan degene waar de constructie op is berekend.

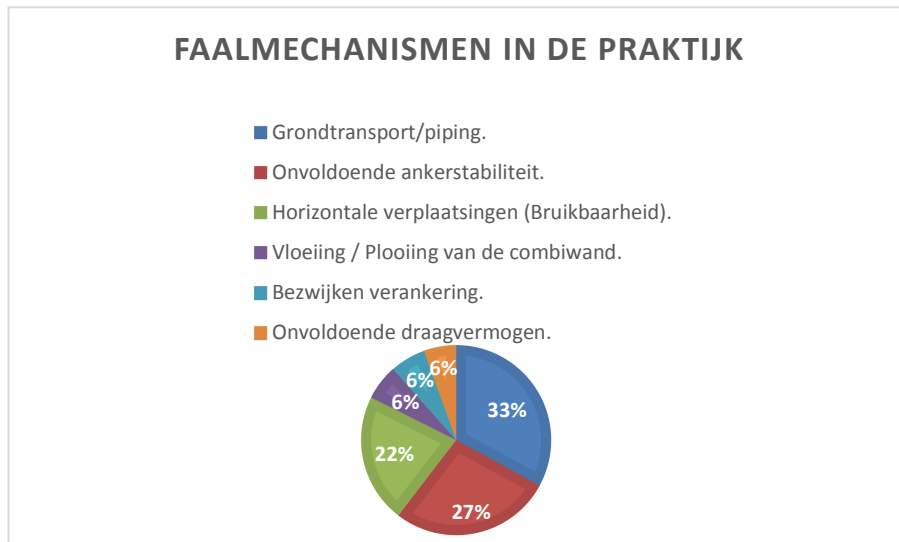
De maatgevende gevolgen van de opgetreden faalmechanismen geven een gematigd positief beeld. Het feit dat maar een kademuurconstructie is ingestort geeft aan dat er goed preventief wordt ingegrepen en een goede monitoring van de objecten wordt gehouden. Zoals eerder benoemd komt het optreden van faalmechanismen hoofdzakelijk door menselijke fouten waar niet op is ingegrepen. Op basis van deze gemaakte fouten heeft men het ontwerp op aangepast. Hedendaags ligt de focus erg op het voorkomen van fouten in het ontwerp van de ankers en verbindingen. Ook ligt een sterke focus op het voorkomen van uitvoeringsfouten en wordt in de beheerfase deugdelijke, intensieve monitoring gehandhaafd om deze faalmechanismen verder te voorkomen.

### 5.5.1 Methoden van falen

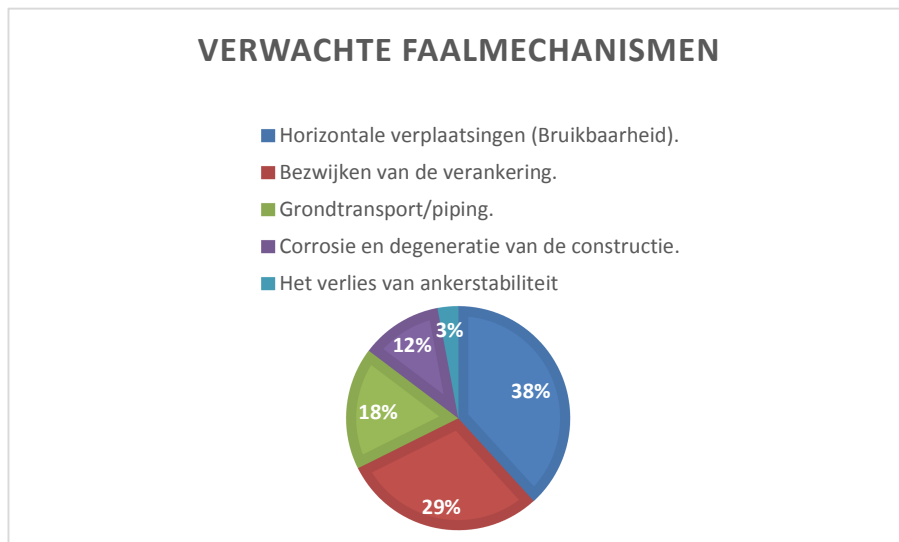
In figuur 10 zijn de praktijk gerelateerde faalmechanismen weergegeven. In figuur 11 zijn de verwachte methoden van falen weergegeven. Ook deze mechanismen komen op veel punten overeen.

Wanneer deze worden vergeleken wordt duidelijk dat de maatgevende methoden dan ook als volgt zijn:

- Het bezwijken van de verankering of het verlies van ankerstabiliteit (Kranz-stabiliteit);
- Horizontale verplaatsingen (deformaties) van de constructie, welke invloed hebben op de bruikbaarheid van de constructie;
- Het verliezen van de gronddichtheid van de constructie (grondtransport of piping);
- Het verliezen van de sterkte van de constructie (Degeneratie, corrosie).



Figuur 10: praktijk faalmechanismen volgens de interviews.



Figuur 11: Verwachte faalmechanismen volgens de interviews.

## 6 MAATGEVENDE GEVOLGEN

Om een beeld te krijgen wat de daadwerkelijke consequenties van falen is uitgebreid onderzoek nodig. Om een eerst verkenning hiervan te houden is een vragenlijst gehouden op basis van het voorgestelde toetsingskader, welk in hoofdstuk 4 is behandeld. Dit diende tevens als eerste proef van het opgestelde toetsingskader.

De vragenlijst is ingevuld door een groep experts, om middels de criteria uit het voorgestelde toetsingskader een beeld te vormen van de afzonderlijke consequenties van falen. De effecten van het falen zijn verder onderzocht op gebied van menselijke veiligheid, sociaaleconomische- en milieukundige consequenties. Hierbij is als referentiecaser de kademuur van de LNG Breakbulk Terminal aangehouden. De uitwerking van de vragenlijst wordt in het desbetreffende deelonderzoek, bijgevoegd aan het bijlagenverslag, behandeld.

Voor een verdere verdieping van de maatgevende gevolgen van het falen van afzonderlijke faalmechanismen, wordt u verwezen naar het desbetreffende onderzoek in het bijlagenverslag.

### 6.1 Vragenlijst

Voor het onderzoek naar de maatgevende gevolgen van het falen van kademuurconstructies is een kwalitatief onderzoek gestart middels een vragenlijst. De vragenlijst is ingevuld door 9 ervaren professionals.

Er is geen database met betrekking tot de gevolgen van (opgetreden) faalmechanismen. Om een indicatie van de consequenties te krijgen is een vragenlijst opgezet en gehouden met professionals uit het werkveld. Eveneens als er geen informatie over de oorzaken van falen zijn, is er geen database voor de gevolgen van het optreden van faalmechanismen. Door de vragenlijst wordt een indicatie van de consequenties gegeven.

#### 6.1.1 Toetsingskader

Tevens is er voor gekozen om het voorgestelde toetsingskader te vertalen naar de vragenlijst. Dit geeft zowel de mogelijkheid om het kader te toetsen bij de professionals, als een indruk van de classificatie die middels het toetsingskader aan de kademuuren wordt gegeven. Hierdoor is een eerste pilot van het toetsingskader gehouden, zodat het voor volgende toepassingen aanbevelingen mee kan dragen.

#### 6.1.2 Referentieproject

Om het toetsingskader daadwerkelijke toe te passen is er voor gekozen om een referentieproject in de vragenlijst te verwerken. Het referentieproject betreft een pas gerealiseerde LNG-terminal te Rotterdam, Maasvlakte. Door het toepassen van een referentieproject wordt verwacht dat de vragenlijst in meer perspectief kan worden geplaatst.

#### 6.1.3 Faalmechanismen

Voor de vragenlijst zijn een negental globale faalmechanismen geformuleerd waar de kademuuren in algemene vorm op worden getoetst tijdens het ontwerp. Deze faalmechanismen zijn opgesteld middels CUR186 "Binnenstedelijke Kademuuren" en CUR211 "Quay Walls" (SBR CURnet, 2013) (SBR CURnet, 2014). Middels het invullen van de vragenlijsten voor elk specifiek faalmechanisme, wordt een indicatie gegeven voor de onderlinge verschillen van de gevolgen van de faalmechanismen.

## 6.2 Resultaten vragenlijst

In tabellen 4, 5 en 6 zijn de gezamenlijke resultaten van de invullingen van de vragenlijst te zien. Hierbij zijn de resultaten in elk onderdeel van het voorgestelde toetsingskader weergegeven in procentuele indeling. De definitieve indeling van de betrouwbaarheidsklasse van de constructie is hoogstwaarschijnlijk een discussie van de resultaten van de classificatie. Hier zijn bewust geen criteria aan verbonden, aangezien deze als subjectief worden bevonden.

Er kan worden voor de hoogste indeling van een (deel)onderwerp als de betrouwbaarheid te kiezen, hierbij is echter beargumenteerbaar dat men hierbij bewust overdimensioneerd; Aangezien de andere deelonderwerpen hoger worden ingedeeld dan dat deze oorspronkelijk waren beoordeeld. Een ander alternatief hiervoor zou om per faalmechanisme een keuze voor de betrouwbaarheid te maken, wat er mogelijk voor zou kunnen zorgen dat de onderdelen minder worden overgedimensioneerd.

### 6.2.1 Gevolgen ten aanzien van menselijke veiligheid

Het risiconiveau bij het falen van de kademuurconstructies lijkt relatief laag, als de resultaten van de ingevulde vragenlijsten worden aangehouden. Dit geldt eveneens voor het aantal mogelijke slachtoffers wat bij het falen wordt verwacht.

Dit is te beargumenteren, aangezien de experts zowel bij de interviews als bij de vragenlijst beargumenteren dat over het algemeen relatief weinig mensen aanwezig zijn bij kademuren. Hierdoor wordt de kans op menselijke schade aanzienlijk minder dan constructies aar dit wel het geval zou zijn zoals gebouwen en bruggen.

Faalmechanismen zoals ankerbreuk, het verlies van grondichtheid en piping worden als gevaarlijker beschouwd. Dit kan worden verklaard omdat deze faalmechanismen 'plots' op kunnen treden, zonder (waarneembare) waarschuwingen.

Het verlies van (macro) stabiliteit is ook gevaarlijk. Dit komt omdat bij het verlies van (macro) stabiliteit de grond over een groter oppervlakte geheel wegschuift. Het relatief grotere oppervlakte brengt een groter risico met zich mee. Dit geldt tevens ook voor ankerbreuk, waar het falen van een enkel anker voor een zogeheten 'rits-effect' kan zorgen, waar opeenvolgend de naastgelegen ankers ook bezwijken.

Tabel 4: Gezamenlijke uitkomsten van de vragenlijst voor sociale consequenties van falen en menselijke veiligheid.

| Social consequences of failure and safety of human life                    |                                                                                   |                                                           |                                              |                                                             |                                                              |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Class                                                                      | A                                                                                 | B                                                         | C                                            | D                                                           | E                                                            |
| Risk level given structural failure                                        | Negligible or low                                                                 | Some                                                      | Considerable                                 | High                                                        | Very High                                                    |
| Uitkomst:                                                                  | 63%                                                                               | 10%                                                       | 10%                                          | 14%                                                         | 3%                                                           |
| Description of consequences regarding life safety given structural failure | Predominantly injuries. Expected number of fatalities/ disabilities fewer than 1. | Expected number of fatalities/ disabilities fewer than 5. | Expected number of fatalities fewer than 50. | Expected number of fatalities/ disabilities fewer than 500. | Expected number of fatalities/ disabilities larger than 500. |
| Uitkomst:                                                                  | 51%                                                                               | 25%                                                       | 22%                                          | 2%                                                          | 0%                                                           |

## 6.2.2 Sociaaleconomische consequenties

De sociaaleconomische effecten van falen zijn eveneens van grote invloed op de betrouwbaarheid van de kademuurconstructies; Hierbij zijn de consequenties over het algemeen het grootst volgens de experts.

Dit is echter wel sterk afhankelijk van het optredend faalmechanisme. Er zijn faalmechanismen waarbij minder schade zal optreden, of schade wat sneller/goedkoper is te herstellen. Hierbij kan bijvoorbeeld worden gedacht aan horizontale deformaties. Faalmechanismen als ankerbreuk of het verlies van (macro) stabiliteit veroorzaken grotere schade, welke moeilijk of niet te repareren is.

Hoewel de directe faalkosten (herstelkosten) relatief laag worden geschat, worden de indirecte faalkosten hoger geschat (de kosten volgend uit het niet bruikbaar van delen van de terminal, de downtime kosten). Dit wilt zeggen dat het niet operationeel zijn van (een deel van) de kademuur of ligplaats grotere economische gevolgen kan hebben. Dit is vooral het geval bij de faalmechanismen welke mogelijk grotere gebieden hebben bij het optreden, zoals ankerbreuk of het verlies van Kranz- of (macro) stabiliteit.

Hoewel de directe kosten relatief laag worden geschat, wordt de omvang van de schade groter geacht. Bij het optreden van faalmechanismen wordt er relatief grotere hoeveelheid aan sociale schade verwacht. Dit wilt zeggen dat mogelijk delen van de terminal niet bruikbaar zijn. Wel wordt relatief vaak beantwoordt dat dit door een concullega terminal, of op andere creatieve wijze, kan worden opgelost en dat dit niet voor ladingverlies zorgt.

Tabel 5: Gezamenlijke uitkomsten van de vragenlijst voor sociaaleconomische consequenties van falen.

| Social-Economic consequences of failure                              |                                              |                                                                                                                 |                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                |                                                                                                                                              |
|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Class                                                                | A                                            | B                                                                                                               | C                                                                                                                                                             | D                                                                                                                                              | E                                                                                                                                            |
| Economic damages safety given structural failure                     | Negligible or small                          | Some                                                                                                            | Considerable                                                                                                                                                  | Great                                                                                                                                          | Very Great                                                                                                                                   |
| <b>Uitkomst:</b>                                                     | <b>14%</b>                                   | <b>13%</b>                                                                                                      | <b>19%</b>                                                                                                                                                    | <b>37%</b>                                                                                                                                     | <b>17%</b>                                                                                                                                   |
| Description of social economic consequences given structural failure | Predominantly insignificant material damages | Material damages and functionality losses of significance for owners and operators and low or no social impact. | Material losses and functionality losses of societal significance, causing regional disruptions and delays in important societal services over several weeks. | Disasterous events causing severe losses of societal services and disruptions and delays at national scale over periods in de order of months. | Catastrophic events causing losses of societal services and disruptions and delays beyond national scale over periods in the order of years. |
| <b>Uitkomst:</b>                                                     | <b>7%</b>                                    | <b>56%</b>                                                                                                      | <b>24%</b>                                                                                                                                                    | <b>6%</b>                                                                                                                                      | <b>7%</b>                                                                                                                                    |
| Direct cost of failure                                               | $q < 2$                                      | $q \approx 2$                                                                                                   | $q = 2-5$                                                                                                                                                     | $q = 5-10$                                                                                                                                     | $q > 10$                                                                                                                                     |
| <b>Uitkomst:</b>                                                     | <b>73%</b>                                   | <b>27%</b>                                                                                                      | <b>0%</b>                                                                                                                                                     | <b>0%</b>                                                                                                                                      | <b>0%</b>                                                                                                                                    |
| Indirect cost of failure                                             | $< \text{€ } 8 \text{ mln}$                  | $\text{€ } 8-80 \text{ mln}$                                                                                    | $\text{€ } 80-250 \text{ mln}$                                                                                                                                | $> \text{€ } 250 \text{ mln}$                                                                                                                  |                                                                                                                                              |
| <b>Uitkomst:</b>                                                     | <b>53%</b>                                   | <b>7%</b>                                                                                                       | <b>40%</b>                                                                                                                                                    | <b>0%</b>                                                                                                                                      | <b>0%</b>                                                                                                                                    |

### 6.2.3 Milieukundige consequenties

Uit de beantwoording van de vragenlijst blijkt dat de range van antwoorden, waar alle antwoorden van experts en faalmechanismen bij elkaar zijn opgeteld, eenzelfde spreidingen te zien is. Elk van de faalmechanismen wordt in relatief lage klassen ingeschat. De concentratie bevindt zich hier in de lichtste klasse, A. Faalmechanismen met het risico van grondverlies, zoals het verlies van grond dichtheid, piping en ankerbreuk, worden relatief hoger beoordeeld. Dit kan komen door een menging van (eventueel vervuilde) grond met het oppervlaktewater.

De milieukundige schade bij het falen van de kadeconstructie van het referentieproject wordt erg laag ingeschat. Het wordt verwacht dat de consequenties van falen van een kademuurconstructie relatief weinig invloed hebben op het milieu. Hierbij zijn geen significante verschillen tussen onderlinge faalmechanismen waargenomen.

Het is mogelijk dat dit aan het referentieproject ligt. Dit zou per locatie kunnen verschillen.

Tabel 6: Gezamenlijke van de uitkomsten vragenlijst voor milieukundige consequenties van falen.

| Environmental consequences of failure                              |                                                    |                                                                                                                |                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                |
|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Class                                                              | A                                                  | B                                                                                                              | C                                                                                                                                            | D                                                                                                                                                                                                                         | E                                                                                                                                                              |
| Environmental damages given structural failure                     | Negligible or small                                | Some                                                                                                           | Considerable                                                                                                                                 | Great                                                                                                                                                                                                                     | Very Great                                                                                                                                                     |
| <b>Uitkomst:</b>                                                   | <b>82%</b>                                         | <b>10%</b>                                                                                                     | <b>8%</b>                                                                                                                                    | <b>0%</b>                                                                                                                                                                                                                 | <b>0%</b>                                                                                                                                                      |
| Description of environmental consequences given structural failure | Predominantly insignificant environmental damages. | Damages to the qualities of the environment of an order which can be restored completely in a matter of weeks. | Damages to the qualities of the environment limited to the surroundings of the failure event and which can be restored in a matter of weeks. | Significant damages to the qualities of the environment contained at national scale but spreading significantly beyond the surroundings of the failure event and which can only be partly restored in a matter of months. | Significant damages to the qualities of the environment spreading beyond national scale and which can only be partly restored in a matter of years to decades. |
| <b>Uitkomst:</b>                                                   | <b>87%</b>                                         | <b>8%</b>                                                                                                      | <b>5%</b>                                                                                                                                    | <b>0%</b>                                                                                                                                                                                                                 | <b>0%</b>                                                                                                                                                      |



## 7 EERSTE VERKENNING VAN DE ECONOMISCHE EFFECTEN VAN EEN DIFFERENTIATIE OP DE BETROUWBAARHEID

In dit hoofdstuk zal in worden gegaan op de economische effecten van een differentiatie van het toetsingskader. Hiervoor is middels een referentieproject, de pas gerealiseerde LNG Breakbulk Terminal te Maasvlakte Rotterdam, de kosten voor elk van de betrouwbaarheidsniveaus in beeld gebracht.

Tevens is een verkenning van de indirecte kosten van het optreden van een faalmechanisme uiteengezet, door een schatting de kosten van het optreden van een faalmechanisme in beeld te brengen. Deze kosten zijn gekoppeld aan de kans van optreden, de betrouwbaarheidsindex. Met de gezamenlijke uitkomsten is een gevoeligheidsanalyse uiteengezet, wat het effect op de betrouwbaarheid in beeld brengt.

Mocht u interesse hebben in de achtergrondinformatie van dit onderdeel, wordt u doorverwezen naar het bijlageverslag.

### 7.1 Referentieproject

Om een beeld te vormen van de marginale kosten van de betrouwbaarheidsindexen is een referentieproject gekozen. Het gekozen project is het ontwerp van de LNG Breakbulk Terminal te Maasvlakte Rotterdam. In figuur 12 is een luchtfoto van de terminal te zijn tijdens de realisatie hiervan.

Bij deze terminal vindt kleinschalige LNG distributie plaats voor de scheepvaart. De hoofdconstructie bestaat uit een combiwand met een zware, beschermende deksloof en groutankers. Delen van de terminal bestaan uit keermuren en steigers, deze zijn niet meegenomen in het ontwerp.

Er is voor dit project gekozen aangezien de constructie pas is gerealiseerd, de hieruit volgende prijzen vergelijkbaar zijn met de aanwezige kengetallen en de ontwerpgegevens van de gerealiseerde constructie aanwezig zijn en overeenkomen met de hedendaagse regelgeving.



Figuur 12: Luchtfoto van de aanleg van de LNG Breakbulk Terminal (Smiet).

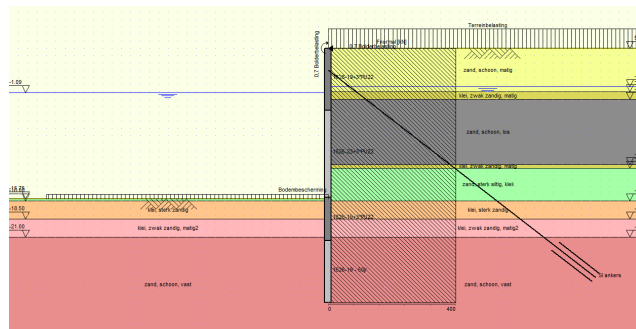


## 7.2 Uitgevoerde berekeningen

Voor het uitrekenen van de constructie is gebruik gemaakt van het programma D-sheet Piling van Deltares, aangeboden door Arcadis. Eenzelfde, echter vorige versie, programmatuur is aangehouden bij het originele ontwerp van de kademuurconstructie. In figuur 13 is een overzicht van het D-Sheet Piling model te zien. In tabel 7 zijn de toenames in maatgevende momenten en ankerkrachten te zien ten opzichte van de betrouwbaarheidsindex.

Het geotechnisch rapport is aangehouden als de leidraad van het herontwerp. Elk van de parameters, belastingen en constructieonderdelen is hieruit overgenomen om tot de nieuwe doorsneden te komen. Als controle van de invulling van het model is een controleberekening gemaakt. Uit de controleberekening volgt dat er een afwijking zit in de optredende krachten tussen het originele en het nieuwe model. Hier op volgend heeft overleg plaatsgevonden met enkele ervaren geotechnici en is gezamenlijk tot de conclusie gekomen dat het model geheel overeenkomt. Het verschil tussen de waarden zou hoogstwaarschijnlijk kunnen worden verklaard door een verschil in het gebruik van versies van de programmatuur.

De doorsneden zijn berekend middels de controle van de Nederlandse bijlagen en verschillende belastingsmodellen. Dit is middels partiële veiligheidsfactoren geschied. Voor de onbekende veiligheidsfactoren zijn nieuwe factoren bepaald middels interpolatie van de bestaande factoren met respect tot de betrouwbaarheidsindexen. Dit wordt verder toegelicht in de relevante bijlage van de berekening. Deze partiële factoren zijn met verschillende geotechnici besproken en passend geacht voor een eerste verkenning.



Figuur 13: Opbouw van het berekeningsmodel, D-Sheet Piling.

Er is bewust enkel ontworpen op de doorsneden van de profielen. Zijn bewust geen aanpassingen gedaan aan de lengte van de profielen. De tussenplanken eindigen vlak onder een kleilaag. Verkorting van de tussenplanken zou voor grondwaterstroming kunnen zorgen en heeft geen invloed op de doorsneden. De lengte van de palen zijn niet aangepast aangezien de locatie van de draagkrachtige laag niet verankert. De draagkracht is met de originele berekeningen voldoende geacht.

Tabel 7: Verhouding tussen de maatgevende ankerkrachten, momenten en gebruikte betrouwbaarheidsindex.

| Betrouwbaarheidsklasse                             | A    | B    | C    | D    | E    |
|----------------------------------------------------|------|------|------|------|------|
| Betrouwbaarheidsindex (50 jaar)                    | 2,3  | 3,2  | 3,45 | 3,8  | 4,4  |
| Maatgevend moment [ $\text{kNm}^2/\text{m}^1$ ]    | 4395 | 5110 | 5389 | 5601 | 6127 |
| Maatgevende ankerkracht [ $\text{kN}/\text{m}^1$ ] | 1198 | 1288 | 1314 | 1359 | 1461 |

### 7.3 Indicatie van de relatie tussen kosten en betrouwbaarheid

Er heeft een optimalisatie van de doorsneden voor elk van de betrouwbaarheidsniveaus plaats gevonden, behalve voor de doorsnede van de bestaande constructie. Dit is bewust gedaan omdat deze constructie is geaccepteerd.

De kosten zijn uiteindelijk bepaald middels aanbestedingsgegevens uit een recent uitbesteed project met een de zelfde constructie, de realisatie van de SIF-terminal te Maasvlakte Rotterdam. Hierbij zijn de berekende doorsneden middels totale kosten voor het leveren van de onderdelen en het aanbrengen van elk onderdeel bepaald. Dit bestaat dus uit: 'Leveren damwanden, leveren buispalen, aanbrengen damwanden en aanbrengen buispalen'.

De totale kosten hiervan zijn uitgezet in tabel 6. Hierbij zijn eveneens de totale kosten van de constructie geschat middels de publicatie 'Cost of Quay Walls' (de Gijt, 2002). Hierin staat aangegeven dat de kosten van het staalwerk 40% van de totale kosten van het realiseren van de terminal is in een vergelijkbaar project, de realisatie van de terminal in de Amazonehaven in Rotterdam.

Tabel 8: Berekende kosten in relatie tot de betrouwbaarheidsniveau's uit het toetsingskader.

| Klasse | Betrouwbaarheid-index [-] | Staaikosten (€/m <sup>1</sup> ) | Constructiekosten (€/m <sup>1</sup> ) | Marginale constructiekosten (€/m <sup>1</sup> ) |
|--------|---------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------|
| A      | 2,3                       | ≈ € 8.150,-                     | ≈ € 20.350                            | -                                               |
| B      | 3,2                       | ≈ € 8.150,-                     | ≈ € 20.350                            | ≈ € 0,00                                        |
| C      | 3,45                      | ≈ € 8.400,-                     | ≈ € 21.025                            | ≈ € 675                                         |
| D      | 3,8                       | ≈ € 8.400,-                     | ≈ € 21.025                            | ≈ € 0,00                                        |
| E      | 4,4                       | ≈ € 9.000,-                     | ≈ € 22.500                            | ≈ € 1.475                                       |

Middels deze gegevens zijn de constructiekosten in relatie tot de betrouwbaarheid berekend in formulevorm. Bij het bepalen van de kosten zijn echter grove aannamen gedaan en wordt een afwijking geadviseerd van 25%, wat niet conservatief wordt geact. De formule is hieronder weergegeven in formule 3.

$$K_c = C_a \cdot \beta + C_b \quad [3]$$

Hierin zijn  $K_c$  de totale kosten van het realiseren van de constructie [€/m<sup>1</sup>],  $C_a$  de factor van de betrouwbaarheidsindex [€/m<sup>1</sup>],  $\beta$  de betrouwbaarheidsindex van de constructie [-] en  $c$  de standaard kosten voor het realiseren van een kademuurconstructie [€/m<sup>1</sup>]. Geschatte karakteristieke waarden hiervoor voor  $C_a$  is naar benadering €500,- met een afwijking van ± € 125,- en voor  $C_b$  is dit naar benadering € 20.000,- met een afwijking van ± € 5.000,-.

De krachten van de ankers veranderen ook ten gevolge van de verschillende betrouwbaarheid niveaus. Deze bijkomende kosten zijn echter niet uitgerekend: deze worden in de gegeven verhoudingen om de totale constructiekosten te bepalen meegenomen.

## 7.4 Verkenning van de kosten van het uitvallen van een ligplaats

Ten behoeve van een verkenning van de kosten van optreden van een faalmechanisme, en de invloed op het economisch optimum van het ontwerp, is een schatting van de indirecte (downtime) kosten gemaakt.

Hierbij is de aanname gedaan dat door het optreden van een faalmechanisme gedurende een periode van 9 maanden een ligplaats niet beschikbaar is. Uit de vragenlijsten, behandeld in hoofdstuk 7, is naar voren gekomen dat een reparatieperiode van 9 maanden voor veel van de faalmechanisme mogelijk is volgens de experts. Dit ligt dus relatief in de lijn van de verwachtingen.

Aangezien de kosten van het niet beschikbaar zijn van een terminal niet bekend zijn, worden hier meerdere grove getallen voor aangenomen. De reparatiekosten van de faalmechanismen worden in deze analyse niet meegenomen. Deze reparatie kosten verschillen per faalmechanisme, maar er wordt verwacht dat er geen verband is tussen de reparatiekosten en de betrouwbaarheid van een constructie.

Er is gerekend met de bedragen overeenkomend met de uitkomsten uit de vragenlijst, behandeld in hoofdstuk 7.

Tevens zijn de bedragen omgerekend naar kosten per strekkende meter. De totale lengte van de kademuurconstructie is 200 meter.

De berekende kosten per strekkende meter kademuur zijn hieronder weergegeven in tabel 7.

Tabel 9: De relatie tussen de grof geschatte faalkanskosten en de betrouwbaarheidsindex.

| Betrouwbaarheidsklasse | Betrouwbaarheidsindex [-] | Faalkans (%)      | Faalkans-kosten 50.000 €/dag (€/m1) | Faalkans-kosten 100.000 €/dag (€/m1) | Faalkans-kosten 150.000 €/dag (€/m1) | Faalkans-kosten 200.000 €/dag (€/m1) |
|------------------------|---------------------------|-------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| A                      | 2,3                       | $1,07 \cdot 10^2$ | ≈ € 750,00                          | ≈ € 1.500,00                         | ≈ € 2.250,00                         | ≈ € 3.000,00                         |
| B                      | 3,2                       | $6,87 \cdot 10^4$ | ≈ € 50,00                           | ≈ € 100,00                           | ≈ € 150,00                           | ≈ € 200,00                           |
| C                      | 3,45                      | $2,80 \cdot 10^4$ | ≈ € 20,00                           | ≈ € 40,00                            | ≈ € 60,00                            | ≈ € 80,00                            |
| D                      | 3,8                       | $7,23 \cdot 10^5$ | ≈ € 5,00                            | ≈ € 10,00                            | ≈ € 15,00                            | ≈ € 20,00                            |
| E                      | 4,4                       | $5,41 \cdot 10^6$ | ≈ € 0,35                            | ≈ € 0,70                             | ≈ € 1,05                             | ≈ € 1,40                             |

Hier uit volgen voor elk van de kosten een grove, geschatte relatie met de betrouwbaarheid:

$$K_f = C_f \cdot \Phi(-\beta) \quad [4]$$

$$K_{f;50.000} \approx 1000 \cdot \beta^{-4.3}$$

$$K_{f;100.000} \approx 2000 \cdot \beta^{-4.3}$$

$$K_{f;150.000} \approx 3000 \cdot \beta^{-4.3}$$

$$K_{f;200.000} \approx 4000 \cdot \beta^{-4.3}$$

Hierin zijn  $K_f$  de totale indirecte faalkosten [€/m<sup>1</sup>] als factor van de betrouwbaarheidsindex,  $C_f$  de factor van de betrouwbaarheidsindex [-],  $\Phi(\dots)$  een normaalverdeling en  $\beta$  de betrouwbaarheidsindex van de constructie.

### 7.4.1 Gevoeligheidsanalyse van de invloed op de betrouwbaarheid

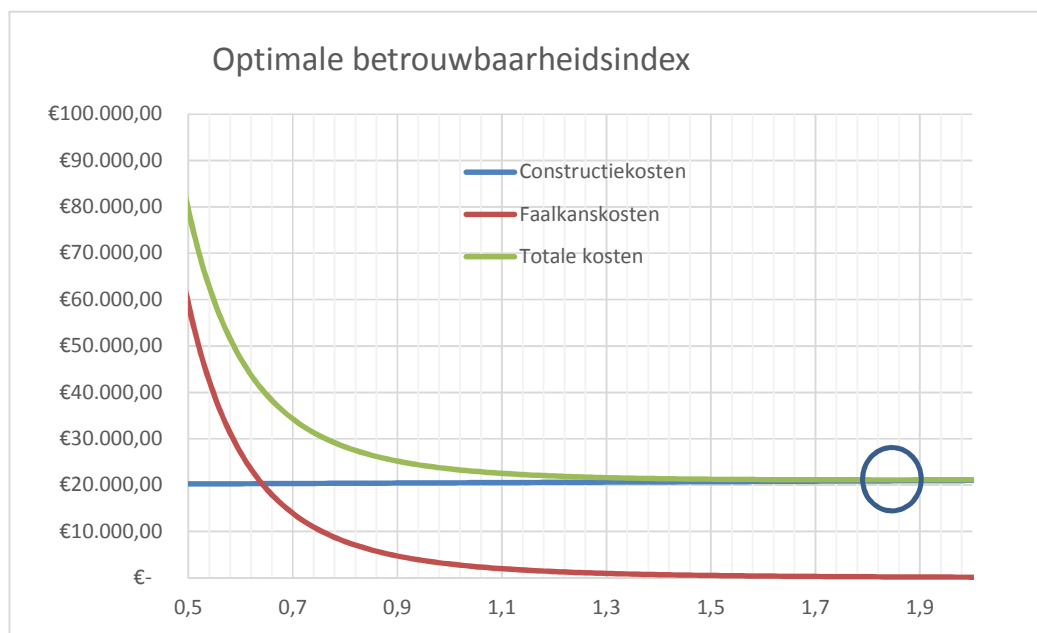
Het ontwerpen naar een economisch optimum is gewenst bij het zo optimaal gebruiken van een kademuurconstructie. Aangezien in zowel de constructiekosten als de faalkosten ruime aannemens zitten kan geen direct verband worden gegeven tussen het optimum van deze kosten.

Hierom wordt er gekozen voor de bepaling van de gevoeligheid van de betrouwbaarheid. De onderlinge factoren worden zowel positief, gemiddels als negatief tegen elkaar uit gezet. Hiermee wordt middels de combinatie van de verkregen formules berekend op een optimum.

In tabel 8 zijn de resultaten van de gevoeligheidsanalyse weergegeven. In figuur 14 zijn de formules van de gemiddelde constructiekosten, de indirecte downtime kosten met een aanname van € 150.000 per dag en de som hiervan weergegeven.

Tabel 10: Gevoeligheidsanalyse van de invloed op de betrouwbaarheid (-optimum).

|               | $C_a = €375,$<br>$C_b = €15.000$ | $C_a = €500,$<br>$C_b = €20.000$ | $C_a = €625,$<br>$C_b = €25.000$ |
|---------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| $C_f = €1000$ | <b>1,44</b>                      | 1,51                             | 1,58                             |
| $C_f = €2000$ | 1,64                             | 1,71                             | 1,81                             |
| $C_f = €3000$ | 1,77                             | 1,85                             | 1,95                             |
| $C_f = €4000$ | 1,87                             | 1,95                             | <b>2,06</b>                      |



Figuur 14: Relatie tussen de kosten en de betrouwbaarheidsindex voor de gemiddelde constructiekosten, indirecte downtime kosten met een aanname van €150.000 per dag en de som hiervan.



#### 7.4.2 Reflectie op de uitkomst.

Zoals eerder besproken in dit hoofdstuk zijn er verschillende aannamen gedaan. Dit heeft als gevolg dat de weergegeven getallen illustratief zijn. Hieronder zullen enkele onderdelen worden behandeld, waar aannamen zijn gehanteerd en welke invloed kunnen hebben op de uiteindelijke uitkomst.

##### **Constructiekosten**

Het algemene kengetal wat professionals voor kademuren gebruiken is dat deze € 25.000,- per strekkende meter kosten. Dit is over het algemeen de zwaarste klasse (RC3 / klasse E). Hiertussen zit een verschil tussen de berekende kosten van € 2.500,-. Dit verschil kan worden verklaard door het niet meenemen van de ankerdoorsneden in de kosten van de totale hoeveelheid staal. De verworven getallen zijn echter ook erg illustratief, aangezien deze middels een bron zijn bepaald en met een verhouding uit een andere bron zijn verwerkt tot totale constructiekosten. De constructiekosten zijn hierdoor minder betrouwbaar; Deze dienen hoogstens als illustratie van de verwachtingen.

Hierbij kan moet bij worden vermeld dat in de werkelijkheid de betrouwbaarheid geen rechtevenredige lijn zal zijn. Ontwerpkeuzes in combinatie met de betrouwbaarheid zullen voor een veel getrapter effect zorgen. Ter illustratie:

De maten van een de buispalen van een combiwand spelen hier een grote rol in. Wanneer middels een stap in de betrouwbaarheid van een dunnere wand naar een grotere maat met een kleinere diameter aan staal kan worden gegaan, wordt de systeemplengte van de combiwand hierdoor aangepast. Dit kan als gevolg hebben dat er minder systeemplengtes nodig zijn voor de realisatie van de kademuurconstructie. Of de keuze dat er een of meerdere ankers gelijk aan de buispalen lopen, dit kan als effect hebben dat er minder staal in de gording nodig is.

Er wordt verwacht dat deze keuzes in het ontwerp een dermate grote invloed hebben, dat in realiteit het verloop van de kosten getrapper zal lopen.

##### **Downtimekosten**

De precieze kosten van de downtime van een ligplek, of van (delen van de) terminals zijn niet bekend. Om deze redenen zijn grove aannamen gedaan. Deze aannamen zijn gedaan middels de beantwoording van de eerder behandelde vragenlijst. Het is mogelijk dat de downtimekosten in deze orde grote liggen, maar deze kunnen hier ook hevig van afwijken.

##### **Gevoelighedsanalyse**

Uit de gevoelighedsanalyse lijkt te blijken dat een mogelijke optimale betrouwbaarheid tussen de 1,44 en 2,06 zou kunnen liggen. Deze betrouwbaarheid ligt onder het betrouwbaarheidsniveau van de laagste klasse (RC0 / klasse A). Kademuren worden momenteel veelal ontworpen met een betrouwbaarheidsindex van 4,4 (RC3 / klasse E). Door de vele aannamen lijkt het niet waarschijnlijk dat het optimum dermate laag ligt, echter toont het wel aan dat het optimum mogelijk onder de betrouwbaarheidsindex van 4,4 ligt. Ook blijkt uit de gevoeligheidsanalyse dat de aannamen een grote invloed hebben op de betrouwbaarheid. Hierdoor is het optimum hoogstens een illustratie van de mogelijkheid.

##### **Totale kosten**

Bij de berekening van de totale kosten zijn enkele effecten niet meegenomen, welke invloed kunnen hebben op de locatie van het optimum. De reparatiekosten zijn niet meegenomen. Deze kosten kunnen de faalkanskosten verhogen, met als gevolg dat het optimum naar rechts verschuift. Ook is geen discantovoet meegenomen; De discantovoet representeert de waarde van de euro in relatie met de tijd. Ook dit kan invloed op het optimum hebben.

## 8 CONCLUSIE

**De eerste deelvraag luidt:** *Hoe verhouden de nationale- en internationale ontwerpmethodes (voor kademuurconstructies) zich tot elkaar ten aanzien van betrouwbaarheid van constructies?*

---

De bestaande normen en richtlijnen gaan uit van een betrouwbaarheid die gekoppeld is aan de consequenties van falen van een bouwwerk. De bestaande Eurocode is ontwikkeld voor gebouwen. Een specifieke eurocode voor maritieme infrastructuur ontbreekt. De Eurocode is gebaseerd op de ISO2394 en de Probabilistic Modelcode van de Joint Committee of Structural Safety.

Voor het ontwerpen van kademuurconstructies wordt gebruik gemaakt van de Eurocode in combinatie met Nederlandse ontwerphandboeken. De Nederlandse ontwerphandboeken worden opgesteld door het SBRCURnet, in CUR-aanbevelingen. Deze aanbevelingen richten zich op specifieke onderwerpen. Relevante CUR-aanbevelingen zijn de CUR166 'Damwandconstructies', CUR186 'Binnenstedelijke Kademuren' en CUR211 'Quay Walls'. Betreffende de betrouwbaarheid conformeert de CUR166 'Damwandconstructies' zich aan CUR211 'Quay Walls'. De beide CUR-aanbevelingen CUR186 'Binnenstedelijke Kademuren' en CUR211 'Quay Walls' conformeren zich aan de (Nederlandse bijlagen van de) Eurocode, op enkele toegevoegde voorbeelden na.

De Eurocode sluit aan op de ISO2394 en Probabilistic Modelcode 1 van de Joint Committee of Structural Safety, aangezien dit de brondocumenten van de Eurocode zijn. Deze normen en richtlijnen vormen tezamen een goede basis voor een beoordelingskader voor kademuurconstructies.

---

**De tweede deelvraag luidt:** *Wat zijn de maatgevende oorzaken waarom een kademuurconstructie in Rotterdam niet meer aan de gewenste functionaliteit kan voldoen?*

---

Op basis van de interviews met ervaren experts is vastgesteld dat een aantal kademuurconstructies tijdelijk niet meer aan de gewenste functionaliteit konden voldoen. In totaal zijn 17 situaties aangemerkt. In de meeste gevallen kon volstaan worden met kleinschalige reparaties. In 5 situaties moet de kade compleet vervangen worden.

De specifieke oorzaken hiervan liepen uiteen. Echter is wel op te merken dat veelal menselijke factoren van invloed waren. Misbruik van het terrein (een hogere belasting dan toegestaan), aanvaringen en bouwfouten waren vooral de oorzaken. De oorzaken van het falen van kademuurconstructies komen dan ook hoofdzakelijk door menselijk falen en niet door de constructie zelf. Deze factoren zijn niet meegenomen tijdens het ontwerp van de kademuurconstructies.

De consequenties van falen waren gematigd. Geen van de experts gaf aan dat ongelukken zijn voortgekomen uit de kademuurconstructies die niet meer voldeden aan de gewenste functionaliteit. Eveneens zijn geen tot weinig bijna-ongevallen gemeld. Er is geen noemenswaardige milieuschade bij de kademuurconstructies die niet meer voldeden aan de gewenste functionaliteit.

Omdat er geen grote databank met falende kademuren is, is aan de geïnterviewde experts gevraagd naar de meest waarschijnlijke faalmechanismen die theoretisch op zouden kunnen treden. De meest waarschijnlijke faalmechanismen in volgorde van belangrijkheid zijn:

- Het bezwijken van de verankering of het verlies van ankerstabiliteit (Kranz-stabiliteit);
- Horizontale verplaatsingen (deformaties) van de constructie, welke invloed hebben op de bruikbaarheid van de constructie;
- Het verliezen van gronddichtheid (grondtransport door pitting of piping);
- Het verliezen van sterkte (Bijvoorbeeld overschrijden van vloeispanning door degradatie).

---

**De derde deelvraag luidt:** *Wat zijn de maatgevende gevolgen van het optreden van een faalmechanisme bij een kademuurconstructie?*

---

Om deze vraag te beantwoorden is een vragenlijst ontwikkeld. Het ontwikkelen en valideren van een vragenlijst kost relatief veel tijd, daarom is een eerste pilot gedaan met 7 experts voor een referentieproject. De resultaten van deze pilot zijn daarom alleen richtinggevend, maar geven wel al een goede eerste indruk; Waardoor een poging wordt gedaan deze vraag te beantwoorden.

Middels het invullen van een vragenlijst door 7 deskundigen is in beeld gebracht dat vooral sociaaleconomische consequenties maatgevend zijn voor het indelen van kademuurconstructies in de betrouwbaarheidsklassen. De vragenlijst is gebaseerd op ISO2394 en sluit aan bij de Eurocode en achtergrond documenten, zodat de antwoorden direct met deze normen vergeleken kunnen worden.

Het doel was voor een referentie project een eerste test te doen naar de efficiëntie van de vragenlijst. Als referentie project is een kademuur voor een LNG-terminal gekozen, Die ingedeeld is in de meest veilige klasse van de Eurocode (RC3).

Er is op te merken dat door de termen als verwaarloosbaar, aanzienlijk en groot te gebruiken lijkt er een zekere mate van subjectiviteit aanwezig te zijn. Dit lijkt niet in overeenstemming met het aantal slachtoffers, verhouding herstelkosten en bouwkosten en de beschrijving van de milieukundige schade.

Tevens blijkt dat uit de resultaten van de vragenlijst blijkt dat er relatief weinig risico op menselijk leed is bij het optreden van een faalmechanismen van kademuren. Dit is echter wel afhankelijk per faalmechanismen. Zo worden bepaalde faalmechanismen risicovoller ingeschat. Voorbeelden hiervan zijn ankerbreuk of het optreden van piping. Daar tegen zijn er ook faalmechanismen die minder invloed op de menselijke veiligheid lijken te hebben, zoals horizontale deformatie.

De ankers van kademuurconstructies nemen grote krachten op. Wanneer een of meerdere ankers door bijvoorbeeld corrosie, aanvaringen of andere effecten bezwijken, moeten de naastgelegen ankers deze krachten kunnen overnemen. Als deze ankers dit niet kunnen, zullen deze ook bezwijken. Dit kan een zogenaamd 'rits-effect' hebben, waar elk opvolgend anker bezwijkt, aangezien hij de krachten van de vorige ankers niet kon opnemen. Hierdoor vervallen een groot deel, dan niet alle, ankerkrachten in de constructie en zal hij plots en hevig verplaatsen of omvallen. Het is dus logisch dat dit als een groter risico wordt gezien.

Bij piping treedt grondtransport op ten gevolge van grondwaterstromingen. Hierdoor verliest de kademuurconstructie grond in het achtergelegen gebied. Wanneer dit niet tijdig wordt gedetecteerd, door bijvoorbeeld metingen van de diepte in de vaarweg of doorbuiging van de ontlastvloerconstructie, kunnen in het achterliggend gebied grote gaten. Deze gaten houden zichzelf in stand, tot deze te groot worden of een te hoge boven belasting ondervinden. Dit kan dus bijvoorbeeld ineenstorten wanneer er een kraan over rijdt. Ook hierbij is kans op een mindere mate van menselijke veiligheid,

Een kademuurconstructie is over het algemeen onderhevig aan veel en verschillende omstandigheden. Dit, in combinatie met de degradatie van de constructie, kan ervoor zorgen dat de sterkte van de constructie in de loop van de tijd zal afnemen. Wanneer dit goed wordt gemonitord, kan dit als een relatief traag proces worden gezien. De geleidelijkheid van het optreden, in combinatie met goede en degelijke monitoring kan als resultaat hebben dat dit wordt beschouwd als een 'veiliger' faalmechanisme.

Verder blijkt dat eveneens de sociaaleconomische consequenties afhankelijk per faalmechanisme zijn. De sociaaleconomische consequenties worden over het algemeen ook groter geacht dan de consequenties betreffende menselijke veiligheid. Voorbeelden van faalmechanismen met een hoger risicoprofiel betreffende sociaaleconomische consequenties betreffen ankerbreuk en het verlies van (macro) stabiliteit.

Zoals eerder uitgelegd kan ankerbreuk er toe leiden dat een groot deel van de kade niet meer aan de gestelde eisen voldoet, of zelf gehele nieuwbouw nodig heeft. De directe reparatiekosten hiervan worden niet alleen groot geacht, maar de indirecte kosten zullen hier ook erg door oplopen. Doordat de kademuurconstructie over een grotere lengte niet meer bruikbaar is, is er mogelijk een ligplaats verloren of kan een (groot) deel van het terrein niet of in mindere mate worden gebruikt. Dit kan aanzienlijke verlies van lading en inkomsten met zich meebrengen.

Ditzelfde geldt voor het verlies van (macro) stabiliteit. Wanneer een kademuurconstructie niet meer stabiel in de ondergrond staat, kan deze met een groot deel van het terrein in het vaarwater afglijden. Dit kan al snel leiden tot nieuwbouw. Dit heeft ongeveer dezelfde indirecte kosten als bij ankerbreuk, aangezien dit ook over grotere lengtes kan gebeuren en dezelfde impact heeft op de terminal, haar gebruik en ligplaatsen.

Lokaal optredende faalmechanismen, zoals plotselinge zakkingen door geometrische opening grond kerende wand, worden over het algemeen gezien als faalmechanismen met kleinere sociaaleconomische effecten. Geometrische opening, wanneer deze niet tijdig door monitoring worden waargenomen, kunnen net als piping lijden tot grondverlies en (plotselinge) lokale gaten. Aangezien dit faalmechanisme lokaal is, brengt dit minder hersteltijd en -kosten met zich en is er mogelijk minder indirecte kosten ten gevolge van effecten op de bruikbaarheid van de terminal.

Uit de beantwoording van de vragenlijst zijn geen significante verschillen voor milieukundige consequenties per faalmechanisme voor dit referentieproject. Tevens is op te merken dat de milieukundige consequenties allen als erg laag en van korte duur werden ingeschat door de professionals.

---

**De vierde deelvraag luidt:** *Wat zijn de economische effecten van een differentiatie van het toetsingskader?*

---

Voor de beantwoording van deze deelvraag is één referentieproject als pilot gekozen. Hiervoor is een kademuur voor een LNG-terminal gekozen.

De kade van het referentieproject bestaat uit een combiwandconstructie met een groutinjectie-anker en een verzwaarde deksloof, ter bescherming van de kademuur. De constructie is gemodelleerd in D-Sheet Piling. Vervolgens zijn de marginale kosten van de betrouwbaarheid inzichtelijk gemaakt. Dit is gedaan door de betrouwbaarheidsindex en de veiligheidsfactoren, die algemeen geaccepteerd zijn in handboeken, te vertalen naar een ontwerp. De betrouwbaarheidsindex is hierdoor direct gekoppeld aan de bouwkosten.

De originele berekeningen zijn aangehouden om tot een overeenkomende situatie te komen. Deze zijn vervolgens per betrouwbaarheidsklassen doorberekend om tot een doorsnede van de kerende constructie te komen. De kosten van de constructies zijn aan de hand van actuele literatuur bepaald. Hieruit zijn de marginale kosten voor elk betrouwbaarheidsniveau gevolgd. Hoewel hierin een aantal aannamen zijn gedaan geeft dit een indicatie van de relatie tussen de betrouwbaarheidsindex en de constructiekosten van de kademuurconstructie.

Aanvullend is een schatting gemaakt van de kosten van het optreden van een faalmechanisme, die gedurende de 50 jaar durende levensduur van het referentieproject niet mag optreden. Hieruit zijn de faalkosten in relatie tot het betrouwbaarheidsniveau van het referentieproject bepaald. Hierbij zijn een grote hoeveelheid aannamen gedaan, echter veelal gebaseerd op de antwoorden van de vragenlijsten.

De relatie tussen de constructiekosten en de betrouwbaarheidsindex geven aan dat de toename in kosten, ofwel de marginale kosten, relatief gering is. Hierdoor kan een toename in betrouwbaarheid worden verkregen door een kleine extra investering in materiaal.

De indirecte faalkosten (van onder andere de downtime van een ligplaats) zijn van grote invloed op de positie en de grootte van de optimale investering. Wanneer indirecte kosten worden gecombineerd met de constructiekosten wordt een indicatie van het economisch optimum van het ontwerp van de kademuurconstructies gegeven. Doordat de aannames in deze pilot gebaseerd zijn op een eerste schatting van de indirecte kosten, is de kans klein dat het verworven beeld van het economisch optimum realistisch is. Het geeft echter wel een goede eerste indruk van de gevoeligheid van de betrouwbaarheid ten aanzien van de directe en indirecte kosten van falen.

Door een differentiatie van het toetsingskader kunnen kademuren beter worden gepositioneerd. Hierbij zijn de extra toevoegingen van criteria behulpzaam om de classificatie pragmatischer en beter onderbouwd uit te voeren. Door de verhouding tussen indirecte en directe kosten van falen inzichtelijk te maken kan mogelijk met groter economisch inzicht worden ontworpen.

---

**De hoofdvraag luidt:** *Op welke manier kan het raamwerk uit de Eurocode ten aanzien van betrouwbaarheid worden geoptimaliseerd voor het beoordelen en classificeren van kadeconstructies, rekening houdend met de consequenties van falen?*

---

Uit het verrichte onderzoek blijkt dat geldende normen en richtlijnen op elkaar aansluiten, maar dat hier nog veel in te optimaliseren en verbeteren is.

In Rotterdam is pas de laatste jaren gebruik gemaakt van de betrouwbaarheidsclassificatie zoals hij in de Eurocode staat omschreven (Consequentie klassen CC1, 2 en 3) voor kademuurconstructies. Deze classificatie is afgeleid voor gebouwen en niet specifiek voor maritieme infrastructuur.

In Duitsland en Engeland worden vandaag de dag voor maritieme infrastructuur geen verschillende klassen onderscheden. Opmerkelijk is ook dat in de Eurocode-0 (EN1990) 3 klassen zijn opgenomen en in de ISO2394:2015 5 klassen. Het lijkt erop dat een aantal klassen bewust of onbewust niet zijn opgenomen in de Eurocode, die mogelijk wel van belang kunnen zijn voor kademuurconstructies.

Er lijkt tevens een zekere mate van subjectiviteit aanwezig te zijn bij het classificeren van kademuurconstructies. De deskundige op het gebied van kademuren hebben mogelijk weinig tot geen kennis van het aantal toelaatbare dodelijke omgevallen en omvangen van economische gevolgschade van het optreden van faalmechanismen.

Per faalmechanisme van kademuurconstructies kunnen deze gevolgen aanzienlijk verschillen. Voor het beoordelen van bestaande constructies kan men gericht naar afzonderlijke faalmechanismen kijken.

Indien men menselijke veiligheid wil garanderen dan is het voorkomen van ankerbreuk, het voorkomen van piping of andere manieren van grondtransport en het behouden van (macro) stabiliteit belangrijk. Wanneer wordt gekeken naar economische schade dan zijn faalmechanismen die grotere beïnvloedingsgebieden vaker maatgevend. Milieukundige consequenties lijkt minder maatgevend te zijn; Het is hier raadzaam om per situatie specifiek naar te kijken. Hier zijn mogelijk uitzonderingen op, bij bijvoorbeeld kademuren in waterkeringen of, hoewel dit minder waarschijnlijk is, wanneer het bezwijken kan leiden tot explosies of het oplossen van giftige stoffen in het water.

Het raamwerk van de ISO2394, aangevuld met beschrijvingen uit andere normen en richtlijnen en het oordeel van deskundigen, lijkt te kunnen bijdragen aan een differentiatie voor maritieme constructies. Een hier op gebaseerd toetsingskader zou kunnen bijdragen aan een transparanter toetsingskader wat mogelijk betere economische afwegingen bij indeling van betrouwbaarheidsklassen kan faciliteren. Ook zou een differentiatie per faalmechanismen de berging van de betrouwbaarheid en menselijke veiligheid, in relatie tot het economisch optimaal presteren van een kademuur, ten goede kunnen komen.



## 9 AANBEVELINGEN

### 9.1 Specifieke richtlijn voor maritieme infrastructuur

De geldende normen en richtlijnen in Nederland, met name de Eurocode en Internationale Standaard, zijn ontwikkeld voor het gebruik voor bruggen en gebouwen. De richtlijnen zoals de SBRCUR-richtlijnen geven hier een goede differentiatie in, echter conformeren deze zich nog aan de Eurocode en Internationale Standaard.

Het toetsingskader wat wordt voorgeschreven in de Eurocode wordt veelal niet geheel passend geacht. In andere Europese landen worden in de richtlijnen al alternatieve methoden aangeboden om met de betrouwbaarheid om te gaan. Het verder ontwikkelen van een specifieke richtlijn voor maritieme infrastructuur zou de acceptatie van een nieuw toetsingskader ten goede kunnen komen.

### 9.2 Internationale normen en richtlijnen

Het voorgestelde toetsingskader is gebaseerd op ISO2394 en sluit aan bij de Eurocode en achtergrond documenten. Internationaal zijn er echter normen en richtlijnen die specifiek zijn ontwikkeld voor maritieme infrastructuur, zoals de Duitse EAU en de Spaanse ROM. Ook wordt in Japan een andere systematiek gebruikt.

Elk van deze normen hebben een, goed technisch onderbouwde, eigen visie betreffende het toetsen van betrouwbaarheid. In beide gevallen wordt er niet enkel gebruik gemaakt van de classificatie zoals deze is beschreven in de Eurocode.

Het verwerken van de methoden en visies van deze, maar mogelijk ook andere internationale normen en richtlijnen, zou kunnen leiden tot een beter passender toetsingskader wat mogelijk breder wordt gedragen.

### 9.3 Betrekken van de code-schrijvers

Het voorgestelde toetsingskader is, zoals eerder benoemd, gebaseerd op de ISO2394, Eurocode en de achtergrond documenten. Uit het invullen van de vragenlijsten blijkt dat de terminologie en de verwante referenciecijfers een bepaalde subjectiviteit bij de experts aanwezig te zijn.

Door het verder betrekken van de schrijvers van de originele normen en richtlijnen kunnen de intenties hierachter worden onderzocht. Het is nog onduidelijk waarom bepaalde verwoordingen en koppelingen zijn gehanteerd. Met de betrekking van de code-schrijvers zou tot nieuwe inzichten kunnen worden gekomen.

Het zou kunnen dat aanpassingen aan het kader mogelijk zijn, om bijvoorbeeld de kwantitatieve indrukken beter met de verwachtingen overeen te laten komen.

## 9.4 Afzonderlijk toetsen betrouwbaarheid faalmechanismen

Uit zowel de resultaten van het onderzoek, als de resultaten uit de vragenlijsten, blijkt dat een onderling verschil zit tussen de daadwerkelijke frequenties, verwachtingen en consequenties van faalmechanismen.

Het afzonderlijk beoordelen van de mogelijke faalmechanismen van de kademuurconstructies kan tot nieuwe inzichten leiden betreffende de onderlinge verhoudingen van de faalmechanismen.

Het individueel beoordelen van de betrouwbaarheid van bepaalde faalmechanismen kan er voor zorgen dat per faalmechanismen beheersmaatregelen kunnen worden afgewogen, om tot een zo economisch rendabele kademuurconstructie te komen.

## 9.5 Monitoring en beheer betrekken bij het toetsingskader

Uit de interviews blijkt dat er een verschil zit tussen monitorbare en plotselinge faalmechanismen. Plotselinge faalmechanismen hebben zowel een verhoogd risico betreffende menselijke veiligheid, als dat het een hoeveelheid aan kosten met zich mee brengt wat op heden niet werd verwacht.

Een differentiatie op het gebied van monitoring en beheer in het toetsingskader kan er voor een motivatie in juist, actueel en accuraat monitoringssysteem in acht wordt genomen en gehouden.

Wanneer de differentiatie resulteert in een koppeling met de betrouwbaarheid van kademuurconstructies kan het in stand brengen van monitoringssystemen en beheerplannen inbreng hebben in de afweging van het in kaart brengen van de totale kosten van kademuurconstructies in de plan-, ontwikkel- en ontwerpfases. Als resultaat kan de inbreng van beheer- en monitoring leiden tot een zo economisch mogelijk ontwerp, realisatie en instandhouding van de constructie.

## 9.6 Daadwerkelijke indirecte kosten

Uit de vergelijking van de geschatte indirecte kosten, waaruit een mogelijk economisch optimum voor het referentieproject wordt berekend in het bijlageverslag middels de betrouwbaarheid die volgt uit de ERI-normering van de Spaanse ROM, blijkt dat de geschatte indirecte kosten voor het optreden van een faalmechanisme mogelijk te optimistisch waren.

De indirecte kosten zijn een belangrijk aspect van de bepaling van het economisch optimum van een ontwerp. Voor vervolgstudies waarin het economisch optimum kan worden bepaald, is het van belang dat een goede, theoretisch onderbouwde representatie van de indirecte kosten wordt gemaakt.

Dit zal resulteren in een betrouwbaarder, representatiever economisch optimum waarnaar kan worden ontworpen.

## 9.7 Meer referentieprojecten

Aangezien een enkel referentieproject is aangehouden, zijn de gegevens onderhevig aan de situaties die bij de desbetreffende casus optreden. Het is van belang om de universele verhoudingen van onder andere faalmechanismen en de marginale kosten van betrouwbaarheid in beeld te krijgen.

Een universeel inzicht van faalmechanismen kan leiden tot een betere verhouding van consequenties te verwerven. Hier kan, bij een afzonderlijke toetsings van de betrouwbaarheid van faalmechanismen, tot een gemeenschappelijke betrouwbaarheid te komen.

Het inzicht van de daadwerkelijke marginale kosten van betrouwbaarheid kan leiden tot een betere onderbouwing van het economisch optimum waar kademuurconstructies naar kunnen worden ontworpen, realiseerd en instandgehouden.

## 9.8 Afzonderlijk milieukundige consequenties koppelen

Uit het referentieproject van de vragenlijst zijn geen onderlinge verschillen van de faalmechanismen te zien ten opzichte van milieukundige consequenties. Dit kan echter per casus sterk verschillen. Het wordt hierom aangeraden om de daadwerkelijke consequenties per casus afzonderlijk te bepalen, aangezien deze aan enorm veel verschillende factoren onderhevig kunnen zijn.

## 9.9 Controleren en ontwikkelen partiële factoren

De gebruikte partiële factoren voor de berekening van de staalprofielen zijn afkomstig uit de Nederlandse bijlagen van de Eurocode. Voor de aangevulde klassen is de afkomst tweeledig. De laagste groep factoren was al beschikbaar in D-sheet Piling (hier kwam tevens de betrouwbaarheidsindex overeen). De andere partiële factoren, voor klasse C, zijn middels interpolatie van de bestaande richtlijnen bepaald.

Deze resultaten zijn overlegd en passend geacht voor een eerste gebruik. Voor verder ontwerp is het raadzaam om deze factoren nogmaals te bekijken. Verdere controle met betrekking tot de toepasbaarheid van de gebruikte factoren in samenwerking met de ontwikkelaar van de originele partiële factoren zou een deel van de aannamen weghalen.

## 10 BIBLIOGRAFIE

- British Standard. (2015). British Standard 6349 (Maritime works) – Part 1-2: General – Code of practice for assessment of actions. In S. Watson, *British Standard 6349 (Maritime works) – Part 1-2: General – Code of practice for assessment of actions* (p. 142). London: BSI Group Headquarters.
- de Gijt, J. (2002). Typical distribution of costs. *Cost of Quay Walls* (p. 4). Delft: TU-Delft.
- Elling, R., Andeweg, B., de Jong, B., & Baars, S. (2011). *Rapportage techniek; Schrijven voor lezers met weinig tijd*. Groningen: Noordhoff Uitgevers B.V.
- Faber, M., & Vrouwenvelder, T. (2001). *Probabilistic Modelcode 1*. Delft: Joint Committee of Structural Safety.
- Frolke, G. (sd). Realisatie SIF-terminal. *Persoonlijk Album*. Havenbedrijf Rotterdam, Rotterdam.
- Grabe, P. D. (2012). *Recommendations of the Committee for Waterfront Structures, Harbours and Waterways. EAU 2012*. Hamburg: Wilhelm Ernst & Sohn.
- ISO2394. (1998, Maart 01). *General principles on reliability for structures*. Switzerland: ISO copyright. Opgeroepen op Maart 01, 2016, van De website van de ISO: <http://www.iso.org/iso/home/about.htm>
- ISO2394. (2015). *General principles on reliability for structures*. Switzerland: ISO copyright office.
- Japanse Normalisation Organisation. (sd). Partial Factor and System Reliability. In P. a. Order, *Technical standards and commentaries for ports and harbour facilities in Japan* (p. 37). Tokio: Port and Harbour Law Enforcement Order.
- Ministerio de Fomento. (2002). *General procedure and requirements in the design of harbor and maritime structures part 1; ROM0.0*. Madrid: Graficas Calima.
- Nederlands Normalisatie-Instituut. (2002). Eurocode - Grondslagen van het constructief ontwerp. In N. 3. Bouwconstructies", *Europese Norm* (p. 26). Delft: Europese Commissie voor Normalisatie.
- Nederlands Normalisatie-Instituut. (2002). Eurocode - Grondslagen van het constructief ontwerp. In N. 3. Bouwconstructies", *Europese Norm* (p. 66). Delft: Europese Commissie voor Normalisatie.
- Roubos, A., & Grotegoed, D. (2014). *CUR 186 Binnenstedelijke kademuuren*. Rotterdam: SBRCURnet.
- Saunders, M., Lewis, P., & Thornhill, A. (2006). Primaire gegevens verzamelen met behulp van vragenlijsten. In M. Saunders, P. Lewis, & A. Thornhill, *Methoden en technieken van onderzoek* (pp. 291-340). Amsterdam: Pearson Education Benelux.
- Saunders, M., Philip, L., & Adrian, T. (2006). *Methode en technieken van onderzoek*. Amsterdam: Pearson Education Benelux.
- SBRCURnet. (2013). *CUR 211 Quay-walls*. Rotterdam: SBRCURnet.
- SBRCURnet. (2014). *CUR 166 Damwanden*. Delft: SBRCURnet.
- SBRCURnet. (2014). *CUR 186: Binnenstedelijke kademuuren*. Delft: SBRCURnet.
- Smiet, M. (sd). LNG Breakbulk Terminal. *Realisatie deksloof kademuur*. Havenbedrijf Rotterdam, Rotterdam.
- STOWA. (2015). *Leidraad Waterkerende Kunstwerken in regionale waterkeringen*. Ork: STOWA.
- Swart, S. (sd). De randen tussen stad en haven. *Sluisjesdijk en Waalhaven Noordzijde met Nieuwe Maas links en Waalhaven rechts*. Beeldbank Havenbedrijf Rotterdam, Rotterdam, stadhavens.