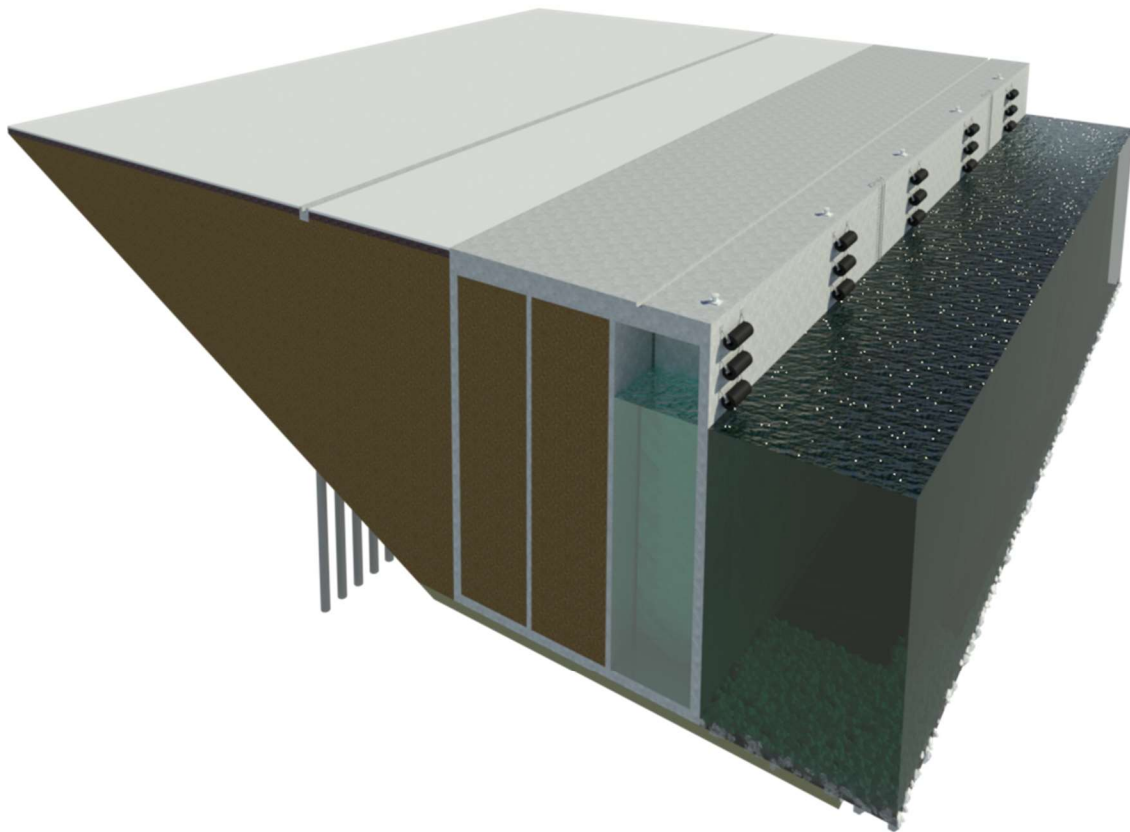




# Een flexibele, herbruikbare gewichtsmuur onder West- Rotterdamse omstandigheden

## Hoofdrapport

Witteveen + Bos  
24 mei 2019

Civiele Techniek  
CT4constructief

Jan Treure  
Thomas Kasternans

Project Een flexibele, herbruikbare gewichtsmuur onder West-Rotterdamse omstandigheden  
Opdrachtgever Hogeschool Arnhem en Nijmegen  
Witteveen + Bos, Raadgevende ingenieurs B.V.

Document Hoofdrapport Afstudeeronderzoek  
Status Definitief  
Datum 24 mei 2019

Auteur(s) Thomas Kastermans & Jan Treure  
Inhoudelijke begeleiding Menno Fousert, Witteveen + Bos  
Procesmatige begeleiding Thomas Beuker & Ernst Rob, Hogeschool van Arnhem en Nijmegen

Paraaf



Adres Witteveen+Bos Raadgevende ingenieurs B.V.  
Leeuwenbrug 8  
Postbus 233  
7400 AE Deventer  
+31 (0)570 69 79 11  
[www.witteveenbos.com](http://www.witteveenbos.com)  
KvK 38020751

Het kwaliteitsmanagementsysteem van Witteveen+Bos is gecertificeerd op basis van ISO 9001.

© Witteveen+Bos

Niets uit dit document mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt in enige vorm zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Witteveen+Bos noch mag het zonder dergelijke toestemming worden gebruikt voor enig ander werk dan waarvoor het is vervaardigd, behoudens schriftelijk anders overeengekomen. Witteveen+Bos aanvaardt geen aansprakelijkheid voor enigerlei schade die voortvloeit uit of verband houdt met het wijzigen van de inhoud van het door Witteveen+Bos geleverde document.



## VOORWOORD

Voor u ligt de scriptie 'Een flexibele, herbruikbare gewichtsmuur onder West-Rotterdamse omstandigheden'. Dit onderzoek naar gewichtsconstructies is uitgevoerd bij het ingenieursbureau Witteveen + Bos te Deventer.

Deze constructieve scriptie is geschreven ter voltooiing van de opleiding Civiele techniek bij de Hogeschool van Arnhem & Nijmegen. Van februari 2019 tot en met mei 2019 zijn we bezig geweest met het onderzoek naar gewichtsconstructies in de haven van Rotterdam.

Samen met onze afstudeerbegeleider, ir. Menno Fousert, hebben we de onderzoeksvraag voor deze scriptie gedefinieerd. Dit onderzoek draagt bij aan de kennisontwikkeling betreft dit type kademuur, daarnaast kan Witteveen + Bos beter en vooral sneller advies geven, wanneer er advies gegeven dient te worden over het realiseren van deze kademuur in de havengebieden.

Tijdens dit onderzoek stonden onze collega's vanuit de afdeling, en daarbuiten, altijd voor ons klaar. Daarom willen we onze collega's bij Witteveen + Bos graag bedanken voor de fijne samenwerking. Er is door de collega's veel tijd en moeite gestoken in het meedenken met dit afstudeeronderzoek, waardoor er op een fijne en effectieve wijze gewerkt kon worden.

Ook willen we graag onze begeleiders vanuit de opleiding, Thomas Beuker en Ernst Rob, bedanken voor de altijd snelle response en het uitlenen van de software die nodig was om het onderzoek tot een kwalitatief hoger niveau te brengen. Tevens willen we ook alle ander belangstellende bedanken voor de ondersteuning. Zonder de medewerking van alle bovenstaande genoemde betrokkenen hadden we dit onderzoek niet kunnen voltooien.

Dit onderzoek was een mooie afsluiting van onze opleiding. We zijn Witteveen + Bos dankbaar voor deze afstudeeropdracht. We hopen dat u met plezier dit afstudeeronderzoek leest.

De afstudeerders,

Thomas Kastermans & Jan Treure

Deventer, 24 mei 2019



## SAMENVATTING

Dit afstudeeronderzoek is uitgevoerd bij Ingenieursbureau Witteveen + Bos, bij de groep Havenconstructies. Deze groep is voornamelijk bezig met het berekenen van kademuren. Tot op heden worden er veelal stalen wanden (damwanden, combiwanden) of diepwanden gebruikt voor het realiseren van de grote grondkerende kademuren in de havens van Rotterdam. Door de steeds groter wordende schepen met grotere diepgang, vraagt de groep zich af of de combiwand bestaande uit buispalen en slanke wanden nog steeds de meest economische en snelste oplossing is voor het realiseren van grote grondkerende kademuren. Door de grote afmetingen van de constructie, kan er dieper gefundeerd dan de aanwezige kleilaag en kan er voor deze gewichtsconstructie mogelijk gebruik gemaakt worden van de daaronder liggende, stijve zandlaag. Op basis van deze vraagstelling is een haalbaarheidsstudie uitgevoerd met als onderzoeksvraag:

**Op welke wijze is het constructief en geotechnisch haalbaar, uitvoerbaar en economisch concurrerend om met een gewichtsconstructie 25 meter grondkerende hoogte te bereiken, in het westelijke gebied van de haven van Rotterdam?**

Een afwegingsmodel is gebruikt om gewichtsconstructies verder specificeren. Hieruit blijkt dat een afzinkbaar caisson de best passende gewichtsconstructie zal zijn in West-Rotterdamse omstandigheden. Een afzinkbaar caisson kan hergebruikt worden en zal minimale verstoring in het havengebied veroorzaken. Uit een tweede afwegingsmodel blijkt dat het prefabriceren in een bestaand bouwdok een betere oplossing is dan het te water laten via een drijvend dek of een railconstructie. Het bouwdok in Barendrecht is als uitgangspositie gebruikt.

Het afzinkbare caisson wordt constructief en geotechnisch getoetst aan de normen. Hieruit volgen de afmetingen per afzinkbaar caisson: 27,0 meter hoogte, 20,0 meter breedte en 100,0 meter lengte. Het caisson wordt 2,0 meter ingegraven, om de optredende horizontale krachten deels tegen te gaan. Betondikte voor de gewapende betonnen vloeren, buitenwanden en binnenwanden moeten circa 800 mm, 700 mm en 450 mm respectievelijk bedragen.

Het caisson wordt, met een hoekverdraaiing van 90 graden ten opzichte van de eindpositie, in het bouwdok in Barendrecht gerealiseerd. Deze verdraaiing is vereist zodat het caisson, zonder additioneel drijfvermogen, getransporteerd kan worden naar de eindbestemming in het havengebied. Het caisson kan, zonder groot materieel, gekanteld worden door het deels vullen van een van de buitenste compartimenten. Bij een bepaalde scheefstand wordt het tweede, buitenste compartiment deels met water gevuld, zodat het caisson de volledige 90 graden kan draaien. Er wordt gunstig gebruik gemaakt van het gewicht van het vulwater en de excentrische positie van de compartimenten om het terugdraaiend moment te overwinnen. In het bouwdok kunnen negen caissons met elk 100 meter lengte gerealiseerd worden.

Op basis van de gekozen bouwmethode en de afmetingen van de constructie is een beknopte projectplanning opgesteld. Voor de realisatie wordt er gebruik gemaakt van een systeemkist, waardoor de bouwtijd aanzienlijk afneemt. Aan de hand van de bouwtijd per batch caissons, de hoeveelheden, benodigd materieel en de prijzen per eenheid is een globale kostenraming opgesteld. Hierdoor kan het caisson vergeleken worden met andere kademuren. Uit deze kostenraming blijkt dat het caisson 65% duurder is dan een gemiddelde kademuur met 25,0 meter grondkerende hoogte.

Een effectenstudie is uitgevoerd waaruit blijkt dat een zandige ondergrond een vereiste is voor een caisson. Een exponentieel verband tussen de belastingen en de horizontale verplaatsing is gevonden bij cohesieve grondslagen, waarbij een dikkere en ondiepere kleilaag zal resulteren in een sneller stijgende verplaatsingslijn.

Een herbruikbaar caisson draagt bij aan de duurzaamheidsdoelstellingen van de Verenigde Naties. Deze ontwikkeling van dit type kademuur is innovatief en draagt bij aan de verdere economische groei van het Rotterdamse havengebied. Daarnaast is het hergebruiken van dit caisson een goed voorbeeld van het tegengaan van afvalproductie, doordat het hergebruikt wordt en niet wordt afgeschreven.

Het toepassen van een caisson in het westelijke gebied van de haven van Rotterdam is technisch haalbaar en uitvoerbaar. Het caisson kan concurrerend zijn met andere kademuren, mits het hergebruikt wordt.

## PROJECT SUMMARY

This graduation research was carried out at consultancy Witteveen + Bos, within the group Port Structures. The main task of this group is the calculation of quay walls. Until now steel walls (e.g. sheet piling and combined walls) and diaphragm walls are being used for the realization of large, ground retaining quay wall in the port of Rotterdam. Due to the ever-increasing growth of the container vessels, with deeper drafts is Witteveen + Bos questioning whether the combined wall, consisting of tubular piles and sheet piles is still the most economical and fastest solution for the realization of the largest ground retaining quay walls in the port of Rotterdam. Due to the large dimensions and likely deep foundation below the existing clay layer, a gravity wall is considered. It is likely that the unlaying stiff sand layer can serve as a foundation layer for this structure. Based on this question, a feasibility study is conducted with the following research question:

**In what way is it structurally and geotechnically feasible, achievable and economic competitive to reach 25 meters of retaining height with a gravity wall, in the western part of the port of Rotterdam?**

A consideration model has been used to specify the gravity wall further. This model shows that an immersible caisson is probably the most suitable gravity wall in West Rotterdam conditions. An immersible caisson can be reused and will cause minimal disruption in the port area. A second consideration model is made to determine the best suitable way of construction. This model shows that prefabrication of the caisson in an existing dry dock is a better solution than the other considered alternatives; launching via a floating deck or via a rail construction on a slope. The dry dock in Barendrecht, in the Netherlands, is used as the starting point.

The immersible caisson is constructively and geotechnically tested according to the codes. The dimensions per immersible caisson is suggested to be 27.0 m high, 20.0 m wide and 100.0 m long. The caisson is buried 2.0 m to partially counteract the horizontal forces that will occur. The concrete thickness for the reinforced concrete floors, outer walls and inner walls must be approximately 800 mm, 700 mm and 450 mm respectively.

The caisson is constructed in the proposed dry dock in Barendrecht, with an angular rotation of 90 degrees relative to the end position. The rotation is recommended so that the caisson can be transported to the final destination in the port area without any additional buoyancy. The caisson can, without large equipment, be tilted by partially filling one of the outer compartments. At a certain rotation, the second, outer compartment is partially filled with water, so that the caisson can rotate the full 90 degrees. Beneficial use of the deadweight of the water and the eccentric position of the compartments is made, to overcome the reversal moment. Nine caissons of each 100 meters in length, can be realized in the dry dock.

Based on the chosen construction method and the dimensions of the construction, a brief project plan has been set up. A specially designed formwork is used for the realization, which considerably reduces the construction time. Based on the construction time per batch of caissons, the quantities required equipment and the prices per unit, a global cost estimate has been drawn up. This estimate allows the caisson to be compared with other quay walls. This cost estimate shows that the caisson is 65% more expensive than an average quay wall with a retaining height of 25.0 meters.

Based on the carried out effect study, it can be stated that sandy soil is a requirement for a caisson. For a soil layout with clay layers within the influence zone, an exponential relationship between the loads and the horizontal displacement can be found. Thicker and shallower clay layers result in a faster increasing displacement line; therefore, the caisson will displace more.

A reusable caisson contributes to the sustainability goals of the United Nations. The graduation research into this type of quay wall is innovative and contributes to the further economic growth of the Rotterdam port area. In addition to the economic benefits, the reuse of a caisson is a good example of preventing waste production, because it can be repurposed and its depreciation period is extended.

In conclusion: "The use of a caisson in the western area of the port of Rotterdam is feasible. The caisson can be economically competitive with other quay walls, provided that it is going to be repurposed."

## INHOUDSOPGAVE

|          |                                         |           |
|----------|-----------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INLEIDING</b>                        | <b>2</b>  |
| 1.1      | Projectaanleiding                       | 2         |
| 1.2      | Probleemstelling                        | 2         |
| 1.3      | Hoofdvraag                              | 3         |
| 1.4      | Subvragen                               | 3         |
| <b>2</b> | <b>UITGANGSPUNTEN</b>                   | <b>4</b>  |
| 2.1      | Afbakening project                      | 4         |
| 2.2      | Geografische afbakening                 | 5         |
| 2.3      | Ontwerputgangspunten                    | 5         |
| <b>3</b> | <b>ONTWERP AFWEGINGEN</b>               | <b>8</b>  |
| 3.1      | Afwegingen keuze gewichtsmuur           | 8         |
| 3.2      | Afweging type gewichtsconstructie       | 9         |
| 3.3      | Afweging bouwmethode                    | 10        |
| <b>4</b> | <b>GEOTECHNISCHE HAALBAARHEID</b>       | <b>11</b> |
| 4.1      | Hoogte, Breedte en Lengte               | 11        |
| 4.2      | Gronddrukken                            | 11        |
| 4.3      | Ongedraineerde toestand                 | 12        |
| 4.4      | Samengestelde belastingen               | 12        |
| 4.5      | Verticaal draagvermogen                 | 13        |
| 4.6      | Weerstand tegen afschuiven              | 14        |
| 4.7      | Kantelstabiliteit                       | 14        |
| 4.8      | Verticale en horizontale verplaatsingen | 14        |
| 4.9      | Conclusie                               | 14        |

|          |                                                        |           |
|----------|--------------------------------------------------------|-----------|
| <b>5</b> | <b>CONSTRUCTIEVE HAALBAARHEID</b>                      | <b>15</b> |
| 5.1      | Constructieve uitgangspunten                           | 15        |
| 5.2      | Materiaaleigenschappen                                 | 16        |
| 5.3      | Duurzaamheid beton                                     | 16        |
| 5.4      | Maatgevende krachten                                   | 17        |
| 5.5      | Betondrukcontrole                                      | 18        |
| 5.6      | Wapeningshoeveelheden                                  | 18        |
| 5.7      | Conclusie                                              | 18        |
| <br>     |                                                        |           |
| <b>6</b> | <b>UITVOERINGSHAALBAARHEID</b>                         | <b>19</b> |
| 6.1      | Realisatiefase                                         | 19        |
| 6.2      | Transportfase                                          | 21        |
| 6.3      | Kantelen                                               | 23        |
| 6.4      | Afzinkfase                                             | 25        |
| 6.5      | Eindfase                                               | 25        |
| 6.6      | Conclusie                                              | 25        |
| <br>     |                                                        |           |
| <b>7</b> | <b>ECONOMISCHE HAALBAARHEID</b>                        | <b>26</b> |
| 7.1      | Gemiddelde bouwkosten kademuur                         | 26        |
| 7.2      | Kosten caisson als kademuur                            | 27        |
| 7.3      | Vergelijking caisson met andere kademuren              | 27        |
| 7.4      | Conclusie                                              | 28        |
| <br>     |                                                        |           |
| <b>8</b> | <b>EFFECTENSTUDIE BIJ AANWEZIGE KLEILAAG</b>           | <b>29</b> |
| 8.1      | Uitgangspunten                                         | 29        |
| 8.2      | Hypothese verplaatsingen                               | 30        |
| 8.3      | Analytische berekening                                 | 30        |
| 8.4      | Verplaatsingen bij project gerelateerde uitgangspunten | 31        |
| 8.5      | Andere combinaties                                     | 33        |
| 8.6      | Resultaten PLAXIS berekeningen                         | 33        |
| 8.7      | Conclusies                                             | 35        |

|      |                                                                      |                        |
|------|----------------------------------------------------------------------|------------------------|
| 9    | <b>SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS</b>                                 | <b>36</b>              |
| 9.1  | Doel 12 Verantwoorde consumptie en productie                         | 36                     |
| 9.2  | Doel 9 Industrie, Innovatie en Infrastructuur                        | 36                     |
| 9.3  | Doel 8 Waardig werk en economische groei                             | 36                     |
| 10   | <b>CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN</b>                                    | <b>37</b>              |
| 11   | <b>BIBLIOGRAFIE</b>                                                  | <b>41</b>              |
|      | Laatste pagina                                                       | 41                     |
|      | <b>Bijlagen in het deelrapport</b>                                   | <b>Aantal pagina's</b> |
| I    | Sonderingen                                                          | 3                      |
| II   | Gronddrukken, waterstanden en belastingen                            | 4                      |
| III  | Analytische bereken Fundering op staal met zand en fundering op klei | 4                      |
| IV   | Zettingsberekening                                                   | 7                      |
| V    | Engineering Rapport Eindfase                                         | 28                     |
| VI   | Engineering Rapport transport                                        | 13                     |
| VII  | Validatieberekeningen wapening                                       | 8                      |
| VIII | Wapeningsberekeningen                                                | 14                     |
| IX   | Gehele planning                                                      | 1                      |
| X    | Referentiedocument kostendeskundige                                  | 2                      |



# 1

## INLEIDING

### 1.1 Projectaanleiding

Tot op heden worden er veelal stalen wanden (damwanden, combiwanden) of diepwanden gebruikt voor het realiseren van de grote grondkerende kademuren in de havens van Nederland. Bij kleinere grondkerende hoogte wordt er ook gebruik gemaakt van L-wanden als gewichtsconstructie. Door de steeds groter wordende schepen met grotere diepgang, vraagt de groep “Havenconstructies” binnen Witteveen + Bos zich af of de combiwand met buispalen en slanke wanden nog steeds de meest economische en snelste oplossing is voor het realiseren van grote grondkerende kademuren. Gewichtsconstructie die grote grondkerende hoogte bereiken worden in Nederland niet toegepast, met name vanwege de geotechnische omstandigheden in de havengebieden. De benodigde grondkerende hoogte bedraagt circa 25,0 meter.

Dit onderzoek draagt bij aan de kennisontwikkeling betreft dit type kademuur, daarnaast kan Witteveen + Bos beter en vooral sneller advies geven, wanneer er advies gegeven dient te worden over het realiseren van een nieuwe kademuur in de havengebieden.

### 1.2 Probleemstelling

De aanwezige cohesieve lagen, in het Rotterdamse havengebied, waren in het verleden een argument om geen gewichtsconstructie te realiseren. Maar, doordat er op grote diepte gewerkt moet worden voor het funderen van een gewichtsconstructie, kan er mogelijk gefundeerd worden op de diepgelegen pleistocene zandlagen, onder de cohesieve lagen. De betere draagkracht van deze zandige ondergrond zou erg geschikt kunnen zijn voor een gewichtsconstructie. Tot op heden is er nog geen gewichtsconstructie in de haven van Rotterdam gerealiseerd met zeer grote grondkerende hoogte.

In dit onderzoek wordt er ingegaan op de vraagstelling of een gewichtsconstructie economischer en sneller gerealiseerd kan worden dan een traditionele kademuur. Concluderend zal er gesteld worden of een gewichtsconstructie een haalbare oplossing is voor de grote grondkerende kademuren in de haven van Rotterdam.

### 1.3 Hoofdvraag

Uit de probleemstelling volgt de hoofdvraag voor dit afstudeeronderzoek:

Op welke wijze is het constructief en geotechnisch haalbaar, uitvoerbaar en economisch concurrerend om met een gewichtsconstructie 25 meter grondkerende hoogte te bereiken, in het westelijke gebied van de haven van Rotterdam?

### 1.4 Subvragen

Ter ondersteuning aan de hoofdvraag, worden er verschillende subvragen geformuleerd. Deze vragen worden onderzocht tijdens het afstuderen en vormen de rode draad voor dit onderzoek.

De subvragen zijn:

**Welke praktische dimensies moeten aangehouden worden om te voldoen aan de geotechnische en constructieve normen?**

Om tot een antwoord op deze subvraag te komen, worden de volgende stappen ondernomen:

- Belastingen vaststellen;
- Geometrie van de constructie bepalen;
- Geotechnische uitgangspunten vaststellen;
- Geotechnische funderingsberekening uitvoeren;
- Constructieve dimensies bepalen.

**Op welke manier kan de gekozen gewichtsconstructie gerealiseerd worden en op de locatie geplaatst worden?**

Om tot een antwoord op deze subvraag te komen, worden de volgende stappen ondernomen:

- Bouwfasering opstellen;
- Werkplan opstellen;
- Wijze van transporten bepalen;
- (indien van toepassing) Opdrijf- en stabiliteitsberekening uitvoeren.

**Hoe verhoudt de gekozen gewichtsconstructie zich met een gemiddelde kademuur, wanneer de bouwkosten met elkaar vergeleken worden?**

Om tot een antwoord op deze subvraag te komen, worden de volgende stappen ondernomen:

- Hoeveelheden berekenen;
- Kostenposten en prijzen bepalen;
- Vergelijking tussen gemiddelde kademuur en gekozen gewichtsconstructie opstellen.

**Welk effect heeft een kleilaag onder een gewichtsconstructie, op de horizontale verplaatsing van het element?**

Om tot een antwoord op deze subvraag te komen, worden de volgende stappen ondernomen:

- Aanvullende geotechnische uitgangspunten bepalen;
- Horizontale verplaatsingen bepalen;
- Relatie tussen de horizontale verplaatsing en belasting opstellen.

# 2

## UITGANGSPUNTEN

### 2.1 Afbakening project

Tijdens dit onderzoek wordt er gekeken naar de grote elementen die direct verbonden zijn met of effect hebben op de draagkracht van de kademuur. Betreffende de belastingen, wordt er enkel gekeken naar de belastingen die veel invloed op de constructie hebben, dit zijn:

- Eigen gewichten;
- Actieve en passieve grondrukken;
- Hoge/lage waterstanden;
- Bolderkrachten;
- Bovenbelasting;
- Dichtheid water (Zoet/Zout);
- (statische) Belastingen tijdens transporteren.

Een aantal belastingen worden **niet** opgenomen in dit onderzoek. Deze belastingen zullen weinig invloed hebben op de uiteindelijke conclusie of zijn te complex voor dit afstudeeronderzoek, dit zijn:

- Thermische belasting;
- Windbelasting;
- Ijsbelasting;
- Sneeuwbelasting;
- Trillingsbelasting;
- Belastingen ten gevolge van verschilzakkingen;
- Seismische belasting.

Ook een aantal onderdelen worden uitgesloten. Deze onderdelen worden daarom ook verder **niet** berekend. Sommige onderdelen zullen wel zichtbaar zijn in andere berekeningen of tekeningen, maar deze dimensies volgen dan uit literatuur of zijn gekozen op basis van ervaring. De uitgesloten onderdelen zijn:

- Kabels en Leidingen;
- Bodembescherming;
- Kade- en afmeermeeubilair;
- Kathodische bescherming, coating en verfsystemen;
- Constructies in de nabije omgeving van de grondkerende kademuur;
- Vleugelwanden;
- Vergunningen.

## 2.2 Geografische afbakening

In dit afstudeeronderzoek wordt alleen het westelijke gebied van de haven van Rotterdam beschouwd. Dit is de diepste haven van Nederland en daardoor ook een locatie waar kademuren met een kerende hoogte van 25,0 meter gebouwd zouden kunnen worden.

In Afbeelding 2.1 is een momentopname geplaatst van het westelijke gedeelte van de haven van Rotterdam. In dezelfde afbeelding is ook de geplande eindsituatie opgenomen van de gemeente (Gemeente Rotterdam, 2018). Dit maakt de hoeveelheid nog te verrichten werkzaamheden ook goed zichtbaar. Het rood omcirkelde veld valt binnen de projectgrenzen.

Afbeelding 2.1 Geografische afbakening (Google Maps, 2019)



## 2.3 Ontwerputgangspunten

Om de haalbaarheid van een gewichtsconstructie te onderzoeken zijn zowel geotechnische als constructieve berekeningen vereist. In dit hoofdstuk worden de ontwerputgangspunten voor deze berekeningen gegeven. Deze waarden volgen uit de ontwerputgangspunten in het deelrapport (hoofdstuk 2.2).

### Ontwerpschip

De afmetingen waarmee gerekend wordt zijn gebaseerd op een, in de toekomst nog te ontwikkelen, schip. Hierdoor zijn de toekomstige ontwikkelingen in de scheepvaart in dit rapport opgenomen. De afmetingen volgen uit het Handboek Kademuren (De Gijt, 2013) en zijn opgenomen in Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Overzicht afmetingen ontwerpcontainerschip (De Gijt, 2013, p. 23)

| Type                   | Lengte<br>[m] | Breedte<br>[m] | Diepte<br>[m] | Tonnage<br>[DWT] | Maximaal lading<br>[TEU] |
|------------------------|---------------|----------------|---------------|------------------|--------------------------|
| Ontwerp containerschip | 440           | 59             | 16,5          | 220,000          | 20,250                   |

### Grondkerende hoogte

De grondkerende hoogte van de kademuur wordt bepaald op basis van een aantal onderdelen. De onderdelen met bijbehorende diepte per onderdeel wordt gegeven:

- Hoogte kademuur boven extreem laag water (LAT + toeslag); 6,3 m;
- Diepgang ontwerpschip; 16,5 m;
- Andere toeslagen en toleranties (zoals baggertolerantie en onderhoudsmarge); 2,2 m.

Hieruit volgt dat de grondkerende hoogte van de kademuur 25,0 meter moet zijn. De ontwerputgangspunten en kerende hoogte wordt verder onderbouwd in het deelrapport (hoofdstuk 2.2.4).

## Belastingen

De belastingen worden toegelicht in het deelrapport, hoofdstuk 2.2.7. Samengevat zijn de maatgevende belastingen:

- Verticale en horizontale grond en waterdrukken, berekend volgens de norm (NEN9997-1, 2016);
- Eigen gewicht, berekend volgens de norm (NEN1992-1, 2011);
- Terreinbelasting; 100 kN/m<sup>2</sup>;
- Verticale kraanbelasting, 1200 kN per wiel, h.o.h. 1,05 meter; 1143 kN/m;
- Horizontale kraanbelasting, parallel aan kademuur, 10% verticale belasting; 114,3 kN/m;
- Bolderkrachten\*, 2000 kN per bolder, h.o.h. 30,0 meter; 67 kN/m;
- Afmeerbelasting\*; 2000 kN/m;
- Windbelasting en Thermische belasting. Niet beschouwd.

(\*) De afmeerbelasting en Bolderkrachten kunnen niet tegelijkertijd optreden;

## Geotechnisch bodemprofiel

Tabel 2.2 toont het vastgestelde bodemprofiel. Dit bodemprofiel komt overeen met een typische grondopbouw voor het westelijke deel van de haven van Rotterdam.

Tabel 2.2 Grondopbouw op basis van sondering (bijlage I van het deelrapport)

| Laag<br>[-] | Hoofdnaam<br>[-] | Bijmengsel<br>[-] | Consistentie<br>[-] | B.k. laag<br>[m NAP] | q <sub>c</sub><br>[kN/m <sup>2</sup> ] | γ / γ <sub>sat</sub><br>[kN/m <sup>3</sup> ] | φ'<br>[°] | c'<br>[kPa] |
|-------------|------------------|-------------------|---------------------|----------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------|-----------|-------------|
| 1           | Zand             | Schoon            | Matig               | 5                    | 15                                     | 18 / 20                                      | 32,5      | 0           |
| 2           | Zand             | Sterk siltig      | -                   | -1                   | 8                                      | 18 / 20                                      | 25,0      | 0           |
| 3           | Zand             | Schoon            | Matig               | -11                  | 13                                     | 18 / 20                                      | 32,5      | 0           |
| 4           | Klei             | Zwak zandig       | Vast                | -14                  | 5                                      | 20 / 20                                      | 22,5      | 13          |
| 5           | Zand             | Schoon            | Vast                | -15,5                | 30                                     | 19 / 21                                      | 35,0      | 0           |
| 6           | Klei             | Sterk zandig      | -                   | -20,5                | 2                                      | 18 / 18                                      | 27,5      | 0           |
| 7           | Zand             | Schoon            | Vast                | -21,5                | 45                                     | 19 / 21                                      | 35,0      | 0           |

Deze bodemopbouw is gebaseerd op de geïnterpreteerde sonderingen uit bijlage I van het deelrapport. De interpretatie is uitgevoerd volgens de geotechnische norm (NEN9997-1, 2016, p. 2.4.5.2).

## Waterstanden

Verschillende waterstanden zijn gegeven in de ontwerpuitgangspunten in het deelrapport (hoofdstuk 2.3). De waterstanden zijn gegeven:

- Gemiddeld laagwater (GLW, 5% overschrijdingskans tijdens referentieperiode); NAP -1,08 m;
- Gemiddeld hoogwater (GHW, 5% overschrijdingskans tijdens referentieperiode); NAP +1,77 m;
- Hoogst gemeten hoogwater (HHW, Incidentele waarde, daarom ook IGT); NAP +3,34 m;
- Laagst gemeten laagwater (LLW, Incidentele waarde, daarom ook IGT); NAP -1,95 m.

Er wordt uitgegaan van een slecht werkend drainagesysteem, met een vertraging van 120 minuten. Dit heeft gevolgen voor de landafwaarts gerichte waterdruk en korrelspanning. Bijlage II van het deelrapport toont de uitgangspunten en resultaten van deze berekening.

## Veiligheidsfilosofie

De constructie wordt getoetst volgens de veiligheidsfilosofie van gevolgklasse 3. Het bezwijken van deze constructie zal resulteren in zeer grote economische schade en zeer grote gevolgschade, daarnaast is een levensduur van 100 jaar gewenst, omdat het element mogelijk nog hergebruikt zal gaan worden (zie o.a. hoofdstuk 3.2 en 6.5).

Tabel 2.3 toont de combinatiefactoren die relevant zijn voor het berekenen van deze kademuur. Deze gegevens volgen uit het Handboek Kademuren.

Tabel 2.3 Combinatiefactoren op kademuren (De Gijt, 2013, p. 233)

| Belastingsgeval                                    | Combinatiefactor<br>$\psi_0$ | Frequent<br>$\psi_1$ | Quasi<br>$\psi_2$ |
|----------------------------------------------------|------------------------------|----------------------|-------------------|
| Gelijkmatig verdeelde belasting (containers, bulk) | 0,7                          | 0,5                  | 0,3               |
| Verkeersbelastingen (havenvoertuigen)              | 0,6                          | 0,4                  | 0,0               |
| Kraanbelasting, Bolderkrachten, Afmeerbelasting    | 0,7                          | 0,3                  | 0,0               |
| Grond- en Waterdrukken                             | 1,0                          | 1,0                  | 1,0               |
| Verschilzettingen                                  | 1,0                          | 1,0                  | 1,0               |
| Omgevingsbelastingen (wind, sneeuw, temperatuur)   | 0,7                          | 0,3                  | 0,0               |

Verskillende belastingcombinaties worden opgesteld aan de hand van de Eurocode (NEN1990, 2011), Tabel 2.4 toont de algemene belastingcombinaties. De combinatiefactoren van gevolgklasse 3 (CC3) zijn al ingevuld.

Tabel 2.4 Belastingcombinaties CC3 (NEN1990, 2011, p. A2.4 Nationale Bijlage)

| RC/<br>CC | Belasting combinatie      | Permanente ( $\gamma_{fg}$ ) |         | Veranderlijke ( $\gamma_{fq}$ )             |                                                    | Bijzondere<br>( $\gamma_{fa}$ ) |
|-----------|---------------------------|------------------------------|---------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------|
|           |                           | Ongunstig                    | Gunstig | Dominant<br>operende variabele<br>belasting | Overige<br>gelijktijdig<br>optredende<br>belasting |                                 |
| 3         | Fundamenteel, 6.10b (UGT) | 1,25 * G                     | 0,9 * G | 1,65 * Q                                    | 1,65 * $\psi_0$ * Q                                | -                               |
| 3         | Fundamenteel, 6.10a (UGT) | 1,4 * G                      | 0,9 * G | -                                           | 1,65 * $\psi_0$ * Q                                | -                               |
| 3         | Bijzonder, 6.11 (IGT)     | 1,0 * G                      | 1,0 * G | 1,0 * $\psi_1$ * Q                          | 1,0 * $\psi_2$ * Q                                 | 1,0 * A                         |
| 3         | Momenteel, 6.15 (BGT)     | 1,0 * G                      | 1,0 * G | 1,0 * $\psi_1$ * Q                          | 1,0 * $\psi_2$ * Q                                 | -                               |

Door deze combinaties op te stellen kunnen maatgevende krachten bepaald worden. Aan de hand van deze krachten kan verder gedimensioneerd worden.

De IGT (=Incidentele GrensToestand) is in dit onderzoek niet verder onderzocht. De aanvaarbelasting (= incidenteel) is gelijk aan 1,5 keer de afmeerbelasting (zie paragraaf 2.2.8 van het deelrapport). Dit is minder groot dan de combinatie waarin 1,65 keer de dominante belasting optreedt. Daarom is de IGT voor deze globale berekeningen, in dit rapport, niet maatgevend voor de geotechnische en constructieve berekeningen. Voor detailbeschouwingen moet deze toestand wel gebruikt worden.

Partiële factoren voor de geotechnische berekeningen zijn weergegeven in Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Geotechnische partiële factoren (NEN9997-1, 2016, p. 2.4.7)

| Grondparameter               | Symbool            | Keermuur |
|------------------------------|--------------------|----------|
| Hoek van inwendige wrijving  | $\gamma_{\phi'}$   | 1,2      |
| Effectieve cohesie           | $\gamma_{c'}$      | 1,5      |
| Ongedraineerde schuifsterkte | $\gamma_{cu'}$     | 1,5      |
| Prismadruksterkte            | $\gamma_{qu'}$     | 1,5      |
| Volumiek gewicht             | $\gamma_{\gamma'}$ | 1,1      |

## ONTWERP AFWEGINGEN

### 3.1 Afwegingen keuze gewichtsmuur

Tijdens dit afstudeerproject is er onderzoek gedaan naar gewichtsconstructies die dienen als kademuur in het westelijk gebied van de haven van Rotterdam. Het is niet gebruikelijk dat er in dit gebied, wat bekend staat om de aanwezigheid van slappere lagen in de ondergrond, gebruik gemaakt wordt van gewichtsconstructies. In dit hoofdstuk worden de voordelen, die gewichtsconstructies hebben ten opzichte van stalen wanden, gegeven.

#### Prefab mogelijkheid

Een gewichtsconstructie kan geheel geprefabriceerd worden, alleen bij een L-wand blijkt dit lastiger te zijn bij 20,0 meter of meer grondkerende hoogte. Door een kademuur te prefabriceren hoeft een groot deel van het betonwerk niet op locatie gerealiseerd te worden. In een druk havengebied, als dat van Rotterdam, kan dit gewenst zijn in verband met minder verstoring van de havenoperaties. Aangezien een grote inkomstenbron van de haven de ligplaatsen zijn, is het gewenst om het te realiseren van een kademuur zo spoedig mogelijk uit te voeren. Door de hinder in het havengebied zo minimaal mogelijk te houden zullen er weinig tot geen inkomsten misgelopen worden op de ligplaatsen.

#### Nederlands beton

De beschouwde gewichtsconstructies bestaan voornamelijk uit beton, de materialen die er nodig zijn voor het produceren van beton kunnen in Nederland gewonnen worden. Het staal wat normaliter gebruikt wordt voor stalen wanden, wordt geïmporteerd vanuit het buitenland. Dit is milieubelastende oplossing. Door het gebruik van Nederlands beton kan er bespaard worden op buitenlands (wapenings)staal. Mogelijk is een betonnen kademuur ook minder milieubelastend.

Doordat een holle gewichtsconstructie kan opdrijven, is het mogelijk dat deze kademuur op een andere locatie kan fungeren als grondkerende constructie. Een andere, mogelijke herbestemming voor een holle gewichtsconstructie kan zijn dat het gebruikt gaat worden als ruimte-efficiënte, snel plaatsbare golfbreker voor de kust.

De laatste optie is dat de holle constructie getransporteerd wordt naar een droogdok waar het afgebroken wordt. Het menggranulaat kan dienen als wegfundering of als basis voor nieuw beton.

#### Geen verankeringen

Tijdens de realisatie van een gewichtsmuur verkrijgt het haar stabiliteit door middel van haar eigen gewicht. Dure verankeringen zijn hierdoor bij gewichtsconstructies vaak niet nodig. Ook neemt het plaatsen van de verankeringen tijd in beslag.

Vergeleken met de stalen wanden is de gewichtsconstructie mogelijk:

- Sneller; Geprefabriceerde elementen kunnen sneller op locatie gerealiseerd worden
- Duurzamer; In een later stadium kunnen de beschouwde gewichtsconstructies hergebruikt worden met dezelfde of andere functie
- Goedkoper; Er kan gebruik gemaakt worden van materialen uit eigen land. Dure verankeringsystemen zijn niet vereist.

Deze redenen zijn de aanleiding waarom een haalbaarheidsstudie naar gewichtsconstructies in het westelijke deel van de haven van Rotterdam uitgevoerd is.

## 3.2 Afweging type gewichtsconstructie

Om te bepalen welk type gewichtsconstructie verder uitgewerkt gaat worden is er een Multicriteria-analyse (=MCA) opgesteld, de uitkomst is te vinden in Afbeelding 3.1. Om te bepalen welk alternatief het beste kan concurreren met de stalen wanden zijn er een aantal beoordelingscriteria opgesteld waaraan de gewichtsconstructies getoetst zijn. Door aan elk criteria een wegingsfactor en vervolgens een score te geven resulteert dit in een totaalscore. De totaalscore is te vinden in het afwegingsmodel in de onderstaande afbeelding. Uit de toetsing door middel van het MCA volgt dat het caisson het beste scoort, in de gegeven omstandigheden. Andere beoordelingscriteria of een verandering van de score van het criterium, kan resulteren in een ander voorkeursvariant. Het caisson wordt in dit afstudeeronderzoek verder uitgewerkt.

Het caisson scoorde ten opzichte van de andere gewichtsmuren erg goed op de criteria kosten en kwaliteit. Dit komt voort uit het feit dat een caisson flexibel, demontabel, verplaatsbaar en herbruikbaar is.

Doorslaggevende criteria voor de afweging tot een caisson, zijn:

- Bouwtijd; Het caisson kan als een volledige constructie geprefabriceerd worden. De bouwtijd op locatie wordt verkort. Dit kan resulteren in lagere kosten. Daarnaast zal het havengebied minder gestoord worden door prefabricatie.
- Realisatiekosten; Het caisson is een grote holle constructie, er is daarom relatief weinig duur materiaal benodigd, vergeleken met de andere gewichtsconstructies. Hierdoor zijn de materiaalkosten lager;
- Duurzaamheid; Het caisson kan in een later stadium opnieuw worden opgedreven en hergebruikt worden. Door het caisson te hergebruiken scoort het goed op het criterium duurzaamheid.

De verdere onderbouwing voor deze afweging zijn te vinden in het deelrapport, hoofdstuk 3.6.

Afbeelding 3.1 Multicriteria-Analyse Gewichtconstructies (Eigen afbeelding)

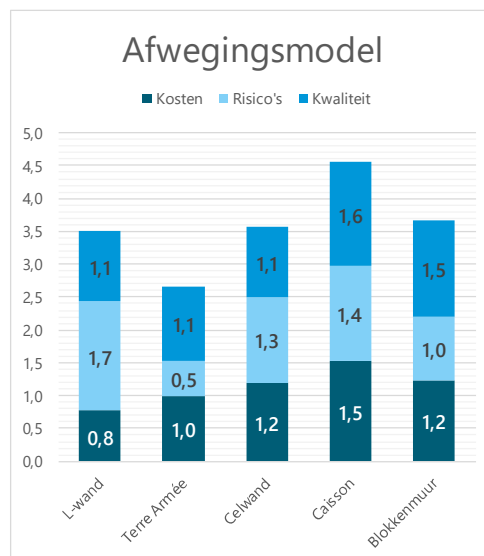
Multi Criteria Analyse gewichtsconstructies in de haven van Rotterdam

Voor het afstudeeronderzoek van de genoemde auteurs is het nodig om een afweging te maken tussen verschillende typen gewichtsconstructies.

| Beoordelingscriteria | Weging | Score  | score       | score   | score   | score       |
|----------------------|--------|--------|-------------|---------|---------|-------------|
|                      |        | L-wand | Terre Armée | Celwand | Caisson | Blokkenmuur |
| Kosten               | 1,00   | 2,3    | 3,0         | 3,6     | 4,6     | 3,7         |
| Bouwtijd             | 50%    | 2      | 1           | 3       | 5       | 4           |
| Realisatiekosten     | 40%    | 2      | 5           | 4       | 4       | 3           |
| Onderhoudskosten     | 10%    | 5      | 5           | 5       | 5       | 5           |
| Risico's             | 1,00   | 5,0    | 1,6         | 3,9     | 4,3     | 2,9         |
| Bouwriscico's        | 40%    | 5      | 1           | 3       | 4       | 2           |
| Schadegevoeligheid   | 30%    | 5      | 3           | 4       | 5       | 5           |
| Ervaring             | 30%    | 5      | 1           | 5       | 4       | 2           |
| Kwaliteit            | 1,00   | 3,2    | 3,4         | 3,2     | 4,8     | 4,4         |
| Veiligheid           | 40%    | 5      | 3           | 3       | 5       | 4           |
| Duurzaamheid         | 40%    | 2      | 3           | 4       | 5       | 5           |
| Uitbreidbaarheid     | 20%    | 2      | 5           | 2       | 4       | 4           |
| Resultaat            | 1,00   | 3,5    | 2,7         | 3,6     | 4,6     | 3,7         |
| Kosten               | 33%    | 2,3    | 3,0         | 3,6     | 4,6     | 3,7         |
| Risico's             | 33%    | 5,0    | 1,6         | 3,9     | 4,3     | 2,9         |
| Kwaliteit            | 33%    | 3,2    | 3,4         | 3,2     | 4,8     | 4,4         |

### CONCLUSIE

Uit bovenstaande afweging volgt dat het Caisson het beste alternatief is.



### 3.3 Afweging bouwmethode

Nu er bepaald is dat een caisson verder onderzocht gaat worden, wordt er gekeken naar de wijze van transporteren. Hiermee wordt bedoeld op waar en op welke wijze het caisson naar de afzinklocatie vervoerd wordt. Een deel van de literatuurstudie (in het deelrapport) is gewijd aan het onderzoeken van een aantal methodes om het caisson te transporteren. Uiteindelijk zijn er drie mogelijke manieren overwogen (bouwdok, drijvend dek en een railconstructie), deze mogelijke transportmethodes zijn getoetst aan een aantal beoordelingscriteria. Uit de toetsing is gebleken dat het realiseren van het caisson in een bestaand bouwdok de beste oplossing is, in de gegeven omstandigheden.

Het gebruik van een bouwdok scoort vooral goed op de criteria kosten en risico's. Dit komt voort uit het gegeven dat de kosten relatief laag zijn en er erg veel ervaring is met een bouwdok voor afzinkbare elementen in Nederland. Aangezien er in Nederland zich een bouwdok in Barendrecht bevindt, kan deze locatie gebruikt worden voor de realisatie van de caissons. In Afbeelding 3.2 zijn de scores te zien te die gegeven zijn aan elk alternatief. Tevens is er in de afbeelding te zien wat de totaalscore is in het afwegingsmodel.

Doorslaggevende criteria voor de afweging tot het gebruik van een bestaand bouwdok, zijn:

- Realisatiekosten; Aangezien er in Nederland meerdere bouwdokken zijn en de kosten van het huren lager zijn dan het realiseren van een nieuw dok, scoort het bouwdok goed op realisatiekosten;
- Bouwtijd; Zoals hierboven vermeld zijn er in Nederland bouwdokken aanwezig. Er kan gebruikt gemaakt worden van deze reeds ingerichte werkplaatsen. Het werken in deze omgeving is sneller dan het opnieuw opbouwen van een werkterrein. Een aantal bouwdokken zijn ook voorzien van een betoncentrale. Er wordt uitgegaan dat het bouwdok beschikbaar is, maar dit is een projectrisico. Ervaring; In Nederland zijn erg veel zinktunnelementen geprefabriceerd in bouwdokken, het realiseren van een gelijkvormig element in een bouwdok scoort daarom hoog op het criterium ervaring.

De onderbouwing van de wegingsfactoren en gegeven scores zijn te vinden in hoofdstuk 3.7 van het deelrapport.

Afbeelding 3.2 Multicriteria-Analyse Transportmogelijkheden (Eigen afbeelding)

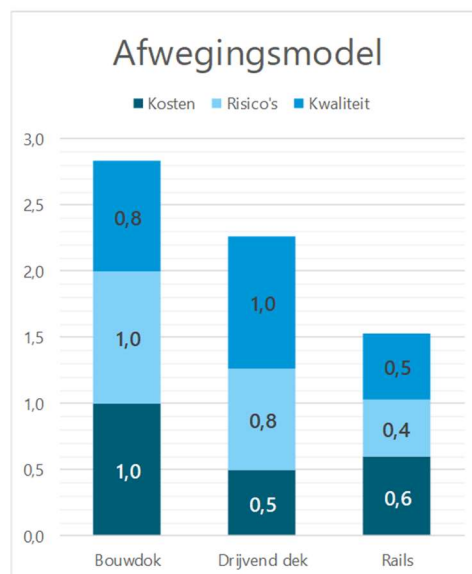
#### Multi Criteria Analyse transportmethode

Voor het afstudeeronderzoek van de genoemde auteurs is het nodig om een afweging te maken tussen verschillende typen transportmethodes.

| Beoordelingscriteria | Weging | Score   | score        | score |
|----------------------|--------|---------|--------------|-------|
|                      |        | Bouwdok | Drijvend dek | Rails |
| Kosten               | 1,00   | 3,0     | 1,5          | 1,8   |
| Realisatiekosten     | 60%    | 3       | 1            | 2     |
| Bouwtijd             | 30%    | 3       | 2            | 1     |
| Transportkosten      | 10%    | 3       | 3            | 3     |
| Risico's             | 1,00   | 3,0     | 2,3          | 1,3   |
| Ervaring             | 70%    | 3       | 2            | 1     |
| Risico's             | 30%    | 3       | 3            | 2     |
| Kwaliteit            | 1,00   | 2,5     | 3,0          | 1,5   |
| Veiligheid           | 50%    | 2       | 3            | 1     |
| Herbruikbaarheid     | 50%    | 3       | 3            | 2     |
| Resultaat            | 1,00   | 2,8     | 2,3          | 1,5   |
| Kosten               | 33%    | 3,0     | 1,5          | 1,8   |
| Risico's             | 33%    | 3,0     | 2,3          | 1,3   |
| Kwaliteit            | 33%    | 2,5     | 3,0          | 1,5   |

#### CONCLUSIE

Uit bovenstaande afweging volgt dat het Bouwdok het beste alternatief is.



# 4

## GEOTECHNISCHE HAALBAARHEID

Voor het bepalen van de grove dimensies van het caisson worden geotechnische berekeningen uitgevoerd. De constructie wordt getoetst, volgens de relevante norm (NEN9997-1, 2016, p. 6.5), op verticaal draagvermogen, weerstand tegen afschuiven en kantelstabiliteit. Hiervoor wordt eerst een schatting gedaan van de caissonafmetingen, vervolgens worden de belastingen op de constructie berekend. Aan deze hand van deze gegevens worden belastingcombinaties opgesteld, zodat de afmetingen bepaald kunnen worden.

### 4.1 Hoogte, Breedte en Lengte

Uit de ontwerputgangspunten (zie hoofdstuk 2.3) volgt dat de grondkerende hoogte minimaal 25,0 meter dient te zijn. Er is echter, gekozen voor een constructiehoogte groter dan 25,0, zodat het caisson verdiept aangebracht kan worden. Dit werkt gunstig voor zowel het verticale draagvermogen, als de weerstand tegen afschuiven.

- *Hoogte caisson: 27,0 meter*

Met de breedte van het caisson wordt de afstand haaks op de lengterichting van de kademuur bedoeld, oftewel landinwaarts gericht. De breedte van het caisson bepaald de kantelstabiliteit van de constructie tijdens de eindfase. Daarnaast neemt ook het effectieve oppervlak van de gewichtsconstructie toe, wat gunstig werkt voor het verticale draagvermogen.

- *breedte caisson: 20,0 meter*

De lengte van het caissons heeft voor de geotechnische berekeningen bijna geen invloed. De lengte van het caisson is vooral gebaseerd op de uitvoering. Afmetingen van een droogdok en beperkte manoeuvreerruimte in het havengebied vormen grenzen aan de mogelijke lengte van een afzinkbaar caisson.

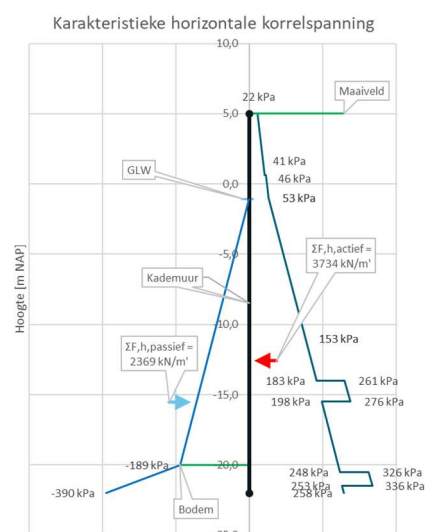
- *Lengte caisson: 100,0 meter*

### 4.2 Gronddrukken

Op basis van het geotechnische bodemprofiel en de waterstanden, zijn de actieve en passieve horizontale gronddrukken bepaald. De toestand waarin laagwater optreedt, in combinatie met 120 minuten vertraging van het achterliggende waterpeil door een verslechtert drainagesysteem, de aanwezige ongedraineerde cohesieve lagen en 100 kPa terreinbelasting, blijkt te resulteren in de grootste horizontale krachten op de kademuur.

Zoals in hoofdstuk 4.1 ook is aangegeven, is er gekozen om de kademuur 2,0 meter verdiept aan te leggen. Deze passieve gronddruk werkt gunstig voor de constructie. De gronddrukken zijn weergegeven in Afbeelding 4.1. De som van de karakteristieke horizontale krachten bedragen circa 1350 kN per strekkende meter kademuur. Het karakteristieke moment bedraagt circa 20,0 MNm landafwaarts per strekkende meter. Verwacht wordt dat extra horizontale korrelspanning optreedt door het overspannen grondwater in de cohesieve lagen. Dit is ook zichtbaar in Afbeelding 4.1, door de lokale spanningstoename.

Afbeelding 4.1 Grond- en Waterdrukken  
(Eigen afbeelding)

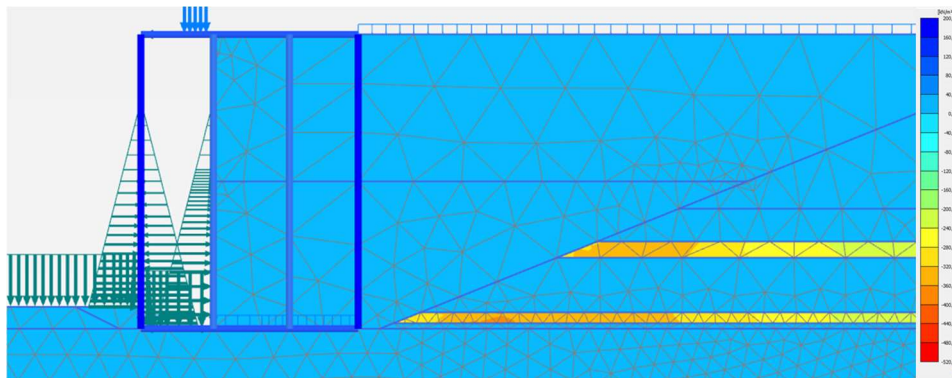


### 4.3 Ongedraineerde toestand

Het caisson wordt geplaatst in een ontgraven geul en de achterliggende grond wordt vervolgens aangevuld. In Nederland is dit vulmateriaal, 'gewoon' matig zand. De gronddrukken op de kademuur zullen dus niet volgen uit het geïnterpreteerde bodemprofiel, maar deze gronddrukken zullen volgen uit het achterliggende, aangevulde zandpakket. Onder het waterpeil is het verdichten van de zandlagen lastig, daarom wordt gerekend met 'Zand, schoon, matig (verdicht)'. Boven de grondwaterstand wordt gerekend met goed verdichte zandpakketten; Zand, schoon, vast (verdicht). Hoofdstuk 2.3 toont de geotechnische bodemeigenschappen van deze lagen.

Onder het achterliggende terrein treedt de geïnterpreteerde sondering op. Ten gevolge van een optredende terreinbelasting, terwijl de onderliggende grondlagen nog niet volledig gedraineerd zijn, kan een extra horizontale spanning op de kademuur ontstaan. Deze spanningstoename is opgenomen in de berekening en is goed zichtbaar in Afbeelding 4.1. Uit aanvullende berekeningen zal blijken dat dit mechanisme inderdaad juist is, dit blijkt uit Afbeelding 4.2. Het overspannen grondwater zit inderdaad opgesloten, en veroorzaakt een horizontale spanningstoename.

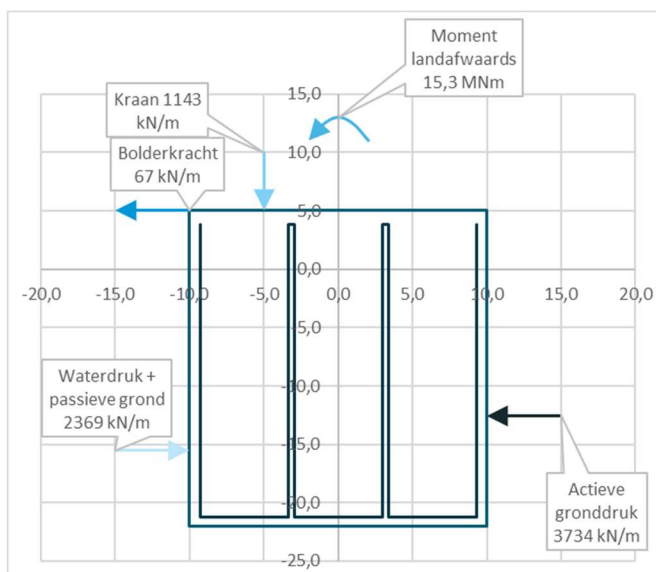
Afbeelding 4.2 Spanningstoename ten gevolge van overspannen grondwater (Eigen afbeelding)



### 4.4 Samengestelde belastingen

Verschillende karakteristieke belastingen werken op het caisson. Deze belastingen moeten samengesteld worden en als rekenwaarde opgegeven worden voor de funderingsberekening. Een model is ontwikkeld waarin de karakteristieke belastingen zijn weergegeven (Afbeelding 4.3).

Afbeelding 4.3 Weergave van de karakteristieke belastingen (Eigen afbeelding)



De, in Afbeelding 4.3 zichtbare, compartimenten worden met verschillende materialen gevuld, waardoor een gunstig werkend moment ontstaat. De twee compartimenten aan de landzijde worden gevuld met een zware vulling. Het compartiment aan de waterzijde wordt gevuld met water. Hierdoor verplaatst het zwaartepunt van het caisson circa 1,3 meter landinwaarts. Dit veroorzaakt een gunstig werkend, karakteristiek moment van circa 10,3 MNm landinwaarts. Het caisson wil als het ware landinwaarts omvallen, tegen de grond in.

De constructie is berekend in gevolgklasse 3 met de combinatiefactoren, volgens de nationale bijlage van de Beton Eurocode (NEN1990, 2011, p. A2.4 NB) die opgenomen zijn in hoofdstuk 2.3. Verschillende belastingcombinaties zijn beschouwd en doorgerekend. De maatgevende combinatie is opgenomen in Tabel 4.1. Kenmerkend voor deze maatgevende belastingscombinatie is de dominante belasting ten gevolge van de achterliggende terreinbelasting.

De rekenwaarden van de grondsterkte zijn verwerkt in de geotechnische berekeningen.

Tabel 4.1 Maatgevende belasting combinatie UGT

| Belastingen                | Soort belasting |          | Combinatie-factor |                            | Kar. Waarde | Verti. | Hori.  | arm  | Moment  |
|----------------------------|-----------------|----------|-------------------|----------------------------|-------------|--------|--------|------|---------|
| Naam                       |                 | $\psi_0$ | $\gamma_{fg}$     | $\gamma_{fg} \cdot \psi_0$ | [kN/m]      | [kN/m] | [kN/m] | [m]  | [kNm/m] |
| Eigen gewicht constructie  | Permanent       | 1,0      | 1,40              | 1,40                       | 5787        | 8102   | 0      | -1,3 | -10300  |
| Grond-/waterdrukken        | Permanent       | 1,0      | 1,40              | 1,40                       | 513         | 0      | 718    | 20   | 14200   |
| Gronddruk Terreinbelasting | Variabel        | 0,7      | 1,65              | 1,65                       | 851         | 0      | 1405   | 11   | 16100   |
| Kraanbelasting             | Variabel        | 0,7      | 1,65              | 1,16                       | 1143        | 1320   | 0      | 5    | 6600    |
| Bolderkrachten             | Exclusief       | 0,7      | 1,65              | 1,16                       | 67          | 0      | 77     | 27   | 2100    |
| Afmeerbelasting            | Exclusief       | 0,7      | 1,65              | 0,00                       | 2000        | 0      | 0      | 27   | 0       |
|                            |                 |          |                   | <b>Totaal (afgerond)</b>   |             | 9400   | 2200   |      | 28700   |

## 4.5 Verticaal draagvermogen

De gewichtsconstructie wordt gefundeerd op de harde zandlaag onder de onderste kleilaag.

Het verdiept aanbrengen van het caisson werk voor het verticaal gunstig, op de volgende manieren:

- De passieve gronddruk neemt toe, hierdoor werkt er minder horizontale kracht op het funderingsvlak;
- De effectieve verticale korrelspanning op het funderingsniveau neemt ook toe, doordat het caisson ingegraven wordt. Meer massa moet verplaatst worden voordat constructie bezwijkt;
- Een moment ten gevolge van de passieve gronddruk ontstaat. Hierdoor wordt het effectieve funderingsoppervlak minder gereduceerd.

Op basis van de belastingen en geotechnische bodemeigenschappen kan een maximale funderingsdruk behaald worden van ongeveer 765 kPa (=kN/m<sup>2</sup>), voordat de constructie faalt door onvoldoende verticaal draagvermogen. Het effectieve oppervlak bedraagt 14,0 m<sup>2</sup> per strekkende meter kademuur. Het verticale draagvermogen van deze constructie bedraagt per strekkende meter circa 10.700 kN/m<sup>2</sup>. Dit is groter dan de optredende verticale belasting (9400 kN/m<sup>2</sup>). Hiermee is aangetoond dat de constructie voldoet op het verticale draagvermogen. Voor de volledige onderbouwing van het draagvermogen wordt verwezen naar hoofdstuk 4.4.1 van het deelrapport.

## 4.6 Weerstand tegen afschuiven

Doordat de constructie gefundeerd wordt op een harde, gedraineerde zandlaag kan de weerstand tegen afschuiven eenvoudig gecontroleerd worden. Met de huidige afmetingen kan er van een homogeen zandlaag uitgegaan worden. De gedraineerde schuifweerstand wordt bepaald door de hoek van inwendige wrijving van de onderliggende grond en ongunstige verticale belasting.

Door de hoek van inwendige wrijving van  $35^\circ$ , wordt een wrijvingscoëfficiënt van 0,37 behaald. Dit betekent dat voor elke 100 kN verticale belasting, 37 kN horizontale schuifweerstand ontstaat. De optredende verticale belasting (9400 kN/m) zal resulteren in 3460 kN/m schuifweerstand. Dit is groter dan 2200 kN/m. Hiermee wordt aangetoond dat de constructie voldoet op afschuiven. De volledige onderbouwing is opgenomen in het deelrapport, in hoofdstuk 4.4.2.

## 4.7 Kantelstabiliteit

Een fundering op staal werkt volledig op druk indien de samengestelde kracht door de kerndoorsnede van het element gaat. Bij een excentriciteit groter dan  $1/6e$  van de breedte zal de constructie niet meer door het volledige funderingsvlak ondersteunt worden; De onderliggende grondlaag kan geen trekkracht opnemen. De excentriciteit mag daarom niet groter zijn dan  $1/6 \cdot$  breedte van de constructie.

De optredende excentriciteit volgt uit het optredend moment en de samengestelde verticale belasting; Uit de belastingen volgt een samengesteld moment van 28.700 kNm in combinatie met een optreden verticale belasting van 9400 kN. Hieruit volgt de excentriciteit van 3,04 meter. Deze excentriciteit is kleiner dan 3,33m ( $= 1/6 \cdot 20,0$ ). Hiermee is aangetoond dat de constructie voldoet op kantelen. In hoofdstuk 4.4.3 van het deelrapport is de uitgebreide onderbouwing opgenomen.

## 4.8 Verticale en horizontale verplaatsingen

Op basis van zettingsberekeningen volgt dat de constructie 55 à 60 mm zal zakken ten gevolge van de verticale belasting. De zakking volgt uit de indrukking van het zand. Verwacht wordt dat de constructie in de beginfase zal verplaatsen, maar zettingen in de tijd worden niet verwacht. De onderbouwing van deze berekening is opgenomen in hoofdstuk 4.5. De resultaten van deze berekening zijn opgenomen in bijlage IV van het deelrapport.

In hoofdstuk 8 van dit rapport wordt uitgebreid aandacht gegeven aan de horizontale verplaatsingen van de constructie. Voor een zandige grondslag zal de horizontale verplaatsing circa 40 mm zijn, uitgaande van de gegeven grondparameters. Dit valt binnen de marges. In zelfde hoofdstuk wordt onderzocht wat de effecten zijn, met betrekking op de horizontale verplaatsing, mits een kleilaag aanwezig is onder deze gewichtsconstructie.

## 4.9 Conclusie

De constructie is getoetst als een fundering op staal en voldoet; Het verticale draagvermogen is voldoende, de weerstand tegen afschuiven is groter dan de optredende belasting, de resulterende belasting gaat door de kerndoorsnede van de fundering en zal daarom niet kantelen. De optredende verplaatsingen zijn acceptabel. Er wordt daarom verder gerekend met 20,0 m breedte, 27,0 m hoogte en 100 m lengte.

Deze conclusie is alleen valide bij de gegeven bodemopbouw (opgenomen in Tabel 2.2 en bijlage I van het deelrapport). Wat de gevolgen zijn bij een afwijkende sondering, met een kleilaag, wordt onderzocht in hoofdstuk 8 van dit rapport.

# 5

## CONSTRUCTIEVE HAALBAARHEID

In dit hoofdstuk wordt de constructieve haalbaarheid van het caisson onderzocht. De geschatte afmetingen worden gecontroleerd en de wapening wordt bepaald, volgens de norm (NEN1992-1, 2011, p. 6.1). De wapening wordt berekend in de UGT (=Uiterste GrensToestand) en gecontroleerd in de BGT (=Bruikbaarheids-GrensToestand). De constructieve haalbaarheid wordt onderzocht, daarom wordt de wapening alleen in globale lijnen beschouwd. Voor de volledige onderbouwing van de constructieve berekeningen wordt verwezen naar hoofdstuk 5 van het deelrapport.

### 5.1 Constructieve uitgangspunten

Op basis van de beschikbare literatuur van de Technische Universiteit in Delft (Voorendt, 2016, p. 36) worden de afmetingen van de buitenwanden, compartimentschermen en van de vloer en het dek ingeschat. Deze dikten worden opnieuw doorgerekend in hoofdstuk 5.4 van dit rapport. De dikte die volgen uit de literatuur zijn:

- |                           |            |
|---------------------------|------------|
| - Dikte buitenwand;       | 0,5 meter; |
| - Dikte compartimentwand; | 0,4 meter; |
| - Dikte vloer en dak;     | 1,0 meter; |

Uit berekeningen zal blijken dat de afmetingen aangepast moeten worden naar:

- |                           |            |
|---------------------------|------------|
| - Dikte buitenwand;       | 0,7 meter; |
| - Dikte compartimentwand; | 0,4 meter; |
| - Dikte vloer en dak;     | 0,8 meter. |

Uit de geotechnische berekeningen van hoofdstuk 4.9 volgen de volgende afmetingen;

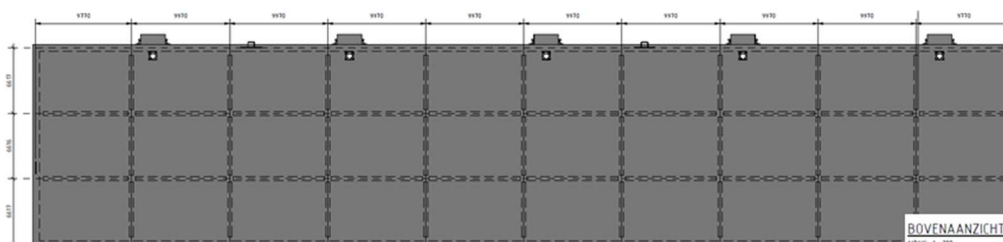
- |                    |              |
|--------------------|--------------|
| - Lengte caisson;  | 100,0 meter; |
| - Breedte caisson; | 20,0 meter;  |
| - Hoogte caisson;  | 27,0 meter.  |

Het caisson wordt opgedeeld door compartimentwanden. Deze compartimenten hebben twee functies:

- Tussensteunpunten voor de buitenwanden, vloer en dek;
- Scheiding tussen licht en zwaar vulmateriaal.

Deze laatstgenoemde functie werkt geotechnisch gunstig voor de constructie; het caisson wordt zo belast dat het landinwaarts wil kantelen ten gevolge van het excentrische zwaartepunt van de vulling. Een opstelling waarbij er drie compartimenten zijn, werkt het meest gunstig. De tussenafstand in de lengterichting is arbitrair gekozen op 10,0 meter. De compartimentopstelling is weergegeven in Afbeelding 5.1.

Afbeelding 5.1 Opstelling van compartimenten (Eigen afbeelding)



De constructie wordt gerealiseerd op een funderingslaag boven het daar onderliggende zandbed. Hiervoor zijn de verticale beddingsconstante berekent in hoofdstuk 4.5 van het deelrapport en de horizontale beddingsconstante zijn overgenomen vanuit literatuur (CUR166, 2012, p. 145). Deze ondersteuning zijn geplaatst onder het caisson in het constructieve rekenprogramma, SCIA Engineer.

Voor de constructieve berekening wordt er uitgegaan van ingeklemde elementen die het buigend moment volledig over brengen naar het aanliggende element.

## 5.2 Materiaaleigenschappen

Voor de betonberekeningen wordt er uitgegaan van de volgende materialen:

- Beton, C30/37
  - o E-modulus; 10.930 MPa; (gescheurd beton)
  - o Soortelijk gewicht; 2400 kg/m<sup>3</sup>; (normaal gewapend beton)
  - o Karakteristieke cylinderdruksterkte; 30 N/mm<sup>2</sup>;
  - o Cementklasse; N. (normale verharding)
- Betonstaal, B500
  - o Soortelijk gewicht; 7850 kg/m<sup>3</sup>;
  - o Karakteristieke vloeisterkte; 500 N/mm<sup>2</sup>
  - o Staafoppervlak; Geribd.

## 5.3 Duurzaamheid beton

Om de duurzaamheid van de betonnen constructie te vergroten, dient er een dekking toegepast te worden. Paragraaf 4.4 van de Betonnorm (NEN1992-1, 2011, p. 4.4) schrijft hiervoor de milieuklassen, dekkingen en maximale scheurwijdte voor.

De relevante milieuklassen worden als volgt omschreven:

- XC4 (ingeleid door carbonatatie) - Wisselend nat en droog;
- XS2 (ingeleid door chloriden afkomstig uit zeewater) - Blijvend onder zeewater;
- XS3 (ingeleid door chloriden afkomstig uit zeewater) - Getijde-, spat- en stuifzones.
- XD3 (ingeleid door chloriden) - Wisselend nat en droog
- XF4 (Aantasting door vorst/dooi-wisselingen) - Verzadigd met water, met dooizouten of zeewater
- XA1 (Chemische aantasting) - Zwak agressief chemisch milieu

Op het toegepaste beton zijn de volgende milieuklassen en dekkingen toegepast (Tabel 5.1):

Tabel 5.1 Milieuklassen, dekking en scheurwijdte (NEN1992-1, 2011, p. 4.4.1.2)

| Onderdeel          | Milieuklasse            | Minimale dekking [mm] | Toepaste dekking [mm] | K <sub>x</sub> [-] | Maximale scheurwijdte [mm] |
|--------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|----------------------------|
| Vloer              | XC4, XS2,               | 45                    | 90                    | 2,0                | 0,2                        |
| Buitenwanden       | XC4, XS3, XD3, XF4, XA1 | 45                    | 90                    | 2,0                | 0,2                        |
| Compartimentwanden | XC4, XS2                | 45                    | 90                    | 2,0                | 0,2                        |
| Dek                | XC4, XS3, XD3, XF4, XA1 | 45                    | 90                    | 2,0                | 0,2                        |

## 5.4 Maatgevende krachten

Op basis van de ontwerputgangspunten uit hoofdstuk 2.3 (belastingsgevallen, combinaties en factoren) en de constructieve uitgangspunten uit hoofdstuk 5.1 zijn de maatgevende krachten op de constructie bepaald. Hiervoor is gebruik gemaakt van rekensoftware (SCIA Engineer v18.1). De samenvatting van de maatgevende krachten is opgenomen in Tabel 5.2. Aan de hand van deze krachten wordt de wapening gekozen en getoetst. Voor de volledige onderbouwing van deze krachten wordt verwezen naar de constructieve bijlage (hoofdstuk 5 van het deelrapport).

Op basis van deze combinatie tussen  $M_{ed,UGT}$  en  $M_{ed,BGT}$  en tussen  $N_{ed,UGT}$  en  $N_{ed,BGT}$  worden de wapeningsberekeningen uitgevoerd. De BGT-waarden worden gebruikt voor de scheurvorming, de UGT-waarden worden gebruikt voor de sterkte berekeningen. De negatieve waarden in Tabel 5.2 staan voor drukkrachten.

Ter plaatse van de verbindingen tussen de betonnen platen, (dat is, waar het steunpuntsmoment optreedt) worden voute toegepast. Hierdoor neemt de effectieve hoogte van de wapening toe en daarmee ook het opneembare moment in het beton. Voor verbinding tussen de buitenwanden en de compartimentwanden zijn vouten van 400 mm in de lengte en breedte vereist. Voor de onderlinge verbinding tussen de compartimenten zijn voute van 200 mm in de lengte en breedte, aan beide zijden, vereist om te voldoen aan de normen.

Tabel 5.2 Maatgevende krachten (bijlage V), gekozen wapening (bijlage VIII van het deelrapport)

| Element      | Hoogte [m] | nr.  | $M_{UGT}$ [kNm/m] | $M_{BGT}$ [kNm/m] | $N_{UGT}$ [kN/m] | $N_{BGT}$ [kN/m] | Wapening [Ø-h.o.h.] | u.c. UGT [-] | u.c. BGT [-] |
|--------------|------------|------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|---------------------|--------------|--------------|
| Buitenwand   | 1100*      | 2    | 2350              | 1510              | 420              | 290              | Ø32-100             | <b>0,78</b>  | <b>0,95</b>  |
|              | 700        | 3    | 1090              | 720               | 200              | -110             | Ø32-100             | 0,65         | 0,65         |
|              | 700        | 5**  | 50                | 250               | -1190            | -300             | Ø32-100             | 0,15         | 0,05         |
| Compartiment | 460        | 6    | 500               | 360               | 180              | 100              | Ø25-100             | <b>0,80</b>  | <b>1,00</b>  |
|              | 800*       | 7    | 1040              | 740               | 370              | -10              | Ø25-100             | <b>0,83</b>  | <b>0,95</b>  |
|              | 460        | 8**  | 10                | 10                | -1780            | -2260            | Ø25-100             | 0,51         | 0,00         |
| Vloer en dek | 800        | 10   | 2020              | 700               | 350              | 0                | Ø32-100             | <b>0,98</b>  | <b>0,55</b>  |
|              | 800        | 12** | 0                 | 190               | -1610            | -860             | Ø32-100             | 0,23         | 0,00         |

\* Steunpunt moment, andere dimensies door voute

\*\* Deze combinaties zijn opgenomen om betondruk te toetsen, zie hiervoor paragraaf Tabel 5.4

Omdat zowel positieve (opbuigend) en negatieve (neerbuigend) momenten op kunnen treden worden de elementen tweezijdig gewapend met dezelfde wapeningsopstelling. Dit is een conservatieve, niet-economische aanname. In hoofdstuk 5.9 van het deelrapport worden verschillende optimalisaties beschreven. Uit bijlage V van het deelrapport blijkt dat de momenten in de dwarsrichting circa 30% van de momenten in langs richting bedragen. Deze wapening bedraagt 30% van de hoofwapening.

Ook de krachten tijdens de transportfase zijn bepaald. De resultaten hiervan zijn opgenomen in bijlage VI van het deelrapport. Een aantal combinaties resulteren in grotere trekkrachten, deze zijn opgenomen in Tabel 5.3. Er is uitgegaan dat de BGT gelijk is aan de UGT. Zelfs met deze conservatieve aanname voldoet de wapening, tijdens de transportfase.

Tabel 5.3 Maatgevende krachten tijdens transportfase (bijlage VI), gekozen wapening (bijlage VIII van het deelrapport)

| Element      | Hoogte [m] | nr. | Fase       | $M_{UGT/BGT}$ [kNm/m] | $N_{UGT/BGT}$ [kN/m] | Wapening [Ø-h.o.h.] | u.c. UGT [-] | u.c. BGT [-] |
|--------------|------------|-----|------------|-----------------------|----------------------|---------------------|--------------|--------------|
| Buitenwanden | 700        | 13  | Kantelfase | 150                   | 1640                 | Ø32-100             | 0,31         | 0,55         |
| Compartiment | 460        | 14  | Kantelfase | 10                    | 1770                 | Ø25-100             | 0,43         | 0,60         |

## 5.5 Betondrukcontrole

De aangegeven krachten combinaties (\*\*) uit Tabel 5.2 worden getoetst op betondruk.

De maximale betondruk voor C30/37 is:

$$f_{cd} = \sigma_{betondruk,max} = 20 \text{ N/mm}^2$$

Tabel 5.4 Controle betondruk

| Onderdeel        | $N_{ed,UGT}$<br>[kN] | $M_{ed,UGT}$<br>[kNm] | excentriciteit<br>tgv moment<br>[mm] | Oppervlakte<br>[m <sup>2</sup> /m] | Oppervlakte waarin<br>druk optreedt<br>[m <sup>2</sup> /m] | $\sigma_{betondruk}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | u.c.<br>[-] |
|------------------|----------------------|-----------------------|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------|
| Buitenwand       | 1190                 | 40                    | 36                                   | 0,7                                | 0,632                                                      | 1,9                                          | 0,09        |
| Compartimentwand | 1780                 | 10                    | 6                                    | 0,46                               | 0,449                                                      | 4,6                                          | 0,23        |
| Vloer en dek     | 1610                 | 190                   | 119                                  | 0,8                                | 0,564                                                      | 2,8                                          | 0,14        |

De optredende spanningen zijn kleiner dan de rekenwaarde van de betondruksterkte. Daarom voldoet de constructie op betondruk.

## 5.6 Wapeningshoeveelheden

Op basis van de gekozen wapening kunnen de hoeveelheden wapening per m<sup>3</sup> beton bepaald worden. Er wordt uitgegaan van dwarswapening van circa 30% van de hoofdwapening. Deze wapening wordt vergeleken met de maximaal toelaatbare wapening volgens Nationale bijlage van de betonnorm (NEN1992-1, 2011, p. 9.3). Deze waarden en vergelijkingen zijn weergegeven in Tabel 5.5.

Tabel 5.5 Gemiddelde hoeveelheid wapening per m<sup>3</sup> constructie

| Constructie   | wapening | As<br>[*10 <sup>3</sup> mm <sup>2</sup> ] | m <sup>3</sup> Ac<br>[*10 <sup>3</sup> mm <sup>2</sup> ] | Wapeningshoeveelheid<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | max kg/m <sup>3</sup><br>[=0,04 Ac] |
|---------------|----------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------|
| Wanden        | Ø32-100  | 20,9                                      | 700                                                      | 180* kg/m <sup>3</sup>                       | 280 kg/m <sup>3</sup>               |
| Vloeren + dek | Ø32-100  | 20,9                                      | 800                                                      | 160* kg/m <sup>3</sup>                       | 300 kg/m <sup>3</sup>               |
| Binnenwanden  | Ø25-100  | 12,8                                      | 400                                                      | 120* kg/m <sup>3</sup>                       | 300 kg/m <sup>3</sup>               |

\*Optimalisatieberekeningen zijn doorgevoerd, zie hoofdstuk 5.9 van het deelrapport

## 5.7 Conclusie

Er zijn geen bovenmatige hoeveelheden wapeningen benodigd voor het dragen van de belastingen. Daarom kan gesteld worden dat, met de gekozen afmetingen, het constructief haalbaar is om een caisson te realiseren met 25 meter grondkerende hoogte. Optimalisaties kunnen nog resulteren in een goedkopere, gunstigere en/of duurzamere oplossingen.

# 6

## UITVOERINGSHAALBAARHEID

Voordat het caisson in gebruik genomen kan worden, zal het eerst gerealiseerd, getransporteerd en afgezonken moeten worden. In dit hoofdstuk wordt er gekeken naar de uitvoeringshaalbaarheid van het caisson. Aan de hand van de uitkomsten die voortkomen uit dit hoofdstuk wordt de subvraag beantwoord op welke wijze het caisson uitvoeringstechnisch haalbaar is.

### 6.1 Realisatiefase

Zoals vermeld staat in hoofdstuk 3.2 is de keuze gemaakt om het caisson verder uit te werken, het caisson scoorde op de totaalscore het hoogst van alle beschouwde type gewichtsconstructies. In hoofdstuk 3.3 is er gekeken naar de verschillende manieren van het transporteren van het caisson, dit resulteerde in de keuze om het element in het bouwdok te Bardrecht te realiseren in plaats van het gebruiken van een drijvend dek of railconstructie.

#### Bouwdok Bardrecht

Het bouwdok in Bardrecht heeft in het verleden al vaak bewezen een zeer praktische locatie te zijn voor de bouw van afzinkbare tunnelelementen. De hoogtes van deze elementen waren echter nooit meer dan 12 meter. De hoogte van de caissons in de gebruikersfase is berekend op 27 meter, de bijbehorende breedte is uitgekomen op 20 meter, de onderbouwing hiervan volgt uit hoofdstuk 4.1

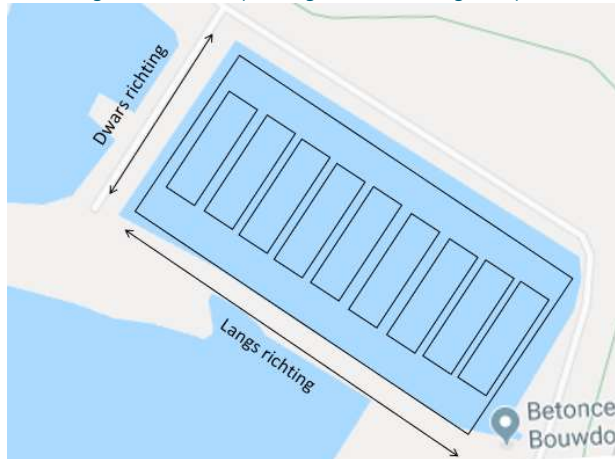
Omdat er zich niet genoeg diepgang bevindt in de Oude Maas ten tijde van een rechtopstaand caisson is er gekozen voor het bouwen van het caisson in een gekantelde positie en het caisson in een later stadium te kantelen. De onderbouwing voor de keuze van het laten kantelen van het caisson staat in paragraaf 6.2. Tijdens de realisatie- en transportfase is de hoogte van het caisson daarom 20 meter en de breedte 27 meter.

Uit de verhouding 3,8 : 1 (lengte : breedte) die volgt uit de literatuur (Voorendt, 2016, p. 36) komt de lengte van het caisson uit op 100 meter. Deze verhouding heeft in het verleden aangetoond een praktische verhouding te zijn tijdens het transporteren van een caisson.

#### Indeling werkterrein

De afmetingen van het bouwdok bedragen 350 x 150 (lengte x breedte) meter. Aangezien er geen lengte kademuur is opgegeven, wordt er van de grootst mogelijke totale lengte kademuur uitgegaan dat per batch gerealiseerd kan worden. Door zoveel mogelijk strekkende meter kademuur per batch te realiseren, zullen de eenmalige kosten per strekkende meter afnemen, waardoor het economisch aantrekkelijker wordt om een caisson te realiseren. De meest gunstige opstelling voor de caissons is te zien in Afbeelding 6.1. Hier zijn negen caissons geplaatst in de dwarsrichting.

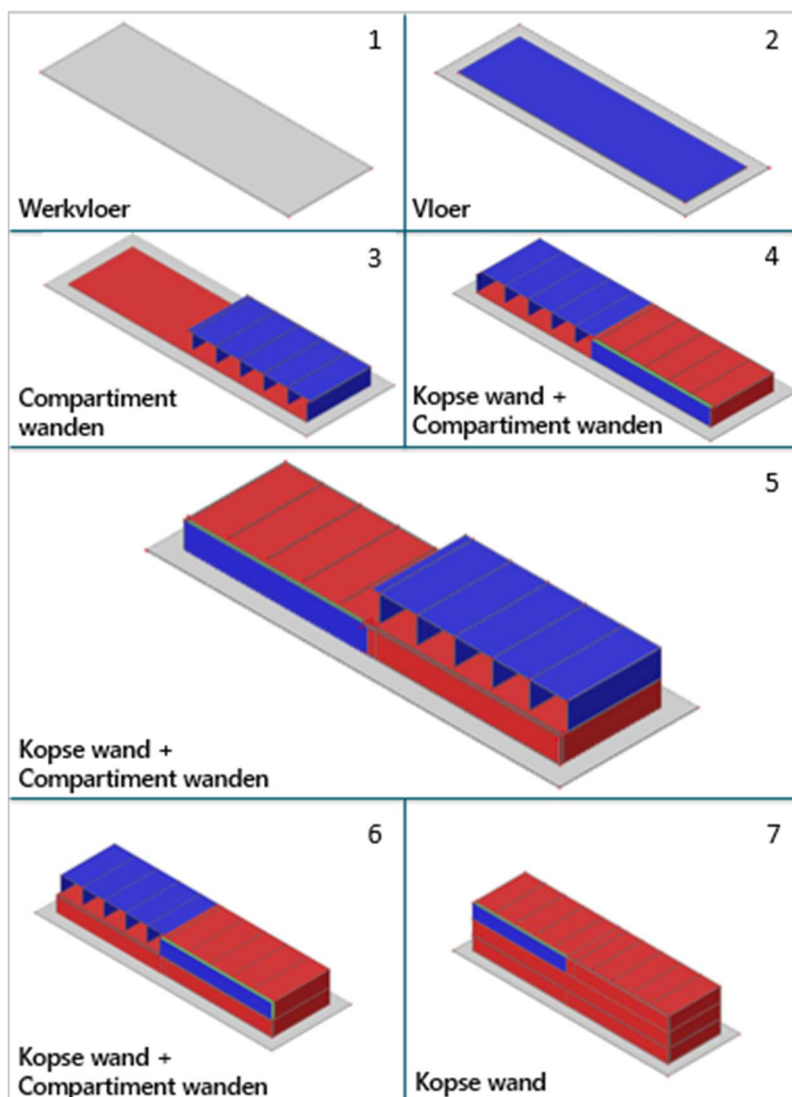
Afbeelding 6.1 Overzicht opstelling bouwdok (Google Maps, 2019)



### Bouwfasering caisson

Doordat het caisson gekanteld gerealiseerd wordt, verandert de wijze van het bekisten. Tijdens de bouw van een caisson in de staande positie wordt vaak gebruikt gemaakt van een glijbekisting. Dit is in het geval van dit onderzoek niet mogelijk omdat het element volledig gesloten moet zijn en het caisson horizontaal gebouwd wordt.

Afbeelding 6.2 Bouwfasering (Eigen afbeelding)



Het caisson wordt gefaseerd gebouwd volgens het stappenplan (zie ook Afbeelding 6.2);

- De 100 mm dikke werkvloer wordt gestort ter plaatse van het element plus een strook rondom het caisson van 5 meter;
- Zodra de werkvloer is gerealiseerd kan er begonnen worden aan de vloer van het element, dit zal in de gebruikersfase één van de zijanten worden. Deze wand wordt in één keer gestort worden;
- De derde fase is het realiseren van de eerste reeks compartimenten. Dit zal gerealiseerd worden door middel van een hydraulisch verstelbare systeemkist. De wanden, het dak en de achterwand worden in één keer gestort. Er is een keuze gemaakt om een stalen plaat te plaatsen aan de kopse kant van de compartimentswanden, als verloren bekisting. De onderbouwing hiervan is te vinden in het deelrapport (hoofdstuk 6);
- Tijdens de vierde fase worden de volgende vijf compartimenten en de kopse wand tegen de verloren bekisting gerealiseerd. Deze manier van stapsgewijs bouwen zal gedurende de hele bouwperiode van het caisson voorkomen;
- Tijdens de vijfde fase wordt de eerste laag afgerond. Tevens zullen de eerste 5 compartimenten van de tweede laag gerealiseerd worden;
- Het principe van de bouwfasering van de eerste laag is hetzelfde voor de tweede en derde laag.

### Bouwtijd

Om een inschatting te geven van de tijd die het realiseren van de caissons in beslag zal nemen is er een grove planning gemaakt. De planning is te vinden in Bijlage IX van het deelrapport. Er wordt berekend dat de doorlooptijd van één batch caissons circa 3,5 jaar in beslag zal nemen, dat is voor 900 m kademuur. Verwacht wordt dat er door een optimalisatie van de planning 3 jaar aangehouden kan worden. Hieronder valt de tijd om het bouwdok gereed te maken, de realisatie van de caissons, de operatie (=Opdrijven, Transporteren en Afzinken) en het terugbrengen in de oude staat van het bouwdok.

## 6.2 Transportfase

### Opdrijfberekening

Zodra het caisson geprefabriceerd en is in het bouwdok, kan er gestart worden met het opdrijven van het caisson. Het bouwdok wordt geïnundeerd (=vol laten lopen met water) en vervolgens wordt de dijk met bijbehorende damwanden, die de Oude Maas en het bouwdok scheidt, verwijderd.

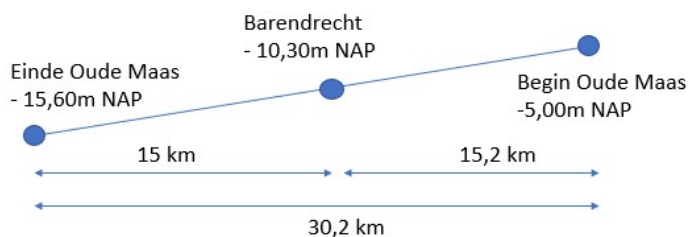
Uit gewichtsberekeningen (in het deelrapport) blijkt dat de diepgang van het caisson 13,3 meter bedraagt, in staande positie.

### Diepgang transportroute

Het caisson zal vervoerd worden via de Oude maas en de Nieuwe Waterweg. De diepte van de Oude Maas wordt aangehouden, aangezien dit ondieper en daarmee maatgevend is.

De diepgang van de Oude Maas eindigt op 15,60 meter en begint op 5,00 meter onder NAP. Deze informatie volgt uit datasets (Rijkswaterstaat, 2019). De lengte van de Oude Maas is in totaal 30,2 km, het bouwdok te Barendrecht ligt op 15,2 km vanaf het begin. Er is uitgegaan van een lineair verloop van de rivier, waardoor gesteld kan worden dat het bodemniveau ter hoogte van het bouwdok te Barendrecht 10,30 meter onder NAP is. Dit is visueel weergegeven in Afbeelding 6.3.

Afbeelding 6.3 Visualisatie verloop Oude maas (Eigen afbeelding)



De caissons worden uitgevaren tijdens hoogwater, hierdoor wordt GHW (=gemiddeld hoogwater) toegevoegd aan het gemiddelde bodemniveau. Het GHW ter hoogte van het bouwdok is 1,15 meter +NAP (Havenbedrijf Rotterdam, 2003, p. 15). Hierdoor komt de totale diepte vanaf de bodem tot aan de het wateroppervlakte op 11,45 meter.

De UKC (=Under Keel Clearance) moet tijdens het transport minimaal 1 meter zijn ten tijde van een zandige bodem, dit om mogelijke verstoring van de bodem tegen te gaan, blijkt uit richtlijnen (Voorendt, 2016, p. 24). De UKC is de ruimte tussen de bodemniveau en de onderkant van het element.

De breedte van de Oude Maas heeft een minimale waarde van 180 meter, hierdoor zal er geen probleem optreden, wanneer het caisson door de waterweg getransporteerd wordt. (Rijkswaterstaat, 2019).

Aangezien de diepgang van het element in staande positie 13,90 meter is en de maximale diepgang in de Oude Maas 10,45 meter is, is het niet mogelijk om het caisson in staande positie naar de eindpositie te transporteren. Om het opdrijvend vermogen te vergroten wordt het caisson daarom op zijn zijkant gerealiseerd en vervoerd, hierdoor is minder diepgang benodigd voor hetzelfde volume onder water.

Uit de aangepaste berekeningen blijkt dat de diepgang van het element in gekantelde positie 10,29 meter is, dit is minder dan de maximale toelaatbare diepgang van 10,45 meter. Omdat het alleen mogelijk is om het caisson op zijn zijkant te vervoeren door de Oude Maas is de keuze gemaakt om in het bouwdok het caisson op zijn zijkant te realiseren. Hierdoor moet het caisson in een later stadium gekanteld moet worden.

### Stabiliteit

Tijdens de transportfase is de stabiliteit erg belangrijk, wanneer dit niet aan de eisen voldoet is het mogelijk dat het caisson ongewenst gaat kantelen. Om er zeker van te zijn dat dit niet gebeurt is de eis gesteld dat de metacentrische hoogte minimaal 0,5 meter moet zijn. Dit is een maat om aan te geven hoe stabiel een drijvend element is. (Voorendt, 2016, p. 39)

Uit de berekening blijkt dat de metahoogte circa 1,0 meter is ten tijde van zoet water en circa 1,1 meter ten tijde van zout water. Hiermee is aangetoond dat het caisson tijdens de transportfase stabiel is.

Buiten de metahoogte berekening zijn er nog meer eisen waaraan het caisson moet voldoen omtrent de stabiliteit, deze zijn opgenomen in hoofdstuk 6.2 van het deelrapport. Samengevat zijn dit:

- Dynamische stabiliteit; deze volgt uit de maximale lengte waarover het caisson kan kantelen. Als deze lengte te klein is in vergelijking met de lengte van de golven, kan het element gaan kantelen.
- Eigen frequentie; deze volgt uit het traagheidsmoment van het element. Hoe groter het oppervlakte van het element hoe groter de eigen frequentie is. Mocht de constructie dezelfde frequentie hebben dan kan de constructie gaan resoneren en daarmee ongewenst bewegen.

Uit de constructieve berekeningen bleek dat de compartimentwanden dikker uitgevoerd moeten worden, dan er in het volgende onderdelen gebruikt is. Deze kleine aanpassingen zijn verder niet verwerkt. Het effect van 60mm extra wanddikte is klein. Het principe wat in de volgende paragrafen wordt uitgelegd blijft hetzelfde.

## 6.3 Kantelen

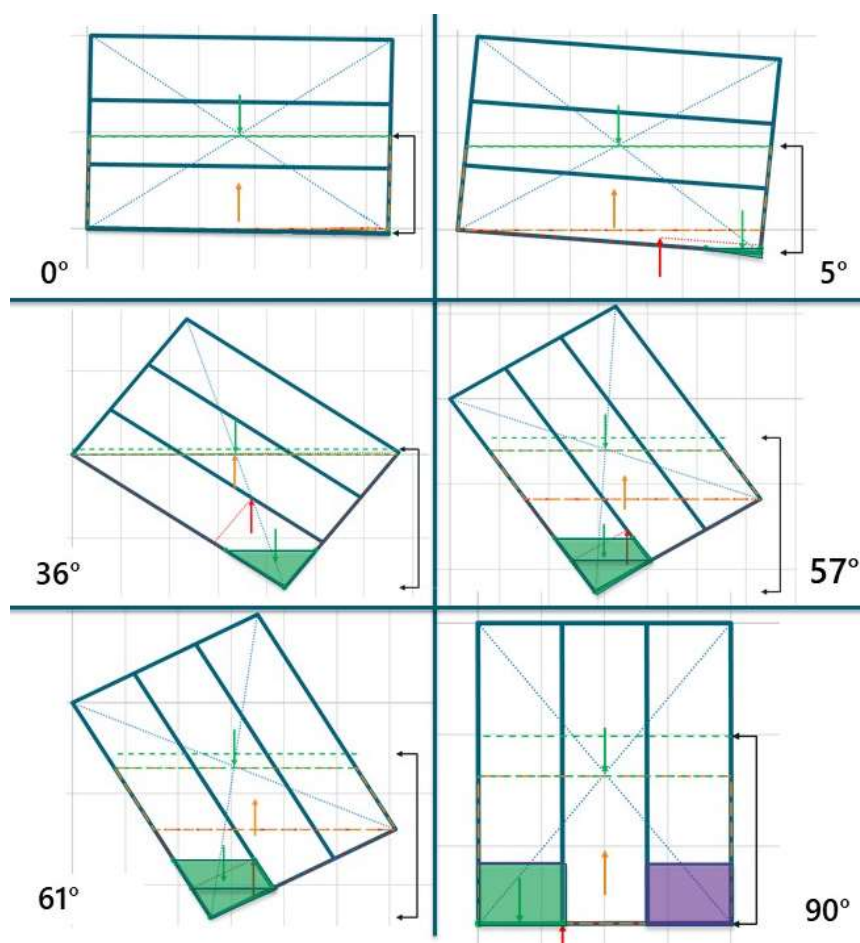
In dit hoofdstuk wordt het kantelproces van het caisson omschreven. De belangrijkste fases zijn omschreven in de volgende opsomming. In Afbeelding 6.4 is het kantelproces weergegeven van een caisson. De waarden per fase zijn weergegeven in Tabel 6.1.

1. Deze fase toont hoe het caisson getransporteerd wordt en hoe het de haven binnenkomt;
2. Ten tijde van deze fase zijn de ballasttanks in het caisson gevuld, dit resulteert in een schuinstand;
3. In deze fase heeft het caisson het grootste waterdoorsnijdend oppervlakte;
4. Tijdens deze fase heeft het element de grootste diepgang, dit is maatgevend voor de kantellocatie;
5. Vanaf deze fase wordt ook het tweede compartiment gevuld;
6. In de laatste fase zijn beide compartimenten evenveel gevuld.

Tabel 6.1 Resultaten kantelengrafiek caisson

| Fase | Graden | Vulling<br>[m <sup>3</sup> ] | Secundaire vulling<br>[m <sup>3</sup> ] | Diepgang<br>[-m onder waterpeil] |
|------|--------|------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------|
| 1    | 0      | 0                            | 0                                       | 9,82                             |
| 2    | 5      | 1                            | 0                                       | 10,76                            |
| 3    | 36     | 18,9                         | 0                                       | 16,17                            |
| 4    | 57     | 35,3                         | 0                                       | 17,78                            |
| 5    | 61     | 35,6                         | 0                                       | 17,74                            |
| 6    | 90     | 35,6                         | 35,6                                    | 16,40                            |

Afbeelding 6.4 Kantelproces (Eigen afbeelding)



### Omschrijving kantelgrafiek

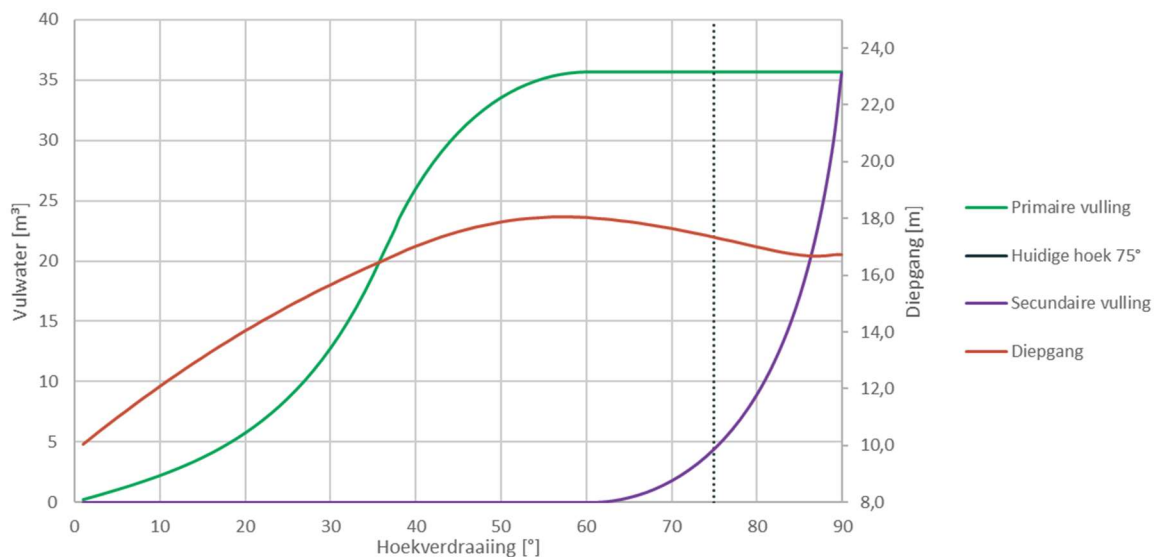
Verskillende berekeningen zijn uitgevoerd om de haalbaarheid van het kantelbare caisson te controleren. De kanteling is gebaseerd op basisprincipes van de mechanica; er dient ten alle tijden een evenwicht te zijn, oftewel het aandrijvende moment moet gelijk zijn aan het tegenwerkende moment. Het kantelprincipe wordt uitgewerkt met een voorbeeld bij een kanteling van 75°.

Het caisson is het meest stabiel in de toestand waarin het waterdoorsnijdend oppervlak het grootste is. Hoe groter het element, hoe moeilijker het is om het element te kantelen. Het traagheidsmoment, en dus de weerstand tegen het kantelen, wordt groter naarmate de breedte en de diepte toenemen.

De opdrijvende kracht is een opwaarts gerichte kracht. Uit het product van de arm (aangrijppunt van de opdrijvende kracht tot het rotatiepunt) en de opwaarts gerichte kracht volgt een moment wat het kantelen tegenwerkt. De positie van deze krachten is weergegeven in Afbeelding 6.4. (rode en oranje pijlen)

De aandrijvende kracht is een neerwaarts gerichte kracht, die volgt uit het vulwater. Uit de arm en het gewicht van het vulwater volgt een moment wat het kantelen aandrijft. Dit is de groene pijl in Afbeelding 6.4. Zodra het aandrijvend moment gelijk is aan het tegenwerkende moment, zal het caisson stabiel zijn. Door stapsgewijs toevoegen van vulwater zal het ook stapsgewijs willen roteren. In Afbeelding 6.5 staat de groene lijn voor deze vulling in het caisson.

Afbeelding 6.5 Hoekverdraaiing van het caisson (Eigen afbeelding)



Uit de berekeningen blijkt dat een hoekverdraaiing 61° dat het caisson het meeste weerstand heeft tegen het kantelen; op dit punt is het meeste vulwater benodigd. Na 61° neemt de weerstand af, het tegenwerkende moment neemt af. Het droogpompen van het caisson zou een optie kunnen zijn, zodat het aandrijvende moment ook afneemt. Maar het vullen van een tweede compartiment is praktischer en veiliger. Het droogpompen van het caisson kan namelijk resulteren dat het caisson terugdraait naar de liggende positie, omdat het caisson minder stabiel is in staande positie. De paarse lijn in Afbeelding 6.5 toont de hoeveelheid vulwater in het tweede compartiment.

Ook in andere fasen zijn de aandrijvende en tegenwerkende moment aan elkaar gelijk. Het terug- en door-draaien wordt tegengewerkt doordat de momenten aan elkaar gelijk zijn.

Hoewel de hoeveelheid m<sup>3</sup> vulwater toeneemt, neemt de diepgang van het caisson tussen circa 55° en 85° af. Dit komt doordat het caisson recht draait; het hoekpunt steek diep onderwater, maar wordt door de rotatie uit het water gelift (zie ook Afbeelding 6.4). Door de toename van het vulwater neemt het volume onderwater van het caisson wel toe.

## 6.4 Afzinkfase

De caissons worden koud tegen elkaar aan geplaatst, de elementen worden in een geul afgezonken. De kademuur zal daarom ook niet waterdicht zijn; om uitspoeling te voorkomen wordt er een geotextiel gebruikt. Er moeten voorzieningen voor het opnieuw laten opdrijven van het caisson gerealiseerd worden om verkleving met de bodem tegen te gaan. Een mogelijke oplossing kan zijn door het gebruik van spuitlansen.

Als het caisson op de eindlocatie staat kan er begonnen worden met het aanvullen van twee van de drie compartimenten met zand. De koppelingen waar eerst het water, voor het kantelproces, door werd gepompt worden nu gebruikt om het mengsel van zand en water door te pompen. Uiteindelijk zullen twee van de drie rijen compartimenten van het caisson gevuld worden met zand en het derde compartiment met water. Tijdens het vullen van het caisson met zand zal ook de grond achter het element worden aangevuld. Om kantelingen van het caisson tegengegaan zal dit stapsgewijs gebeuren. Tussen de stappen van het aanvullen en het vullen van het caisson zal tevens het geotextiel worden geplaatst.

Het is noodzakelijk om de bodem voor de kademuur over de gehele breedte van bodembescherming te voorzien. Dit is nodig om te voorkomen dat het bodemmateriaal als gevolg van stroming of schroefwerking van schepen zodanig erodeert dat de kademuur niet meer stabiel blijft.

### Afbouw

Nu de realisatie van de kademuur voltooid is kan er begonnen worden aan de afbouw van de kademuur. Bovenop het caisson zal er een deksloof geplaatst worden. De deksloof zal ervoor zorgen dat de caissons aan elkaar verbonden zijn en de krachten gespreid worden. Zodra de kraanbaan en ander meubilair geplaatst is, is de kademuur gereed voor gebruik.

## 6.5 Eindfase

De laatste fase in de cyclus van het caisson is het verwijderen en vervolgens verplaatsen. Het caisson wordt berekend op een levensduur van 100 jaar. De bruikbaarheidsperiode van een kademuur in de haven van Rotterdam wordt, volgens het handboek (De Gijt, 2013, p. 222), normaliter op 50 jaar geschat. De resterende 50 jaar dat het caisson nog heeft kan het een andere functie vervullen. Door de holle constructie is het mogelijk om het caisson in een later stadium op te laten drijven.

De beste optie is het verplaatsen van het caisson en het in een ander havengebied opnieuw als kademuur te gebruiken. De geotechnische bruikbaarheid, in andere grondslagen, is getoetst in hoofdstuk 8 van het hoofdrapport. Hieruit blijkt dat het caisson ook nog te gebruiken is bij grondslagen met een kleilaag, mits de verplaatsing niet meer dan acceptabel is. Een reductie van de terreinbelasting heeft grote (gunstige) gevolgen voor het horizontaal glijden van een caisson over een kleilaag.

De tweede optie is het gebruik van het caisson als een golfbreker. Door de constructiehoogte kunnen de elementen geplaatst worden in de zee met als doel het breken van de golven. Voordelen aan deze methode zijn de korte bouwtijd en het innemen van veel minder ruimte dan wanneer de golfbreker bestaat uit opgespoten zand en stortsteen.

Een derde optie zou zijn om het caisson te verpulveren tot menggranulaat. Deze optie is het minst wenselijk, aangezien het caisson dan niet hergebruikt wordt.

## 6.6 Conclusie

In dit hoofdstuk is aangetoond dat een gewichtsconstructie bestaande uit caissons gerealiseerd kan worden in het bouwdok te Barendrecht en vervolgens vervoerd kan worden naar het westelijk deel van de haven van Rotterdam. Door middel van het kantelproces is aangetoond dat de caissons op haar uiteindelijke locatie geplaatst kunnen worden.

## ECONOMISCHE HAALBAARHEID

Nu de haalbaarheid op constructief, geotechnisch en op uitvoeringsaspecten bekend is, wordt de economische haalbaarheid beschouwd. Dit is in veel van de gevallen een doorslaggevende factor als er een keuze gemaakt moet worden voor het type kademuur. In dit hoofdstuk wordt er gekeken naar de verhouding tussen het caisson en andere, reeds uitgevoerde kademuren.

### 7.1 Gemiddelde bouwkosten kademuur

Om een indicatie te verkrijgen van de voorziene bouwkosten van dit project, wordt er gekeken naar een schattingsgrafiek gegeven door het Handboek Kademuren (De Gijt, 2013, p. 459). Deze grafiek is verwerkt in Tabel 7.1. De tabel geeft de prijs per strekkende meter van een gemiddelde kademuur met een bijbehorende grondkerende hoogte aan. Hierin zijn verschillende type kademuren met elkaar vergeleken en van al deze punten is een gemiddelde lijn getrokken. Uitgaande 25 meter grondkerende hoogte, kan aangenomen worden dat een gemiddelde kademuur gerealiseerd kan worden voor 40.000 euro per strekkende meter. Om het caisson als een reële optie te beschouwen, zullen de voorziene bouwkosten moeten kunnen concurreren met de gemiddelde prijzen van andere type kademuren.

Tabel 7.1 Bouwkosten gemiddelde kademuur met bijbehorende grondkerende hoogte in 2008 (De Gijt, 2013, p. 459)

| Grondkerende hoogte<br>[m] | Bouwkosten per strekkende meter kademuur<br>[€] |
|----------------------------|-------------------------------------------------|
| 5                          | 7.000                                           |
| 10                         | 13.000                                          |
| 15                         | 22.000                                          |
| 20                         | 30.000                                          |
| 25                         | 40.000                                          |
| 30                         | 50.000                                          |

Binnen de totale bouwkosten van 40.000 euro per strekkende meter kademuur zijn er een aantal onderdelen die niet opgenomen zijn. Om een gelijkwaardige vergelijking op te kunnen stellen worden deze ook bij het caisson niet meegerekend, deze kostenposten zijn:

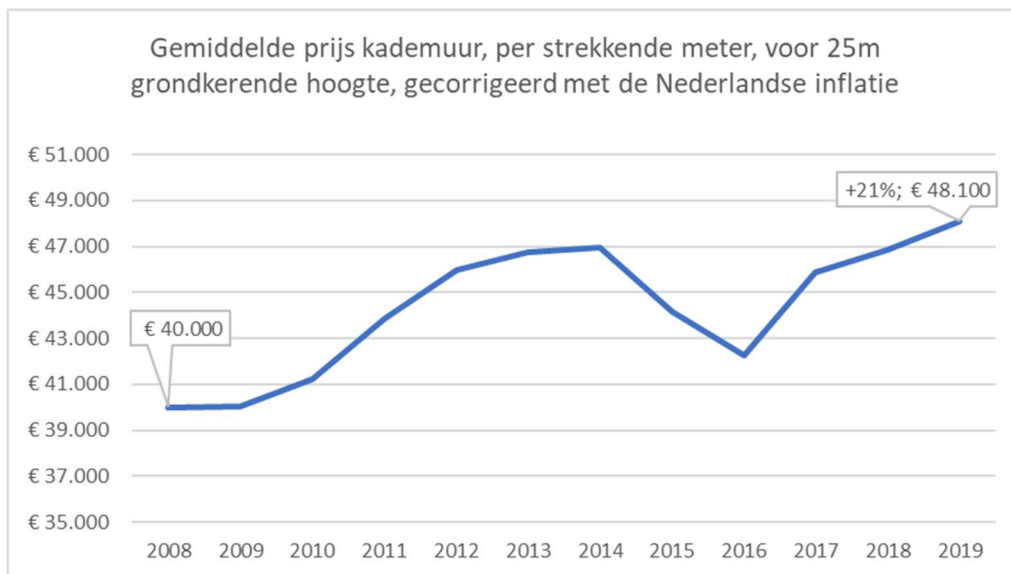
- De kosten van het ontwerpen en berekenen (engineeringskosten);
- Bodembescherming;
- Fenders;
- Baggeren vóór de kademuur.

Tijdens het opstellen van de vergelijking wordt er alleen gekeken naar de bouwkosten die de kademuur met zich mee brengt. De overige kosten (zoals engineeringskosten, vastgoedkosten, risicoreservering, de overige bijkomende kosten en de BTW) die hier normaal gesproken bij op komen om de projectsom volledig te maken worden buiten beschouwing gehouden.

Uit het interview met de kostendeskundige van Witteveen + Bos (Schulte, 2019) bleek dat de kosten per strekkende meter, voor een gewichtsconstructie met een grondkerende hoogte van 25 meter, aanhouden wordt op 50.000 euro in 2019, de notulen is te vinden in bijlage X. In Tabel 7.1, waarin de prijzen per strekkende meter kademuur te zien zijn, is opgesteld in het jaar 2008. Het is aannemelijk dat sinds dat jaar de prijzen van een strekkende meter kademuur zijn veranderd.

In Afbeelding 7.1 zijn de jaarlijkse inflatiepercentages sinds 2008 met de gemiddelde prijs per strekkende meter kademuur vermenigvuldigd, deze inflatiepercentages zijn overgenomen van het CBS (Centraal Bureau voor de Statistiek) GWW-kosten (CBS, 2019), hierdoor kan een accuratere vergelijking opgesteld worden.

Afbeelding 7.1 Gemiddelde prijs per strekkende meter kademuur bij 25 meter grondkerende hoogte. (Eigen afbeelding)



Aangezien beide bronnen aangeven dat de prijs van een kademuur met een grondkerende hoogte van 25 meter uitkomt op circa 48.100 euro per strekkende meter, wordt dit gebruikt als referentiekader voor de economische haalbaarheid van het caisson.

## 7.2 Kosten caisson als kademuur

Nu bekend is wat de gemiddelde bouwkosten zijn voor een strekkende meter kademuur, met een grondkerende hoogte van 25 meter, worden de bouwkosten van een caisson beschouwd. Om een gelijkwaardige vergelijking op te kunnen stellen worden de bouwkosten per strekkende meter berekend. In hoofdstuk 7 van het deelrapport is een opsomming gegeven van de materialen, hoeveelheden en hierbij horende eenheidsprijzen. De eenheidsprijzen zijn bepaald aan de hand van het interview met een kostendeskundige van Witteveen + Bos. Voor een verdere verklaring van de kostenposten, is te vinden in hetzelfde hoofdstuk in het deelrapport.

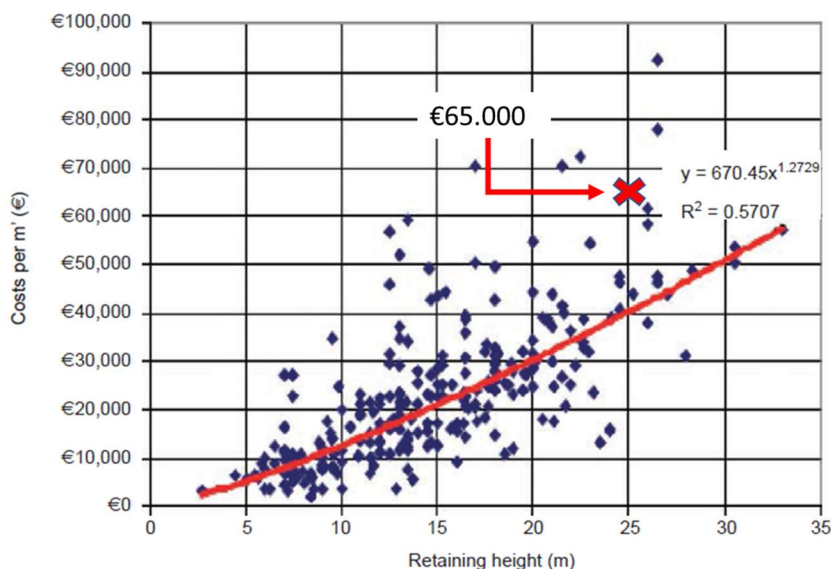
## 7.3 Vergelijking caisson met andere kademuren

Om een accurate vergelijking op te kunnen stellen tussen de voorziene bouwkosten van het caisson en de gemiddelde kosten van een kademuur met een grondkerende hoogte van 25 meter worden de inflatiepercentages gebruikt om terug te rekenen. Uit hoofdstuk 7 van het deelrapport blijkt dat de bouwkosten van het caisson uitkomen op circa 80.000 euro per strekkende meter, door dit getal te delen door de jaarlijkse inflatie, terugrekenend naar 2008, kan er een vergelijking gemaakt worden met Tabel 7.1. In Tabel 7.2 is te zien dat met terugwerkende kracht de bouwkosten per strekkende meter caisson uitkomen op 65.000 euro, dit is een factor van 1,65 in vergelijking met de gemiddelde bouwkosten. In Afbeelding 7.2 is het punt geplaatst waar dit caisson scoort, hierdoor is er een overzichtelijke vergelijking gemaakt.

Tabel 7.2 Vergelijking prijs caisson met gemiddelde kademuren

| Vergelijking prijs        | 2008   | 2019   | Vershil | %-verschil |
|---------------------------|--------|--------|---------|------------|
| Prijs caisson             | 65.000 | 80.000 | 15.000  | 65%        |
| Gemiddelde prijs kademuur | 40.000 | 48.100 | 8.100   | 65%        |

Afbeelding 7.2 Overzicht bouwkosten verhouding caisson en gemiddelde kademuren (De Gijt, 2013, p. 459)



## 7.4 Conclusie

Uit de kostenraming blijkt dat de voorziene bouwkosten per strekkende meter caisson-kademuur, met een grondkerende hoogte van 25 meter, op circa 80.000 euro uitkomen waarbij de risicoreservering, engineeringkosten en andere onvoorziene kostenreserveringen buiten beschouwing zijn gelaten. Volgens het handboek kademuren (De Gijt, 2013) en het interview met de kostendeskundige van Witteveen + Bos (Schulte, 2019) blijkt dat de voorziene bouwkosten van een gemiddelde kademuur met dezelfde afmetingen op 48.100 euro à 50.000 euro uitkomen. Dit betekent dus dat de variant waarin een caisson als kademuur wordt gebruikt 65% duurder is dan een gemiddelde kademuur. Dit valt binnen de lijn der verwachting, omdat het caisson op veel punten goed scoort, maar toch zelden uitgevoerd wordt. Een verklaarbare reden hiervoor kan de hoge bouwsom zijn.

Er kan door het hergebruik van de caissons als kademuur of golfbreker bespaard worden op de hierbij horende projectsom. Het is echter lastig om een inschatting te geven van de extra kosten die het hergebruik met zich mee brengt. Ook is het complex om de economische waarde van het caisson na een aantal jaren gebruikt te zijn, op voorhand te bepalen. Wanneer de kosten tot hergebruik lager zijn dan de economische waarde van de gewichtsconstructie, is het hergebruiken van een caisson economisch rendabel. Wanneer dit niet van toepassing is dan zal het niet verstandig zijn om een verplaatsbaar caisson toe te passen.

Indien het verschil van de bouwkosten tussen het caisson en een gemiddelde kademuur door het hergebruik gecompenseerd kan worden, kan het caisson op langere termijn een economisch voordeligere keuze zijn. Het nadeel is wel dat er vooraf een hogere bouwsom betaald moet worden voor dit project en dat dit verschil pas na 50 jaar terugverdient kan worden.

Om daadwerkelijk te kunnen concluderen of het caisson door middel van hergebruik een economisch betere optie is dan haar concurrenten is er aanvullend onderzoek benodigd.

## EFFECTENSTUDIE BIJ AANWEZIGE KLEILAAG

Uit de sondering in Tabel 2.2 (en Bijlage I van het deelrapport) blijkt dat er geen kleilagen onder het funderingsvlak aanwezig zullen zijn; de grond onder het caisson bestaat uit een vaste zandlaag. Er wordt echter wel verwacht dat het caisson bovenmatig horizontaal wil verplaatsen, mits een kleilaag aanwezig zou zijn. In dit hoofdstuk wordt onderzocht wat de gevolgen op de kademuur zijn wanneer er een kleilaag aanwezig is. Terreinbelasting, dikte-, en diepte van de kleilaag zijn de variabele parameters voor deze effectenstudie.

Het doel van deze studie is het onderzoeken van de effecten van een kleilaag bij deze zware gewichtsconstructie. De representatieve waarden zijn gebruikt, dit is voldoende voor deze effectenstudie. Voor stabiliteit- en draagkrachtberekeningen zijn deze resultaten niet geschikt, omdat er geen veiligheidsfactoren in de berekeningen zijn opgenomen.

### 8.1 Uitgangspunten

De geotechnische berekeningen worden uitgevoerd met behulp van het geotechnisch rekenprogramma PLAXIS 2D. De geometrie van de constructie wordt overgenomen van hoofdstuk 4.1 (breedte = 20,0 m, hoogte = 27,0m). De eigenschappen van de grond worden overgenomen van hoofdstuk 2.3. Verdere aanvullingen op de geotechnische eigenschappen worden gegeven in Tabel 8.1.

Tabel 8.1 Aanvullende geotechnische eigenschappen

| Hoofdnaam<br>[-] | Bijmengsel<br>[-] | Consistentie<br>[-] | E <sub>50</sub><br>[MPa] | E <sub>oed</sub><br>[MPa] | E <sub>ur</sub><br>[MPa] | Power (m)<br>[-] | OCR<br>[-] |
|------------------|-------------------|---------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|------------------|------------|
| Zand,            | Schoon            | Matig               | 45                       | 45                        | 135                      | 0,5              | 1,1        |
| Zand             | Schoon            | Vast                | 75                       | 75                        | 225                      | 0,5              | 1,1        |
| Klei             | Zwak zandig       | Vast                | 5                        | 7,5                       | 22,5                     | 0,9              | 1,3        |
| Klei             | Sterk zandig      | -                   | 5                        | 7,5                       | 22,5                     | 0,9              | 1,3        |

Het caisson wordt in PLAXIS 2D gemodelleerd als een platenmodel, met de volgende eigenschappen (Tabel 8.2):

Tabel 8.2 Materiaaleigenschappen ingevoerde constructie

| Type constructie<br>[-] | Dikte<br>[mm] | E-modulus<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | Oppervlak<br>[*10 <sup>3</sup> mm <sup>2</sup> ] | Traagheidsmoment<br>[mm <sup>4</sup> ] | EI<br>[kN m <sup>2</sup> /m <sup>1</sup> ] | EA<br>[kN] |
|-------------------------|---------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------|------------|
| Buitenwand              | 700           | 10.933                            | 700                                              | 2.86E10                                | 3.12E14                                    | 7.65E15    |
| Binnenwand              | 400           | 10.933                            | 400                                              | 5.33E9                                 | 5.83E13                                    | 4.371E15   |
| Vloeren                 | 800           | 10.933                            | 800                                              | 4.27E10                                | 4.66E14                                    | 8.74E15    |

Er is gerekend met een enkel belastingsgeval, met de volgende, gelijktijdig optredende belastingen (Tabel 8.3):

Tabel 8.3 Ingevoerde belastingen

| Belasting        | Type               | Positie                           | Belasting |
|------------------|--------------------|-----------------------------------|-----------|
| Kraanbelasting   | Vlaklast           | 5,0m van kaderand, breedte = 2,0m | 571 kN/m  |
| Terreinbelasting | Uniforme belasting | gehele achterland                 | variabel  |
| Bolderkracht     | Lijnlast           | -                                 | 67 kN     |

De eigenschappen van “sterk zandig klei” worden overgenomen voor de te onderzoeken kleilaag op diepte. Aangenomen wordt dat een kleilaag op diepte gemengd zal zijn met zand. Daarnaast wordt er uitgegaan dat deze laag, voor kleilagen, relatief stijf zal reageren, door de grotere, langdurige korrelspanningen.

Uit de literatuur volgen de toelaatbare verplaatsingen voor gewichtsconstructies. Dit zijn (Tabel 8.4):

Tabel 8.4 Acceptabele verplaatsingen voor gewichtsconstructies (de Gijt, 2004, p. 85)

| Type muur<br>[-]   | Gelijkmatige zakking<br>[mm] | Hoekverdraaiing<br>[rad] | Horizontale verplaatsing<br>[mm] |
|--------------------|------------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| Afzinkbaar caisson | 120 - 150                    | 0,005 - 0,008            | 50 - 80                          |

## 8.2 Hypothese verplaatsingen

Op basis van literatuur en geotechnische kennis worden de volgende resultaten verwacht:

- Bij zandige bodem zal de constructie voornamelijk horizontaal verplaatsen;
- Bij een bodem met een dieper gelegen kleilaag zal de constructie horizontaal glijden over deze kleilaag, verticaal zakken ten gevolge van zettingen én zal de constructie een scheefstand gaan aannemen bij ongelijkmatig verdeelde belastingen;
- Dikkere kleilagen zullen resulteren in meer verplaatsingen en rotatie;
- Diepere kleilagen zullen resulteren in minder verplaatsing en rotatie dan bij hoger gelegen kleilagen.

## 8.3 Analytische berekening

Doordat er een cohesieve laag aanwezig is, dient er, volgens de geotechniek norm (NEN9997-1, 2016, p. 6.5.1) gerekend te worden met ongedraineerde grenstoestanden. Er wordt dan uitgegaan van de ongedraineerde schuifsterkte van het cohesieve materiaal. Voor de kleilaag op diepte, die in dit hoofdstuk onderzocht wordt, geldt dat de ongedraineerde schuifsterkte gelijk is aan 13 kPa. Deze waarde is overgenomen van Tabel 2.2.

Uit een aanvullende geotechnische berekening in bijlage II blijkt dat er onvoldoende weerstand gevonden wordt voor het verticale draagvermogen in ongedraineerde toestand (U.C. circa 3,0) en onvoldoende horizontale schuifweerstand (U.C. circa 3,5). Uit deze berekening blijkt dat de belasting groter is dan de weerstand tegen afschuiven, hierdoor kan gesteld worden dat de constructie zal gaan schuiven.

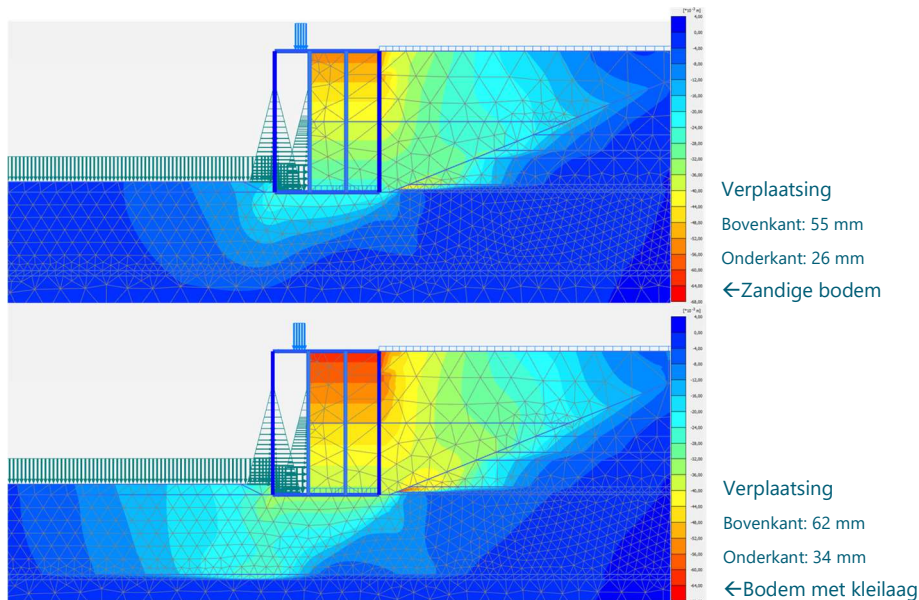
De daadwerkelijke verplaatsingen worden berekend met het eindige elementen geotechnisch rekenprogramma PLAXIS 2D. De kleilaag zal consolideren ten gevolge van de toegevoegde belasting, hierdoor zal de grondmoot, inclusief caisson, verplaatsen. Op basis van deze verplaatsingen zal een conclusie getrokken worden of het caisson meer dan acceptabel zal verplaatsen.

## 8.4 Verplaatsingen bij project gerelateerde uitgangspunten

Uit een van de uitgangspunten uit hoofdstuk 2.3 blijkt dat de terreinbelasting 100 kPa moet zijn.

In Afbeelding 8.1 wordt de horizontale verplaatsing weergegeven bij een volledig zandige ondergrond (boven) en bij een ondergrond met een kleilaag met een dikte van 1 meter op 15m onder het caisson (onder).

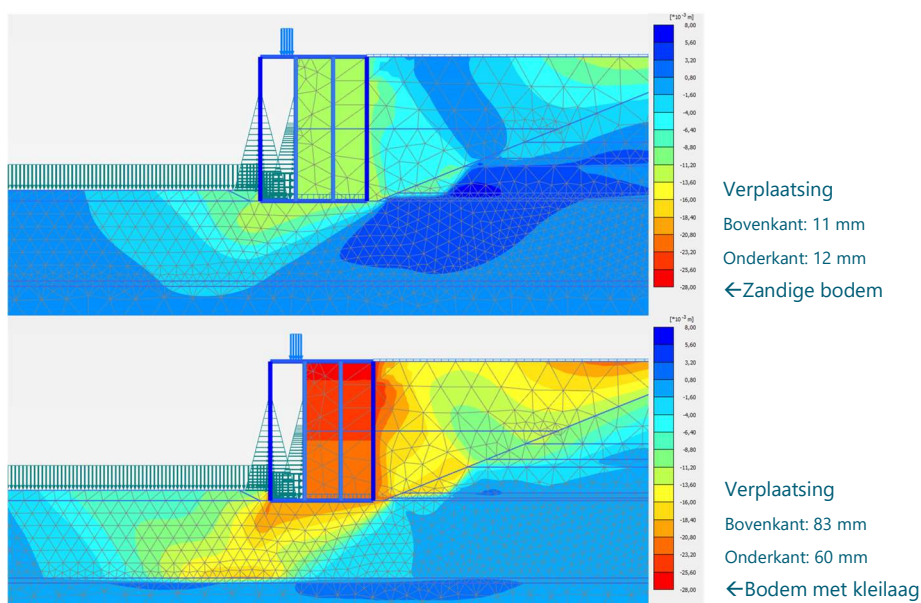
Afbeelding 8.1 Horizontale verplaatsing bij T=0 dagen, 1,0m kleilaag op -15m onder het caisson (Eigen afbeelding)



Hierin is de directe verplaatsing ten gevolge van de belasting goed zichtbaar. Dezelfde verplaatsingsschaal is gehanteerd voor het weergeven van de verplaatsingen.

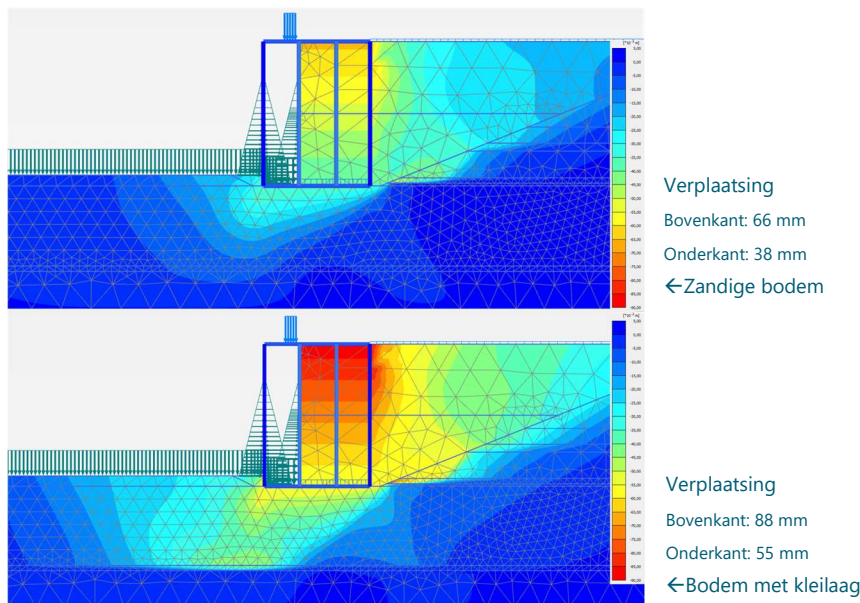
In Afbeelding 8.2 is de lange termijn verplaatsing weergegeven. Hierin is ook duidelijk zichtbaar dat de constructie gevoeliger is voor het horizontaal verplaatsen bij een onderliggende kleilaag. Ook in deze afbeelding is dezelfde verplaatsingsschaal gehanteerd.

Afbeelding 8.2 Horizontale verplaatsing bij T=10.000 dagen, 1,0 m kleilaag op 15m onder het caisson (Eigen afbeelding)



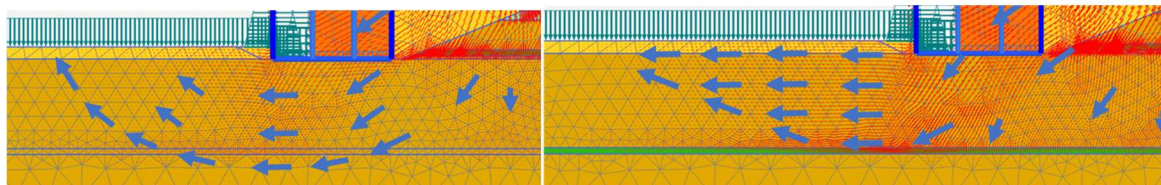
In beide toestanden is de horizontale verplaatsing groter bij de bodem met kleilaag, dan bij de zandige bodem. De totale verplaatsing zal daardoor ook groter zijn. Dit is zichtbaar in Afbeelding 8.3, waarin de som van de verplaatsingen is weergegeven.

Afbeelding 8.3 Totale horizontale verplaatsing ten gevolge van de belasting (Eigen afbeelding)



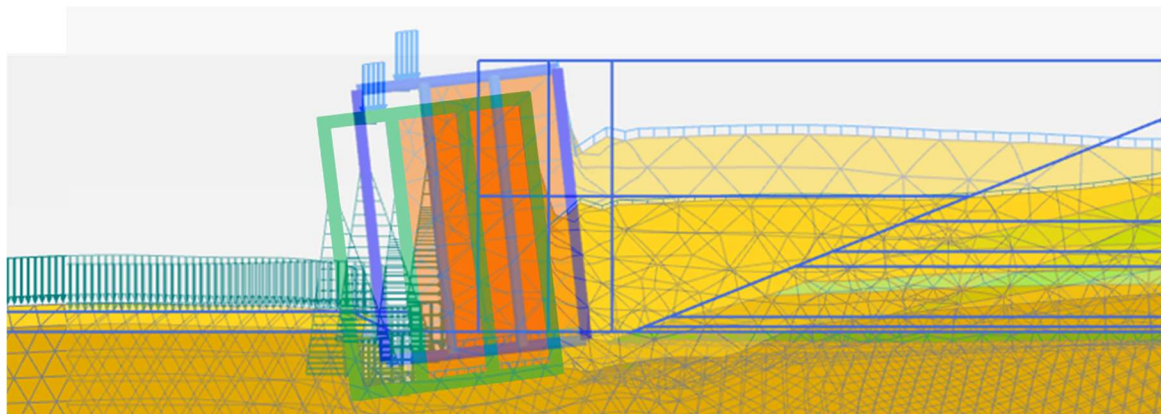
In alle bovenstaande afbeeldingen (Afbeelding 8.1, Afbeelding 8.2 en Afbeelding 8.3) blijkt dat de glijcirkel afgebroken wordt door de aanwezigheid van de kleilaag, hierdoor gaat de hele grondmoot glijden over de onderliggende kleilaag. Bij de zandige bodemopbouw zijn volledige glijcirkels zichtbaar; de grondmoot gaat niet glijden over de onderliggende laag. Dit is weergegeven in Afbeelding 8.4.

Afbeelding 8.4 Verplaatsingsvectoren met zandige bodem (links) en bodem met kleilaag (rechts) (Eigen afbeelding)



De totale verplaatsing, zowel verticaal als horizontaal, is in Afbeelding 8.5 uitvergroet weergegeven (schaal 100x). Twee afbeeldingen zijn over elkaar geplaatst. Het blauw gearceerde caisson toont de verplaatsing bij een zandige bodem. Het groen gearceerde caisson toont de verplaatsing bij een bodem met een kleilaag. De verticale en horizontale verplaatsing is, naar verwachting, groter bij de kleiige grondlagen.

Afbeelding 8.5 Verplaatsingen in zandige (blauw) en kleiige (groen) grond (Eigen afbeelding)



## 8.5 Andere combinaties

Verskillende berekeningen zijn uitgevoerd, waarin er gevarieerd is met de drie parameters. Combinaties die resultaten geven zijn weergegeven in Tabel 8.5. Grotere terreinbelastingen dan de gegeven waarden in deze tabel, resulteren in het bezwijken van het grondlichaam. Hieruit volgt daarom ook geen realistische verplaatsing. Uit berekeningen met deze parameters volgen verschillende resultaten. In hoofdstuk 8.6 worden deze resultaten verder verwerkt.

Tabel 8.5 Combinaties met resultaat

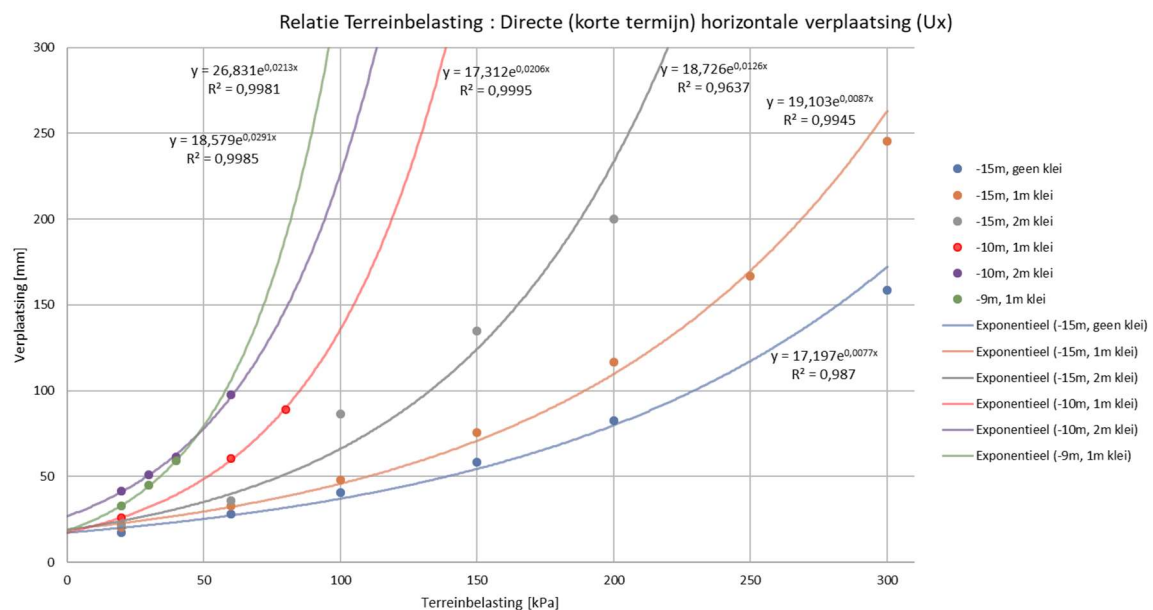
| Diepte kleilaag<br>[m onder caisson] | Dikte kleilaag<br>[m] | Terreinbelasting<br>[kPa]       |
|--------------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| 9                                    | 1                     | 20, 30, 40                      |
| 10                                   | 1                     | 20, 60, 80                      |
| 10                                   | 2                     | 20, 30, 40, 60                  |
| 15                                   | 0                     | 20, 60, 100, 150, 200, 300      |
| 15                                   | 1                     | 20, 60, 100, 150, 200, 250, 300 |
| 15                                   | 2                     | 20, 60, 100, 150, 200, 250      |

## 8.6 Resultaten PLAXIS berekeningen

De resultaten van de PLAXIS 2D berekeningen van de genoemde combinaties uit Tabel 8.5 worden verwerkt in grafieken om de relatie tussen de parameters en de resultaten weer te geven. Daarnaast dienen deze grafieken ook ter onderbouwing van de hypothese uit Hoofdstuk 8.2. De formules van de trendlijnen worden in de afbeeldingen gegeven, inclusief de R-kwadraat waarde. Hoe hoger de R<sup>2</sup>-waarde, hoe nauwkeuriger de trendlijn, waarin R<sup>2</sup>=1,0 gelijk staat aan een uiterst nauwkeurige trendlijn.

Uit Afbeelding 8.6 volgt de directe horizontale verplaatsing ten gevolge van de ingevoerde belastingen (uit Tabel 8.3). Deze grafiek geldt dus bij een kortdurende belasting. De verplaatsingen ten gevolge van permanente belasting is hierin niet zichtbaar. Tijdens de uitvoering dient hier wel rekening mee gehouden te worden; het caisson zal ook al horizontaal verplaatsen ten tijde van het aanvullen achter het caisson. Verschillende waarnemingen worden gedaan. Aan de hand van deze waarnemingen wordt uiteindelijk een conclusie getrokken.

Afbeelding 8.6 Relatie Terreinbelasting: Directe (korte termijn) horizontale verplaatsing (U<sub>x</sub>)

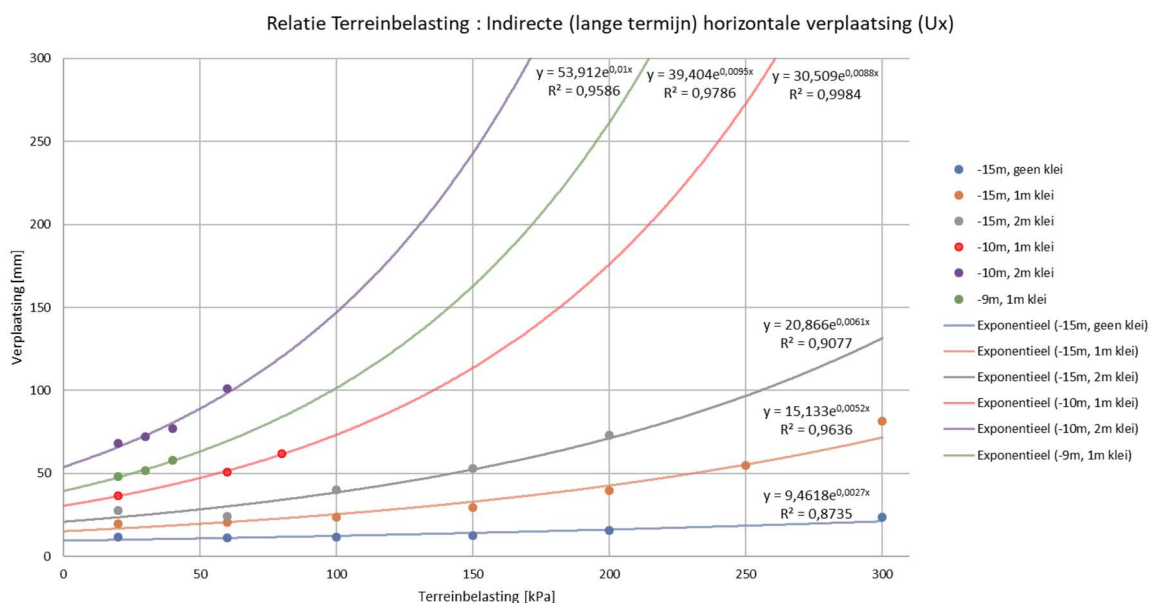


Uit Afbeelding 8.6 blijkt, dat:

- Het caisson bij ondiepe kleilagen meer zal verplaatsen dan bij dieper gelegen kleilagen;
  - o Bijvoorbeeld bij 60 kPa terreinbelasting. De verplaatsing bij een kleilaag op 15 m diepte bedraagt circa 30 mm. Bij een kleilaag op 10 m bedraagt dit circa 60 mm.
- Een toename in de dikte van de kleilaag zal resulteren in exponentieel grotere verplaatsingen;
  - o Bijvoorbeeld de kleilaag op 15 m diepte. De helling (dat is de steilheid van de lijn) is voor de 2,0 m dikke kleilaag groter dan voor de kleilaag met 1,0 m dikte. Deze helling blijft toenemen.
- Diepere kleilagen zijn stijver dan ondiepere lagen; en zullen dus minder vervormen.
  - o De helling van de 15 m meter diepe kleilaag (van 1,0 meter dikte) is vele malen kleiner dan de helling van de kleilaag (1,0 m dikte) op 10 m diepte. Bij de dezelfde belasting vervormd de diepere, stijvere kleilaag minder.

Uit Afbeelding 8.7 volgt de relatie tussen de indirecte (lange termijn) horizontale verplaatsing en de terreinbelasting. De terreinbelasting voor de lange termijn wordt gehalveerd, met de korte termijn terreinbelasting. Dit komt overeen met  $\psi$ -factor (=0,50) voor gelijkmatig verdeelde belastingen voor kademuren. De kade-muur wordt namelijk nooit 100% van de tijd maximaal belast. (zie Tabel 2.3).

Afbeelding 8.7 Relatie Terreinbelasting : Indirecte (lange termijn) horizontale verplaatsing (glijden) (Eigen afbeelding)



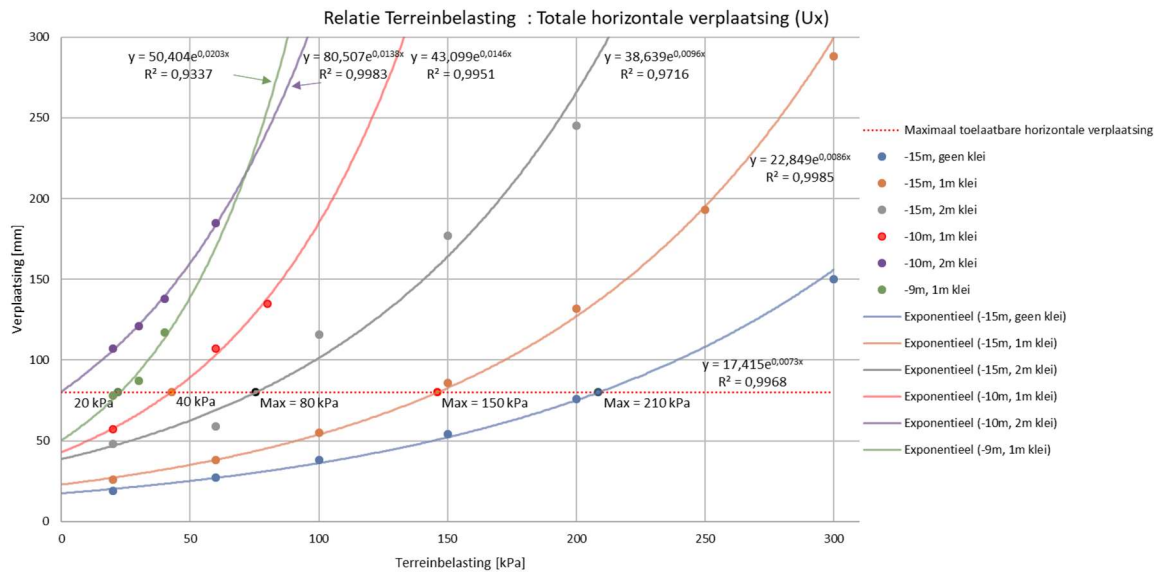
Uit deze grafiek (Afbeelding 8.7) wordt duidelijk dat:

- Het caisson bij een zandige grondslag bijna niet zal gaan glijden;
  - o De verplaatsingslijn is bijna lineair en neemt nauwelijks toe. De verplaatsing op lange termijn is nihil. (Deze aanname wordt vaak gedaan, maar deze grafiek bewijst dit ook)
- Het caisson bij ondiepe kleilagen meer zal verplaatsen dan dieper gelegen kleilagen;
  - o Bijvoorbeeld bij 20 kPa terreinbelasting. Zichtbaar is dat de hoogstgelegen laag (9 m onder het caisson) het meest verplaatst, namelijk 65 mm. De laag op 10 m diepte verplaatst circa 40 mm. De diepst gelegen kleilaag (15 m onder het caisson) verplaatst circa 20 mm.

- Dikke kleilagen zullen resulteren in grotere verplaatsingen.
  - o Bijvoorbeeld bij 60 kPa terreinbelasting. De verplaatsing, bij een 2,0 m dikke kleilaag op 10 m onder het caisson, bedraagt circa 100 mm. De verplaatsing bij dezelfde kleilaag op 15 m onder het caisson bedraagt slechts 35 mm.

Uit Afbeelding 8.8 blijkt dat er een exponentieel verband tussen de terreinbelasting en de horizontale eindverplaatsing van de constructie aanwezig is. Deze eindverplaatsing volgt uit de som van de directe en de indirecte verplaatsing.

Afbeelding 8.8 Relatie Terreinbelasting: Totale horizontale verplaatsing (Eigen afbeelding)



Uit het snijpunt met de trendlijn en de maximaal toelaatbare horizontale verplaatsing volgt de (afgeronde) maximaal toelaatbare terreinbelasting per grondgesteldheid.

## 8.7 Conclusies

Op basis van deze verplaatsingen zijn meerdere conclusies te trekken:

- De opgegeven terreinbelasting vanuit de ontwerpuitgangspunten (hoofdstuk 2.3), 100 kPa, veroorzaakt geen onacceptabele verplaatsingen bij de opgegeven grondgesteldheid;
- Uitgaande van de gegeven sondering (hoofdstuk 2.2), zal het caisson (met deze afmetingen), bij terreinbelastingen groter dan 210 kPa, meer dan acceptabel verplaatsen\*;
- Uit Afbeelding 8.8 blijkt dat dit caisson ook nog toe te passen is bij andere grondgesteldheden. Hieruit wordt gesteld dat het caisson is te hergebruiken, mits de terreinbelasting geen onacceptabele verplaatsingen veroorzaakt;
- Het toepassen van deze constructie bij ondiepe kleilagen (-9,0m of hoger) is niet haalbaar.

\* bij deze terreinbelastingen dient de geotechnische controle op verticaal draagvermogen opnieuw uitgevoerd te worden

Door deze effectenstudie zijn verplaatsingen van de constructie zichtbaar gemaakt, bij een kleiige grond. Hiermee is het doel van deze effectenstudie bereikt. Er zijn geen veiligheidsfactoren opgenomen in deze berekening, daarom zijn stabiliteits- en draagkrachtberekeningen nog vereist. Daarom zijn er nog aanvullende berekening benodigd om deze gegevens over te kunnen nemen voor een project.

## SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS

In dit hoofdstuk worden de Sustainable Development Goals (=SDG's) beschouwd die van toepassing zijn in dit onderzoek. Deze Duurzame Ontwikkelingsdoelen zijn een wereldwijd actieplan om te komen tot een sociaal, ecologisch en economisch duurzame wereld in 2030. Deze doelen zijn voor Witteveen + Bos het vertrekpunt van de bedrijfsdoelstellingen.

De Verenigde Naties (VN) heeft deze doelen opgesteld en meetbare doelstellingen hieraan gekoppeld. Per doel wordt omschreven waarom dit onderzoek bijdraagt aan de duurzame ontwikkelingsdoelen van de VN.



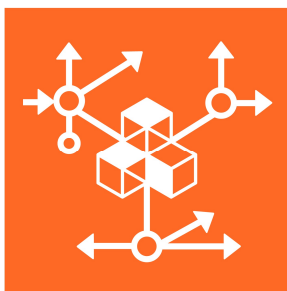
### 9.1 Doel 12 Verantwoorde consumptie en productie

Het is mogelijk om het caisson opnieuw op te laten drijven en deze vervolgens, op een andere locatie, te hergebruiken. Dit hergebruik komt overeen met de omschrijving van de ontwikkelingsdoelstellingen (SDGoals, 2019): "Tegen 2030 de afvalproductie aanzienlijk beperken via preventie, vermindering, recyclage en hergebruik"



### 9.2 Doel 9 Industrie, Innovatie en Infrastructuur

Dit onderzoek draagt bij aan de ontwikkeling van een object waardoor havens, zowel in Nederland als in het buitenland, verder ontwikkeld kunnen worden. Dit draagt bij aan de economische groei van het land en past daarom goed in ontwikkelingsdoelstellingen. Dit doel is als volgt omschreven (SDGoals, 2019): "Ontwikkelen van kwalitatieve, betrouwbare, duurzame en veerkrachtige infrastructuur, ter ondersteuning van de economische ontwikkeling."



Een tweede subdoel, binnen het hoofddoel Industrie, innovatie en infrastructuur, is van toepassing op dit onderzoek. Dit is, samengevat, Moderniseren door middel van innovatie. Het onderzoek naar het transporteren en kantelen verbetert onderzoek naar dit type kademuur. Dit subdoel wordt omschreven als (SDGoals, 2019): "Verbeteren van het wetenschappelijk onderzoek, moderniseren van de technologische capaciteiten van industrie sectoren in alle landen."



### 9.3 Doel 8 Waardig werk en economische groei

De ontwikkeling van kademuuren draagt bij aan economische groei, omdat er op een efficiëntere wijze gebouwd kan worden. Het onderzoek naar verplaatsbare caissons veroorzaakt diversificatie, doordat stalen wanden voornamelijk gebruikt worden voor de realisatie van grote grondkerende constructies in de haven van Rotterdam. Dit subdoel wordt als volgt omschreven (SDGoals, 2019): "Tot meer economische productiviteit komen door diversificatie, technologische modernisatie en innovatie"

# 10

## CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN

In dit hoofdstuk wordt een antwoord op de hoofdvraag gegeven. Dit afstudeeronderzoek is opgedeeld in kleinere subvragen, om een zo volledig mogelijk antwoord te kunnen geven op de hoofdvraag. De resultaten van een subvragen vormen de onderbouwing voor de conclusie van dit onderzoek. De overkoepelende vraag voor dit onderzoek is:

Op welke wijze is het constructief en geotechnisch haalbaar, uitvoerbaar en economisch concurrerend om met een gewichtsconstructie 25 meter grondkerende hoogte te bereiken, in het westelijke gebied van de haven van Rotterdam?

Drie onderdelen zijn te ontleden van deze hoofdvraag, dit zijn: "Technische haalbaarheid", "Uitvoeringshaalbaarheid" en "Economische haalbaarheid". Op basis van deze onderdelen zijn er vier subvragen opgesteld:

1. Welke praktische dimensies moeten aan gehouden worden om te voldoen aan de geotechnische en constructieve normen?
2. Op welke manier kan de gekozen gewichtsconstructie gerealiseerd worden en op de locatie geplaatst worden?
3. Hoe verhoudt de gekozen gewichtsconstructie zich met een gemiddelde kademuur, wanneer de bouwkosten met elkaar vergeleken worden?
4. Welk effect heeft een kleilaag onder een gewichtsconstructie, op de horizontale verplaatsing van het element?

Door de steeds groter wordende schepen met grotere diepgang, vraagt Witteveen + Bos zich af of de combiwand met buispalen en slanke wanden nog steeds de meest economische en snelste oplossing is voor het realiseren van grote grondkerende kademuren. Een gewichtsconstructie is mogelijk sneller, goedkoper en duurzamer te realiseren (volgens hoofdstuk 3.1). Het toepassen van een caisson, als gewichtsconstructie, is onder de gekozen criteria, met bijbehorende omstandigheden, de beste optie. Dit element is verplaatsbaar en kan hergebruikt worden (volgens hoofdstuk 3.2). Het gebruik van een bouwdok, om vervolgens het element via het water te transporteren, blijkt de beste bouwmethode (volgens hoofdstuk 3.3)

Per subvraag wordt een antwoord gegeven. Hierdoor kan een onderbouwd antwoord gegeven worden op de hoofdvraag.

1. De geotechnische toetsing (zie hoofdstuk 4) en constructieve berekeningen (zie hoofdstuk 5) zijn uitgevoerd. Hieruit blijkt dat een element van 27,0 m hoogte en 20,0 m breedte benodigd zijn voor deze 25,0 m grondkerende constructie, bij de gegeven grondopbouw. Het 2,0 m ingraven van het caisson werkt gunstig voor de constructie, op verticaal draagvermogen, afschuiven en kantelstabiliteit. De afmetingen van de betonnen onderdelen komen overeen met de literatuur. Het dek en de vloer van het caisson voldoen met een betondikte van 800 mm en Ø32-100 wapening, voor de buitenwanden is een betondikte van 700 mm voldoende, met Ø32-100 wapening. Voor de binnenwanden, die de compartimenten vormen, is een betondikte van 400 mm en Ø25-100 wapening voldoende. De genoemde wanddikten komen overeen met de literatuur; Het is zowel geotechnisch, als constructief haalbaar om een caisson op zandige bodem te realiseren voor een 25,0 m hoge kademuur.

2. In dit haalbaarheidsonderzoek bleek het gebruik van een bestaand bouwdok de beste optie voor dit onderzoek. Het caisson kan, met behulp van systeembekisting, geprefabriceerd worden. Hoewel de betonnen constructie relatief dunne wanden en vloeren heeft, zal het caisson in een staande positie te diep liggen om getransporteerd te worden. Daarom wordt het caisson gekanteld (90° in lengterichting) gerealiseerd en getransporteerd. Het caisson zal daarom met 20,0 m hoogte vervoerd worden in plaats van 27,0 m hoogte. Op deze wijze is het mogelijk om, zonder additioneel drijfvermogen, diepgang te reduceren. De metahoogte is getoetst; het element is voldoende stabiel. Door het vullen van de compartimenten met water, zal het caisson in de diepere delen van de haven naar de eindpositie gekanteld moeten worden. Voor het kantelen van het caisson is geen zwaar materieel benodigd; uitgebreide berekeningen tonen aan dat, door het vullen van de compartimenten, het caisson zal draaien naar de staande positie (zie hoofdstuk 6). Door het gekanteld bouwen en het in een later stadium laten kantelen van het caisson wordt er aangetoond dat dit caisson haalbaar is om uit te voeren.
3. Uit de hoeveelheden met bijbehorende prijzen per eenheden blijkt (in hoofdstuk 7) dat het caisson 65% duurder is dan een gemiddelde kademuur. Dit is gebaseerd op de inschattinggrafiek uit het Handboek Kademuren. De, met inflatie gecorrigeerde, voorziene bouwkosten van een kademuur bedragen circa €48.100 per strekkende meter kademuur. De voorziene bouwkosten van een caisson bedragen circa €80.000 per strekkende meter kademuur. De getoonde prijzen van beide kademuren zijn van toepassing bij 25,0 meter grondkerende hoogte en zijn zonder riscoreservering, engineeringskosten en andere onvoorziene kostenreserveringen. Het prijsverschil valt in de lijn der verwachting. Het caisson scoort op verschillende onderdelen goed, maar in de praktijk wordt het caisson weinig gerealiseerd. Een logische verklaring hiervoor is de hogere bouwsom. Er kan door het hergebruik van de caissons als kademuur of golfbreker bespaard worden op de hierbij horende projectsom. Het is echter lastig om een inschatting te geven van de extra kosten die het hergebruik met zich mee brengt. Om daadwerkelijk te kunnen concluderen of het caisson door middel van hergebruik een economisch betere optie is dan haar concurrenten is er aanvullend onderzoek benodigd.
4. Uit de bodemopbouw van de gegeven sondering blijkt dat er geen cohesieve lagen aanwezig zullen zijn onder de gewichtsconstructie; de grond onder het caisson bestaat uit een vaste zandlaag. In hoofdstuk 8, blijken de effecten wanneer er een cohesieve (klei) laag aanwezig zou zijn onder het caisson. Deze toestand kan zich voordoen bij een onjuiste/onvolledige sondering of wanneer het caisson op een andere locatie hergebruikt wordt. Uit de berekeningen blijkt een exponentieel verband tussen de terreinbelasting en de horizontale verplaatsing; De verticaal gerichte terreinbelasting veroorzaakt dat het caisson, inclusief de grondmoot, wil gaan glijden over de dieper gelegen kleilaag. Daarnaast blijkt uit berekeningen ook, dat de verplaatsingen afnemen bij dieper gelegen cohesieve lagen. Een dikkere kleilaag zal resulteren in grotere verplaatsingen en hoekverdraaiingen. De maximaal toelaatbare terreinbelasting, voordat het caisson bovenmatig verplaatst, is bij een volledig zandige bodemopbouw circa 200 kPa. Bij een bodemopbouw met een 1,0 m dikke cohesieve laag op 10,0 m onder het funderingsvlak, is deze toelaatbare terreinbelasting circa 40 kPa. Uit deze effectenstudie blijkt dat voor de realisatie van een caisson een zandige grondslag een vereiste is voor grote terreinbelastingen. Wanneer het caisson hergebruikt wordt bij een kleiige bodem, dient er rekening gehouden te worden met lagere toelaatbare terreinbelastingen

Op basis van deze conclusies kan de eindconclusie gesteld worden:

Het toepassen van een caisson voor 25 meter grondkerende hoogte, in het westelijk gebied van de haven van Rotterdam, is een haalbare oplossing. Het caisson is mogelijk een economisch concurrerende oplossing, mits deze, in een later stadium, hergebruikt wordt. Uit aanvullend onderzoek moet dat nog blijken.

## AANBEVELINGEN

### Geotechnische aanbevelingen

- De doorsnede van het caisson is rechthoekig. Optimalisaties van de vorm van de constructie zijn mogelijk. Mogelijke optimalisaties van de doorsnede zijn:
  - o Verbrede funderingsvoet door middel van een teen
  - o Trapeziumvormige doorsnede, met een schuinstand van de achterwand
- De weergegeven horizontale en verticale verplaatsingen zijn gebaseerd op algemene grondeigenschappen. Deze verplaatsingen zullen per project variëren; een project specifieke berekening is hiervoor vereist.
- Voor elk project dient de geotechnische berekening opnieuw uitgevoerd te worden. Omdat de grondopbouw grote invloed heeft op de gehele constructie.

### Constructieve aanbevelingen

- Voor de betonberekeningen is er uitgegaan van C30/37 beton. Een hogere, maar duurdere betonkwaliteit zal mogelijk resulteren in een slankere constructie. Dit is mogelijk een goedkopere oplossing.
- Voor de wapeningsberekeningen zijn er grove optimalisaties doorgevoerd, verfijning van deze berekening zal kunnen resulteren in een goedkopere en duurzamere oplossing.
- Er is geen rekening gehouden met dynamische belastingen tijdens het kantelen van het caisson, omdat het caisson gecontroleerd en stapsgewijs zal kantelen. Wanneer snellere rotaties verwacht worden, zullen hiervoor aanvullende berekeningen uitgevoerd moeten worden.

### Uitvoeringsaanbevelingen

- De kosten van de extra systeemkisten en kranen kunnen opwegen tegen de huurkosten van het bouwdok. Door een optimalisatie van de planning kan de doorlooptijd verkort worden en de bouwsom afnemen.
- Een optimalisatie van de indeling van het bouwdok lijkt mogelijk te zijn. Mocht het mogelijk zijn meer of langere caissons te realiseren per batch, dalen de kosten per strekkende meter kademuur.
- Er is uitgegaan van de beschikbaarheid van het bouwdok in Barendrecht. Voor een project moet duidelijk worden of dit dok ook daadwerkelijk beschikbaar is. Een scheepdok in het havengebied zou een alternatief kunnen zijn.

### Aanbevelingen kostenvergelijking

- Tijdens het opstellen van de kostenraming zijn er meerdere onderbouwde aannamen gedaan, om een accurater beeld te krijgen tussen de verhouding van een caisson en een gemiddelde kademuur zal er een gedetailleerde kostenraming opgesteld moeten worden.
- In de kostenraming is er uitgegaan van het innovatieve kantelproces. Andere bouwmethoden zijn niet opgenomen in de vergelijken en zullen daarom resulteren in een andere conclusie betreft de kostenvergelijking.

### Aanbeveling effectenstudie

- Het effect van kleiige grond onder een gewichtsconstructie is duidelijk gemaakt. De weergegeven waarden zijn gebaseerd op algemene grondeigenschappen en zullen daarom afwijken van de werkelijke verplaatsingen.
- Voor de verplaatsingen is er geen gebruik gemaakt van combinatie- en veiligheidsfactoren. De getoonde verplaatsingen zullen daarom niet representatief zijn voor geotechnische toetsingen.
- De, automatisch gegenereerde, getoonde exponentiële trendlijnen tonen wat onnauwkeurigheid ( $R^2 \neq 1,0$ ). De berekende verplaatsingen zijn dus ter indicatie van de effecten. Werkelijke verplaatsingen zullen afwijken en zullen daarom voor elk project opnieuw berekend moeten worden.
- Voor de grotere terreinbelastingen (200 kPa) op zandige ondergrond kan een caisson mogelijk wel goedkoper zijn. Horizontale verplaatsingen zijn voor dit caisson bij 200 kPa terreinbelasting nog acceptabel. Bij deze belastingen zijn er voor een standaard combiwand grote, dure ontlastconstructies nodig. Uit nader onderzoek moet blijken of het caisson een betere oplossing is dan een combiwand met ontlastvloeren.

## LEERZAME ERVARINGEN

Hoewel er zo nauwkeurig mogelijk gewerkt is, hebben er zicht tijdens dit onderzoek ook uitdagingen en valkuilen voorgedaan. Dat was, volgens het Handboek Kademuuren (De Gijt, 2013, p. 503), zelfs te verwachten voor iedere ontwerper en uitvoerder.

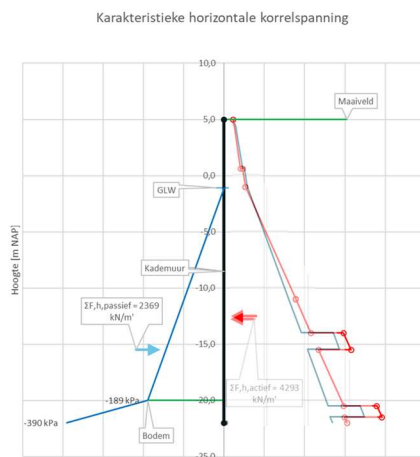
### Gronddrukken

Op basis van de gegeven sondering is een interpretatie van de bodemopbouw uitgevoerd. Aan de hand hiervan is de verticale en horizontale spanningsopbouw bepaald. Erg laat in het afstudeerproces bleek, na een geotechnische controle, dat deze spanningen niet helemaal juist waren. Dit heeft gevolgen voor de constructie. Deze gevolgen zijn te merken in alle onderdelen van het project:

- Voor de geotechnische berekeningen is een grotere constructie nodig om volgende draagvermogen te kunnen vinden
- Voor de constructieve berekeningen, zal er mogelijk blijken dat er meer wapening of een dikkere constructie benodigd is, om te voldoen aan de normen.
- Wanneer de afmetingen van de constructie wijzigen, zal het realiseren in het bouwdok in Barendrecht erg lastig worden. Doordat de constructie groter zal zijn en daardoor ook dieper in het water komt te liggen.
- Door al de bovenstaande onderdelen zal de kostenraming ook wijzigen.

In dit afstudeeronderzoek zijn deze wijzigingen niet verder doorgevoerd, maar voor een project is het vereist om deze gronddrukken opnieuw te controleren. De gebruikte (blauw) en de gecorrigeerde (rood) gronddrukken zijn weergegeven in Afbeelding 10.1

Afbeelding 10.1 Verschil horizontale gronddruk (Treure & Kastermans)



### Geleerde les:

Voor elk project, afstuderen of voor een opdrachtgever, is het essentieel dat de uitgangspunten intensief en vroegtijdig gecontroleerd worden. Bij eerdere controle zou er meer tijd geweest zijn om deze belasting aan te passen.

Voor elk van de onderdelen zijn oplossingen beschikbaar, maar deze wijken af van dit onderzoek.

- Het toepassen van verticale drainage kan resulteren in circa 10% minder horizontale belasting uit de gronddruk. De lokale spanningstoename (ten gevolge van overspannen grondwater) neemt af;
- Het toepassen van een teen zal resulteren in een groter effectief oppervlak;
- Meer wapening kan toegepast worden in de constructie. In de huidige toestand is de maximaal toelaatbare hoeveelheid wapening nog niet bereikt;
- Uit betonberekeningen zou kunnen blijken, dat met een hogere betonkwaliteit de afmetingen van de constructie niet zullen wijzigen.
- Het realiseren van het caisson met behulp van een drijvend dek of een rails constructie zijn alternatieve bouwmethoden.

## BIBLIOGRAFIE

- CBS. (2019, februari 28). *Grond-, weg- en waterbouw (GWW)*. Opgehaald van <https://statline.cbs.nl/Statweb/publication/>
- CUR. (2012). *CUR Damwandconstructies deel 2 (6e ed.)*. Gouda: CUR.
- de Gijt, J. (2004, november). *Structures in hydraulic engineering: Port Infrastructure*. Opgehaald van <https://repository.tudelft.nl>
- De Gijt, J. G. (2013). *Quay Walls, Second Edition (2e ed.)*. Leiden, Nederland: Taylor & Francis.
- Gemeente Rotterdam. (2018, februari 15). Opgehaald van Maasvlakte 2: Toelichting (2018): <https://www.planviewer.nl/>
- Havenbedrijf Rotterdam. (2003). *HydroMeteo informatiebundel nr.3*.
- Maps, G. (2019, Februari). *Google Maps*. Opgehaald van Google Maps.
- NEN1990. (2011). *NEN1990 + NB:2011: Grondslagen voor het constructief ontwerp*.
- NEN1992-1. (2011). *NEN-EN 1992-1-1+C2 2011/NB(NL) Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies - Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen*.
- NEN9997-1. (2016). *NEN9997-1, Eurocode 7: Geotechnisch ontwerp van constructies - deel 1: Algemene regels, hoofdstuk 6.5 (Funderingen op staal);*.
- Rijkswaterstaat. (2019, april 4). *Oude Maas*. Opgehaald van [www.rijkswaterstaat.nl/water/vaarwegenoverzicht/oude-maas/index.aspx](http://www.rijkswaterstaat.nl/water/vaarwegenoverzicht/oude-maas/index.aspx)
- Schulte, E. (2019, April 15). Kostenraming. (J. Treure, & T. Kastermans, Interviewers)
- SDGoals, N. (2019, april 10). *De 17 doelen*. Opgehaald van [www.sdgnerland.nl/sdgs-2/](http://www.sdgnerland.nl/sdgs-2/)
- Treure, J., & Kastermans, T. (2019). *Eigen afbeelding gemaakt met MS Powerpoint, MS Excel, SCIA Engineer v18, PLAXIS 2D*. Deventer.
- Voorendt, M. Z. (2016, Februari). *Lecture notes on CAISSONS*. Opgehaald van [tudelft repository: www.tudelft.nl](http://tudelft.nl)



