
UNIVERSITEIT TWENTE.

Faculteit Engineering Technology
Civiele Techniek

Ontwerp van een drijvende telescopische havendam

N.A. Geerdink
Bachelor eindopdracht
2018

Begeleiders:
Ir. M. Pezij, Universiteit Twente
Ing. A.F. Hofmeijer, Witteveen + Bos

Voorwoord

Dit rapport is geschreven in het kader van een afstudeeronderzoek aan de Universiteit Twente. Het rapport laat een onderzoek zien naar het ontwerp van een drijvende telescopische havendam.

Hierbij dank ik iedereen die geholpen heeft aan het tot stand komen van dit rapport met in het bijzonder mijn begeleider vanuit de Universiteit van Twente, ir. Michiel Pezij, en mijn begeleider vanuit Witteveen + Bos, ing. Arno Hofmeijer.

Nikos Geerdink

Hengelo, juli 2018

Samenvatting

Dit rapport doet onderzoek naar een oplossing voor het beperkte zicht dat vaarverkeer ondervindt door havendammen die hoog uitstijgen boven de waterstand. Hiervoor is een ontwerp gemaakt dat het bovenste gedeelte van de bestaande havendam vervangt. Dit ontwerp is een telescopisch element dat meebeweegt met de waterstand door middel van zijn drijfvermogen. Daarmee bevindt het element zich altijd op vaste hoogte boven de waterstand waardoor vaarverkeer over het ontwerp heen kan kijken.

Het ontwerpproces is begonnen met het opstellen van het programma van eisen. Hierin zijn eisen, wensen en randvoorwaarden meegenomen afkomstig van stakeholders en de ontwerpnota van de betreffende haven. Daarna is met behulp van een multi-criteria analyse een afweging gemaakt voor de materiaalkeuze en de bevestiging van het ontwerp aan de bestaande havendam. Op basis van deze ontwerpkeuzes en het programma van eisen is een functioneel ontwerp opgesteld. Van het functioneel ontwerp is vervolgens bepaald of deze voldoet aan technische aspecten. Concreet is berekend met welke afmetingen dit ontwerp bestand is tegen alle krachten die erop komen te werken en of het drijfvermogen te allen tijde voldoende is. Door middel van een iteratief proces zijn de minimale afmetingen tot stand gekomen waarbij het ontwerp voldoet aan de technische aspecten. Hieruit volgt het definitief ontwerp. Daarnaast is bepaald hoe meerdere ontwerpen kunnen worden geïnstalleerd in praktijk.

Uit de resultaten blijkt dat het definitief ontwerp het zicht van vaarverkeer aanzienlijk verbetert. Vaarverkeer met een laag zichtpunt ondervindt in de oude situatie slecht zicht bij de mediane waterstand, terwijl zij in de nieuwe situatie bij deze waterstand, en zelfs 0,75 meter daaronder, volledig zicht hebben. Het zicht wordt nog enigszins belemmerd door tussenschotten die geplaatst zijn tussen een reeks ontwerpen. Toch blijft het zicht goed genoeg om te zien wat er aan de andere zijde van de havendam vaart.

Omdat het ontwerp alleen bestaat uit rechte wanden en is gemaakt van staal is deze goed maakbaar en relatief goedkoop. Dit zijn grote voordelen van het ontwerp. Bovendien wordt de bestaande damwand goed benut en is het ontwerp eenvoudig te installeren. Wel heeft het ontwerp door het gebruik van staal een erg grote omvang. In deze situatie heeft dat geen nadelige gevolgen omdat aan de technische aspecten wordt voldaan, en de doorstroming van de rivier en vaarverkeer niet worden gehinderd. Echter, wanneer dit ontwerp zou worden gebruikt in andere havens kan deze breedte hinderlijk zijn. Daarmee is het ontwerp enkel onder voorbehoud toepasbaar in andere situaties.

Al met al is dit ontwerp van de drijvende telescopische havendam een relatief goedkope en goed maakbare oplossing voor het beperkte zicht dat vaarverkeer ondervindt. Een keerzijde is de omvang van het ontwerp. Dit is nadelig is voor de toepasbaarheid maar heeft in deze situatie geen nadelige gevolgen.

Inhoudsopgave

1. Inleiding	1
1.1. Aanleiding en probleemstelling	1
1.2. Doelstelling	1
1.3. Situatie	2
1.4. Inkadering	3
1.5. Literatuuronderzoek	3
2. Methodologie	5
2.1. Onderzoeksvragen	5
2.2. Methode onderzoeksvraag I	5
2.3. Methode onderzoeksvraag II	5
2.4. Methode onderzoeksvraag III	6
2.5. Ontwerpproces	6
3. Eisen, wensen en randvoorwaarden	8
3.1. Eisen en wensen van stakeholders	8
3.1.1. Rijkswaterstaat	8
3.1.2. Beroepsvaart en recreatievaart	8
3.2. Praktische toepassing	8
3.3. Randvoorwaarden	9
3.4. Programma van eisen	10
4. Functioneel ontwerp drijvende telescopische havendam	11
4.1. Materiaal drijvende telescopische havendam	11
4.1.1. Staal	11
4.1.2. Composieten	11
4.1.3. Criteria voor materialen	11
4.1.4. Multi-criteria analyse voor materialen	13
4.2. Bevestiging drijvende telescopische havendam	13
4.2.1. Variant 1	14
4.2.2. Variant 2	15
4.2.3. Criteria voor bevestiging	17
4.2.4. Multi-criteria analyse voor bevestiging	18
4.3. Functioneel ontwerp	18
5. Technische aspecten	20
5.1. Krachtenberekening	20
5.1.1. Lange zijde	20
5.1.2. Bovenzijde	20
5.1.3. Korte zijde	20
5.2. Drijfvermogen drijvende telescopische havendam	20
6. Resultaten	22
6.1. Definitief ontwerp	22
6.2. Controle definitief ontwerp	22
6.3. Vergelijking situaties	23
7. Conclusie	24
8. Discussie	25
Referenties	26
Bijlage A, Programma van eisen	27

Bijlage B, Functioneel ontwerp.....	30
Bijlage C, Krachtenberekening	32
C.1. Krachten op lange zijde.....	32
C.2. Krachten bovenzijde.....	36
Bijlage D, Berekening drijfvermogen	38
D.1. Opwaartse kracht.....	38
D.2. Wrijving	39
Bijlage E, Definitief ontwerp	41

Lijst van figuren

Figuur 1, Overzicht overnachtingshaven.	2
Figuur 2, Eigenschappen AZ26-damwandprofiel (Arcelor RPS, 2004).	3
Figuur 3, Automatische drijvende waterkering in Spakenburg (Aggeres, 2017).	3
Figuur 4, Element dat meebeweegt met de waterstand (Floodcontrol International, 2018)..	4
Figuur 5, Flowchart van het ontwerpproces, beginnend bij het Programma van eisen.....	7
Figuur 6, Waterstanden schematisch weergegeven.....	10
Figuur 7, Het zijaanzicht van Variant 1.	14
Figuur 8, Het bovenaanzicht van Variant 1.....	15
Figuur 9, Het zijaanzicht van Variant 2.	16
Figuur 10, Het bovenaanzicht van Variant 2.....	16
Figuur 11, Zijaanzicht oude situatie vanaf havenzijde.	23
Figuur 12, Zijaanzicht nieuwe situatie vanaf havenzijde inclusief tussenschotten met bakens.	23
Figuur B 1, Zijaanzicht functioneel ontwerp, afmetingen nog onbekend.....	30
Figuur B 2, Bovenaanzicht verbinding functioneel ontwerp, afmetingen nog onbekend.	31
Figuur C 1, Zijaanzicht functioneel ontwerp met maatgevende kracht van 80 kN/m.	32
Figuur C 2, Model in XFrame2d met staafaanduidingen.	33
Figuur C 3, Model in XFrame2d met maatgevende kracht.	33
Figuur C 4, Model in XFrame2d met vervormingen.....	34
Figuur C 5, Model in XFrame2d met momentenlijnen.	34
Figuur C 6, Model in XFrame2d met maatgevende kracht.	36
Figuur C 7, Model in XFrame2d met momentenlijnen.	37
Figuur E 1, Zijaanzicht definitief ontwerp in zijn laagste stand.	41
Figuur E 2, Zijaanzicht definitief ontwerp in zijn hoogste stand.....	42
Figuur E 3, Bovenaanzicht verbinding definitief ontwerp met bestaande havendam.	43
Figuur E 4, Bovenaanzicht definitief ontwerp met tussenschotten voor bakens.	43
Figuur E 5, Zijaanzicht definitief ontwerp in zijn laagste stand met tussenschotten voor bakens.	44
Figuur E 6, Zijaanzicht definitief ontwerp in zijn hoogste stand met tussenschotten voor bakens.	44

Lijst van tabellen

Tabel 1, Toegepaste waterstanden en toelichting	9
Tabel 2, Waarden per criterium voor elk materiaal.	13
Tabel 3, Gestandaardiseerde waarden per criterium voor elk materiaal en score.	13
Tabel 4, Waarden per criterium voor beide varianten.	18
Tabel 5, Gestandaardiseerde waarden per criterium voor beide varianten en score.....	18
Tabel 6, Materialen per onderdeel functioneel ontwerp.	19
Tabel 7, Controle van eisengroepen voor definitief ontwerp.	22

Tabel A 1, Programma van eisen.	27
--------------------------------------	----

1. Inleiding

1.1. Aanleiding en probleemstelling

Nederland heeft een goed ontwikkeld vaarwegennet. Meer dan de helft van de internationaal vervoerde vracht in het Europese achterland vindt plaats met binnenvaartschepen. Daarnaast neemt de hoeveelheid vervoerde vracht over water toe ten opzichte van het verleden en worden de schepen groter. Het is daarom van belang de scheepvaart in goede banen te leiden.

Om vlot en veilig scheepvaartverkeer op de Nederlandse rivieren te waarborgen, stelt de Binnenvaartwet eisen aan vaar- en rusttijden. De Binnenvaartwet verplicht beroepsschippers om elk etmaal een aaneengesloten rustperiode te nemen van vijf tot acht uren (Overheid, 2015). Dat kan alleen als er een veilige en rustige ligplaats beschikbaar is. Zonder vrije rustplaatsen zijn schippers genoodzaakt langer door te varen of op de rivier voor anker te gaan, hetgeen kan leiden tot gevaarlijke situaties.

Daarom is de doelstelling opgenomen dat er voldoende ligplaatsen gerealiseerd moeten worden voor een betrouwbare en veilige vaarweg (Rijksoverheid, 2012). De richtlijn hiervoor schrijft voor dat er langs de Nederlandse vaarwegen circa elke 30 rivierkilometers (gelijk aan ongeveer twee uur varen) een mogelijkheid moet zijn voor schippers om buiten de vaargeul te overnachten. Aangezien veel vaarwegen in Nederland hier niet aan voldoen, worden er door Rijkswaterstaat momenteel overnachtingshavens aangelegd.

De overnachtingshavens zijn vaak gesitueerd langs grote rivieren die zich kenmerken door grote seizoensgebonden fluctuaties in afvoerdebiet en daarmee sterk wisselende waterstanden. Het realiseren van een haven met invaaropening verstoort de hydraulische en morfologische processen in de vaarweg, omdat door de verbreding van de rivier de snelheid van de stroming wordt afgeremd. Hierdoor kan sterke aanzanding in de vaargeul ontstaan waardoor een grote baggerbelasting ontstaat. Dit leidt tot regelmatige stremming van de vaarweg door onderhoudswerkzaamheden. Bovendien leidt het baggeren tot hoge kosten.

Om de hydraulische en morfologische processen zo min mogelijk te verstoren wordt de invaaropening van havens begrensd door havendammen die de stroming zo geleiden dat er geen of weinig aanzanding plaatsvindt. In het ontwerp wordt uitgegaan van een harde rechte wand uitgevoerd als een stalen damwand.

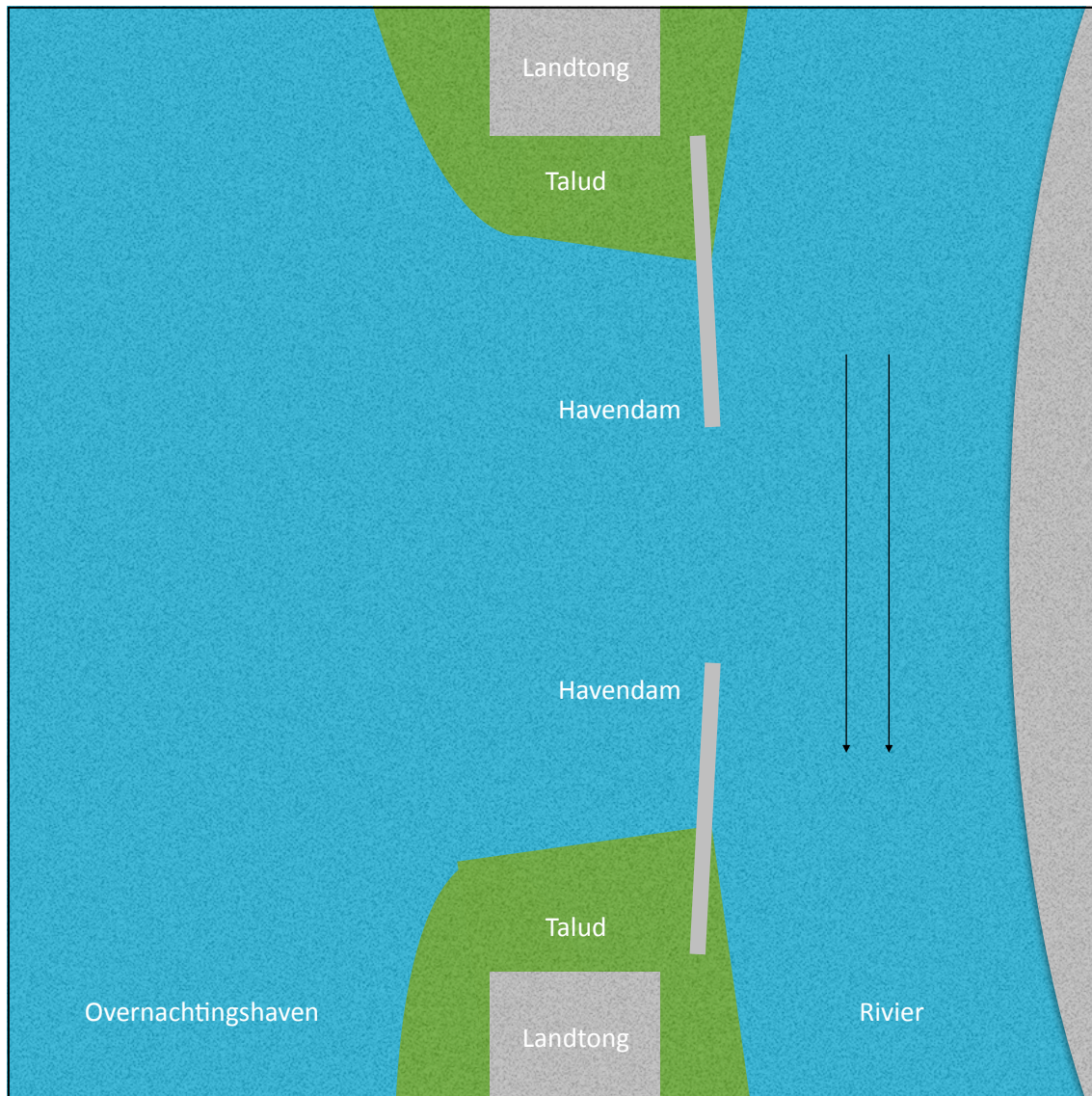
Voor een goede werking dient de damwand minimaal dezelfde hoogte te hebben als de kribben in de vaarweg. Bij lage waterstanden kunnen deze damwanden tot 5 meter boven het water uitsteken. Dit betekent dat het zicht van de beroepsschipper en met name het zicht van de recreatieschippers met kleinere en kwetsbaardere vaartuigen sterk wordt beperkt door de damwanden. Dit kan leiden tot gevaarlijke situaties wanneer beroeps- en recreatievaart elkaar ontmoeten in de invaaropening. Dit gevaar wordt groter als de haven is gesitueerd in een recreatiegebied aangezien hier meer recreatievaart aanwezig is.

1.2. Doelstelling

Het doel van dit onderzoek is het ontwerpen van een oplossing voor het beperkte zicht van vaarverkeer. Concreet wordt gedacht aan het vervangen van het bovenste deel van de dammen door een telescopisch element dat meebeweegt met de waterstand door middel van zijn drijfvermogen. Zo bevindt de dam zich altijd op vaste hoogte boven de waterstand waardoor vaarverkeer altijd zicht heeft op de vaarweg.

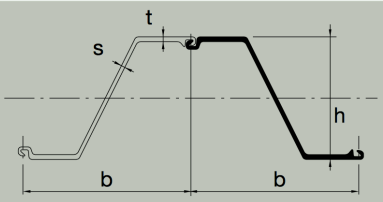
1.3. Situatie

Eén van de overnachtingshavens die Rijkswaterstaat momenteel aanlegt wordt in dit onderzoek beschouwd. Deze is schematisch weergegeven in Figuur 1. Bij deze overnachtingshaven is de invaaropening van de haven begrensd door havendammen die de stroming van de aanliggende rivier geleiden. Bij lage waterstanden beperken deze havendammen het zicht van het vaarverkeer rondom de invaaropening. In deze studie wordt uitgegaan van de afmetingen en andere data afkomstig van dit project. Echter blijft de locatie van deze overnachtingshaven anoniem aangezien het onderzoek naar het concept van drijvende waterkeringen nog loopt en het dus ook nog niet van toepassing is op de betreffende overnachtingshaven.



Figuur 1, Overzicht overnachtingshaven.

De bestaande havendammen zijn uitgevoerd als een rechte stalen damwand met een AZ26-damwandprofiel (Figuur 2) met staalkwaliteit S3206P. Het bovenste deel van deze havendammen wordt ingekort en vervangen door een telescopisch element dat meebeweegt met de waterstand door middel van zijn drijfvermogen. Het gedeelte van de havendam dat zich bevindt in het talud wordt niet in beschouwing genomen aangezien de drijvende telescopische havendam niet kan schuiven over het talud en zo in zijn ruimte wordt beperkt.



Profieltype	Breedte Hoogte		Dikte		Staaldoorsnede	Massa		Traagheidsmoment	Elastisch weerstandsmoment	Statisch moment	Plastisch weerstandsmoment	Klasse*				
	b	h	t	s	cm ² /m	kg/m enkele plank	kg/m ² wand	cm ⁴ /m	cm ³ /m	cm ³ /m	cm ³ /m	S 240	S 270	S 320	S 355	S 430
	mm	mm	mm	mm												
AZ 26	630	427	13,0	12,2	198	97,8	155	55510	2600	1530	3059	2	2	2	2	2

Figuur 2, Eigenschappen AZ26-damwandprofiel (Arcelor RPS, 2004).

1.4. Inkadering

Volgens de NEN-EN 1990 moet het ontwerp worden berekend volgens gevolgklasse CC1 omdat het bezwijken van de constructie geringe gevolgen heeft ten aanzien van het verlies van mensenlevens en kleine of verwaarloosbare economische of sociale gevolgen heeft voor de omgeving. Voor deze gevolgklasse hoeven volgens NEN-EN 1990 geen buitengewone belastingen te worden beschouwd. Daarom wordt het ontwerp niet berekend op buitengewone belastingen zoals aanvaring.

Naast de havendammen zelf zijn er meerdere aspecten die bij de realisatie van de overnachtingshaven in beschouwing moeten worden genomen. Echter, dit onderzoek beperkt zich tot alleen de havendammen zelf en aspecten die hier invloed op hebben zoals bijvoorbeeld waterstanden en scheepvaart.

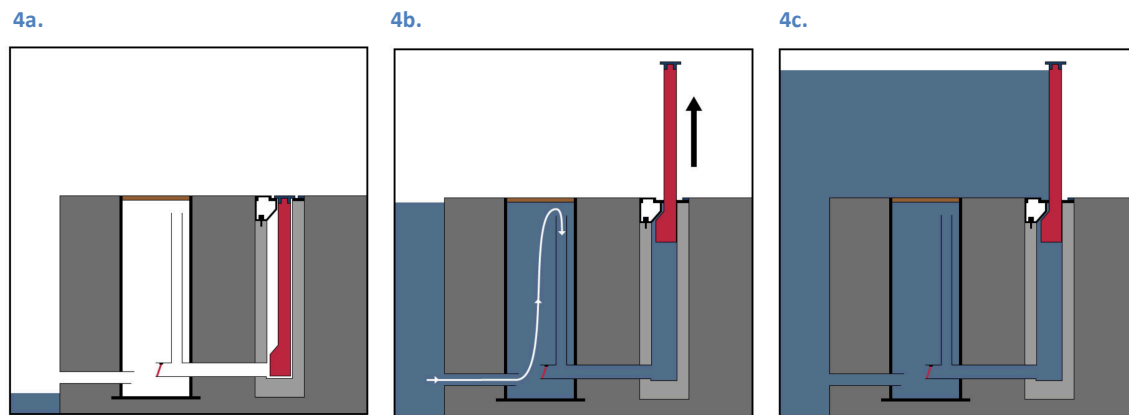
1.5. Literatuuronderzoek

Een voorbeeld van een innovatieve oplossing voor het beschreven probleem is een element dat meebeweegt met de waterstand. Dit zorgt ervoor dat de dam alleen omhoog beweegt wanneer dat nodig is. Dit concept is al eerder gebruikt in een onderzoek naar een automatisch drijvende waterkering voor de stad Kampen (Kamphuis, 1999) en de automatisch drijvende waterkering in Spakenburg (Schelfhout et al., 2016). Deze tweede is zichtbaar in Figuur 3 als een uit de grond gekomen stalen wand.



Figuur 3, Automatische drijvende waterkering in Spakenburg (Aggeres, 2017).

Het concept van beide voorbeelden is hetzelfde en wordt beschreven aan de hand van Figuur 4. In de reeks afbeeldingen zijn twee ruimtes te zien die kunnen worden gevuld met water, waarvan er in één een automatisch drijvende waterkering is geplaatst. Figuur 4a. toont de situatie tijdens lage rivierwaterstanden, wanneer er geen water aanwezig is in de ruimtes. Figuur 4b. toont de situatie wanneer de waterstand is gestegen en het water, nadat de eerste ruimte is volgestroomd, via een buis in de tweede ruimte is gestroomd waarin de automatisch drijvende waterkering zich bevindt. Als gevolg van het drijfvermogen van de waterkering heeft deze een opwaartse beweging gemaakt. In Figuur 4c. is de waterstand boven de kritieke niveaus gestegen. Hier voorkomt de automatisch drijvende waterkering dat het achterliggende gebied overstroomt. Dit concept is een effectieve oplossing voor waterpreventie, terwijl de dam zelf niet zichtbaar is in reguliere situaties. Wanneer de waterstand weer daalt stroomt ook het water in de twee ruimtes weg waardoor de automatisch drijvende waterkering terugkeert in zijn originele positie zoals in Figuur 4a.



Figuur 4, Element dat meebeweegt met de waterstand (Floodcontrol International, 2018).

Dit concept wordt ook voor dit onderzoek gebruikt om het beperkte zicht van vaarverkeer te verbeteren. Echter is de functie van dit concept binnen dit onderzoek niet hetzelfde omdat het niet een waterkering betreft maar een havendam. Een waterkering dient water tegen te houden waarbij er alleen water aanwezig is aan één zijde van de wand wat met name resulteert in krachten loodrecht op de wand. Een havendam dient de stroming van de aanliggende rivier te geleiden waarbij er water aanwezig is aan beide zijden van de wand (zie Figuur 1) wat met name resulteert in krachten evenwijdig aan de wand. Ondanks dit verschil in functie zou dit concept gebruikt kunnen worden voor dit onderzoek. Wel vereist dit concept een ruimte waarin het water kan stijgen. Daarmee is deze methode niet geschikt voor havendammen die al geplaatst zijn omdat de dammen dan in hun geheel vervangen moeten worden, en dit onderzoek is gebaseerd op bestaande havendammen. Daarom is het noodzakelijk om een drijvend telescopisch element te ontwikkelen dat aan bestaande dammen bevestigd kan worden, waardoor de bestaande dammen niet vervangen hoeven te worden.

2. Methodologie

Dit hoofdstuk beschrijft de methodologie door eerst onderzoeksvragen op te stellen (2.1). Voor elke onderzoeksvraag wordt vervolgens een methode beschreven (2.2 t/m 2.4). Uiteindelijk geeft een flowchart overzichtelijk weer hoe de onderzoeksvragen in verband staan met elkaar (2.5).

2.1. Onderzoeksvragen

De hoofdonderzoeksvraag is:

Is het mogelijk een drijvende telescopische havendam te ontwerpen die meebeweegt met de waterstand van rivieren om scheepvaart veiliger te maken?

Deze hoofdonderzoeksvraag is opgedeeld in de volgende sub-onderzoeksvragen:

- I. *Aan welke eisen, wensen en randvoorwaarden moet het ontwerp van de drijvende telescopische havendam voldoen?*
- II. *Welke materialen zijn en welke bevestiging is het meest geschikt voor het functioneel ontwerp van de drijvende telescopische havendam?*
 - i. *Welk materiaal is het meest geschikt voor de drijvende telescopische havendam?*
 - ii. *Hoe wordt de drijvende telescopische havendam bevestigd aan de bestaande havendam?*
- III. *Voldoet het functioneel ontwerp van de drijvende telescopische havendam met betrekking tot de technische aspecten?*
 - i. *Is het ontwerp bestand tegen alle krachten die erop komen te werken, zelfs in de meest extreme omstandigheden?*
 - ii. *Is het drijfvermogen te allen tijde voldoende?*

2.2. Methode onderzoeksvraag I

Om te beantwoorden aan welke eisen, wensen en randvoorwaarden het ontwerp van de drijvende telescopische havendam moet voldoen (onderzoeksvraag I.) worden de eisen en wensen van stakeholders geïnterviewd. Deze zijn allen afkomstig vanuit een interview met Rijkswaterstaat. Daarnaast wordt bekeken welke aspecten van belang zijn bij de praktische toepassing van de drijvende telescopische havendam en aan welke randvoorwaarden het ontwerp moet voldoen. Alle eisen, wensen en randvoorwaarden komen voort uit het Bouwbesluit en het project waar Witteveen + Bos momenteel aan werkt. Deze zijn allen in een programma van eisen opgesteld. Het programma van eisen is de basis voor het ontwerp.

2.3. Methode onderzoeksvraag II

Om te beantwoorden hoe de drijvende telescopische havendam wordt bevestigd aan de bestaande havendam (onderzoeksvraag II.) wordt eerst bekeken welk materiaal het meest geschikt is voor het ontwerp (onderzoeksvraag II.i.). Op basis van een multi-criteria analyse wordt deze bepaald. Criteria die invloed hebben zijn de materiaaleigenschappen wrijvingsweerstand, duurzaamheid, stijfheid, dichtheid, materiaalkosten en maakbaarheid. Deze zijn opgesteld middels het programma van eisen. De criteria worden beoordeeld met waarden of met een beoordeling met + en - welke beide op basis van bronnen worden beargumenteerd. Deze tweede beoordeling is als volgt gerangschikt:

- (-) = Slecht
- (0) = Gemiddeld
- (+) = Goed

Om een eerlijke afweging te maken worden de waarden en de beoordeling met + en - gestandaardiseerd tot waarden waarmee gerekend kan worden. Voor de waarden wordt dit gedaan door middel van intervalstandaardisatie; eerst wordt, wanneer er sprake is van meerdere waarden, het gemiddelde van deze waarden genomen. Daarna wordt de hoogste en laagste waarde per criterium respectievelijk met 1 en 0 beoordeeld en worden de tussenliggende waarden als percentage van het interval genomen. Voor de beoordeling met + en - krijgt de laagste beoordeling (-) een waarde van 0, de middelste beoordeling (0) een waarde van 0,5 en de hoogste beoordeling (+) een waarde van 1. Naast de standaardisering wordt er per criterium een weging toegevoegd die aangeeft hoe belangrijk elk criterium is. Hierbij geeft de waarde 1 het minste belang aan en 3 het meeste belang aan. Deze waarden zijn geschat op basis van het belang van de eisen in het programma van eisen.

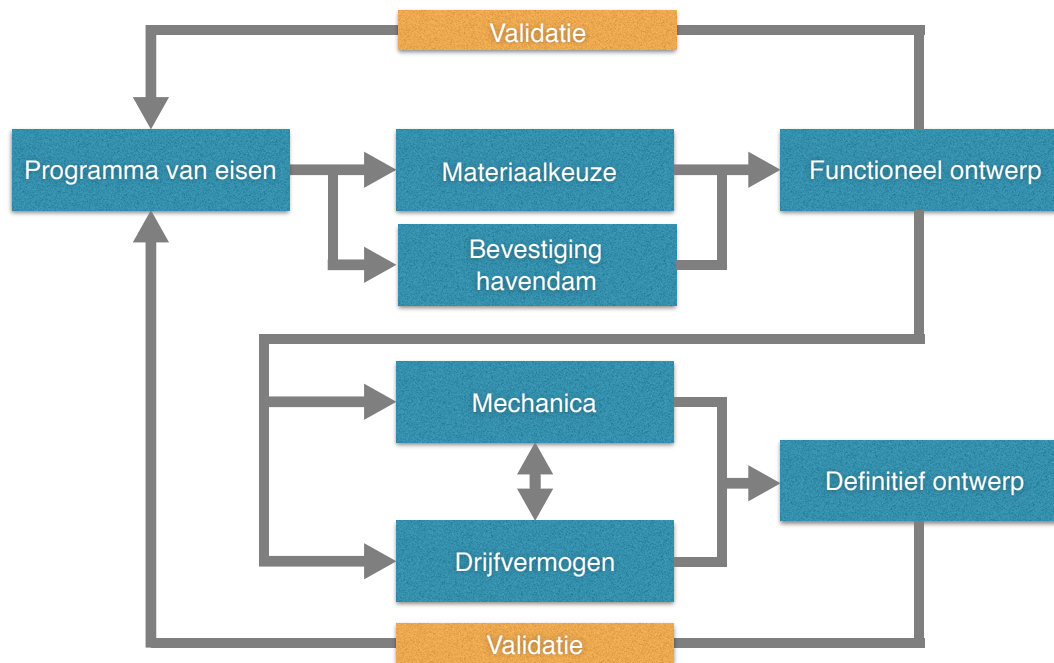
Om te bepalen hoe de drijvende telescopische havendam wordt bevestigd aan de bestaande havendam (onderzoeksvraag II.ii.) worden varianten opgesteld en wordt wederom met een multi-criteria analyse bepaald wat de meest geschikte variant is voor de drijvende telescopische havendam. Criteria die invloed hebben zijn de kosten voor het materiaal en de plaatsing, het schuifvermogen, de benutting van de bestaande damwand, de hinder en de maakbaarheid van de connectie. De criteria en de wegingsfactoren worden net zo beoordeeld als in de eerste multi-criteria analyse.

2.4. Methode onderzoeksvraag III

Om te beantwoorden of het ontwerp voldoet met betrekking tot de technische aspecten (onderzoeksvraag III.) wordt het functioneel ontwerp beoordeeld. Eerst wordt onderzocht of dit ontwerp bestand is tegen alle krachten die erop komen te werken, zelfs in de meest extreme omstandigheden (onderzoeksvraag III.i.). Dit wordt onderzocht door de krachten op de havendam te berekenen en te bekijken of de constructie sterk genoeg is om de krachten in de meest extreme omstandigheden te weerstaan. Hiervoor wordt onder andere de software XFrame2d gebruikt. Daarna wordt onderzocht of het drijfvermogen te allen tijde voldoende is (onderzoeksvraag III.ii.). Dit houdt in dat de havendam niet blijft klemmen en dus altijd op een vaste hoogte boven de waterstand uitstijgt. Dit wordt onderzocht door de krachten op de havendam te gebruiken en te bekijken of de schuifweerstand die hierdoor ontstaat niet groter is dan de opwaartse kracht die uit het drijfvermogen wordt gehaald. Met een iteratief proces worden de minimale afmetingen van het ontwerp bepaald waarbij deze voldoet aan de technische aspecten. Dit is het definitief ontwerp.

2.5. Ontwerpproces

Om het ontwerpproces te verduidelijken is in Figuur 5 een flowchart te zien die de relaties toont tussen de onderzoeksvragen. Eerst wordt het programma van eisen opgesteld. Op basis hiervan worden de materiaalkeuze en de bevestiging aan de bestaande havendam bepaald, waarmee het functioneel ontwerp wordt opgesteld. Deze wordt opnieuw gevalideerd met zowel het programma van eisen als voorgaande twee stappen totdat dit ontwerp voldoende is om te beoordelen op de technische aspecten. Daarna wordt dit ontwerp getest op mechanica en op zijn drijfvermogen. Zo is berekend met welke afmetingen dit ontwerp bestand is tegen alle krachten die erop komen te werken en of het drijfvermogen te allen tijde voldoende is. Door middel van een iteratief proces zijn de minimale afmetingen tot stand gekomen waarbij het ontwerp voldoet aan de technische aspecten, dit is het definitief ontwerp. Ook deze wordt opnieuw gevalideerd met het programma van eisen totdat het definitief ontwerp voldoet aan alle eisen.



Figuur 5, Flowchart van het ontwerpproces, beginnend bij het Programma van eisen.

3. Eisen, wensen en randvoorwaarden

Dit hoofdstuk geeft antwoord op onderzoeksvraag I. ('Aan welke eisen, wensen en randvoorwaarden moet het ontwerp van de drijvende telescopische havendam voldoen?'). Om deze vraag te beantwoorden worden eerst de eisen en wensen van stakeholders bepaald (3.1). Daarna wordt de praktische toepassing behandeld (3.2) en worden de randvoorwaarden opgesteld (3.3). Uiteindelijk vat het programma van eisen alles samen (3.4).

Enkele eisen en randvoorwaarden voor het ontwerp van de drijvende telescopische havendam komen voort uit de ontwerpnota van de bestaande havendammen waar Witteveen + Bos momenteel aan werkt. Hoewel dit document zelf anoniem moet blijven wordt er wel naar verwezen.

3.1. Eisen en wensen van stakeholders

3.1.1. Rijkswaterstaat

Rijkswaterstaat is een belangrijke stakeholder gezien zij initiatiefnemer, eigenaar en beheerder zijn van de overnachtingshaven die momenteel wordt aangelegd. Daarom hebben zij eisen en wensen met betrekking tot het ontwerp en de realisatie. Aangezien binnen dit onderzoek de focus ligt op het ontwerp worden alleen de eisen en wensen met betrekking tot het ontwerp behandeld. Eisen met betrekking tot de realisatie worden buiten beschouwing gelaten. Voorbeelden hiervan zijn veiligheidseisen en eisen met betrekking tot de duur van de realisatie. De eisen en wensen zijn geïnventariseerd door middel van een persoonlijk afgenomen interview met Rijkswaterstaat. Al deze eisen en wensen vanuit Rijkswaterstaat zijn gepresenteerd in het programma van eisen onder de bron 'Rijkswaterstaat'.

Zo moet het ontwerp in zijn breedte beperkt blijven en moet het ontwerp worden uitgevoerd in meerdere segmenten zodat in geval van aanvaring slechts één segment vervangen hoeft te worden. Rijkswaterstaat heeft geen specifieke ontwerpeisen of beleidsrichtlijnen ten aanzien van bewegende constructies, wel moet de bewegende constructie van het ontwerp betrouwbaar en veilig zijn. Het ontwerp van de drijvende telescopische havendam, dat wordt geplaatst bovenop het ingekorte deel van deze bestaande havendam, mag de hoogte van de bestaande havendam niet overstijgen. Ook mag het ontwerp niet minder dan 0,60 m en niet meer dan 0,75 m boven de waterstand uitstijgen omdat tussen deze waarden de golven niet overslaan en het zicht voor vaarverkeer bevorderd wordt. Verder dient het ontwerp van de drijvende telescopische havendam minimaal 0,50 m boven de rivierbodem te zijn gesitueerd omdat bij aanslibben van de bodem ruimte moet overblijven voor het ontwerp om in zijn laagste stand te komen.

3.1.2. Beroepsvaart en recreatievaart

Andere stakeholders zijn respectievelijk de beroeps- en recreatievaart. Zij ervaren problemen met het zicht tijdens het in- en uitvaren van de haven. De enige eis die zij hebben is dat het zicht van vaarverkeer wordt bevorderd. Deze eis is afgeleid uit klachten bij Rijkswaterstaat en is ter sprake gekomen tijdens het interview met Rijkswaterstaat. Ook deze eis is verwerkt in het programma van eisen.

3.2. Praktische toepassing

Voor de praktische toepassing van de drijvende telescopische havendam zijn er een aantal aspecten van belang binnen dit onderzoek. Deze aspecten worden hier behandeld en verwerkt in het programma van eisen. Zo moet de functie van de aanwezige bakens bij de bestaande havendam in stand worden gehouden en dient het systeem de bestaande infrastructuur niet te hinderen. De aanwezige bakens omvatten de havenlichten en radarreflectoren. De functie van deze bakens moet in stand worden gehouden door ze op de juiste manier te installeren. De bestaande infrastructuur wordt niet gehinderd door middel van het enigszins beperken van de afmetingen van de drijvende telescopische havendam.

3.3. Randvoorwaarden

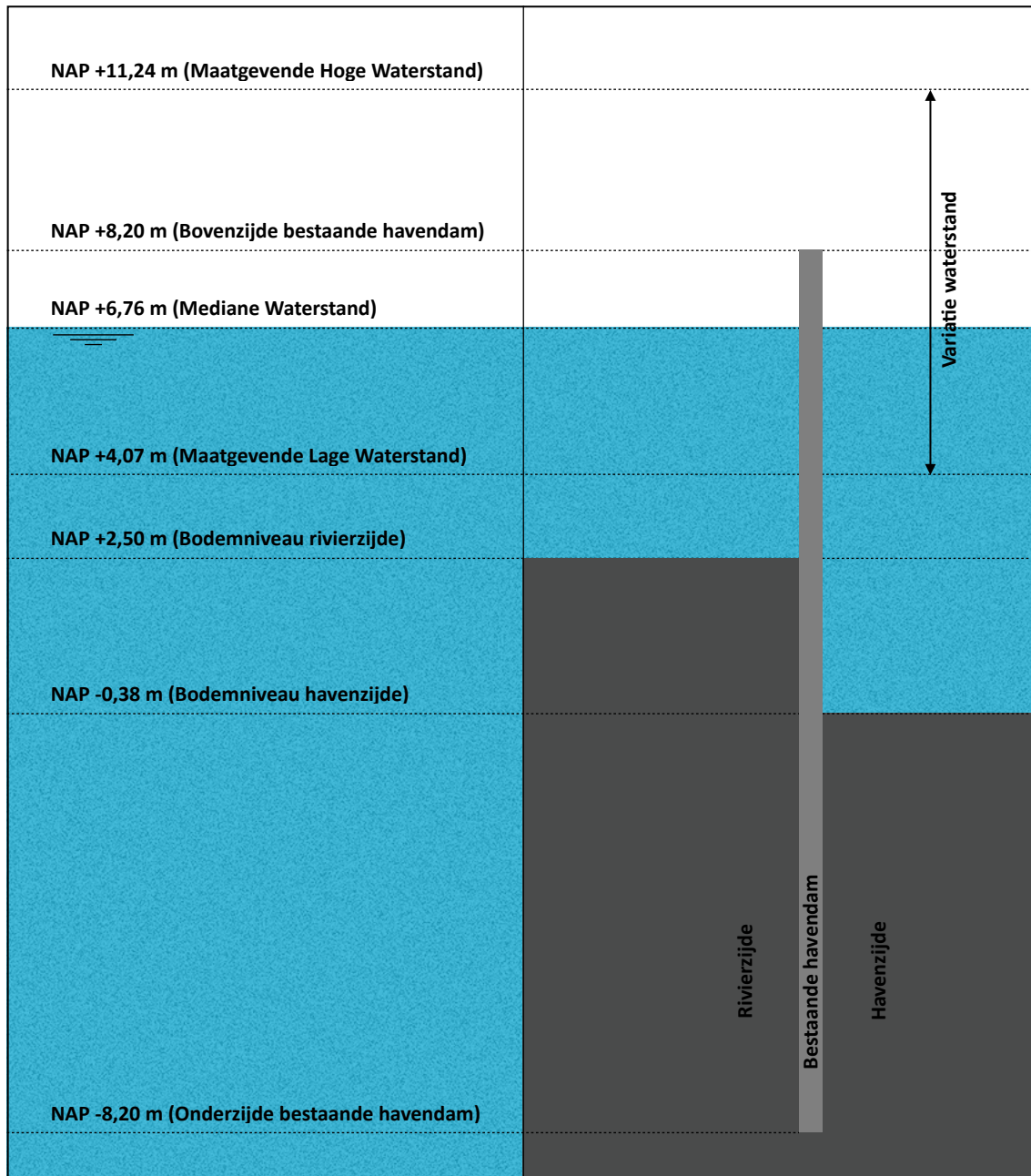
Onder de randvoorwaarden vallen de toegepaste waterstanden van de haven waarvoor het ontwerp wordt opgesteld. In Tabel 1 zijn de toegepaste waterstanden voor het ontwerp weergegeven. In Figuur 6 zijn deze waterstanden schematisch weergegeven.

Tabel 1, Toegepaste waterstanden en toelichting.

Definitie	Waterstand	Toelichting
Maatgevende Hoge Waterstand	NAP +11,24 m	Eén etmaal per 10 jaar overschrijding
Maatgevende Lage Waterstand	NAP +4,07 m	20 dagen per jaar onderschrijding
Mediane Waterstand	NAP +6,76 m	50% over- en onderschrijding

De definitie van de Maatgevende Hoge Waterstand is vastgelegd in de Richtlijnen Vaarwegen 2011 (Rijkswaterstaat, 2011). Dit komt overeen met de waterstand rondom de havendam die eenmaal gedurende een aaneengesloten periode van 24 uur overschreden wordt per 10 jaar en is op de betreffende locatie NAP +11,24 meter.

Voor de betreffende locatie is het conform de Richtlijnen Vaarwegen 2011 gebruikelijk om voor de Maatgevende Lage Waterstand de waterdiepte ten opzichte van de Overeengekomen Lage Rivierafvoer aan te houden. Dit is een afvoer die 20 ijsvrije dagen per jaar onderschreden wordt en circa 5% van de tijd voor komt. Volgens de Overeengekomen Lage Rivierafvoer in 2012 resulteert dit in een Maatgevende Lage Waterstand van NAP +5,23 meter. Echter laat de huidige trend van lage rivierafvoeren een waterstands daling zien van circa 0,02 meter per jaar. Dit wordt voor 90% door bodemdaling veroorzaakt en voor 10% door verminderde afvoer veroorzaakt. Volgens de Overeengekomen Lage Rivierafvoer resulteert dit in 2070 in een Maatgevende Lage Waterstand van NAP +4,07 meter, uitgaande van een ontwerp levensduur van circa 50 jaar. Deze waterstand is van toepassing op het ontwerp. De Mediane Waterstand is de waterstand die in 50% van de tijd wordt overschreden of onderschreden. Voor het ontwerp wordt uitgegaan van een Mediane Waterstand van NAP +6,76 meter (Witteveen + Bos, 2018).



Figuur 6, Waterstanden schematisch weergegeven.

3.4. Programma van eisen

Deze sectie doet een inventarisatie van alle mogelijke eisen met betrekking tot het ontwerp van de drijvende telescopische havendam. Alle eisen en wensen van stakeholders zijn hierin verwerkt. Daarnaast volgen er eisen vanuit de functies van het systeem. Alleen de eisen en wensen die meespelen met betrekking tot het ontwerp van de drijvende telescopische havendam zijn in beschouwing genomen. Het programma van eisen is gepresenteerd in Bijlage A.

4. Functioneel ontwerp drijvende telescopische havendam

Dit hoofdstuk geeft antwoord op onderzoeksvraag II. ('Welke materialen zijn en welke bevestiging is het meest geschikt voor het functioneel ontwerp van de drijvende telescopische havendam?'). Het antwoord uit zich in een functioneel ontwerp van de drijvende telescopische havendam (4.3). Om deze vraag te beantwoorden wordt eerst onderzoeksvraag II.i. ('Welk materiaal is het meest geschikt voor de drijvende telescopische havendam?') beantwoord (4.1) waarna onderzoeksvraag II.ii. ('Hoe wordt de drijvende telescopische havendam bevestigd aan de bestaande havendam?') wordt beantwoord (4.2).

4.1. Materiaal drijvende telescopische havendam

4.1.1. Staal

Een eerste materiaal dat in beschouwing wordt genomen is staal. Aangezien de bestaande damwand is gemaakt van staal zou het voor de hand liggen om de drijvende telescopische damwand ook van staal te maken. Het soort staal dat in beschouwing wordt genomen is staal S355 omdat dit staal veel wordt gebruikt voor constructieplaten (Tosec, 2018). Echter, het verschil is dat de drijvende telescopische damwand een bewegend object is dat moet kunnen drijven, en dat deze wellicht grotere krachten moeten kunnen opvangen. Daarom worden naast staal ook nog andere materialen in beschouwing genomen, dit zijn de composieten glasvezel en koolstofvezel.

4.1.2. Composieten

Een breed scala aan hydraulische constructies zijn gemaakt van composieten. Sinds 1999 zijn deze structuren geïnstalleerd en tot op heden presteren ze goed. Dit impliceert een uitstekende duurzaamheid. Hoewel de toepassingen met glasvezelversterkte kunststoffen voor hydraulische constructies beperkt zijn, zijn de initiële kosten van glasvezelversterkte kunststoffen meestal lager dan die van conventionele constructiematerialen. Natuurlijke vezels die worden gebruikt in composieten zijn meestal afkomstig van plantaardige vezels. Enkele plantaardige vezels die veel worden gebruikt voor composieten zijn de vezels vlas, sisal en kenaf. Hoewel deze relatief goedkoop zijn, zijn deze ongeschikt voor dit ontwerp omdat deze vezels water opnemen en het ontwerp zich grotendeels onder water bevindt (PIANC, 2018). Dit komt niet ten goede van de sterkte van het ontwerp. Twee composieten die veel gebruikt worden in hydraulische constructies zijn glasvezel en koolstofvezel, deze twee worden in de afweging meegenomen.

4.1.3. Criteria voor materialen

In Tabel 2 zijn de drie materialen staal, glasvezel en koolstofvezel naast elkaar gezet met elk een waardering per criterium. Elk criterium wordt vermenigvuldigd met een wegingsfactor. Alle wegingen zijn geschat op basis van het programma van eisen en worden toegelicht. Naast de materiaaleigenschappen die in Tabel 3 zijn meegenomen zijn er ook twee materiaaleigenschappen die wel van belang zijn maar voor alle materialen hetzelfde opleveren. Deze worden eerst toegelicht.

4.1.3.1. Wrijving

De wrijvingscoëfficiënt van het materiaal is van belang omdat de drijvende telescopische havendam langs de bestaande havendam beweegt en hierbij zo min mogelijk wrijving moet plaatsvinden. De drijvende telescopische havendam mag namelijk niet klem komen te zitten omdat er dan functieverlies kan optreden. Randvoorwaarde 3.5 in het programma van eisen stelt dat het ontwerp van de drijvende telescopische havendam vloeiend mee dient te bewegen met de waterstand door middel van drijvende elementen. Hoe lager de wrijvingscoëfficiënt, hoe geschikter het materiaal dus is. De wrijvingscoëfficiënt van staal op staal is 0,5 tot 0,8 (Werktuigbouw & Tribologie, 2018). Dit verwijst naar een drijvende telescopische havendam van staal over de bestaande stalen damwand. De wrijvingscoëfficiënt van composiet op staal is 0,1 (Werktuigbouw & Tribologie, 2018). Dit verwijst naar een drijvende telescopische havendam van composiet, zowel glasvezel als koolstofvezel, over de bestaande stalen damwand. Dit toont aan dat glasvezel en koolstofvezel volgens dit criterium veel

gunstiger zijn dan staal. Echter kan op de contactoppervlakken van een stalen ontwerp een laag composiet worden aangebracht wat zorgt voor eenzelfde effect. Dit betekent dat ongeacht de materiaalsoort van de drijvende telescopische havendam een laag composiet wordt aangebracht op de contactoppervlakken en daarom de wrijvingscoëfficiënt niet doorslaggevend is voor de materiaalkeuze.

4.1.3.2. Duurzaamheid

De duurzaamheid van het materiaal is van belang omdat de drijvende telescopische havendam moet bestaan uit materiaal dat lang meegaat zonder dat deze zijn functie verliest. Daarnaast zou het voordelig zijn als dit materiaal recyclebaar is en weinig energie vergt bij de productie ervan. Sinds 1999 zijn structuren van composieten geïnstalleerd en tot op heden presteren ze goed. Dit impliceert een uitstekende duurzaamheid (PIANC, 2018). Echter zijn de onderzoeken en vergelijkingen die tot nu toe hebben plaatsgevonden nog niet toereikend genoeg om een eenduidig oordeel te geven over de duurzaamheidsaspecten composieten ten opzichte van andere constructiematerialen. Er is simpelweg geen goed vergelijkingsmateriaal beschikbaar. Het geven van een doorslaggevend oordeel is daarmee nog niet mogelijk (Green PAC, 2018).

4.1.3.3. Stijfheid

De stijfheid is van belang omdat de drijvende telescopische havendam alle krachten aan moet kunnen. Eis 2.1 stelt dat het systeem van de drijvende telescopische havendam alle combinaties van voorkomende belastingen dient te kunnen opnemen gedurende de gehele ontwerp levensduur. Dit impliceert dat de stijfheid van het materiaal erg belangrijk is om de functie van het ontwerp te behouden waarmee dit criterium een wegingsfactor krijgt van 3. Hoe groter de stijfheid, hoe geschikter het materiaal dus is. De stijfheid van staal is $2,07 \cdot 10^8$ kPa, die van glasvezel is $8,27 \cdot 10^6$ kPa en die van koolstofvezel is $5,52 \cdot 10^7$ kPa (Performance Composites, 2018). Dit toont aan dat staal volgens dit criterium gunstiger is dan glasvezel en koolstofvezel. Wel is bij deze stijfheden is de hoeveelheid materiaal gelijk. De stijfheid is dus niet apart te beschouwen van de dichtheid van de materialen.

4.1.3.4. Dichtheid

De dichtheid is van belang omdat de drijvende telescopische havendam niet te zwaar mag zijn. Dat zou namelijk het plaatsen van het element vermoeilijken en mogelijk het drijfvermogen verminderen. Hoewel deze aspecten van invloed zijn is het geen vereiste voor de functie en de veiligheid van het ontwerp waarmee dit criterium relatief minder belangrijk is. Daarom krijgt dit criterium een wegingsfactor van 1. Hoe kleiner de dichtheid, hoe geschikter het materiaal dus is. De dichtheid van staal is $8,30 \cdot 10^3$ kg/m³, die van glasvezel is $1,52 \cdot 10^3$ kg/m³ en die van koolstofvezel is $1,80 \cdot 10^3$ kg/m³ (Performance Composites, 2018). Dit toont aan dat glasvezel en koolstofvezel volgens dit criterium veel gunstiger zijn dan staal.

4.1.3.5. Materiaalkosten

De materiaalkosten zijn van belang omdat de drijvende telescopische havendam zo goedkoop mogelijk moet zijn. Toch is dit een relatief minder belangrijk criterium omdat de functie en de veiligheid van het ontwerp voorop staan. Daarom krijgt dit criterium een wegingsfactor van 1. De materiaalkosten van staal zijn €1,- tot €2,- per kilogram, die van glasvezel zijn €2,- tot €6,- per kilogram en die van koolstofvezel zijn €16,- tot €38,- of meer per kilogram. Dit toont aan dat koolstofvezel relatief erg duur is ten opzichte van glasvezel en staal.

4.1.3.6. Maakbaarheid

De maakbaarheid is van belang omdat de drijvende telescopische havendam een specifieke vorm moet krijgen. Omdat dit criterium wel belangrijk maar niet bepalend is krijgt deze een wegingsfactor van 2. De vormvrijheid van staal is relatief lager dan die van glasvezel en koolstofvezel. Voor complexere vormen zullen glasvezel en koolstofvezel dus voordeliger zijn. Echter, voor eenvoudigere vormen is staal juist voordeliger omdat voor glasvezel en koolstofvezel mallen moeten worden

gegoten wat veel tijd en geld kost (PIANC, 2018). Er wordt aangenomen dat het eerste ontwerp een relatief eenvoudige vorm aanneemt. Dit betekent dat staal voor dit ontwerp een goede (+) maakbaarheid heeft en glasvezel en koolstofvezel een wat minder goede (0) maakbaarheid hebben.

Tabel 2, Waarden per criterium voor elk materiaal.

	Weging	Staal S355	Glasvezel	Koolstofvezel
Stijfheid materiaal (kPa)	3	$2,07 * 10^8$	$8,27 * 10^6$	$5,52 * 10^7$
Dichtheid materiaal (kg/m³)	1	$8,30 * 10^3$	$1,52 * 10^3$	$1,80 * 10^3$
Materiaalkosten (€/kg)	1	€1 - €2	€2 - €6	€16 - €38+
Maakbaarheid (+/-)	2	+	0	0

4.1.4. Multi-criteria analyse voor materialen

In Tabel 3 zijn per criterium de gestandaardiseerde waarden vanuit Tabel 2 weergegeven. Deze waarden zijn vermenigvuldigd met de wegingsfactor en opgeteld wat de totaalscore per materiaal is. Hieruit volgt dat de score van staal het hoogst is, de score van koolstofvezel daar net iets onder ligt en de score van glasvezel het laagst is.

Tabel 3, Gestandaardiseerde waarden per criterium voor elk materiaal en score.

	Weging	Staal S355	Glasvezel	Koolstofvezel
Stijfheid materiaal (kPa)	3	1,00	0,00	0,85
Dichtheid materiaal (kg/m³)	1	0,00	1,00	0,96
Materiaalkosten (€/kg)	1	1,00	0,90	0,00
Maakbaarheid (+/-)	2	1,00	0,50	0,50
		6,00	2,90	4,51

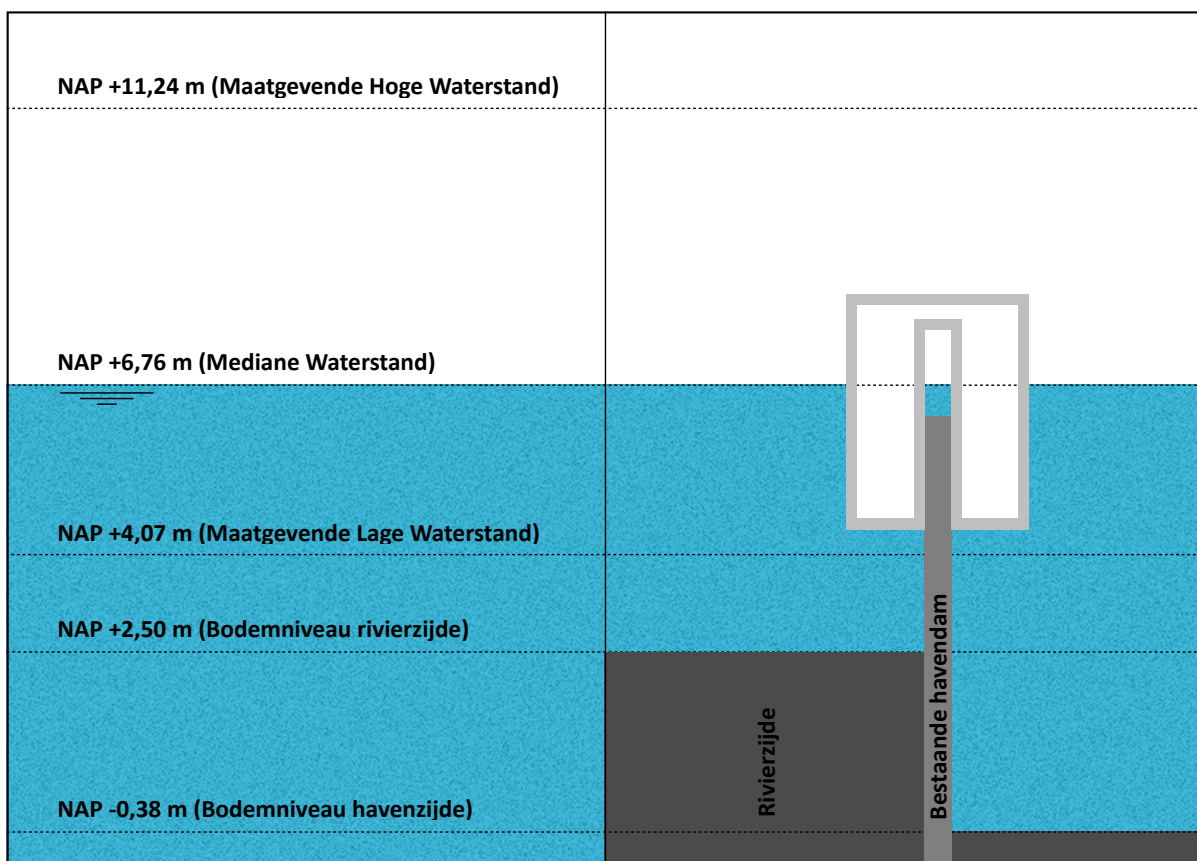
Uit Tabel 3 wordt geconcludeerd een drijvende telescopische havendam van staal S355 met een laag composiet op de contactoppervlakken het meest geschikt is. Om te bepalen welk composiet hiervoor het meest geschikt is wordt nogmaals Tabel 3 beschouwd waarbij alleen glasvezel en koolstofvezel worden vergeleken. Omdat dit contactoppervlak van composiet geen krachten hoeft op te vangen vervalt het criterium stijfheid. Ook het criterium maakbaarheid vervalt omdat de waarden hiervan tegen elkaar opwegen. Dan blijven alleen de dichtheid en materiaalkosten nog over, waar glasvezel op beide criteria beter scoort. Daarmee wordt geconcludeerd dat een laag glasvezel over de stalen drijvende telescopische havendam het meest geschikt is.

4.2. Bevestiging drijvende telescopische havendam

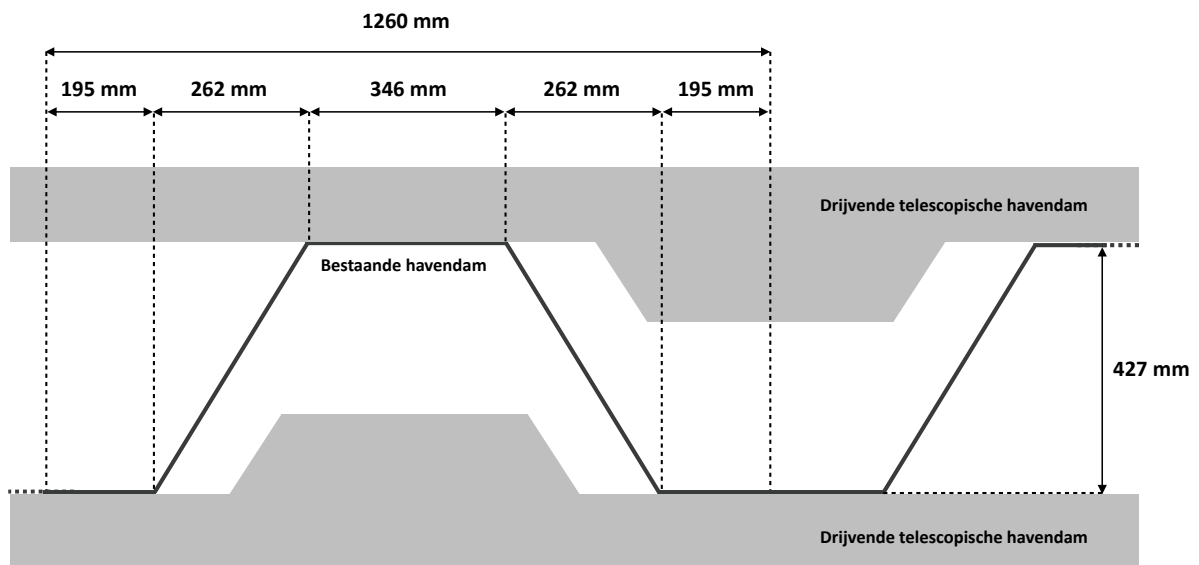
Om te bepalen hoe de bevestiging van de drijvende telescopische havendam aan de bestaande havendam eruit ziet zijn eerst twee varianten opgesteld. Het doel van de bevestiging is dat het ontwerp horizontaal in positie blijft en verticaal mag schuiven tussen bepaalde hoogtes. Eerst wordt voor beide varianten zowel de horizontale als verticale beweging beschreven. Daarna bepaalt een multi-criteria analyse welke variant het meest geschikt is.

4.2.1. Variant 1

Een eerste mogelijkheid is een ontwerp dat zich aan beide zijden van de bestaande havendam bevindt (zie Figuur 7 en Figuur 8), deze wordt Variant 1 genoemd. Omdat dit ontwerp zich aan beide zijden van de bestaande havendam bevindt is een beweging loodrecht op de bestaande havendam niet mogelijk. Aan de binnenzijde het ontwerp zijn schuifelementen geplaatst die ervoor zorgen dat een beweging evenwijdig aan de bestaande havendam ook niet mogelijk is. Een horizontale beweging wordt hiermee voorkomen. Het ontwerp mag wel verticaal bewegen binnen een bepaald bereik. Om dit bereik te begrenzen worden stopelementen geplaatst op de hoogtes die niet overschreven mogen worden. Echter, voor deze variant wordt de neerwaartse beweging al gestopt door de bestaande havendam. Om de beweging gelijkmatig te vertragen en de materialen niet te beschadigen worden de stopelementen bedekt met rubber. De schuifelementen strekken over de gehele hoogte van de binnenzijde van het ontwerp. Daarmee kan deze er niet af schuiven of klemmen. De schuifelementen worden zo nodig op meerdere locaties aangebracht om de stabiliteit te vergroten en krachten beter op te vangen.



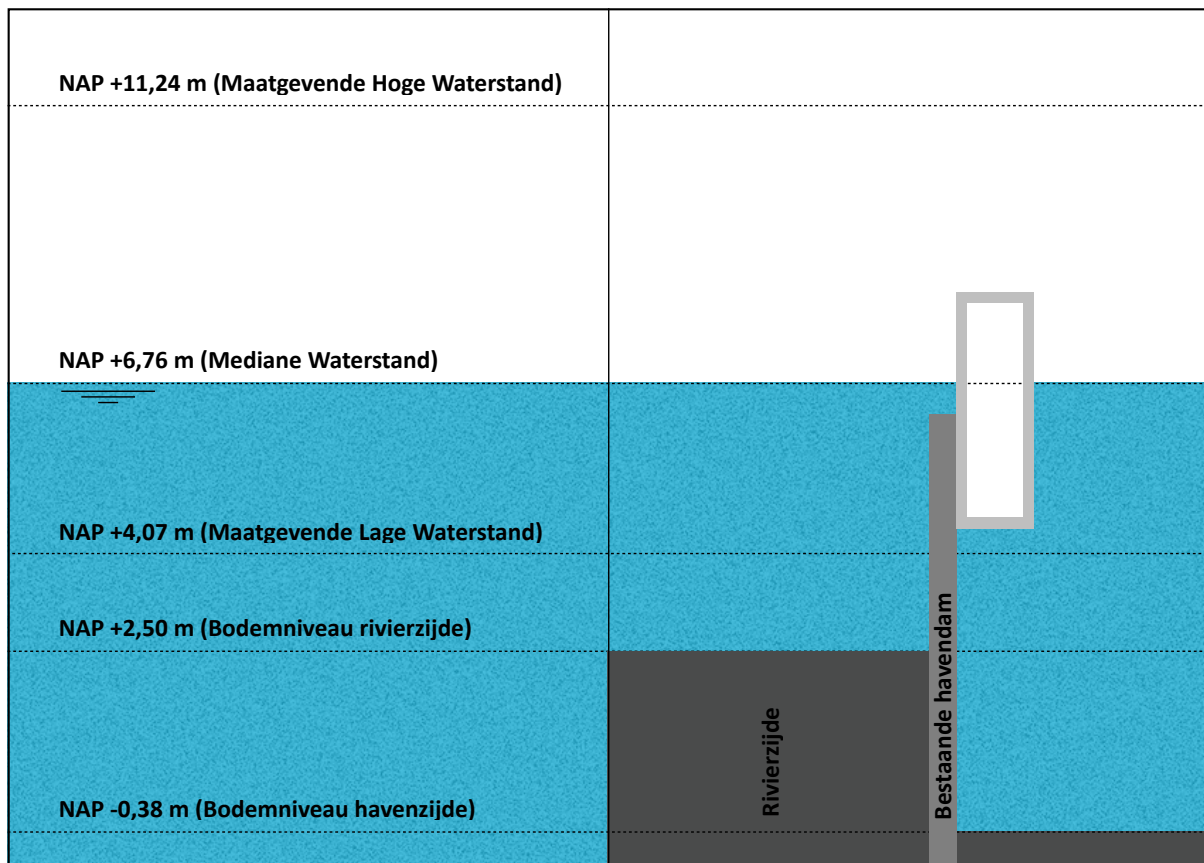
Figuur 7, Het zijaanzicht van Variant 1.



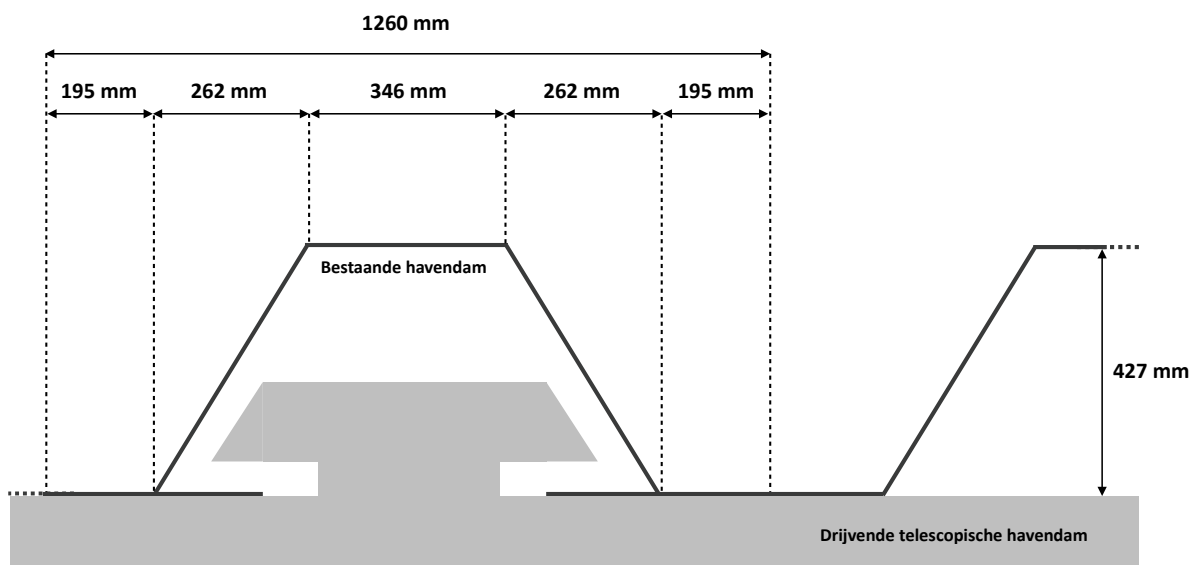
Figuur 8, Het bovenaanzicht van Variant 1.

4.2.2. Variant 2

Een tweede mogelijkheid is een ontwerp dat zich aan één zijde van de bestaande havendam bevindt (zie Figuur 9 en Figuur 10), deze wordt Variant 2 genoemd. Aan de binnenzijde het ontwerp zijn schuifelementen geplaatst die ervoor zorgen dat zowel een beweging loodrecht op als een beweging evenwijdig aan de bestaande havendam niet mogelijk is. Een horizontale beweging wordt hiermee voorkomen. Net als Variant 1 mag dit ontwerp verticaal bewegen binnen een bepaald bereik. Dit bereik wordt wederom begrensd met stopelementen bedekt met rubber. Ook hier strekken de schuifelementen over de hele hoogte van de binnenzijde en worden deze zo nodig op meerdere locaties aangebracht.



Figuur 9, Het zijaanzicht van Variant 2.



Figuur 10, Het bovenaanzicht van Variant 2.

4.2.3. Criteria voor bevestiging

In Tabel 4 zijn de twee varianten naast elkaar gezet met elk een waardering per criterium. Elk criterium wordt vermenigvuldigd met een wegingsfactor. Alle wegingen zijn geschat op basis van het programma van eisen en worden toegelicht. Naast de criteria die in Tabel 4 zijn meegenomen zijn er ook twee criteria die wel van belang zijn maar voor beide varianten hetzelfde opleveren. Deze worden eerst toegelicht.

4.2.3.1. Kosten ontwerp

De kosten voor het ontwerp zijn afkomstig van zowel de materiaalkosten als de installatiekosten van het element. Deze zijn beide afhankelijk van de hoeveelheid materiaal. Immers, hoe meer materiaal, hoe meer installatiebenodigdheden vereist zijn en hoe meer het ontwerp kost. Echter, de hoeveelheid materiaal kan nog niet worden bepaald omdat het ontwerp pas wordt doorgerekend wanneer de bevestiging bepaald is. Wel kan worden gesteld dat beide varianten van dezelfde orde grootte zijn. Daarom wordt aangenomen dat het verschil in materiaalhoeveelheid voor beide varianten niet doorslaggevend is en daarmee het verschil in kosten ook niet. Dit criterium is dus niet maatgevend voor de afweging van de twee varianten.

4.2.3.2. Schuifweerstand

De schuifweerstand wordt in dit geval bepaald door het contactoppervlak met de bestaande havendam. De zijde van het ontwerp komt namelijk in contact met de bestaande havendam. Hoewel het in Figuur 8 lijkt alsof het ontwerp in contact is met beide zijden van de bestaande havendam is er in werkelijkheid enige ruimte hiertussen. Daarmee komen beide varianten slechts met één zijde van de bestaande havendam in aanraking en hebben zij beide hetzelfde contactoppervlak. Ook dit criterium is dus niet maatgevend voor de afweging van de twee varianten.

4.2.3.3. Benutting bestaande havendam

De benutting van de bestaande havendam kan veel verschil maken in het opvangen van krachten en benodigde hoeveelheid extra materiaal. Daarmee is dit criterium erg van belang en krijgt deze een wegingsfactor van 3. Variant 1 maakt optimaal gebruik van de bestaande havendam omdat deze zich eromheen inklemt met zijn vorm. Variant 2 heeft daarentegen extra schotten nodig (zie Figuur 10) die het ontwerp op zijn plaats houden. Bovendien worden deze schotten het meest belast en wordt de bestaande havendam niet goed benut voor het opvangen van krachten. Daarom krijgt Variant 1 een goede (+) beoordeling en Variant 2 een slechte (-) beoordeling.

4.2.3.4. Hinder ontwerp

Onder de hinder die ondervonden wordt van het ontwerp vallen zowel hydraulische hinder als hinder voor vaarverkeer. Omdat dit criterium wel belangrijk maar niet bepalend is krijgt deze een wegingsfactor van 2. Variant 1 neemt ruimte in aan de rivierzijde terwijl Variant 2 dat niet doet. Dit is geen nadeel van Variant 1 omdat deze ruimte te verwaarlozen is ten opzichte van de totale rivierbreedte van tientallen meters op de betreffende locatie. Daarmee wordt aangenomen dat de hydraulische en morfologische processen in de vaarweg niet verstoord worden en het vaarverkeer niet gehinderd wordt. Voor Variant 2 is dit echter een nadeel omdat de bestaande havendam in dit geval zonder markering niet zichtbaar is voor vaarverkeer. Variant 1 veroorzaakt geen hinder en krijgt een goede (+) beoordeling. Variant 2 veroorzaakt hinder zonder extra markering en krijgt een gemiddelde (0) beoordeling.

4.2.3.5. Maakbaarheid vorm

De maakbaarheid van de vorm kan enig verschil maken in kosten en wordt daarom meegenomen. Echter is dit criterium relatief niet erg belangrijk er krijgt deze een wegingsfactor van 1. Variant 2 heeft een erg eenvoudige vorm, deze is namelijk blokvormig zoals Figuur 9 laat zien. Variant 1 heeft een wat meer complexe vorm maar kan ook met rechte platen worden gemaakt. Variant 1 krijgt daarom een gemiddelde (0) beoordeling en Variant 2 krijgt een goede (+) beoordeling.

Tabel 4, Waarden per criterium voor beide varianten.

	Weging	Variant 1	Variant 2
Benutting bestaande damwand	3	+	-
Hinder ontwerp	2	+	0
Maakbaarheid Vorm	1	0	+

4.2.4. Multi-criteria analyse voor bevestiging

In Tabel 5 zijn per criterium de gestandaardiseerde waarden vanuit Tabel 4 weergegeven. Deze waarden zijn vermenigvuldigd met de wegingsfactor en opgeteld wat de totaalscore per materiaal is. Hieruit volgt dat de score van Variant 1 meer is dan die van Variant 2.

Tabel 5, Gestandaardiseerde waarden per criterium voor beide varianten en score.

	Weging	Variant 1	Variant 2
Benutting bestaande damwand	3	1	0
Hinder ontwerp	2	1	0,5
Maakbaarheid Vorm	1	0,5	1
		5,5	2

Uit Tabel 5 wordt geconcludeerd dat de drijvende telescopische havendam tweezijdig wordt bevestigd zoals Variant 1.

4.3. Functioneel ontwerp

Het functioneel ontwerp is opgesteld op basis van de materiaalkeuze, de bevestiging en het programma van eisen. Daarbij is uitgebreid nagedacht over de exacte vorm van het ontwerp en de positie van het drijflichaam. Hieruit is het functioneel ontwerp ontstaan.

Het functioneel ontwerp is luchtdicht en gemaakt van staal S355 met een deklaag composiet op het oppervlak dat in contact staat met de bestaande havendam. De vorm van het functioneel ontwerp lijkt op een U-vorm ondersteboven. Dit is te zien in Figuur B1 in Bijlage B. Hierbij zijn ook de eisen over de hoofdmaatvoering in acht genomen. Zo is het functioneel ontwerp uitgevoerd als rechte wand (Eis 4.1), overstijgt het ontwerp de originele hoogte van de bestaande damwand niet (Eis 4.4) en bevindt het ontwerp zich 0,60 meter boven de waterstand (Eis 4.5) en 0,50 meter boven de rivierbodem (Eis 4.6). De connectie tussen het ontwerp en de bestaande havendam is te zien in Figuur B2 in Bijlage B. In deze figuren die het functioneel ontwerp laten zien zijn de meeste afmetingen nog niet bepaald omdat de technische aspecten hier van afhangen en deze berekening in het volgende hoofdstuk wordt behandeld. Tabel 6 toont van welke materialen de onderdelen van het ontwerp zijn.

Tabel 6, Materialen per onderdeel functioneel ontwerp.

Onderdeel	Materiaal
Constructie	Staal S355
Contactoppervlakken	Glasvezel
Kern van het ontwerp	Lucht (vacuüm) met eventueel contragewicht

5. Technische aspecten

In dit hoofdstuk wordt antwoord gegeven op onderzoeksvraag III. ('Voldoet het ontwerp van de drijvende telescopische havendam met betrekking tot de technische aspecten?'). Om deze vraag te beantwoorden wordt eerst onderzoeksvraag III.i. ('Is het ontwerp bestand tegen alle krachten die erop komen te werken, zelfs in de meest extreme omstandigheden?') beantwoord (5.1) waarna onderzoeksvraag III.ii. ('Is het drijfvermogen te allen tijde voldoende?') wordt beantwoord (5.2). Uitgangspunt van dit hoofdstuk is het functioneel ontwerp dan in Hoofdstuk 4 is beschreven. Dit hoofdstuk komt tot alle exacte afmetingen van het ontwerp en de hoogste van de bestaande havendam, zo dat het ontwerp alle krachten kan opvangen en blijft drijven. Met behulp van een iteratief proces is geprobeerd die ideale situatie te benaderen waarbij aan de technische aspecten wordt voldaan met de minimale afmetingen en materiaalhoeveelheid.

5.1. Krachtenberekening

De drijvende telescopische havendam moet allerlei krachten opvangen zonder te bezwijken. Deze zijn afkomstig van de golven, waterstroming, wind, ijsvorming en de lading op het ontwerp. Waterdruk wordt hierbij niet beschouwd omdat de waterstand aan beide zijden van het ontwerp even hoog is en er dus sprake is van een evenwicht. Van deze krachten worden de maatgevende krachten gebruikt om de lange zijde en de bovenzijde van het ontwerp door te rekenen. De korte zijde wordt niet doorgerekend, dit wordt toegelicht.

Binnen dit onderzoek wordt alleen de drijvende telescopische havendam zelf doorgerekend, de bestaande havendam niet. Deze keuze is gemaakt omdat voor dit onderzoek de focus wordt gelegd op het ontwerp zelf en niet op de bestaande havendam.

5.1.1. Lange zijde

Voor krachten op de lange zijde van het ontwerp zijn scheepsgolven vanaf de rivierzijde maatgevend (Witteveen + Bos, 2018). Ook voor de bestaande havendam zijn deze krachten gebruikt bij het doorrekenen. Deze scheepsgolven hebben een maximum van 80 kN/m. Het ontwerp wordt getoetst op de situatie waarbij deze scheepsgolven het grootste moment leveren in de constructie. Bijlage C.1. toont de berekening van de laatste iteratie van deze situatie.

5.1.2. Bovenzijde

Voor krachten op de bovenzijde van het ontwerp is de zwaartekracht van lading maatgevend. Deze lading is alleen afkomstig van personen die bovenop het ontwerp staan. Verder wordt er in deze situatie namelijk niets bovenop het ontwerp geplaatst. Bijlage C.2. toont de berekening van de laatste iteratie van deze situatie.

5.1.3. Korte zijde

De enige kracht die werkt op de korte zijde van het ontwerp is afkomstig van de stroming dan de rivier en de wind. Echter is deze kracht minimaal wanneer er een extra element wordt geplaatst dat de stroming langs het ontwerp geleidt. Dit is mogelijk met de driehoekvormige stroomgeleider te zien in Figuur E4 In Bijlage E. Hiermee wordt aangenomen dat de krachten op de korte zijde verwaarloosbaar zijn voor de vier schuifelementen die deze moeten opvangen met een sterkte in dezelfde orde grootte als de rest van het ontwerp. Deze stroomgeleider is alleen nodig voor de eerste in een reeks elementen. Meerdere elementen worden dicht tegen de tussenschotten geplaatst zodat ook hier de krachten op de korte zijde minimaal zijn.

5.2. Drijfvermogen drijvende telescopische havendam

De drijvende telescopische havendam moet blijven drijven. Hiervoor wordt de drijvende telescopische havendam luchtdicht afgesloten zodat de ingesloten lucht een opwaartse kracht genereert. Eerst wordt de opwaartse kracht van het ontwerp bepaald waaruit blijkt hoe ver het ontwerp boven de waterstand uitstijgt. Om voor andere situaties speling te behouden wordt het

ontwerp zo ontworpen dat deze minimaal 0,70 meter boven de waterstand uitstijgt. Omdat in deze situatie geen lading op het ontwerp rust wordt in deze situatie het ontwerp teruggebracht tot 0,60 meter boven de waterstand. Deze massa van de lading hiervoor wordt bepaald. Bijlage D.1. toont de berekening van de laatste iteratie van deze situatie.

Daarna wordt de wrijving van het ontwerp berekend. Hierbij moet worden vermeld dat in werkelijkheid enige ruimte is tussen het ontwerp en de bestaande havendam. Daarom is er altijd maar één zijde in aanraking met de bestaande havendam. Hier is de berekening op gebaseerd. Ook wordt de wrijving van de schuifelementen niet meegenomen omdat deze wrijving minimaal is door het relatief kleine contactoppervlak en de relatief lage druk op het oppervlak. Bovendien zijn de schuifelementen alleen in sommige gevallen in contact met de bestaande havendam. De berekening bepaalt of het schuifvermogen overwonnen wordt door de opwaartse kracht, en hoeveel hoogte de waterstand moet overbruggen voordat hier sprake van is. Bijlage D.2. toont de berekening van de laatste iteratie van deze situatie.

6. Resultaten

Met het doorrekenen van de technische aspecten van het functioneel ontwerp zijn de exacte afmetingen van zowel het ontwerp als de bestaande havendam tot stand gekomen. Dit is het definitief ontwerp van de drijvende telescopische havendam. Deze wordt eerst duidelijk tentoongesteld (6.1) en vervolgens gecontroleerd met het programma van eisen (6.2). Ook wordt de nieuwe situatie vergeleken met de oude waarbij belangrijke verschillen aan bod komen (6.3).

6.1. Definitief ontwerp

Het definitief ontwerp is uitgebreid tentoongesteld in de Bijlage E. Alle afmetingen hierin volgen uit de berekeningen in Bijlage C, Bijlage D en het programma van eisen. Een uitzondering hiervan zijn de afmetingen van de schuifelementen in Figuur E3. Deze zijn zo bepaald dat zij breder zijn (416 mm) dan het lengtestuk van de bestaande havendam (346 mm) en dat de zijden parallel lopen met de bestaande havendam. Voor de tussenschotten in Figuur E4 is aangenomen dat zij even breed zijn als de drijvende telescopische havendam met een lengte van 1 m. De bakens worden hierop geplaatst.

De herhaling van elementen in de Figuur E4 kan zo doorgaan voor elk mogelijke lengte. Alleen rond de invaaropening wordt het ontwerp niet geplaatst om daar ruimte te bieden aan vaarverkeer dat de haven in- of uitvaart.

6.2. Controle definitief ontwerp

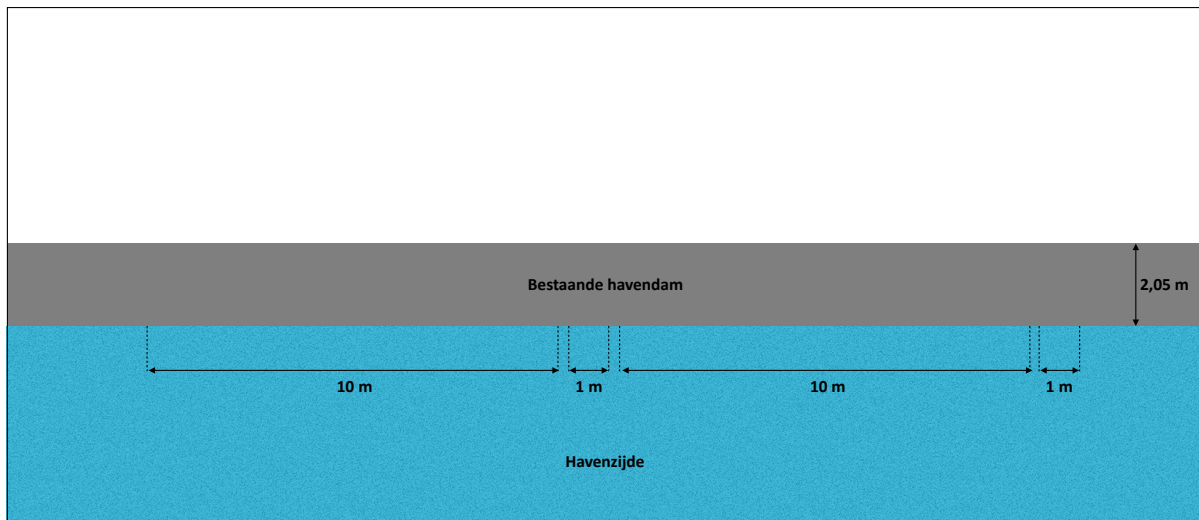
Met behulp van het programma van eisen wordt het definitief ontwerp gecontroleerd of deze aan alle eisen voldoet. Tabel 7 toont deze controle.

Tabel 7, Controle van eisengroepen voor definitief ontwerp.

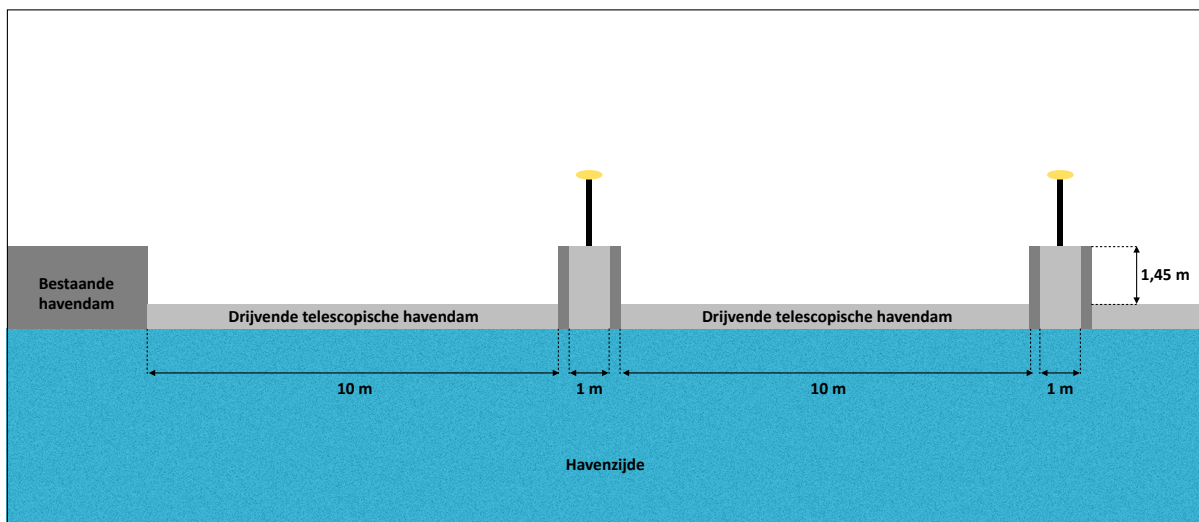
Eisengroep	Beoordeling	Voldoet / Voldoet niet
1. Project scope	Het zicht is verbeterd en het ontwerp voldoet aan de vereiste ontwerplevensduur.	Voldoet
2. Systeemeisen	Het ontwerpen en doorrekenen van de constructie in de software zorgt ervoor dat aan de systeemeisen wordt voldaan.	Voldoet
3. Ontwerp	Tijdens het ontwerpproces en berekening zijn deze eisen constant opnieuw in beschouwing genomen. Uiteindelijk wordt voldaan aan al deze eisen.	Voldoet
4. Hoofdmaatvoering	Bij de optimalisatie van de afmetingen is deze maatvoering constant in acht genomen. Daarmee voldoet het definitief ontwerp aan de hoofdmaatvoering.	Voldoet
5. Praktische toepassing	Aan de praktische toepassing wordt voldaan door bakens te installeren die het ontwerp duidelijk markeren.	Voldoet

6.3. Vergelijking situaties

In de oude situatie bevindt de bestaande havendam zich op een hoogte van NAP +8,20 meter (Figuur 11). In de nieuwe situatie bevindt het ontwerp zich in zijn laagste stand op NAP +6,75 meter (Figuur 12). Als wordt uitgegaan van een kijkhoogte van 0,75 meter dan is er in de nieuwe situatie al zicht vanaf NAP +6,00 meter en in de oude situatie pas vanaf NAP +7,45 meter. Dit is dus een verschil van 1,45 meter. Bij de mediane waterstand ter hoogte van NAP +6,76 meter is er in de oude situatie geen zicht en in de nieuwe situatie wel. In de nieuwe situatie is zelfs nog goed zicht 0,76 meter onder de mediane waterstand.



Figuur 11, Zijaanzicht oude situatie vanaf havenzijde.



Figuur 12, Zijaanzicht nieuwe situatie vanaf havenzijde inclusief tussenschotten met bakens.

7. Conclusie

Dit rapport doet onderzoek naar een oplossing voor het beperkte zicht van vaarverkeer. Daarvoor is een ontwerpproces doorlopen waaruit een definitief ontwerp is opgesteld. De vraag is of en in hoeverre dit definitief ontwerp een oplossing is voor het beperkte zicht van vaarverkeer.

Uit de resultaten blijkt dat het definitief ontwerp zich in zijn laagste stand 1,45 meter lager bevindt dan de bestaande havendam in zijn originele staat. Een verschil van 1,45 meter is relatief weinig in vergelijking met de hoogte van het ontwerp van 3,75 meter. Toch wordt een aanzienlijk deel van het zicht verbeterd met dit ontwerp. In de oude situatie is namelijk geen zicht ter hoogte van de mediane waterstand. In de nieuwe situatie daarentegen is ter hoogte van de mediane waterstand, en zelfs 0,76 meter daaronder, goed zicht. Daarmee kan worden geconcludeerd dat het ontwerp het zicht van vaarverkeer wel degelijk verbetert.

In de nieuwe situatie is het noodzakelijk om tussenschotten te plaatsen tussen de reeks van drijvende telescopische havendammen om bakens te installeren. Deze tussenschotten drijven niet en worden dus net zo hoog als de originele havendam om de stroming te blijven geleiden. Het ontwerp kan dus elke 10 meter verbeterd zicht leveren met een tussenschot van 1 meter dat het zicht enigszins belemmert. Toch is deze verhouding minimaal waardoor het zicht nog steeds goed genoeg is om te zien wat er aan de andere zijde van de havendam vaart.

Omdat het ontwerp alleen bestaat uit rechte wanden en is gemaakt van staal is deze goed maakbaar en relatief goedkoop. Dit zijn dan ook de grote voordelen van het ontwerp ten opzichte van composiet. Bovendien wordt de bestaande damwand goed benut en is het ontwerp eenvoudig te installeren. Wel heeft het ontwerp door het gebruik van staal een erg grote omvang. Met een breedte van 2,93 meter is deze meer dan zes keer breder dan de bestaande havendam. In deze situatie heeft het geen nadelige gevolgen omdat de technische aspecten voldoen en de doorstroming van de rivier niet wordt gehinderd. Ook vaarverkeer wordt niet gehinderd mits de elementen niet rond de invaaropening worden geïnstalleerd. Echter, wanneer dit ontwerp zou worden gebruikt in andere havens kan deze breedte hinderlijk zijn. Daarmee is het ontwerp eventueel toepasbaar in andere situaties, maar wel onder voorbehoud.

Al met al, het ontwerp van de drijvende telescopische havendam is een relatief goedkope en goed maakbare oplossing voor het beperkte zicht dat vaarverkeer ondervindt. Een keerzijde is de omvang van het ontwerp. Dit is nadelig is voor de toepasbaarheid maar heeft in deze situatie geen gevolgen.

8. Discussie

Uit dit onderzoek is geconcludeerd dat het zicht van vaarverkeer daadwerkelijk verbeterd wordt. Een keerzijde is de omvang van het ontwerp. Hierbij speelde een afweging tussen de hoogte en breedte van het ontwerp om het nodige drijfvermogen uit het ontwerp te halen. Enkele aannames hebben deze afweging mede veroorzaakt. Er is aangenomen dat de voor- en achterzijde van het ontwerp geen krachten opvangen en dat staal S355 het sterkst mogelijk potentiele staal is. Daarnaast is de grootst benodigde staaldikte gebruikt voor de hele constructie. Door deze aannames is meer staal in acht genomen dan in werkelijkheid nodig is wat de constructie zwaarder maakt.

Het ontwerp had smaller kunnen zijn als ten eerste de constructie specifiek was doorgerekend. Dit is niet gedaan omdat dit al snel te diep ingaat op de mechanica en daarmee de focus van het onderzoek wordt verlegd. Ook had het ontwerp smaller kunnen zijn wanneer een relatief sterker materiaal gebruikt zou zijn, zoals composiet. Binnen dit onderzoek is expliciet de keuze gemaakt om staal te gebruiken vanwege de goede maakbaarheid en lage kosten. Echter, de keuze zou in andere gevallen ook op composiet kunnen uitkomen. Voor vervolgonderzoek kan worden verdiept op deze aspecten om het ontwerp verder te optimaliseren.

De krachten die optreden in de bestaande havendam zijn niet in acht genomen omdat de focus ligt op het ontwerp van de drijvende telescopische havendam. Het ontwerp zelf is in staat alle krachten te weerstaan, maar wanneer dit nog niet bewezen is voor de bestaande havendam is het ontwerp nog niet toepasbaar in praktijk. Dit is ook een potentieel aspect voor vervolgonderzoek.

Eventueel zou het ontwerp ook toepasbaar zijn in andere havens. Met hetzelfde damprofiel kan het ontwerp zonder aanpassingen gebruikt worden. Bij een afwijkende vorm moeten slechts de schuifelementen en de breedte van de binnenzijde worden aangepast op deze vorm. De algemene structuur kan dus worden behouden. Dit is een groot voordeel van het ontwerp. Wel moet in beide gevallen het ontwerp opnieuw worden doorgerekend vanwege andere randvoorwaarden. Het enige nadeel is dat de breedte van het ontwerp problemen kan opleveren bij smallere vaarwegen. Hier is simpelweg niets aan te veranderen zonder grote ingreep op het ontwerp. Ook het onderzoeken van de gevolgen op de omgeving door de breedte is daarmee een potentieel onderwerp voor vervolgonderzoek.

Referenties

- Academo. (2016). *Wave Interference and Beat Frequency*. Opgeroepen op 2018, van Academo: <https://academo.org/demos/wave-interference-beat-frequency/>
- Aggeres. (2017). *Aggeres*. Opgehaald van www.aggeres.com: <http://www.aggeres.com/nl/case-studies/haven-spakenburg/>
- Arcelor RPS. (2004). *Stalen Damwanden Algemene Catalogus*. Esch-sur-Alzette.
- CBS. (2014). *CBS*. Opgehaald van www.cbs.nl: <https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2014/49/arbeid-kost-in-nederland-gemiddeld-33-euro-per-uur>
- Communities and Local Government. (2009). *Multi-criteria analysis: a manual*. London: Department for Communities and Local Government.
- De Transporters. (2018). *De Transporters*. Opgehaald van detransporters.nl: <http://detransporters.nl/tarieven/>
- Eigen Huis. (2018). *Eigen Huis*. Opgehaald van www.eigenhuis.nl: <https://www.eigenhuis.nl/onderhoud/onderhoudskosten>
- Fabrycky, W. J., & Blanchard, B. S. (2000). *Life-Cycle Costing*. Prentice Hall.
- Green PAC. (2018). *Green PAC*. Opgehaald van www.greenpac.eu: <https://www.greenpac.eu/nl/milieuvergelijkingen-van-staal-hout-en-composieten-bruggen-nog-onbetrouwbaar/>
- Kamphuis, E. (1999). *Automatisch drijvende waterkering voor de stad kampen*. Delft: Technische Universiteit Delft.
- Overheid. (2015). <http://wetten.overheid.nl>. Opgeroepen op 2018, van <http://wetten.overheid.nl/BWBR0023009/2015-01-01>.
- Performance Composites. (sd). *Performance Composites*. Opgeroepen op 2018, van www.performancecomposites.com: <http://www.performancecomposites.com/about-composites-technical-info/122-designing-with-fiberglass.html>
- Performance Composites. (2018). *Performance Composites*. Opgehaald van www.performancecomposites.com: <http://www.performancecomposites.com/about-composites-technical-info/122-designing-with-fiberglass.html><http://www.performancecomposites.com/about-composites-technical-info/122-designing-with-fiberglass.html>
- PIANC. (2018). *Composites for Hydraulic Structures*. Deventer.
- Rijksoverheid. (2012). *Rijksoverheid*. Opgeroepen op 2018, van www.rijksoverheid.nl: <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2012/03/13/structuurvisie-infrastructuur-en-ruimte>
- Rijksoverheid. (2012). *Structuurvisie Infrastructuur en Ruimte*. Den Haag: Rijksoverheid.
- Rijkswaterstaat. (2011). *Richtlijnen Vaarwegen 2011*.
- Schelfhout et al., H. (2016, oktober). *Nepocon*. Opgehaald van www.nepocon.nl: <http://www.nepocon.nl/wp-content/uploads/2018/01/Publicatie-Geotechniek.pdf>
- Tosec. (2018). *Tosec*. Opgehaald van www.tosec.nl: <https://www.tosec.nl/wiki/staal/>
- Werktuigbouw & Tribologie. (2018). *Werktuigbouw & Tribologie*. Opgehaald van www.werktuigbouw.nl: <http://www.werktuigbouw.nl/abc/cof.htm>
- Wernick, A. (2017, Juli 16). *PRI*. Opgehaald van www.pri.org: <https://www.pri.org/stories/2017-07-16/netherlands-always-vulnerable-floods-has-new-approach-water-management>
- Witteveen + Bos. (2018). *Ontwerpnota Havendammen*. Deventer.

Bijlage A, Programma van eisen

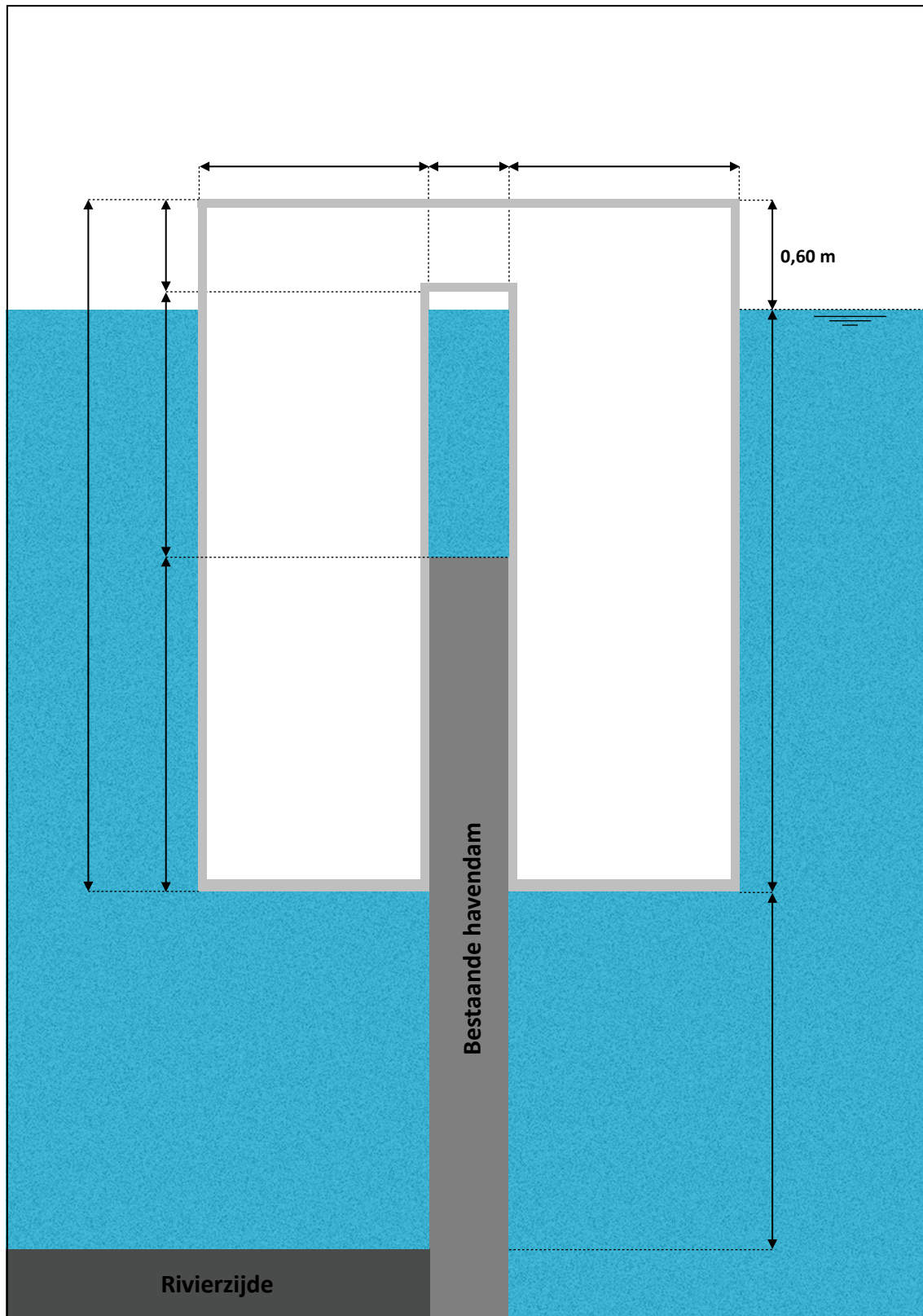
Tabel A 1, Programma van eisen.

Eis ID	Titel	Eis	Toelichting	Eis / Wens / Randvoorwaarde	Bron
1. Project scope					
1.1	Project scope	Een drijvende telescopische havendam dient ontworpen te worden ten behoeve van een beter zicht voor vaarverkeer.	Omdat vaarverkeer slecht zicht ondervindt door hoog uitstaande havendammen.	Eis	Rijkswaterstaat, beroepsvaart, recreatievaart
1.2	Ontwerplevensduur	De drijvende telescopische havendam dient een ontwerplevensduur te hebben van minimaal 50 jaar zonder groot preventief en correctief onderhoud, tenzij anders vermeld voor specifieke onderdelen.	Volgens NEN-EN-1990 moet deze constructie een levensduur hebben van minimaal 50 jaar.	Eis	NEN-EN-1990
2. Systeemeisen					
2.1	Belastingen	Het systeem van de drijvende telescopische havendam dient alle combinaties van voorkomende belastingen zoals die onder meer voortvloeien uit het eigengewicht en natuurlijke belastingen, te kunnen opnemen gedurende de gehele ontwerplevensduur.	-	Eis	NEN-EN 1990
2.2	Onzekerheden	Bij ontwerp en de uitvoering van het systeem van de drijvende telescopische havendam moet rekening worden gehouden met onzekerheden in het ontwerp- en berekeningsmethodieken, belastingen, kwaliteit, sterkte en verwerking van de materialen.	Dit uit zich in het gebruik van veiligheidsfactoren tijdens de berekening van de constructie.	Eis	Bouwbesluit
2.3	Integriteit	De integriteit van de verschillende onderdelen en de werking van het systeem dienen gewaarborgd te blijven gedurende de gehele ontwerplevensduur.	Het drijfvermogen van de drijvende telescopische havendam dient gewaarborgd te blijven gedurende de gehele ontwerplevensduur.	Eis	Bouwbesluit
2.4	Bruikbaarheid	De toegepaste ontwerpen, materialen, onderdelen, bakens en tijdelijke werken dienen gecertificeerd en geschikt te zijn voor de betreffende situatie en omstandigheden die op de projectlocatie gelden.	-	Eis	Bouwbesluit
3. Ontwerp					
3.1	Normen en richtlijnen	Het ontwerp dient te voldoen aan de bindende documenten die volgen uit de in Nederland gangbare en/of van toepassing zijnde normen, richtlijnen, leidraden en handboeken.	-	Eis	Rijkswaterstaat
3.2	Veiligheidsklasse	Het ontwerp dient te voldoen aan de veiligheidsklasse die wordt voorgeschreven voor de desbetreffende materialen.	-	Eis	NEN-EN 1990

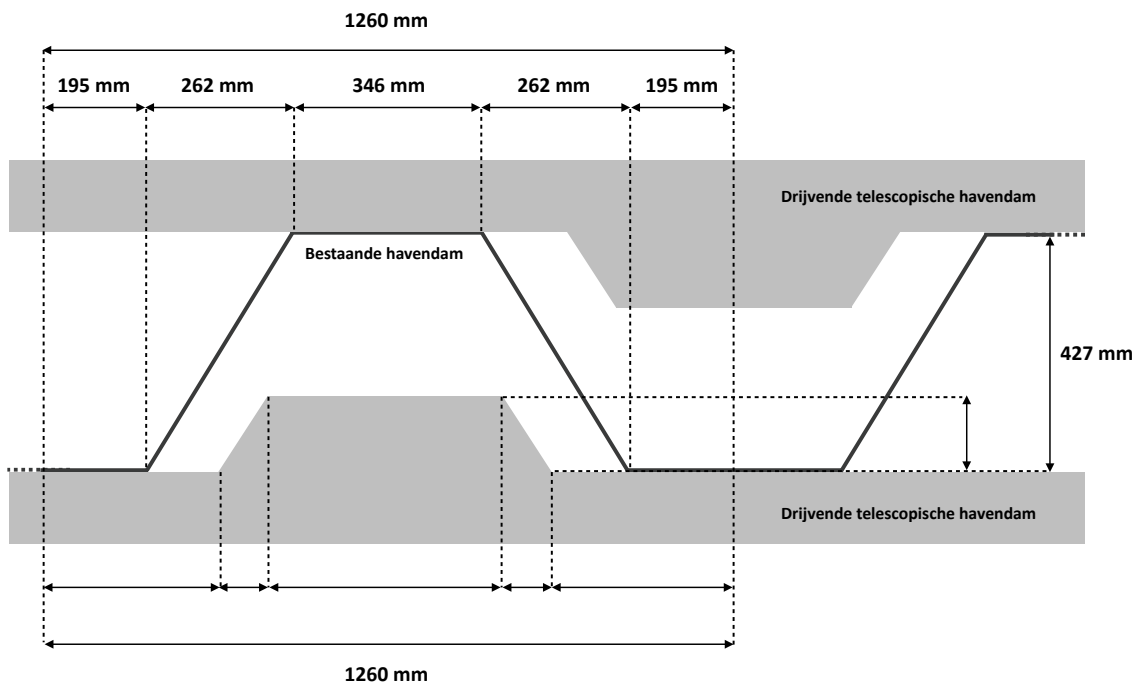
3.3	Ijsvorming	Het ontwerp van de drijvende telescopische havendam dient te zijn ontworpen op ijsvorming.	Wanneer ijsvorming ontstaat kunnen drijvende ijsschotsen een kracht uitoefenen op de drijvende telescopische havendam.	Eis	Rijkswaterstaat
3.4	Waterstanden	Het ontwerp van de drijvende telescopische havendam dient te zijn ontworpen op de maatgevende waterstanden.	De waterstanden bepalen immers de hoogte van de drijvende telescopische havendam.	Eis	Rijkswaterstaat
3.5	Drijfvermogen	Het ontwerp van de drijvende telescopische havendam dient vloeiend mee te bewegen met de waterstand door middel van drijvende elementen.	De drijvende telescopische havendam mag niet klem komen te zitten aangezien deze dan zijn functie verliest.	Randvoorwaarde	Rijkswaterstaat
3.6	Functie havendam	Het ontwerp van de drijvende telescopische havendam dient de functie van de bestaande havendam in geen enkel opzicht te beperken met betrekking tot hydraulische en morfologische randvoorwaarden.	-	Randvoorwaarde	Rijkswaterstaat
3.7	Markering	Het ontwerp van de drijvende telescopische havendam dient duidelijk te worden gemarkeerd met behulp van jalons, reflectoren en eventueel lichtbronnen.	Zodat scheepvaartverkeer zowel overdag als 's nachts duidelijk kan zien waar de drijvende telescopische havendam zich bevindt.	Eis	Rijkswaterstaat
3.8	Beweging	Het systeem van de drijvende telescopische havendam dient ervoor te zorgen dat deze alleen omhoog en omlaag kunnen bewegen, niet in andere richtingen.	-	Eis	Rijkswaterstaat
4. Hoofdmaatvoering					
4.1	Vorm havendam	Het ontwerp van de drijvende telescopische havendam dient loodrecht op de waterstand te zijn uitgevoerd, in de vorm van een rechte wand.	Uitstekende elementen onder water zijn onvoorspelbaar voor vaarverkeer.	Eis	Rijkswaterstaat
4.2	Lengte drijvende telescopische havendam	Eén element van de drijvende telescopische havendam dient te worden beperkt in zijn lengte.	In geval van onverwacht aangebrachte schade hoeft slechts één element vervangen te worden.	Wens	Rijkswaterstaat
4.3	Breedte drijvende telescopische havendam	Het ontwerp van de drijvende telescopische havendam dient geen hinder te veroorzaken met zijn breedte.	De rivier moet zo min mogelijk worden beperkt in zijn breedte. Hoe smaller de drijvende telescopische havendam, des te minder de rivier wordt beperkt in zijn breedte.	Wens	Rijkswaterstaat
4.4	Hoogte drijvende	Het ontwerp van de drijvende	NAP +8,20 meter is de	Eis	Rijkswaterstaat

	telescopische havendam	telescopische havendam mag de hoogte van NAP +8,20 meter niet overstijgen.	hoogte van de bestaande havendam. De drijvende telescopische havendam die wordt geplaatst bovenop het ingekorte deel van deze bestaande havendam mag deze hoogte niet overstijgen.		
4.5	Drijvende telescopische havendam ten opzichte van waterstand	Het ontwerp van de drijvende telescopische havendam mag niet minder dan 0,60 meter en niet meer dan 0,75 meter boven de waterstand uitsteken.	Tussen deze waarden slaan de golven niet over en wordt het zicht voor vaarverkeer bevorderd.	Eis	Rijkswaterstaat
4.6	Drijvende telescopische havendam ten opzichte van rivierbodem	Het ontwerp van de drijvende telescopische havendam dient minimaal 0,50 meter boven de rivierbodem gesitueerd te zijn.	Wanneer de bodem aanslibt moet er ruimte overblijven voor de drijvende telescopische havendam om in zijn laagste stand te komen.	Eis	Rijkswaterstaat
5. Praktische toepassing					
5.1	Bakens	De aanwezige bakens op de bestaande havendam moeten worden bevestigd op of aan de palen die zijn gesitueerd tussen de verschillende elementen van de drijvende telescopische havendam. De functie van deze bakens dient te allen tijde gewaarborgd te blijven.	-	Eis	Rijkswaterstaat

Bijlage B, Functioneel ontwerp



Figuur B 1, Zijaanzicht functioneel ontwerp, afmetingen nog onbekend.

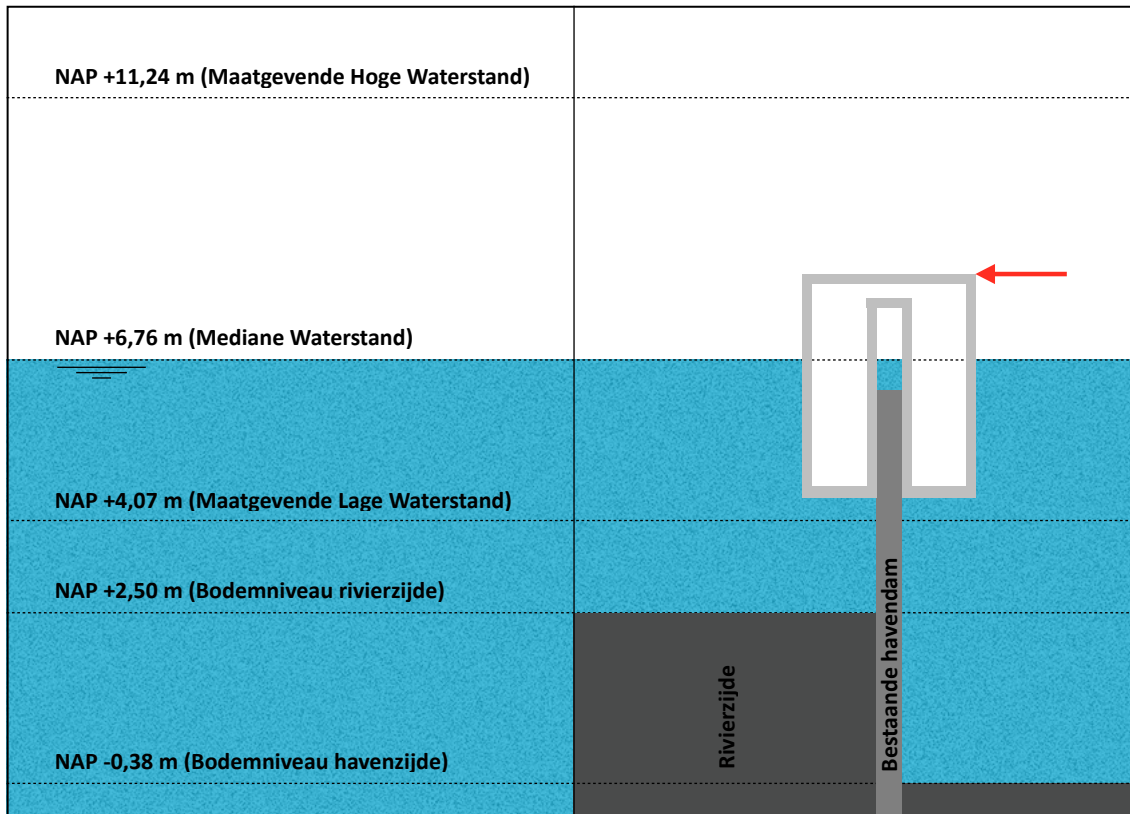


Figuur B 2, Bovenaanzicht verbinding functioneel ontwerp, afmetingen nog onbekend.

Bijlage C, Krachtenberekening

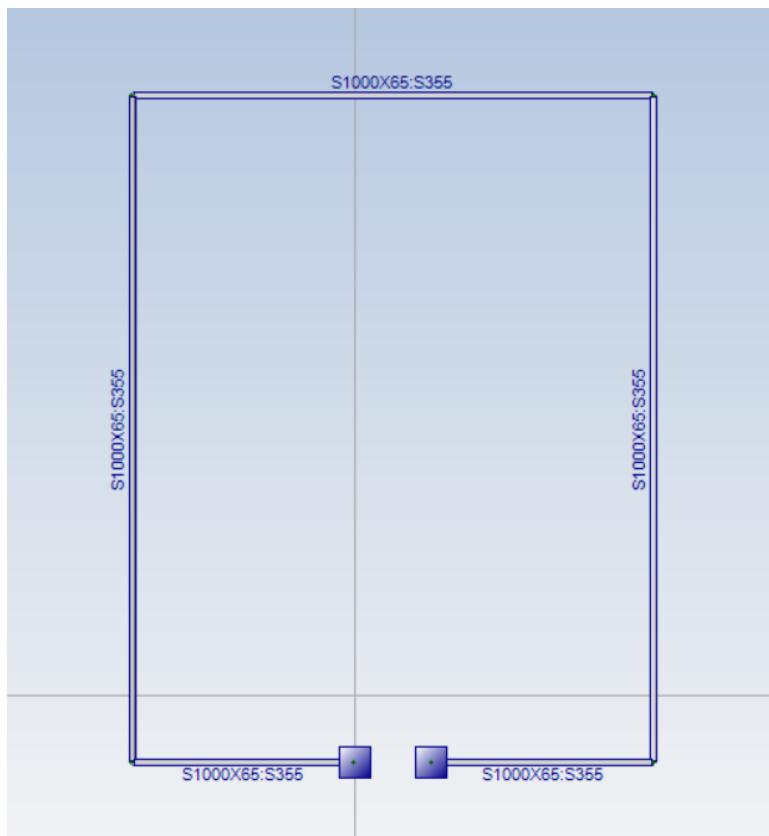
C.1. Krachten op lange zijde

Het ontwerp wordt getest op een golfkracht van 80 kN/m ter hoogte van de bovenzijde van de drijvende telescopische havendam. Figuur C1 toont een schematische weergave hiervan.

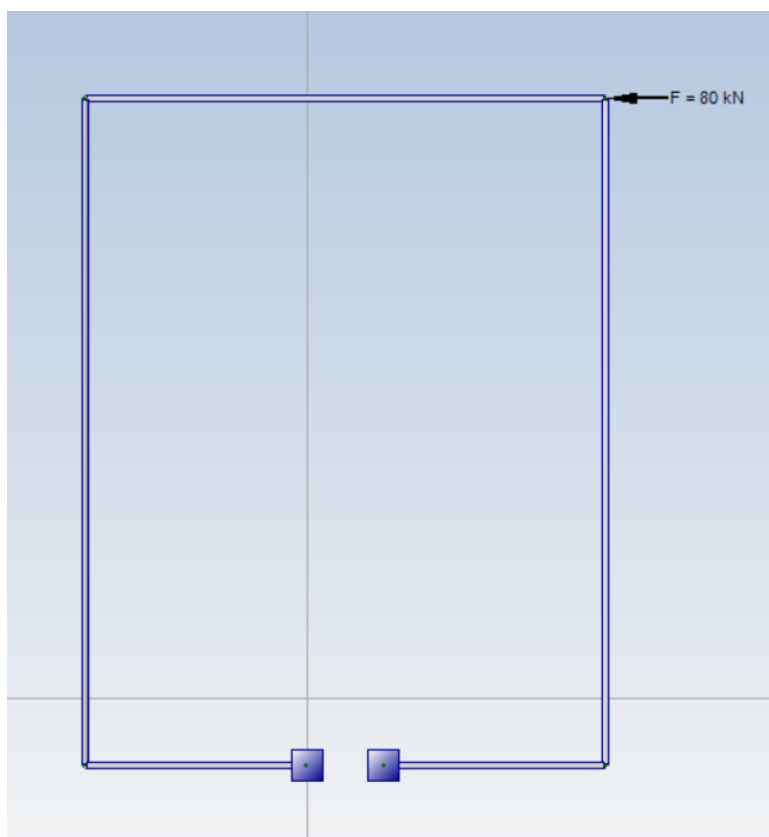


Figuur C 1, Zijaanzicht functioneel ontwerp met maatgevende kracht van 80 kN/m.

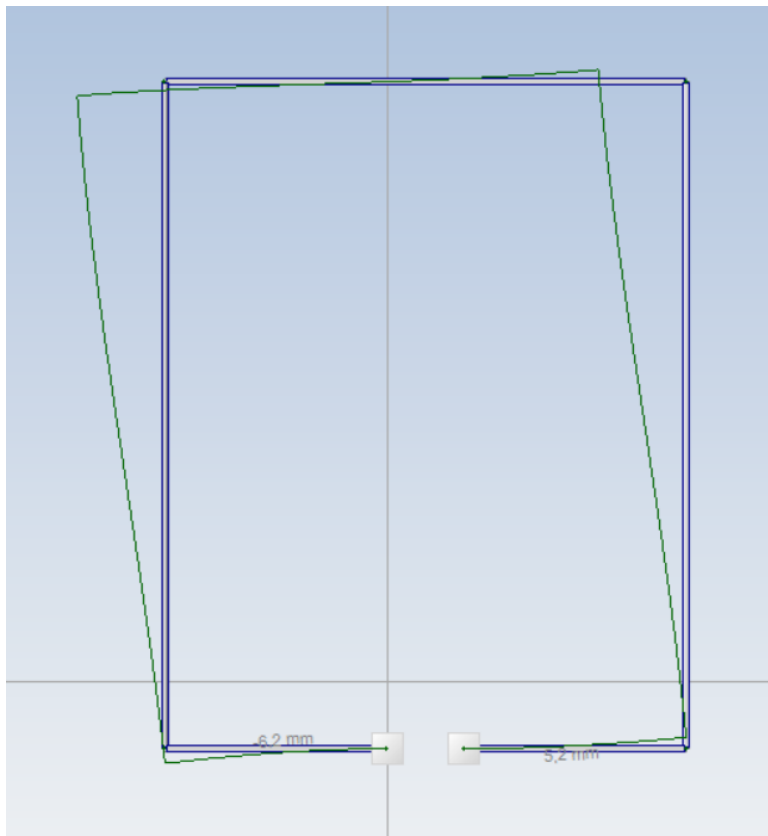
De krachten en momenten die ontstaan in de constructie zijn berekend met de software XFrame2d. Omdat het ontwerp hol is en geen eenvoudige vorm heeft wordt het berekenen constructie erg complex. Daarom is het ontwerp gesimplificeerd tot het model in Figuur C2. Hier is te zien dat het ontwerp zich strak inklemmt om de bestaande havendam. Daarom worden de binnenzijden in deze berekening niet meegenomen. Ook is aangenomen dat de voor- en achterzijde van het ontwerp geen krachten opvangen. Daarom toont de schematische weergaven in Figuur C2 open uiteinden. Figuur C3 toont het model met de maatgevende kracht van 80 kN per strekkende meter.



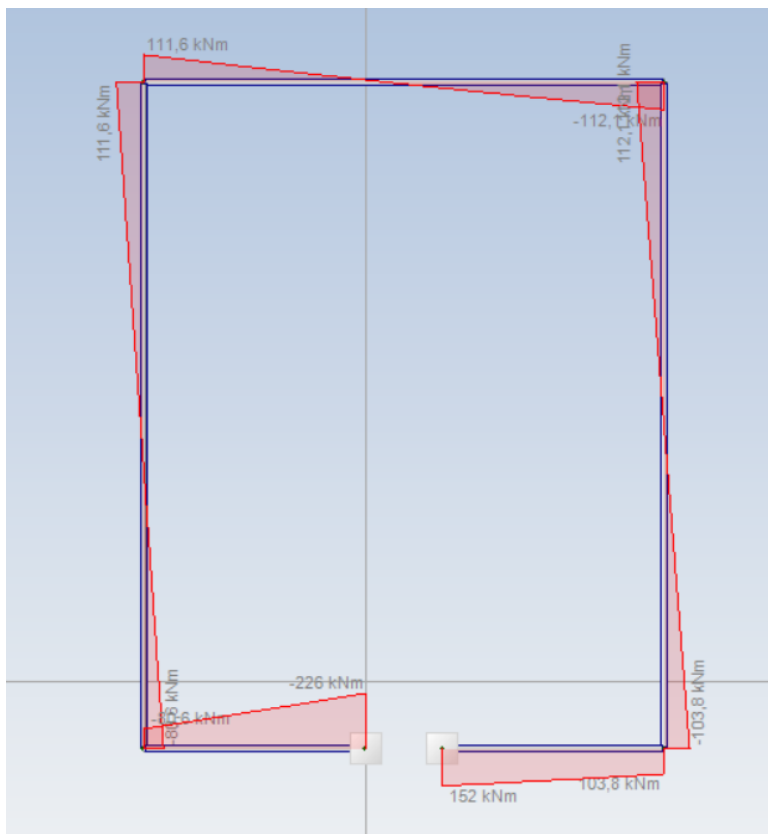
Figuur C 2, Model in XFrame2d met staafaanduidingen.



Figuur C 3, Model in XFrame2d met maatgevende kracht.



Figuur C 4, Model in XFrame2d met vervormingen.



Figuur C 5, Model in XFrame2d met momentenlijnen.

De constructie is doorgerekend waaruit de vervorming van de constructie en de momentlijnen in de constructie volgen. Deze zijn respectievelijk te zien in Figuur C4 en Figuur C5.

Uit Figuur C4 volgt dat de vervorming van de constructie maximaal 6,2 mm is. Deze speling mogelijk dus veroorzaakt de vervorming geen problemen.

Uit Figuur C5 volgt dat het maximale moment 226 kNm is per strekkende meter in de platen van 65 mm. Dit moment in combinatie met het specifieke weerstandsmoment van de stalen plaat mag niet groter zijn dan de vloeigrens van het staal.

$$\frac{M_{ed}}{W_y} \leq \sigma_s$$

Hierin is:

M_{ed} = Maximale moment dat optreedt in de constructie

W_y = Weerstandsmoment van de doorsnede

σ_s = Vloeigrens van het gebruikte staal

$$M_{ed} = 226 \text{ kNm}$$

$$W_y = \frac{bh^2}{6} = \frac{1 \cdot 0,065^2}{6} = 7,04 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$\sigma_s = 355 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\frac{M_{ed}}{W_y} = \frac{226}{7,04 \cdot 10^{-4}} = 3,21 \cdot 10^5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 321 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$321 \leq 355 \rightarrow$ De stalen plaat kan het moment opvangen.

Uit Figuur C5 volgt ook dat het maximale moment 112,1 kNm is per strekkende meter in de platen van 45 mm. Dit moment in combinatie met het specifieke weerstandsmoment van de stalen plaat mag niet groter zijn dan de vloeigrens van het staal. Dezelfde formule wordt gebruikt.

$$\frac{M_{ed}}{W_y} \leq \sigma_s$$

Hierin is:

$$M_{ed} = 112,1 \text{ kNm}$$

$$W_y = \frac{bh^2}{6} = \frac{1 \cdot 0,045^2}{6} = 3,38 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$\sigma_s = 355 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\frac{M_{ed}}{W_y} = \frac{112,1}{3,38 \cdot 10^{-4}} = 3,32 \cdot 10^5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 332 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$332 \leq 355 \rightarrow$ De stalen plaat kan het moment opvangen.

De conclusie is dat de constructie bestand is tegen krachten die op de lange zijde werken.

C.2. Krachten bovenzijde

De krachten door lading loodrecht op de bovenzijde van het ontwerp is enkel afkomstig zijn van personen. Wanneer een persoon van 100 kilogram wordt beschouwd oefent deze een kracht uit, deze wordt eerst berekend.

$$F_{\text{persoon}} = m * g$$

Hierin is:

F_{persoon} = Kracht in N

m = Massa in kg = 100 kg (massa van een persoon)

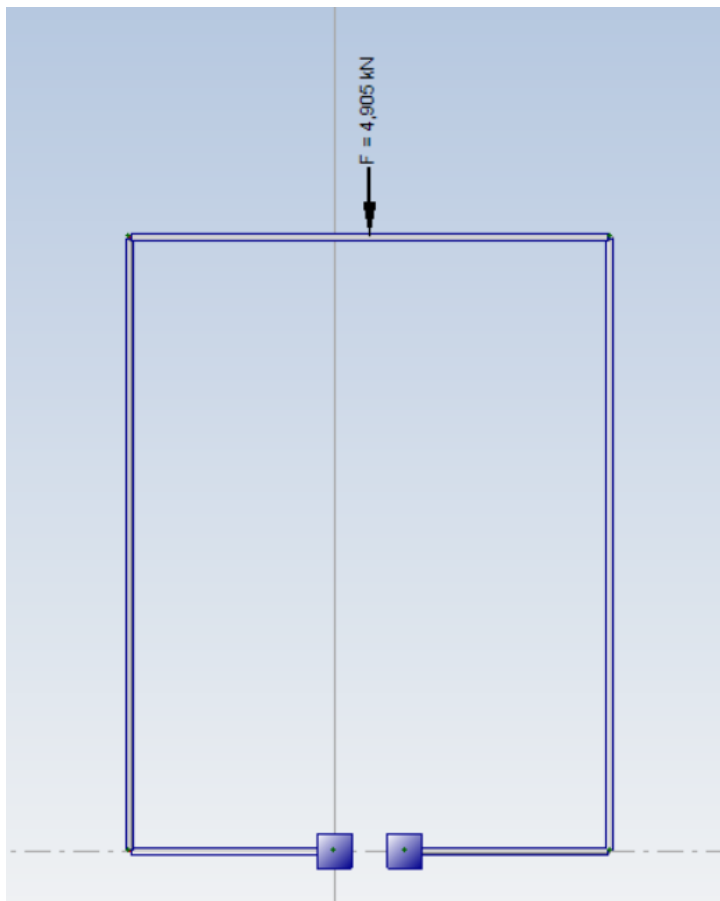
g = Valversnelling in $\frac{m}{s^2} = 9,81 \frac{m}{s^2}$ (valversnelling op aarde)

$$F_{\text{persoon}} = 100 * 9,81 = 981 \text{ N}$$

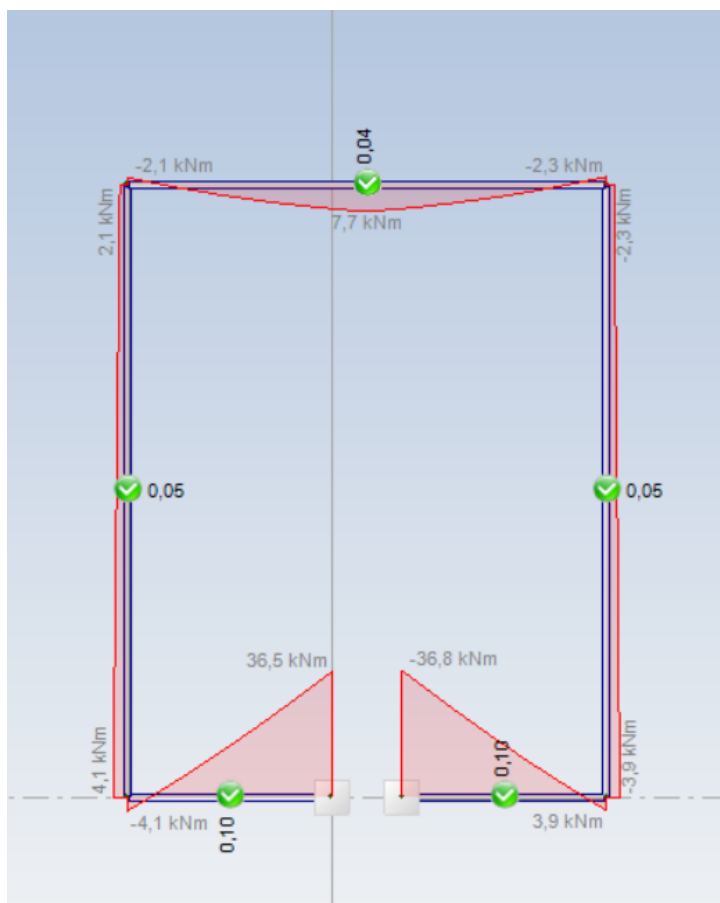
Wanneer vijf van deze personen op een rij gaan staan ontstaat er een kracht per strekkende meter.

$$F_{\text{personen}} = 981 * 5 = 4905 \text{ N} = 4,905 \text{ kN}$$

Deze kracht is in de software XFrame2d in hetzelfde model als in Figuur C2 ingevoerd als kracht per strekkende meter. Dit is te zien in Figuur C6. De software heeft de berekening uitgevoerd en uit de groene vinkjes in Figuur C7 blijkt dat de constructie deze kracht aankan.



Figuur C 6, Model in XFrame2d met maatgevende kracht.



Figuur C 7, Model in XFrame2d met momentenlijnen.

Bijlage D, Berekening drijfvermogen

D.1. Opwaartse kracht

In deze berekening wordt bepaald of en hoe ver het ontwerp zich boven de waterstand bevindt bij het drijfevenwicht.

De neerwaartse kracht wordt bepaald door de massa van het ontwerp. Deze is afkomstig van het staal en de ingesloten lucht.

$$m_o = (V_{frame} + V_{zij} + V_{schuif}) * \rho_{staal} + V_{lucht} * \rho_{lucht}$$

Hierin is:

m_o = Totale massa van het ontwerp

V_{frame} = Volume van het U-vormige frame

V_{zij} = Volume van de voor- en achterzijde

V_{schuif} = Volume van de vier schuifelementen

ρ_{staal} = Dichtheid van staal

V_{lucht} = Volume van de ingesloten lucht

ρ_{lucht} = Dichtheid van lucht

$$V_{frame} = (3,75 * 2 + 3,25 * 2 + 2,93 + 0,43) * 0,045 * 10 + (1,25 * 2) * 0,065 * 10 = 9,4 \text{ m}^3$$

$$V_{zij} = ((3,75 * 2,93 - 3,25 * 0,43) - (\frac{9,4}{10})) * 0,010 * 2 = 0,17 \text{ m}^3$$

$$V_{schuif} = (0,176 + 0,416 + 0,176) * 0,010 * 3 * 4 = 0,10 \text{ m}^3$$

$$V_{lucht} = ((3,75 * 2,93 - 3,25 * 0,43) * 10) - 9,4 - 0,17 = 86 \text{ m}^3$$

$$m_o = (9,4 + 0,17 + 0,10) * 7800 + 86 * 1,293 = 7,5 * 10^4 \text{ kg}$$

$$F_z = m_o * g = 7,5 * 10^4 * 9,81 = 7,4 * 10^5 \text{ N}$$

Dit is de neerwaartse kracht van het ontwerp.

De opwaartse kracht wordt bepaald door het volume van het water dat opzij wordt gedrukt door het ontwerp bij volledig onderdompelen.

$$m_w = V_{tot} * \rho_w$$

Hierin is:

m_w = Totale massa van het water dat opzij wordt gedrukt bij volledig onderdompelen

V_{tot} = Totale volume van het water dat opzij wordt gedrukt bij volledig onderdompelen

ρ_w = Dichtheid van water

$$m_w = (9,4 + 0,17 + 0,10 + 86) * 997 = 9,6 * 10^4 \text{ kg}$$

$$F_w = m_w * g = 9,6 * 10^4 * 9,81 = 9,4 * 10^5 \text{ N}$$

Dit is de opwaartse kracht van het ontwerp.

Hieruit blijkt dat de opwaartse kracht groter is en het ontwerp dus blijft drijven. Nu wordt onderzocht hoe ver het ontwerp zich boven de waterstand bevindt. Hiervoor wordt het verschil tussen de krachten bepaald. Dit verschil moet worden opgegeven omdat er evenwicht moet zijn.

$$F_R = F_w - F_z = 9,4 * 10^5 - 7,4 * 10^5 = 1,9 * 10^5 \text{ N}$$

$$m_R = \frac{F_R}{g} = \frac{1,9 * 10^5}{9,81} = 2,0 * 10^4 \text{ kg}$$

$$V_R = \frac{m_R}{\rho_w} = \frac{2,0 * 10^4}{997} = 20 \text{ m}^3$$

Dit is het volume van het ontwerp dat boven het water uitstijgt.

$$h = \frac{(V_R - 0,5 * 2,93 * 10)}{2 * 1,25 * 10} + 0,5 = 0,71 \text{ m}$$

Zonder extra massa bevindt het ontwerp zich 0,71 m boven de waterstand. Echter, dit ontwerp moet 0,60 m boven de waterstand uitstijgen. Dat betekent dat deze nog 0,11 m moet dalen.

$$V_l = 1,25 * 0,11 * 10 * 2 = 2,8 \text{ m}^3$$

$$m_l = V_l * \rho_w = 2,8 * 997 = 2,7 * 10^3 \text{ kg}$$

Door het ontwerp op te vullen met deze massa daalt deze nog 0,11 m.

D.2. Wrijving

De binnenzijde van het ontwerp van de drijvende telescopische havendam schuift langs de bestaande havendam. Zelfs wanneer er maximale krachten op het oppervlak van het ontwerp optreden moet de schuifweerstand overtroffen worden. Dit wordt hier berekend.

Uit Figuur E3 blijkt dat per 1260 mm wand er 346 mm wand is waarlangs het ontwerp kan schuiven. Voor het hele ontwerp van 10 m lang zijn er dus 8 van deze stukken wand.

$$A_{wand} = 0,347 * 3,25 * 8 = 9,02 \text{ m}^2$$

De stroomsnelheid van het water loodrecht op het ontwerp bepaalt hoe hard deze tegen de bestaande havendam wordt gedrukt. Uit een rapport van Witteveen + Bos komt naar voren dat de stroomsnelheid loodrecht op de drijvende telescopische havendam maximaal 1,5 meter per seconde is (Witteveen + Bos, 2018). De stroomsnelheid aan het oppervlak van het water verschilt wellicht van de stroomsnelheid onder water. Toch wordt voor de gehele hoogte van het water de maximale stroomsnelheid gebruikt.

$$q_{water} = \frac{1}{2} \rho v^2$$

Hierin is:

q_{water} = Dynamische druk in Pa

ρ = Dichtheid van vloeistof

v = Snelheid van vloeistof

$$\rho = 997 \frac{kg}{m^3}$$

$$v = 1,5 \frac{m}{s}$$

$$q_{water} = \frac{1}{2} \rho v^2 = \frac{1}{2} * 997 * 1,5^2 = 1122 Pa = 1122 \frac{N}{m^2}$$

$$F_n = q_{water} * A_{wand} = 1122 * 9,02 = 1,01 * 10^4 N = 10,1 kN$$

$$F_w = \mu_d * F_n$$

Hierin is:

F_w = Wrijvingskracht

μ_d = Statische wrijvingscoëfficiënt tussen composiet en staal

F_n = Normaalkracht op het oppervlak

$\mu_d = 0,1$ (Werktuigbouw & Tribologie, 2018)

F_n = Normaalkracht op het oppervlak

$$F_w = 0,1 * 10,1 = 1,01 kN$$

Dit is de wrijvingskracht die overwonnen moet worden zodat het ontwerp gaat schuiven.

$$F_w = 1,01 kN = 1,01 * 10^3 N$$

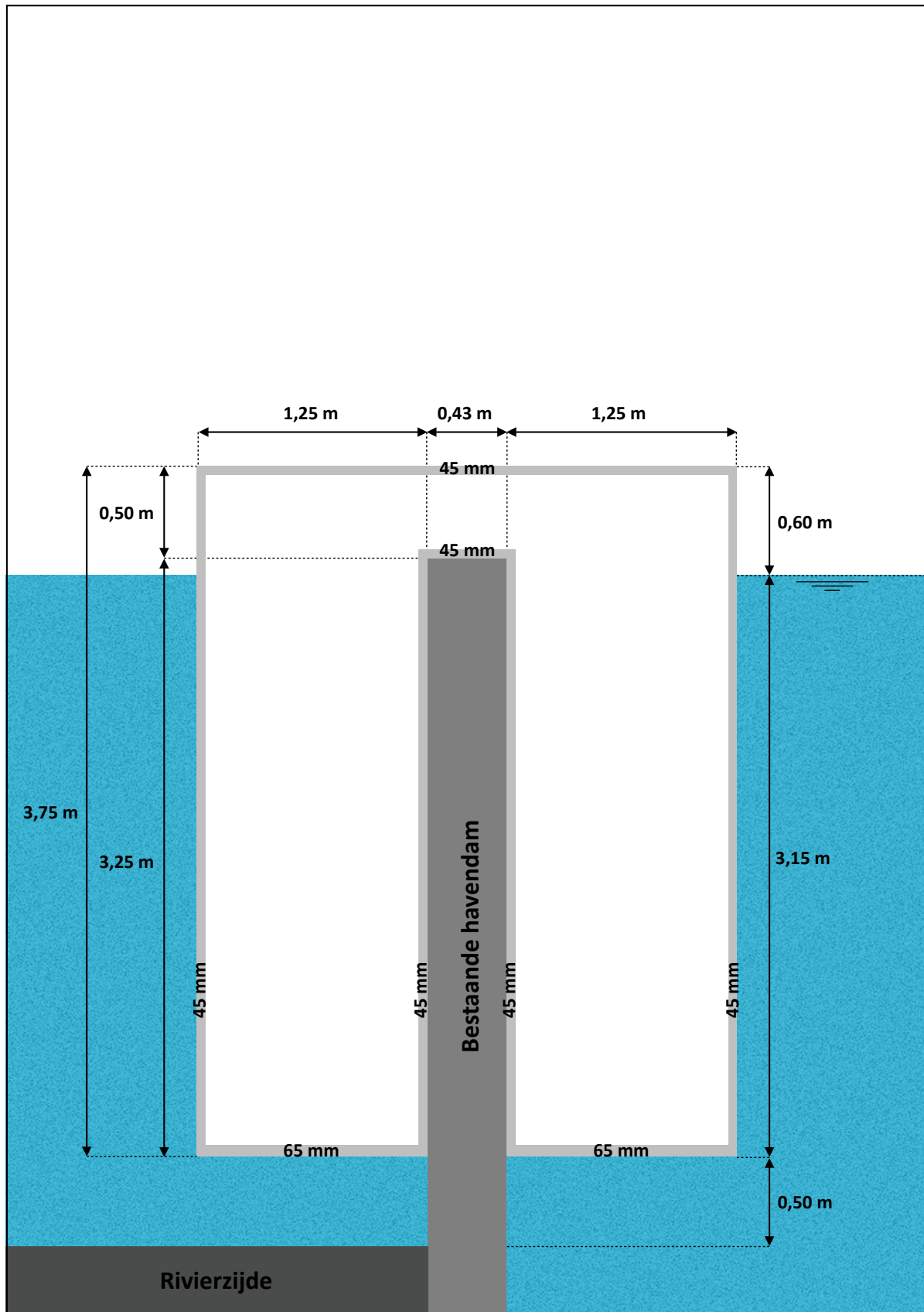
$$m_R = \frac{F_w}{g} = \frac{1,01 * 10^3}{9,81} = 103 kg$$

$$V_R = \frac{m_R}{\rho_w} = \frac{103}{997} = 0,103 m^3$$

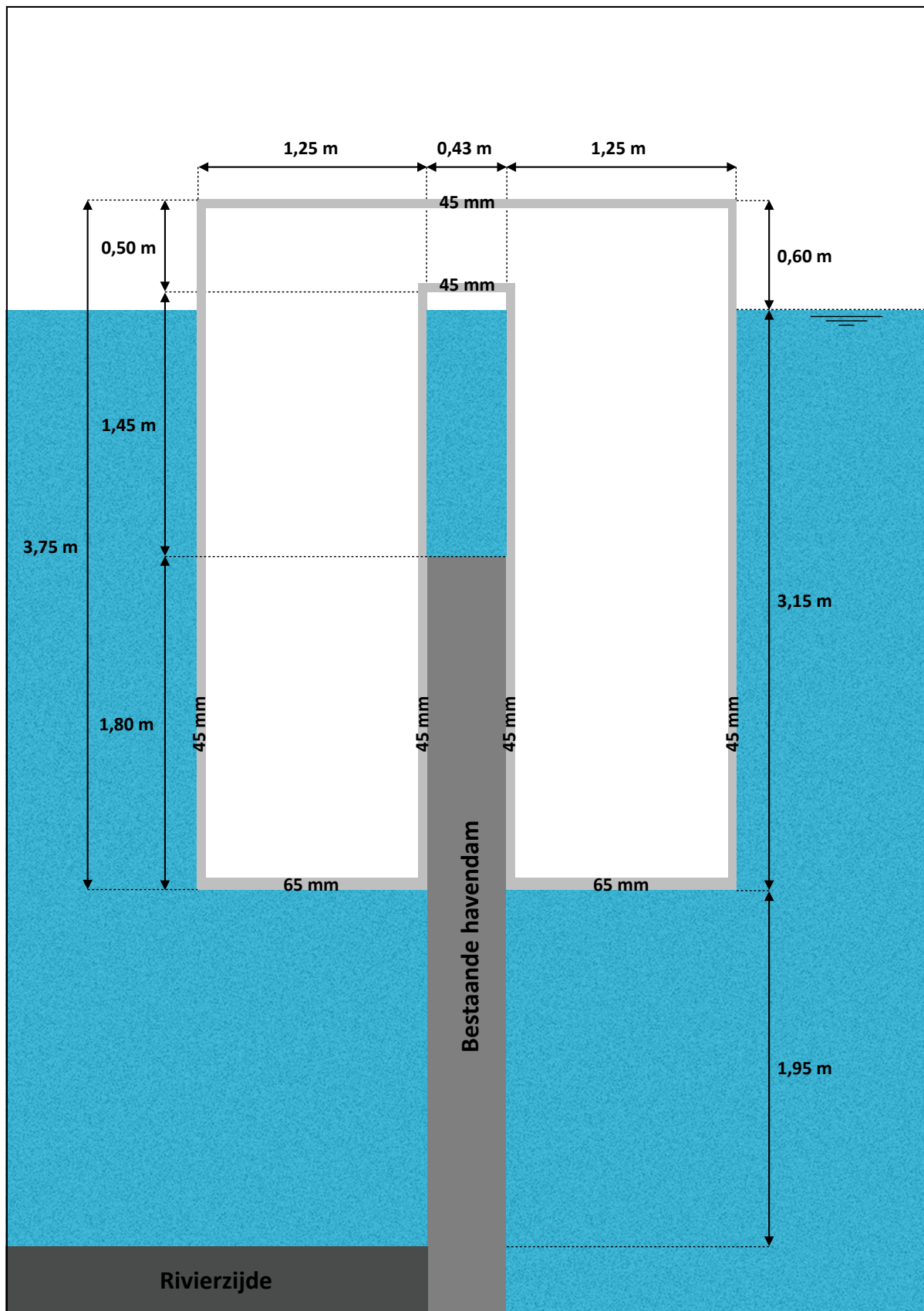
Dit is het volume dat het water inneemt voordat de wrijvingskracht overwonnen wordt.

$$h = \frac{V_R}{2,93 * 10} = \frac{0,103}{2,93 * 10} = 0,00353 m = 3,53 mm$$

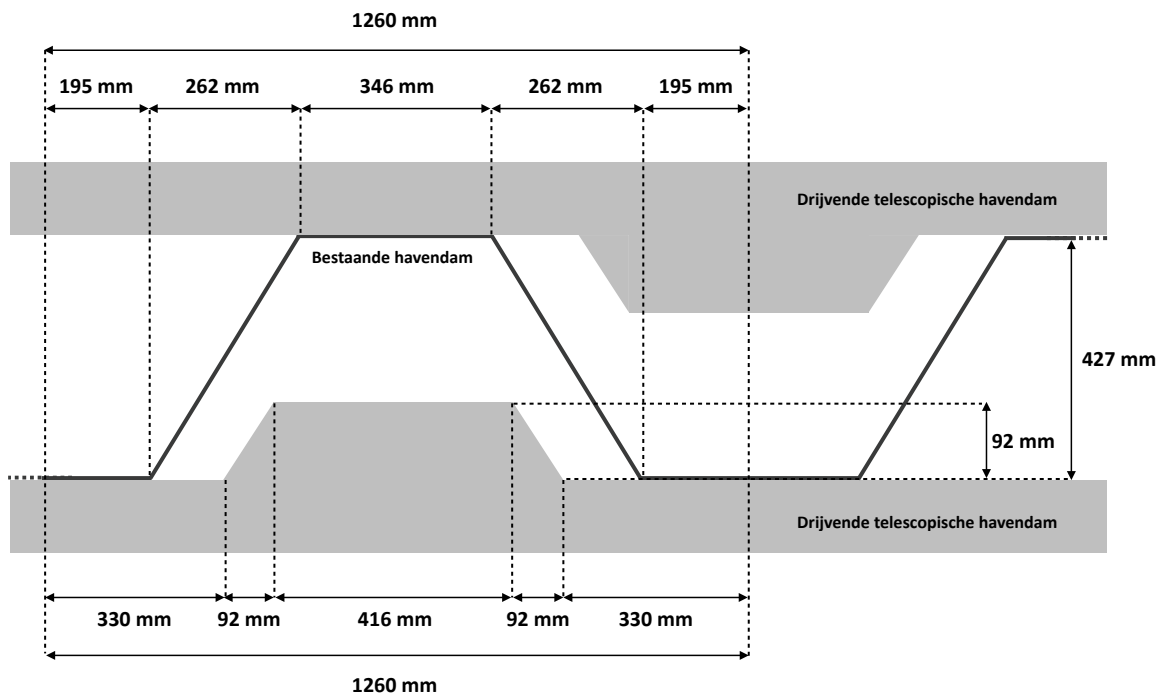
Wanneer de waterstand met deze hoogte stijgt wordt de statische wrijvingskracht overwonnen.

Bijlage E, Definitief ontwerp

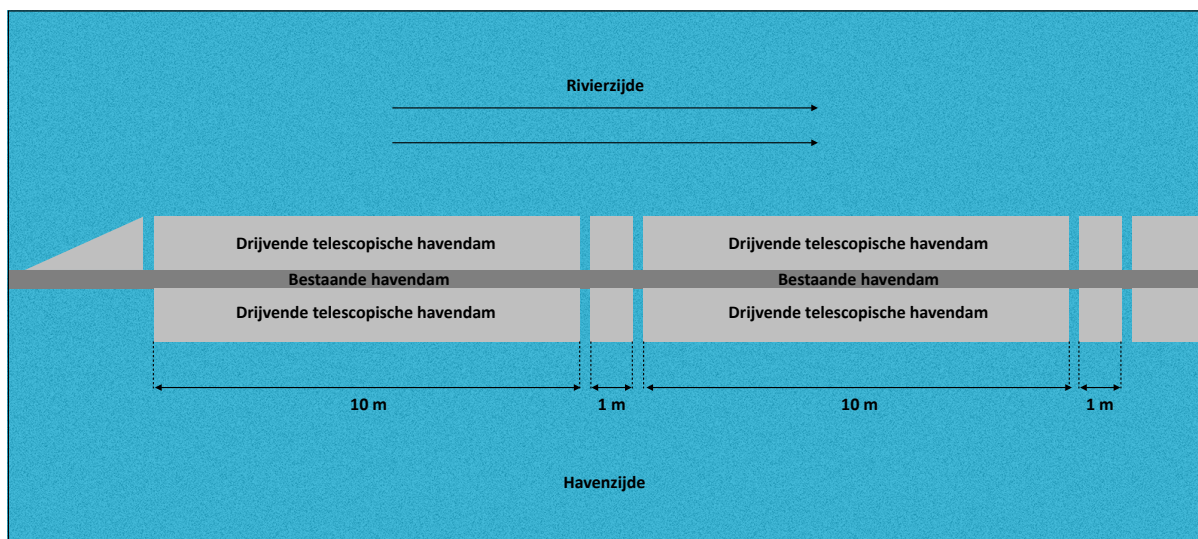
Figuur E 1, Zijaanzicht definitief ontwerp in zijn laagste stand.



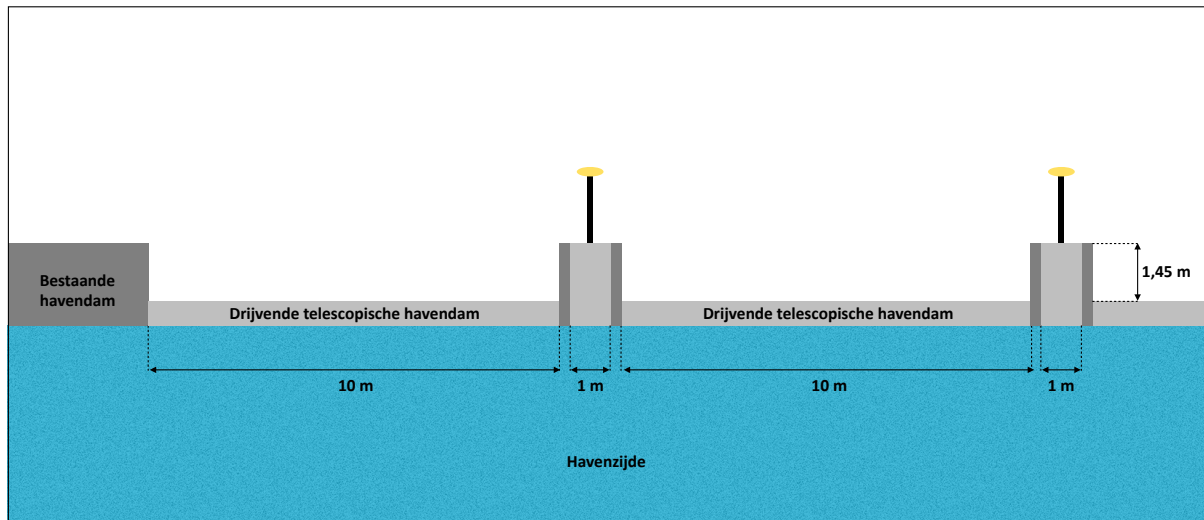
Figuur E 2, Zijaanzicht definitief ontwerp in zijn hoogste stand.



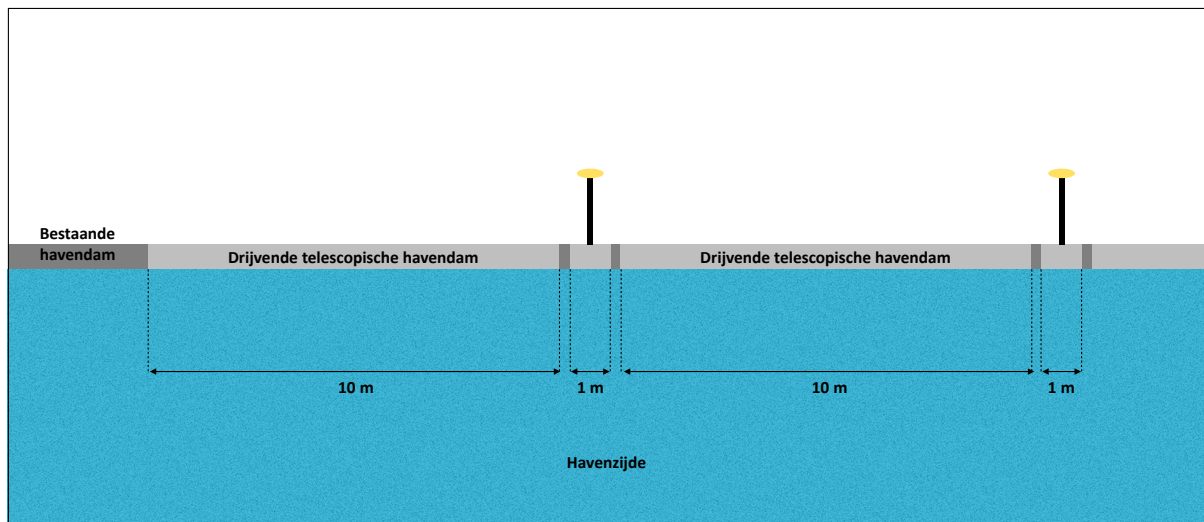
Figuur E 3, Bovenaanzicht verbinding definitief ontwerp met bestaande havendam.



Figuur E 4, Bovenaanzicht definitief ontwerp met tussenschotten voor bakens.



Figuur E 5, Zijaanzicht definitief ontwerp in zijn laagste stand met tussenschotten voor bakens.



Figuur E 6, Zijaanzicht definitief ontwerp in zijn hoogste stand met tussenschotten voor bakens.