



Hanzehogeschool Groningen
University of Applied Sciences



‘Slimme stormvloedkering Holwerd aan Zee’

Afstudeeronderzoek Bachelor Civiele techniek,

Specialisatie constructief ontwerp

Onderzoeksverslag

Tim Kroon
291347

Slimme stormvloedkering Holwerd aan Zee

**Onderzoek een slimme stormvloedkering die bijdraagt aan het oplossen van
het slibprobleem bij Holwerd**

**Afstudeeronderzoek Bachelor Civiele techniek,
Specialisatie constructief ontwerp**

Onderzoeksverslag

Auteur	: Tim Kroon
Studentnummer	: 291347
Onderwijsinstelling	: Hanzehogeschool Groningen Academie voor Architectuur, Bouwkunde en Civiele techniek
Afstudeerrichting	: Constructief ontwerp
Afstudeerdocent	: F. de Boer
Afstudeerlezer	: D. Ernten
Opdrachtgever	: J.P. Postma via Kenniscentrum Noorderruimte
Externe opdrachtgever	: Projectgroep Holwerd aan Zee
Afstudeerbegeleider	: J.P. Postma
Versie	: 1
Documentdatum	: 31-5-2016
Status	: Definitief

Voorwoord

Voor u ligt de definitieve versie van 'Slimme stormvloedkering Holwerd aan Zee'. In dit onderzoek wordt ingegaan op de methode van het spoelmeer, het type constructie die tussen de Waddenzee en het spoelmeer moet komen en het dimensioneren van de constructie deur. Dit onderzoek is opgesteld in samenwerking met het Kenniscentrum Noorderruimte en de projectgroep Holwerd aan Zee (HaZ).

Bij het Kenniscentrum Noorderruimte zijn we met een team die aan Holwerd aan Zee werken. Dit team bestaat uit 4 specialisten die op hun eigen gebied onderzoek doen voor HaZ. Er wordt gekeken naar de juridische zaken rondom de aanleg van de geul naast de pier bij Holwerd 'Juridisch praktijkonderzoek Holwerd aan Zee' (Jasper van den Burg, 2016). Naar de morfologie in de geul en spoelmeer en de werking van luchtinjectie op slib door Rindert Keulen. Tot slot is Emiel Kant bezig met een onderzoek naar een 'leegstaand gebouw' in Holwerd met als doel om te kijken wat de mogelijkheden zijn voor dit gebouw.

De samenwerking heeft voordelen met zich meegebracht waarvan ik Jasper, Rindert en Emiel erg dankbaar ben. Naast de samenwerking geeft het project HaZ mogelijkheden tot verder onderzoek. Dit heeft ervoor gezorgd dat enkele vragen zijn blijven liggen vanuit mijn onderzoek. De volgende student die met het HaZ verder gaat kan deze vragen oppakken. Wat als resultaat heeft dat elk onderzoek steeds verder uitgewerkt kan worden en steeds meer antwoorden geeft op vragen van HaZ. Wat kan leiden tot meer kennis voor Holwerd aan Zee.

Ik wens u veel leesplezier.

Samenvatting

Het project Holwerd aan Zee is in 2013 begonnen met vier initiatiefnemers. Met het aanleggen van een spoelmeer is het doel om de krimp in het gebied te beperken en de geul slibvrij te maken door het spoelend effect van het meer. In dit onderzoek wordt ingegaan op van het spoelmeer en de mogelijke kering die het effect van het spoelmeer zou kunnen vergroten.

Het meer zorgt voor extra capaciteit aan water dat door de geul gaat. Dit heeft als effect dat het slib mee terug naar zee genomen wordt. Wanneer het water in het spoelmeer op het moment van vloed enkele uren wordt vastgehouden, wordt er een groter verval gecreëerd. Dit verval zorgt voor een groter effect van het spoelmeer dit kan echter in verloop van tijd afnemen. Het verzanden van de geul en het dichtslibben van het meer zal het spoelmeffect storeren.

Wanneer er gebruik gemaakt gaat worden van gestuurde sedimentatie kan het dichtslibben tegen gegaan worden. Gestuurde sedimentatie betekent dat het slib op de plekken waarvoor het bestemd is terecht komt. Door de stroomsnelheid van het water te verlagen zal het slib sedimenteren. De stroomsnelheid kan verlaagd worden door de breedte en diepte van de geul te vergroten.

Wanneer het slib gesedimenteerd is, kan het tijdens het spoelen in het oppervlaktewater gebracht worden door middel van luchtinjectie. Dit wordt gedaan door leidingen onder het slib aan te brengen waar de lucht naar buiten geblazen kan worden. De lucht neemt de slibfractie mee naar boven in het oppervlaktewater. Dit zorgt ervoor dat het slib al vermengt is met het water wat naar zee gaat. Het effect van het spoelmeer wordt daarmee verhoogt.

Het water moet vastgehouden kunnen worden in de waterkering. Omdat de kering aan zee staat moet hij ook in staat zijn om stormvloeden tegen te kunnen houden. Dit betekent dat de kering van beide zijden water moet kunnen keren. Hier zijn niet alle constructies toe in staat in. Met behulp van enkele randvoorwaarden uit de omgeving en eisen voor de stormvloedkering, is een selectie gemaakt van mogelijke stormvloedkeringen. Hierna is een multicriteria-analyse over de overgebleven stormvloedkeringen uitgevoerd. Hierin kwam de opdrijvende deur als beste naar voren bij een smalle opening van 6.6 meter. Wanneer er een grote opening gerealiseerd wordt, gaat de voorkeur uit naar een balg.

Bij het ontwerp voor de mogelijke constructie zijn enkele faalmechanismes bekeken: sterkte, stabiliteit en piping. De gevolgen hiervan kunnen groot zijn. Om dit te voorkomen zijn goede berekeningen nodig tijdens de dimensionering, op staal funderen en na zetting moet er nog een kleilaag over blijven van één meter dik.

Bij het dimensioneren van de deur zijn drie belastingen belangrijk. De waterspanning, golfbelasting en de aanvaarbelasting. Er zijn standaarden voor de waterspanning en de golfbelasting, deze zijn er echter niet voor de aanvaarbelasting. Voor de aanvaarbelasting moet er gekeken worden naar de gevolgschade die in het achterland kan ontstaan.

Door de belasting zo op de deur te plaatsen zodat de maximale waarden werden behaald. Met deze maximale waarden zijn de hoofd- en dwarsliggers berekend. Voor de dwarsliggers is een HEA 300 profiel en voor de hoofdliggers een HEA650 profiel. Hier kan nog wel een optimalisatieslag in behaald worden dit paste echter niet in de scope.

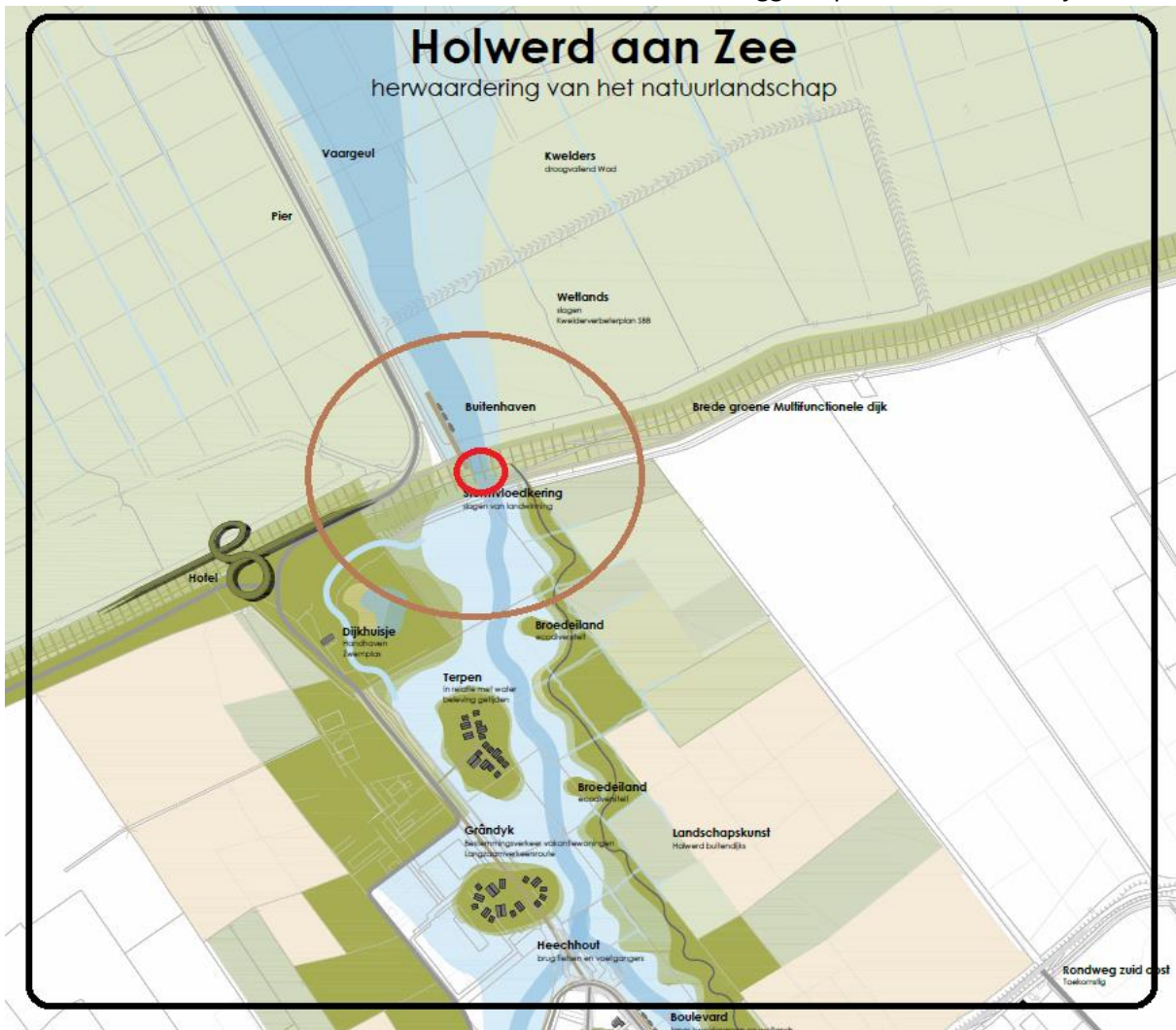
Als laatste wordt het gebruik van composiet bekeken voor HaZ. Composiet is een materiaalsoort dat bestaat uit meerdere materiaalsoorten die samen sterker zijn. Het maken van composietenkunstwerken zit nog in zijn ontwikkelfase. Op dit moment wordt het acht keer zo sterk gemaakt om de stabiliteit van de constructie te garanderen.

Leeswijzer

De leeswijzer is opgezet omdat het rapport verschillende delen bevat. Om duidelijk te maken waar de hoofdstukken over gaan zijn deze in verschillende delen opgesplitst.

- Dit deel heeft betrekking op de werking van het spoelmeer. Hier kunt u bij verwachten dat het gehele plaatje bij Holwerd aan Zee bekeken wordt (zwarte omranding).
- Dit deel gaat over de constructie mogelijkheden die er zijn voor Holwerd aan Zee. Het gebied wat hierbij betrokken wordt is rondom de stormvloedkering (bruine cirkel).
- In dit deel wordt ingegaan op de belastingen die op de constructies werken. Hierbij wordt er alleen specifiek gekeken naar welke faalmechanismes daarbij kunnen ontstaan en welke dimensionering de deur krijgt
- In dit deel wordt de het materiaal composiet aan de orde gebracht en gekeken of dit gebruikt kan worden bij HaZ.

De reden dat het rapport zo is ingedeeld is de complexiteit van het project en de daaruit voortvloeiende noodzaak om vanuit een brede blik de focus te leggen op het onderzoeksobject.



Figuur 1: Gebieden die behandeld worden
Bron: ADEMA ARCHITECTEN

Inhoudsopgave

Voorwoord	1
Samenvatting.....	2
Leeswijzer	3
1. Inleiding	6
1.1 Holwerd aan Zee.....	6
1.2 Krimp	7
1.3 Vaargeulproblematiek	8
1.4 Onderzoeksvraag en afbakening	9
2. Het onderzoek	10
2.1 Methode van onderzoek	10
2.2 Uitgevoerde acties.....	10
3. Werking spoelmeer	12
4. Kans op dichtslibben van het spoelmeer	14
4.1. Het dichtslibproces.....	14
4.2. Gesteuurde sedimentatie.....	15
5. Waterkering Holwerd aan Zee	18
5.1 Randvoorwaarden en kansen uit de omgeving	18
5.2 Eisen voor de veiligheid.....	19
5.3 Waterkerende constructies.....	21
5.3.1. Waterkeringen.....	21
5.3.2. Eerste selectie	21
5.3.3. Tweede selectie	22
5.3.4. Multi criteria analyse	22
5.4. Advies	24
6. Ontwerp stormvloedkering	26
6.1. Welke faalmechanismes zijn er bij een stormvloedkering?	26
6.2 Faalmechanisme gerelateerd aan de geadviseerde constructies	27
6.2.1. Balg	27
6.3.2. Opdrijvende deur	29
7. Dimensionering deur	32
7.1. Belastingen op de deur.....	33
7.2 Profielen van de deur	34
8. Welke innovaties zijn er in het gebruik van composiet en kunststof?	36
Bijdrage composiet voor Holwerd aan Zee	40
Bijlage 1: Natura 2000 gebieden Waddenzee	42

Bijlage 2: Civiele werken en economisch gebruik	43
Bijlage 3: eigenschappen type deur/ bewegingsmechanisme	44
Bijlage 4: uitwerking genoemde waterkerende concepten	46
Bijlage 5: Multi criteria analyse	48
Bijlage 3: Faalmechanismes primaire waterkeringen	51
Bijlage 4: Belastingen op een primaire waterkering	54
Bijlage 5: Ontwerp nota	55
Bijlage 6: Belasting berekening	57
Bijlage 7: Belastingcombinaties.....	60
Bijlage 8: Bepalen van de profielen.....	63
Bijlage 9: uitkomsten Techosoft	65
Referenties	66
Bronnen	67

1. Inleiding

1.1 Holwerd aan Zee

Holwerd is een dorp in het noordoosten van de provincie Fryslân dat valt onder de gemeente Dongeradeel. De meeste mensen kennen Holwerd omdat vanaf daar de boot naar Ameland vertrekt. Het is zonde dat de geschiedenis van Holwerd minder bekend is, als vissersdorp had het vele jaren een goede handel door de locatie. In de jaren is er steeds meer land bijgekomen door het aanspoelen van slib en het plaatsen van dijken waardoor de zee verder van Holwerd af kwam te liggen.

Om Holwerd weer aantrekkelijk te maken is er een verandering nodig. Mede doordat er nu problemen zijn als krimp en het dichtslibben van de geul richting Ameland is er een oplossing bedacht die beide problemen zou kunnen verzachten. Door het aanleggen van een spoelmeer zou er meer recreatie kunnen ontstaan bij Holwerd en zou het slib uit de geulen gespoeld kunnen worden.



*Figuur 2: Toekomstige illustratie HaZ
Bron: HaZ*

Hessel Hiddema, Theo Broersma, Marco Verbeek en Jan Zijlstra zijn in september 2013 begonnen met het opzetten van Holwerd aan Zee. Zij hebben in anderhalf jaar tijd veel werk verricht met het opstellen van de eerste plannen. Hieruit is het idee van een spoelmeer naar voren gekomen die aan beide problemen in Holwerd een mogelijkheid kan bieden. Gedurende deze periode hebben steeds meer organisaties zich bij Holwerd aan Zee aangesloten om de mogelijkheden te onderzoeken.

1.2 Krimp

Krimp is niet alleen het verschijnsel dat mensen vertrekken richting de grote steden. De personen die vertrekken zijn jonge gezinnen of kinderen die gaan studeren in grote steden, die er later voor kiezen om niet terug te keren. Dit zorgt voor leegstaande huizen en de mensen die willen verhuizen krijgen hun huis niet verkocht omdat er geen nieuwe bewoners naar het dorp trekken. Voorzieningen in het dorp nemen af doordat het niet rendabel meer is, wat een aantasting van de leefbaarheid is in deze regio.

In het "Aanvalsplan Krimp Holwerd" van het SEV uit 2010 wordt het bovenstaande met feiten onderbouwd. Een conclusie uit dit rapport is:

"In het nulalternatief zet de bevolkingskrimp van Holwerd onverminderd door: er wordt uitgegaan van een afname van 30% tot het jaar 2030, oftewel een daling van het aantal inwoners van de huidige 1.620 personen tot circa 1.150 personen."

Met 'nulalternatief' bedoeld men wanneer er niet in Holwerd wordt ingrepen zullen dit de gevolgen zijn. De kwaliteitswaarde van Holwerd neemt af wanneer het inwoners aantal blijft dalen. In figuur 2 staat beschreven welke gevolgen dat heeft voor de waarde van Holwerd.

Gevolgen nulalternatief	Effect	Netto contante waarde
Verandering fysieke kwaliteit woningen	Geen verandering	0
Leegstand (gederfde huurwaarde)	150 leegstaande woningen	-/- € 14,5 mln
Ruimtelijke kwaliteit	Waardedaling van niet-leegstaande woningen (0,5% per jaar)	-/- € 5,2 mln
Gederfde toeristische bestedingen	5.000 minder bezoekers per jaar	-/- € 0,6 mln
Afname bestedingen bewoners Holwerd	150 huishoudens doen geen boodschappen meer in Holwerd	-/- € 3,0 mln
Totaal		-/- € 23,4 mln

Figuur 3: Gevolgen nulalternatief voor de waarde van Holwerd
 Bron: SEV, 2010

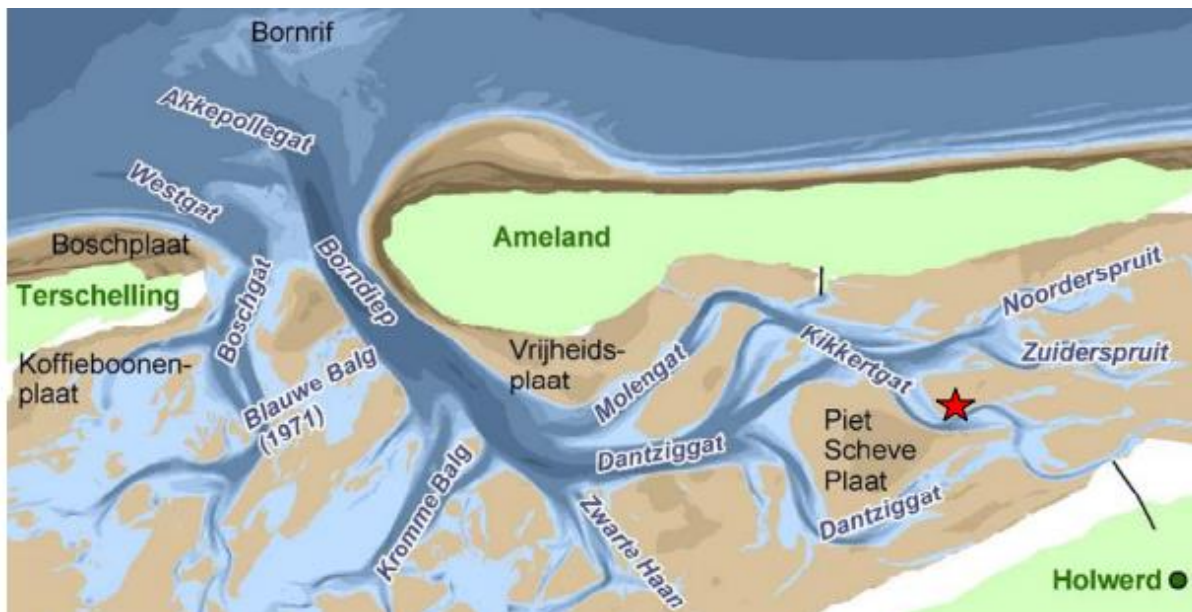
Wanneer er geen actie ondernomen wordt voor Holwerd zal er een ruimtelijke kwaliteitswaarde van rond de € 23,4 miljoen verloren gaan. Dit is veel geld voor een klein dorp met een mooie geschiedenis, ingrijpen lijkt hier dus noodzakelijk om verpaupering en leegstand tegen te gaan.

1.3 Vaargeulproblematiek

Naast krimp heeft Holwerd ook te maken met de veerboot richting Ameland. De veerboot richting Ameland vertrekt vanaf de pier van Holwerd. Het probleem is hier dat de geulen waar de veerboot doorheen vaart constant dichtslibben. In het rapport "Alternatieven voor het baggeren in het Kikkertgat" (Dros, 2013) staan de oorzaken van het dichtslibben beschreven en de verwachtingen voor het te baggeren volume. Tussen 2008 en 2028 zal het te baggeren volume met honderdduizend kuub toenemen. De kosten voor al het baggeren worden volgens Wittenveen en Bos geschat tussen de 27,6 en 134,34 miljoen euro. Deze waarden zijn te vinden in "De maatschappelijke kosten en baten Holwerd aan Zee" (Wittenveen en Bos, 2015).

Dros draagt als voornaamste redenen aan voor het dichtslibben van het Kikkertgat:

- Meanderen van de geulen Kikkertgat en Dantziggat
- Westwaartse verplaatsing van het wantij onder Ameland (wantij van het Zeegat van Ameland en het Pinkegat)
- Sedimentatie op de aangrenzende wadplaten en kwelders
- Scheiding van eb en vloed bij het eb- en vloodschaar



Figuur 4 overzichtskartaal Zeegat van Ameland

Bron: Steijn, R. (2005): Huidige en toekomstige sedimentatie in het Kikkertgat

Volgens het rapport 'Spoelmeer Holwerd aan Zee' (Prof. Dr.ir. P. Vellinga, juli 2015) kan op een groot deel van de baggeractiviteiten bespaard worden door de aanleg van het spoelmeer. Met het geld dat bespaard wordt door de werking van het spoelmeer, kan het project HaZ mede gefinancierd worden.

1.4 Onderzoeksvraag en afbakening

Voorafgaand aan dit rapport is een projectplan geschreven waarin de vraagstelling en de afbakening van dit onderzoek bepaald is. Gedurende dit onderzoek zijn er enkele aanpassingen geweest in de formulering van sommige vragen. Dit is gebeurd om meer verband tussen de deelvragen te brengen.

De hoofdvraag voor dit rapport was:

“Welke mogelijke concepten voor waterkeringen kunnen toegepast worden bij Holwerd aan Zee, welke risico’s zijn er bij waterkeringen en wat zijn de veranderingen wanneer je de constructie in composiet construeert?”

Dit is een hele mond vol vandaar dat de titel van dit onderzoek gemakkelijker geformuleerd is:
“Slimme stormvloedkering Holwerd aan Zee”.

De deelvragen die opgesteld zijn, zijn bedoeld om meer inzicht te krijgen in wat nodig is bij het ontwerpen van een stormvloedkering.

“Welke methodes/concepten kunnen toegepast worden in Holwerd?”

Bij het opstellen van deze vraag was de gedachte om te kijken wat voor type stormvloedkeringen mogelijk zijn voor Holwerd aan Zee. Hier kan tegelijkertijd voldaan worden aan de voorwaarde van de opdrachtgever om te kijken of het mogelijk is om een opening van 100 meter in de dijk te creëren. Doormiddel van een mogelijke stormvloedkering op eisen te selecteren zijn er enkele overgebleven waar een multicriteria-analyse van gemaakt is. Hieruit zijn mogelijkheden voor Holwerd aan Zee naar voren gekomen.

“Welke innovaties zijn er in het gebruik van composiet en kunststof?”

Composiet is een nieuw constructiemateriaal waar nog onderzoek naar gedaan kan worden. Met het opstellen van deze vraag was de bedoeling om te kijken of Holwerd aan Zee hier in de toekomst nog haar voordeel mee kan doen.

“Welke faalmechanismes zijn er bij een stormvloedkering?”

“Welke maatgevende belastingen komen er op de waterkering?”

“Welke dimensionering krijgen de waterkering deuren?”

Deze vragen waren opgesteld om de stappen van het ontwerpen van een stormvloedkering in beeld te brengen. De faalmechanismes van een stormvloedkering zijn afhankelijk van het type constructie dat gebruikt wordt. Daarom zijn er in dit onderzoek twee type constructies uitgewerkt voor de faalmechanismes. Hierin is aangegeven waar de verschillen in zitten.

Belastingen op een waterkering kunnen door verschillende oorzaken komen. Bij het ontwerpen van de deuren zijn alleen de belastingen nodig die kracht uitoefenen op de deur. In het rapport staat welke belastingen dit zijn en waarom deze een effect op de deur hebben. Met deze belastingen zal de deur ontworpen worden. Dit zal bij een ontwerpberekening blijven en er zal geen optimalisatie plaatsvinden van de constructie. Dit omdat hier in het tijdsbestek van het onderzoek geen extra ruimte voor is om dit te realiseren.

2. Het onderzoek

Onderzoek doen bij het Kenniscentrum Noorderruimte brengt meerdere mogelijkheden met zich mee doordat er veel onderzoekers zijn die gespecialiseerd zijn in verschillende onderwerpen. Hier is geprobeerd gebruik van te maken bij het onderzoek 'Slimme stormvloedkering Holwerd aan Zee'.

2.1 Methode van onderzoek

In eerste instantie is het onderzoek vooral gebaseerd op literatuuronderzoek. Er zijn meerdere onderzoeken uitgevoerd naar het spoelmeer. Ook zijn stormvloedkeringen veel beschreven in onderzoeken.

Om een zo volledig mogelijk beeld te geven over de werking van het spoelmeer is er eerst zoveel mogelijk informatie verzameld. Deze informatie is stap voor stap verwerkt, hieruit volgde een duidelijk beeld over het spoelmeer. Door het delen van gegevens en ideeën hebben de plannen van gestuurde sedimentatie vorm gekregen. Dit is een systeem waarbij elke dag weer iets wordt veranderd en verbeterd.

De faalmechanisme en maatgevende belastingen die voor het ontwerpen van een stormvloedkering van belang zijn, staan beschreven in boeken. Hier zijn verschillende bronnen voor gebruikt om uiteindelijk tot het gekomen resultaat te leiden.

Voor het gebruik maken van composiet zijn veel artikelen verzameld en is er enkele keren met een expert gesproken. Hier werd duidelijk dat mijn onderzoek naar composiet te hoog gegrepen was en voor het tijdsbestek het niet mogelijk was. Om toch nog zo veel mogelijk te weten te komen over composiet is er een bezoek geweest aan Fibercore-Europe in Rotterdam. Dit is het bedrijf dat op dit moment het meeste onderzoek uitvoert naar composiet en zelf ook bruggen bouwt met dit materiaal. Veel nieuwe informatie werd hier echter niet gewonnen en dat wat wel nieuw was moet geheim worden gehouden.

2.2 Uitgevoerde acties

De uitgevoerde acties in dit onderzoek zijn:

- Literatuuronderzoek
- Contact met experts
- Bedrijfsbezoeken
- Berekeningen
- Visualisatie tekeningen

Dit zijn de meest uitgevoerde acties tijdens dit afstudeeronderzoek.

3. Werking spoelmeer

Om de resultaten en de uitwerkingen in het rapport te verduidelijken zal eerst de werking van het spoelmeer uitgelegd worden.

In eerste instantie is het idee van de initiatiefnemers om Holwerd weer in contact te brengen met de Waddenzee. Dit zal gebeuren via getijdenbekken in het binnendijkse gebied. Het aanleggen van het getijdenbekken zal verschillende effecten hebben; economisch, ecologisch en voor het spoelen van de vaargeul richting Ameland. Hieruit volgde het “spoelmeer” dat zijn naam verkreeg uit het effect dat het op de geul heeft.

Een getijdenbekken is een stuk land wat vol en leeg loopt met water door de werking van eb en vloed. Door het aanbrengen van het getijdenbekken binnendijs zal dit voor meer water zorgen dat door de geul stroomt. De extra capaciteit die het spoelmeer geeft zal een positief effect hebben op het slibprobleem in de geul.

Door het water nog 2 uur na vloed vast te houden zal er nog een extra positief effect zijn op de geul ‘Spoelmeer Holwerd aan Zee’ (Vellinga, 2015). Drie positieve effecten die hierbij bereikt worden zijn:

- Het water dan laag in de geul staat, zodat het spoelwater zo weinig mogelijk over de platen gaat lopen en dus zoveel mogelijk in de vaargeul terechtkomt.
- Het spoelwater dicht bij de bodem gaat lopen en zodoende het meeste kracht op het sediment zal uitoefenen.
- Het watervolume in de vaargeul in die periode minimaal is, zodat de verhoging van de stroomsnelheid in de vaargeul door het spoelwater maximaal is.

Om de werking van het spoelmeer zo optimaal mogelijk te maken dient er een goed toepasbare stormvloedkering te zijn die in eerste instantie garant staat voor de veiligheid van Holwerd.



*Figuur 5: Toekomstige illustratie HaZ
Bron: HaZ*

4. Kans op dichtslibben van het spoelmeer

4.1. Het dichtslibproces

Naast positieve reacties over Holwerd aan Zee zijn er echter ook enkele sceptische uitlatingen over het project. In deze uitspraken gaat het voornamelijk over het dichtslibben van het spoelmeer en of het spoelmeer het benodigde resultaat kan behalen. Ook hier wordt in het onderzoek 'Spoelmeer Holwerd aan Zee' (Vellinga, 2015) aandacht aan besteed.

In de analyse worden 2 factoren beschreven die ervoor kunnen zorgen dat de geul en spoelmeer dicht slibben. De probleemfactoren die hier volgens het onderzoek ten grondslag aan liggen zijn;

- De vorming van een 'fluid mud' laag tegen de bodem van de vaargeul, dit zorgt voor slibbig baggermateriaal. De vorming hiervan wordt waarschijnlijk gestimuleerd door het terug in de vaargeul brengen van dit baggermateriaal, waardoor deze fractie sinds enige jaren sterk is toegenomen. Mogelijk heeft het gebruik van pumpjets voor de aandrijving van de veerboten ook invloed hierop.
- De afname van de omvang van de geul door morfologische ontwikkelingen (stijging van de wad-bodem), waardoor ook de zandigere baggerfractie toeneemt. Dit is een veel meer geleidelijk proces, dat zich al enige decennia voordoet.

Naast de probleemfactoren is er ook onderzoek verricht naar de positieve effecten die het spoelmeer kan hebben op het slibprobleem in de geul richting Ameland. Het baggervolume wat nu jaarlijks gebaggerd wordt ligt rond de 1.6 miljoen m³. Hierin hebben beide probleemfactoren en gelijk aandeel van 800 duizend m³.

De werking van het spoelmeer zou een positief effect hebben op de hoeveelheid te baggeren water. Het effect van het spoelmeer op de fluid mud fractie zou de baggerhoeveelheden voor 50 tot 100% laten afnemen. Dit is vrij hoog in vergelijking met het zandige fractie, hier zal effect van het spoelmeer maar 10 tot 30% zijn. Dit samen zal ervoor kunnen zorgen dat jaarlijks een derde tot de ruim de helft minder gebaggerd hoeft te worden. Dit zal in de toekomst echter kunnen afnemen door het verzanden van de geul.

Het opvangen van slib

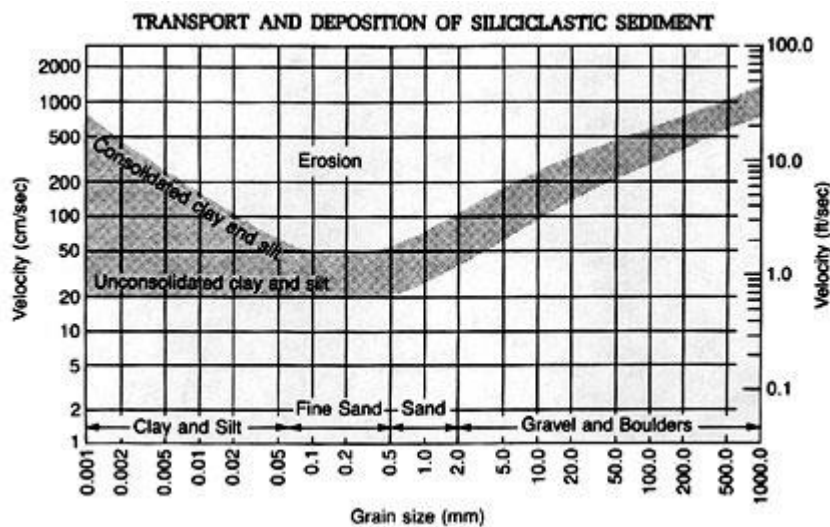
Aangenomen wordt dat het slib wat zich in de geul bij Holwerd bevindt ook naar het spoelmeer zal stromen. Wanneer dit gebeurt zal er de kans bestaan dat het spoelmeer ook dicht gaat slibben en het zijn functie verliest. Dit proces valt nauwelijks te voorkomen waardoor hier rekening mee moet worden gehouden. Hier vanuit-gaande is het proces *gestuurde sedimentatie* bedacht. Met gestuurde sedimentatie wil je het slib geleiden naar waar het gemakkelijk te baggeren valt.

4.2. Gestuurde sedimentatie

Gestuurde sedimentatie is voortgekomen uit het idee om het slib op de juiste plek te laten belanden om vanuit daar weer een afvoeroplossing te kunnen generen. De belangrijkste factoren voor gestuurde sedimentatie zijn:

- Stroomsnelheid
- Korrelgrote van het slib

Hjulström is een onderzoeker die het verband tussen beide factoren heeft onderzocht, van de resultaten heeft hij een diagram gemaakt. In de diagram staat beschreven wanneer fractie erodeert, transporteert en sedimenteert ten gevolge van de stroomsnelheid en korrel fractie.



Figuur 6: Diagram van Hjulström
Bron:

De stroomsnelheid van het water is de enige factor waar invloed op uitgeoefend kan worden. Door de breedte en diepte van het water aan te passen zal de stroomsnelheid ook veranderen. Wanneer er een locatie gekozen is om het slib te laten sedimenteren zal doormiddel van berekeningen uitgevonden moeten worden waar de diepte en breedte van de geul aangepast moet worden.

In de onderstaande afbeeldingen is gevisualiseerd hoe het slib het spoelmeer bereikt en er ook sedimenteert. In de afbeelding is gebruik gemaakt van rechte hoeken, dit zal in werkelijkheid onder een talud lopen.

Vaargeul

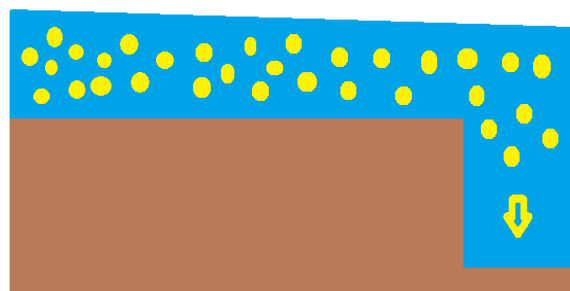
Meer

Vaargeul

Meer



Figuur 7: Instromend sediment



Figuur 8: Sedimentatie

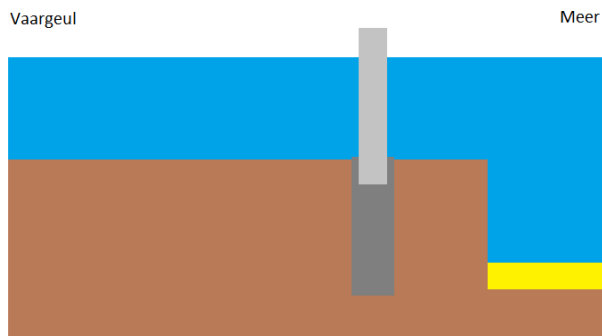
Korrelfracties

Uit het rapport "Alternatieven voor het baggeren in het Kikkertgat" (Dros, 2013) is te lezen dat het bodemmateriaal in het Kikkertgat uit zeer fijn materiaal bestaat. Ook de valsnelheid van de korrelfracties wordt in dit rapport beschreven. De valsnelheid is belang voor de lengte van het gebied waar de stroomsnelheid wordt verlaagt.

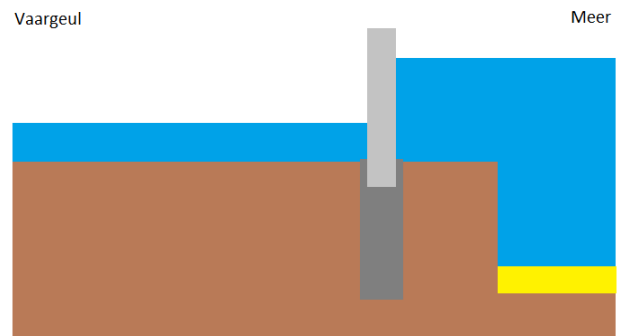
Fluid mud

Fluid mud is een hoog gehalte aan slib wat zich in het water bevindt. Fluid mud is één van de factoren dat het dichtslibben van de geulen veroorzaakt, het kan echter ook worden gebruikt om het spoelmeer weer slibvrij te krijgen. Wanneer het opgaand tij is zal dit ervoor zorgen dat het slib landinwaarts word meegenomen. Bij afgaand tij zal dit effect de tegenovergestelde richting innemen.

Door op het moment van afgaand tij fluid mud te creëren zal logischerwijs meer slib worden afgevoerd. Om het effect van het spoelmeer te vergroten zou er een kering geplaatst moeten worden op het moment dat het hoog water is. Hierdoor zal het waterniveau in het meer nog niet dalen en zal er ook geen stroming plaatsvinden die het slib mee zal nemen.

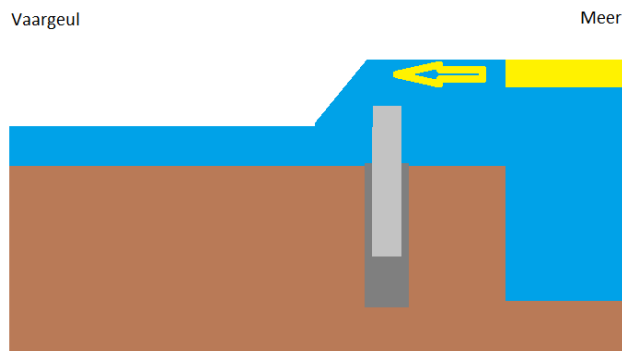


Figuur 9: Gesloten constructie



Figuur 10: Gesloten constructie met verval

Wanneer de waterkering zakt zal het oppervlaktewater als eerst beginnen met stromen. Dit is het moment dat het slib van de bodem in het water vermengt moet zijn. Wanneer het nog op de bodem ligt zal het niet gemakkelijk meegenomen worden door het water en zal er minder slib afgevoerd kunnen worden richting zee. Dit zal het systeem minder efficiënt maken en hier zal ook een oplossing voor gecreëerd moeten worden.



Figuur 11: openen constructie met slib in het oppervlaktewater

De oplossing voor het creëren van fluid mud zou het gebruik van luchtinjectie kunnen zijn onder de laag slib. Door de lucht zal het slib vermengt worden met het water. Waardoor het slib in fluid mud substantie afgevoerd wordt naar zee.

Deze methode is gebaseerd op verschillende onderzoeken waarbij vanuit terughoudende aannames geredeneerd is. Er is daarom een kans dat sommige uitkomsten van de onderzoeken nog een onzekere factor hebben. Om de methode te controleren zal hiernaar extra onderzoek gedaan moeten worden.

Nader onderzoek

Zoals beschreven zijn er nog enkele vragen waar antwoord op gegeven kan worden. Het advies is dan ook om naar enkele vragen nog onderzoek te doen. Dit zal betrekking hebben op:

- Welke slibfractie komt er in het spoelmeer terecht
- Hoeveel luchtdruk nodig is voor de luchtinjectie
- Gestuurde sedimentatie

Als er meer duidelijkheid is over de genoemde punten kan het toepasbaar worden voor het spoelmeer bij Holwerd.

5. Waterkering Holwerd aan Zee

5.1 Randvoorwaarden en kansen uit de omgeving

In dit hoofdstuk zullen de beperkingen en voordelen van de locatie bij Holwerd beschreven worden. Met de beschreven beperkingen is rekening gehouden tijdens het ontwerpen van een duurzame stormvloedkering. Naast de beperkingen zijn er ook enkele voordelen van het gebied waar de stormvloedkering geplaatst kan worden.

Pier

De toekomstige geul komt ten oosten van de pier te liggen. De pier van 1,8 km is de verbinding tussen de locatie waar de veerpont vertrekt en het vaste land.

UNESCO

Nederland heeft in 1992 het Werelderfgoedverdrag geratificeerd. Dit verdrag is het meest bekend als UNESCO waar ondertussen al 191 landen zich bij aan hebben gesloten:

‘De landen die het verdrag hebben geratificeerd, hebben met elkaar afgesproken dat zij zich zullen inzetten voor identificatie, bescherming, behoud, het toegankelijk maken en het overdragen aan komende generaties van die erfgoederen binnen hun landgrenzen die aan de criteria van UNESCO voldoen.’

Ook de Waddenzee staat op deze lijst, hierdoor is het verplicht om tijdens het ontwerpen van de constructie rekening te houden met de Waddenzee.

Natura 2000

Naast dat de Waddenzee op UNESCO werelderfgoed lijst staat, is de Waddenzee ook een Natura 2000 gebied. Met Natura 2000 wilt de Europese Unie de ecologische diversiteit in Europa beschermen. Nederland heeft 162 Natura 2000 gebieden waarvan er zich één boven Holwerd bevindt. Deze gebieden dienen beschermt te worden door middel van beheersplannen. Elke aanpassing in het gebied moet ook gecompenseerd worden in het desbetreffende gebied. Om zo min mogelijk aanpassingen in het Natura 2000 gebied te realiseren is hier rekening mee gehouden tijdens de selectie van de mogelijke stormvloedkering bij Holwerd aan Zee. In bijlage 1 vindt u een kaart waarin de Natura 2000 gebieden staan van de Waddenzee.

Mogelijkheid tot civiele werken en economisch gebruik

Naast de werelderfgoed status en het Natura 2000 gebied Waddenzee bevindt zich er ook een gebied waar gebruik van gemaakt kan worden van civiele werken en economisch gebruik. Dit gebied ligt aan de rechterzijde van de pier en is bedoeld voor kabels en leidingen richting Ameland. Hier kan gebruik van gemaakt worden wanneer de luchtinjectie ook gebruikt moet worden in de geul.

5.2 Eisen voor de veiligheid

In dit hoofdstuk zijn de eisen voor de waterkering weergegeven. De eisen voor de waterkering zijn afgeleid uit de werking van de methode die toegepast gaat worden. Naast deze eisen zal ook gekeken worden of er aan de wensen van de opdrachtgever voldaan kan worden.

Bescherming tegen het zeewater

Het eerste belang is voor Holwerd dat het veilig blijft voor het water. Dit betekent dat er een stormvloedkering moet zijn die stormvloedpeil kan keren. Op dit moment zijn de dijken nog 7,9 meter boven NAP maar er zijn wetsvoorstellen aangenomen waarin staat dat de dijken opgehoogd moeten worden naar 11,5 meter boven NAP.

De waterstand van de zee kan tijdens een storm flink stijgen. Een gemiddelde vloedpeil is 1 meter boven NAP. Maar tijdens een storm kan dit zo met enkele meters stijgen. Om hier meer inzicht in te krijgen zijn de waterpeilen van de grootste stormen in de laatste 50 jaar verzameld. Deze data is verzameld van Rijkswaterstaat. Een kanttekening hierbij is dat bij sommige stormen geen gegevens gevonden konden worden. Zoals de storm in 2006 waar in Delfzijl de hoogste waterstand ooit werd gemeten. In het rapport 'Allerheiligenvloed 2006' (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 30 juni 2007) staat beschreven dat het waterpeil in Delfzijl steeg tot een hoogte van 4,83 meter boven NAP.

Tabel 1: Hoogste waterstanden bij Holwerd

<i>Datum</i>	<i>cm t.o.v. NAP</i>	<i>Richting storm</i>	<i>Locatie hoogwater</i>
3-1-1976	362	WNW (10 bft in Leeuwarden)	Holwerd
20-1-1976	338	W (8 bft in Leeuwarden)	Holwerd
14-12-1973	318	NW (7 bft in Leeuwarden)	Holwerd
2-2-1983	327	WNW (9 bft in Leeuwarden)	Holwerd
6-12-2013	343	NW (9 bft in Lauwersoog)	Holwerd
22-10-2014	315	NNW (8 bft in Lauwersoog)	Holwerd
26-2-1990	338	WZW (9 bft in Leeuwarden)	Holwerd

In het rapport 'Hydraulische Randvoorwaarden primaire waterkering' (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007) staat beschreven dat de toetsingshoogte van het waterpeil 4,9 meter boven NAP is. Hier moet nog wel een significante golfhoogte van 1,75 meter bij opgenomen worden.

Keren in twee richtingen

Zoals beschreven in de voorgaande hoofdstukken zal het water in het spoelmeer vastgehouden moeten worden om het spoeeffect zo groot mogelijk te maken. Samen met de primaire functie van de waterkering zal dit betekenen dat het water van beide kanten gekeerd moet worden.

Minimaal verval

Bij het keren van het water ontstaat er een verschil in waterhoogtes aan beide zijden. Elk type waterkering verschilt in kracht en daarom kunnen sommige waterkeringen niet een dergelijk verval opvangen. In het geval bij HaZ wordt maximaal verval gecreëerd bij een storm en een laagwaterstand in het spoelmeer. Met een laagwaterstand van – 1 meter NAP en een toetsingspeil van 4,9 meter zal dit een verval van 6 meter creëren.

Grote van de waterkering

Rekening houdend met de wetten omtrent de Natura 2000 en de werelderfgoed status is er voorkeur gegeven aan een kleinschalige waterkering. Wanneer er een grote stormvloedkering aangelegd wordt dat permanent in het Natura 2000 gebied komt te liggen, zal daar eventueel voor gecompenseerd moeten worden. Deze compensaties zullen extra geld kosten waardoor het niet voordelig is om voor een waterkering te kiezen die veel ruimte in beslag neemt.

Staande mast route

Recreatie is voor Holwerd een speerpunt bij het realiseren van HaZ. Wanneer er een opening in de dijk komt zal daar ook pleziervaart doorheen willen die kunnen overnachten in Holwerd. Hiervoor is het wel van belang dat er een waterkering gekozen wordt waar het mogelijk is om met een staande mast doorheen te varen.

Opening van 100 meter

Naast enkele eisen waar de waterkering aan moet voldoen was er ook nog een wens van de opdrachtgever of de opening in de dijk niet groter kon zijn dan de geul. 100 meter zou fantastisch zijn voor het zicht vanaf Holwerd. Dit zou betekenen dat er vanaf Holwerd over zee gekeken kan worden.

5.3 Waterkerende constructies

Om aan te duiden hoe de keuze gemaakt is voor de mogelijke type waterkering bij HaZ zal het proces in stappen behandeld worden. In eerste instantie zijn alle type waterkeringen verzameld met daarbij hun eigenschappen. Hieruit volgend zijn twee selecties uitgevoerd met betrekking tot de eisen die in hoofdstuk 5.2 zijn opgesteld. Met de overgebleven waterkeringen is een multicriteria-analyse uitgevoerd en daaruit volgde de onderstaande resultaten in paragraaf 5.3.4.

5.3.1. Waterkeringen

In het rapport Multifunctionele beweegbare waterkeringen (projectgroep afsluitbaar open Rijnmond, 2010) staan vele waterkeringen beschreven met daarbij hun eigenschappen. De zestien waterkeringen die hier benoemd staan zijn gebruikt voor dit rapport. In het rapport staan ook de eigenschappen weergegeven in twee tabellen. Deze tabellen zijn te vinden in bijlage 2.

5.3.2. Eerste selectie

De eerste selectie wordt gemaakt naar aanleiding van de eis dat de waterkering van beide zijde moet kunnen keren. In de tabellen met eigenschappen staat ook een kopje met 'Twee richtingen keren'. Wanneer er ja of mogelijk in de tabellen staat dan kan de waterkering opgenomen worden voor de volgende selectie.

Wanneer de kering niet in staat is om van beide zijde te keren gaat de werking van het spoelmeer teniet. Hierom is gekozen om van het keren in twee richtingen een harde eis te maken en daar type constructies al op af te laten vallen.

De overgebleven type constructies zijn:

- sectordeur
- balg
- opdrijvende deur
- schotten
- vizier (horizontale as)
- hefdeur
- plofdam
- roldeur

In bijlage 3 staan de overgebleven type constructies beschreven. Dit om meer inzichten te krijgen voor de volgende selectie.

5.3.3. Tweede selectie

Deze selectie heeft te maken met de staande mast route. Beschreven staat dat het voor de recreatie van belang is dat deze boten toch bij Holwerd kunnen komen. Er is hierom gekozen voor een constructies die geen belemmering oplevert voor de hoogte van de mast af te laten vallen. Ook is het geen oplossing om de constructie dan extra hoog te maken. Dit geeft in het gebied rondom Holwerd een onnodige zicht-belemmering.

De overgebleven constructie types zijn dan:

- sectordeur
- balg
- opdrijvende deur
- roldeur

Met de overgebleven type constructies zal een multicriteria-analyse uitgevoerd worden.

5.3.4. Multi criteria analyse

Met de overgebleven 4 typen constructies zal een multicriteria-analyse uitgevoerd worden. Het doel is om de best mogelijke constructie te adviseren voor HaZ. In bijlage 4 is de multicriteria-analyse uitgevoerd en zijn alle afwegingen benoemd.

Opening van 6.6 meter

Op dit moment zijn er plannen voor een smalle opening in de dijk. In het rapport van 'Spoelmeer Holwerd aan Zee' (Vellinga, 2015) staat een breedte van 6,6 meter benoemd. Hier is de multicriteria-analyse op gebaseerd. Daaruit volgt dat de opdrijvende deur de voordeligste constructie is.

Tabel 2: Multi criteria analyse, opening 6,6 meter

Vragen/concepten	Sectordeur	Balg	Opdrijvende deur	Roldeur
Breedte constructie 5	15-40	20-120	5-50	10-60
Verval constructie3	2	6	2	6
Schutsluis functie4	Mogelijk	Mogelijk	Ja	Mogelijk
Zichtbaarheid constructie4	Gemiddeld	Laag	Laag	Gemiddeld
Faalkans constructie3	Groot	Gemiddeld	Gemiddeld	Groot
Hoeveelheid onderhoud 2	Groot	Laag	Groot	Groot
Toegevoegde waarde voor het slibprobleem1	Nee	Mogelijk	Nee	Nee
Totaal	35	48	50	41

Opening van ongeveer 100 meter

Een grote opening in de dijk neemt extra risico's met zich mee. De faalkans van de constructie wordt groter wanneer er meerdere onderdelen met elkaar moeten samenwerken om een constructie te vormen. Om toch een beeld te schetsen welke waterkering er zou moeten komen wanneer de opening in de dijk rond de 100 meter is, wordt de balg gebruikt. Dit komt voort uit de multicriteria-analyse bij een breedte van 100 meter.

Uitkomsten voor een opening van ongeveer 100 meter:

Tabel 3: Multi criteria analyse, opening ongeveer 100 meter

Vragen/concepten	Sectordeur	Balg	Opdrijvende deur	Roldeur
Breedte constructie	15-40	20-120	5-50	10-60
Verval constructie	2	6	2	6
Schutsluis functie	Mogelijk	Mogelijk	Mogelijk	Ja
Zichtbaarheid constructie	Gemiddeld	Laag	Laag	Gemiddeld
Faalkans constructie	Groot	Gemiddeld	Gemiddeld	Groot
Hoeveelheid onderhoud	Groot	Laag	Groot	Groot
Toegevoegde waarde voor het slibprobleem	Nee	Mogelijk	Nee	Nee
Totaal	30	58	41	41



Figuur 12: Balg Ramspol

Bron: CATALY PARTNERS, Grootste balgstuw houdt het droog

5.4. Advies

Vanuit alle mogelijke keringen zijn de opdrijvende deur en de balg het beste naar voren gekomen voor HaZ. De opdrijvende deur zal geadviseerd worden voor een smalle opening van 6,6 meter breed. Voor een grote opening zal een balg voordeliger zijn.

Een ontwikkelpunt voor de opdrijvende deur is het onderhoud. Op dit moment hebben de deuren van deze systemen nog veel onderhoud nodig. Een mogelijkheid is om dit van composiet te maken. Dit heeft als voordeel dat het minder snel slijt en dat het sterker is. In hoofdstuk 7 zal verder ingegaan worden op het gebruik van composiet. Een groot voordeel van de opdrijvende deur is dat het omhoog komen van de constructie niet veel tijd in beslag neemt.

Het gebruik van de balg zal anders zijn. Het neemt meer tijd in beslag voordat de balg opgeblazen is, wat ervoor zorgt dat er minder tijd is voor scheepsvaart om door de kering te varen. De hoeveelheid onderhoud aan de constructie is over het algemeen laag. Dit zorgt ervoor dat er kosten bespaard blijven.

De balg zou kunnen bijdragen aan de luchtinjectie die ervoor moet zorgen dat het slib in het oppervlakte water komt. De lucht die in de balg zat kan via leidingen naar de plek van de luchtinjectie geleid worden. Zo krijgt de lucht in de balg meerdere functies en zal de constructie duurzamer gebruikt worden.

Wel zal een grotere opening in de dijk afgeraden worden. Hiermee zal de constructie uit meerdere componenten moeten bestaan. Dit moet op het moment van een grote storm goed met elkaar kunnen samenwerken om het water tegen te houden. De faalkans wanneer een constructie uit meerdere componenten bestaat, wordt groter dan wanneer het een enkel component is.

6. Ontwerp stormvloedkering

In dit hoofdstuk zal het ontwerp van de stormvloedkering beschreven worden. Hier is ook gebruik gemaakt van verschillende stappen om tot het uiteindelijke ontwerp te komen.

Stap 1: Overzicht krijgen in welke faalmechanismes er zijn

Stap 2: In kaart brengen van relevante faalmechanismes voor de balg en opdrijvende deur

Stap 3: Beschrijven hoe de faalmechanisme verholpen kan komen

Het beschrijven hoe de faalmechanismes verholpen kunnen worden zal in dezelfde paragraaf gebeuren als het in kaart brengen van de faalmechanismes.

6.1. Welke faalmechanismes zijn er bij een stormvloedkering?

In het boek 'voorschrift toetsen op veiligheid, Primaire waterkeringen' (Ministerie van Verkeer en Waterstaat,2007) staat aan welke voorwaarden een waterkering moet voldoen. De eisen die beschreven staan in het boek zijn gerelateerd aan de manier hoe de constructies kunnen falen. In hoofdstuk 4.2 is de stabiliteit en sterkte beschreven van een stormvloedkering. Waarbij de beoordeling op drie punten is gebaseerd:

- Stabiliteit van de constructie en grondlichaam;
- Sterkte van (waterkerende) constructieonderdelen;
- Piping en Heave;

Deze punten zijn de hoofdonderdelen waarop een constructie kan falen. In bijlage 4 zijn de drie hoofdonderdelen verder uitgewerkt. Hierin staat beschreven hoe de constructie kan falen en welke oplossingen er voor zijn om dit tegen te gaan.

Niet alle faalmechanismes hebben invloed op het type constructie dat geadviseerd is. Om in te spelen op de geadviseerde constructies worden deze gebruikt als voorbeeld. Ook omdat de type constructies significant anders zijn zullen er verschillende soorten faalmechanismes op werken.

Naast de grote faalmechanismes zijn er ook andere kleinere mechanismes die kunnen zorgen dat de constructie faalt. Dit is niet in het rapport meegenomen omdat de scope daarvoor niet toereikend is. Andere faalmechanismes die voor het falen van de constructie kunnen zorgen zijn onder andere:

- Zwervend vuil dat sluiting van de constructie onmogelijk maakt
- Slib dat slijtage van de constructie verergerd
- Elektronisch falen

6.2 Faalmechanisme gerelateerd aan de geadviseerde constructies

In dit hoofdstuk zullen de grootste risico's beschreven worden aan de voorgedragen constructies. Een balg en een opdrijvende deur zijn verschillende constructie types die verschillend reageren op het opnemen van de krachten. In beide gevallen zijn er mogelijkheden voorgedragen die de problemen op kunnen lossen.

In het vorige hoofdstuk zijn de toets-voorschriften beschreven waar een stormvloedkering op getest wordt. Vanuit deze toets-voorschriften zijn de grootste factoren gehaald die invloed kunnen hebben bij de type constructie.

6.2.1. Balg

De constructie van de balg bevindt zich vooral op de landhoofden en onder water. Bij beide onderdelen van de balg zitten enkele faalmechanismen waar tijdens het ontwerpen van de constructie extra aandacht aan gegeven moet worden. Op de landhoofden zal een constructie staan die ervoor zorgt dat de balg opgeblazen kan worden en daarna ook weer leeg kan lopen. Ook zal hier de verbinding zijn tussen de balg en de desbetreffende dijk. Bij de constructie op de landhoofden zijn dit de extra factoren waar rekening mee gehouden moet worden:

- Macrostabiliteit van het grondlichaam aansluitend op de constructie
- Instabiliteit van het voorland

De constructie onder water zal voornamelijk bestaan uit een betonnen fundering waar het rubber van de balg aan bevestigd zit. Hier zullen andere risico's uit voort komen dan uit het constructie gedeelte op de landhoofden. De risico's waar in het gedeelte onder water rekening mee gehouden moet worden zijn:

- Opdrijvend vermogen
- Schuifspanningen
- Piping

6.2.1.1 Landhoofden

Macrostabiliteit van het grondlichaam aansluitend op de constructie en instabiliteit van het voorland kunnen met elkaar in verband gebracht worden voor het falen van de constructie.



*Figuur 13: Landhoofden bij een balg
Bron: BoxBarrier, Innovatieve Projecten*

Macrostabiliteit van het grondlichaam aansluitend op de constructie

De aansluiting van de balg op de dijk geeft andere krachten op en in de dijk dan die er van oorsprong waren. Wanneer er niet getoetst wordt of de dijk tegen de extra krachten kan, is de kans op afschuiving van de grond mogelijk.

Een goede fundatie is essentieel om de krachtenoverdracht naar de ondergrond te geleiden. Dit kan als resultaat geven dat de krachten van de balg niet de dijkconstructie verstoren waardoor macrostabiliteit ontstaat. Het advies is om de constructie op staal te funderen omdat de fundatie op heipalen in combinatie met piping in verloop van tijd kan verzwakken. De verzakking van de heipalen kan als gevolg hebben dat de gehele constructie verzakt.

Instabiliteit van het voorland

Instabiliteit van het voorland heeft ook te maken met afschuiving. Ditmaal gaat het expliciet om de combinatie van de teen en het voorland van de dijk. De teen en daarmee ook het voorland van de dijk is gevoelig voor afschuiving. Deze gevoeligheid is het gevolg van de drukverschillen op de grond.

Op het moment dat er een constructie op de teen van de dijk wordt geplaatst, zal er verandering optreden in het drukverschil. Deze verandering kan ervoor zorgen dat de teen van de dijk kwetsbaarder wordt voor afschuiving. Om afschuiving tegen te gaan moet ervoor gezorgd worden dat de constructie niet op het oorspronkelijke glijvlak gefundeerd wordt. Wanneer je de funderingsstrook langer maakt zal het glijvlak ook vergroten, een groter glijvlak kan meer krachten opnemen waardoor de teen en het voorland van de dijk stabiel worden.

6.2.1.2. onderwaterconstructie

Naast de landhoofden zit er ook nog een constructie gedeelte onder water. Dit onderdeel bestaat voornamelijk uit beton en is meestal gefundeerd op staal.

Opdrijvend vermogen

Bij een lichte constructie is het risico dat het grondwater de constructie omhoog kan duwen. Mede doordat de balg een lichte constructie is en onder water ligt zal de constructie gevoelig zijn voor opdrijving. Hier wordt opdrijving gezien als een constructie die makkelijker te bewegen is dan wanneer hij zonder water op een zandbed zou liggen.

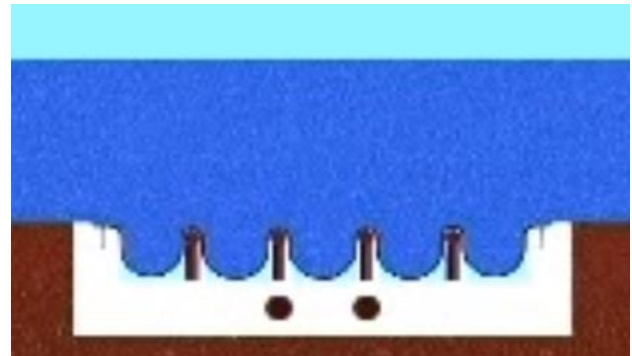
Een oplossing hiervoor zou zijn om de constructie met ankers te funderen die ervoor zorgen dat de constructie op zijn plek blijft liggen.

Schuifspanning

Wanneer de constructie opgeblazen is, zullen er grote krachten op de fundering werken. Deze krachten moeten doorgegeven kunnen worden aan de ondergrond. Dit gebeurt via de schuifspanningen; wanneer de grond niet in staat is om al deze krachten te kunnen opnemen zal de constructie kunnen gaan schuiven.

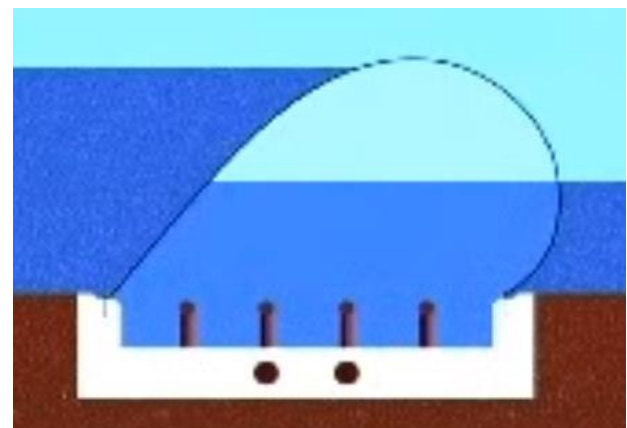
Samengaan met de mogelijkheid op opdrijving zal de balg hier extra gevoelig voor zijn.

Oplossingen hiervoor kunnen zijn om de fundatie te verankeren of op palen te funderen, dit heeft echter ook enkele risico's.



Figuur 14: Balgstuw buiten werking

Bron: Balgstuw, Waterschap Drents Overijsselse Delta



Figuur 15: Opgeblazen balgstuw

Bron: Balgstuw, Waterschap Drents Overijsselse Delta

Piping

Piping is een ondergrondse stroming waardoor er in de ondergrond sommige verzwakkingen kunnen ontstaan. Deze stroming kan ontstaan door een waterhoogteverschil naast een waterkerende constructie. De verzwakkingen in de ondergrond kunnen effect hebben op de fundering van de constructie maar ook op de heipalen die geplaatst zijn.

Een oplossing voor piping is om een ondoorlatende laag klei onder de fundering te leggen. De ondoorlatende laag van klei zorgt ervoor dat er geen waterstromen kunnen ontstaan die de fundatie kan verzwakken. Om de problemen aan de fundering te voorkomen wordt er aanbevolen om een kleilaagdikte van 1 meter te nemen na de zetting voltooit is.

Piping rondom heipalen en ankers kan ook gevolgen hebben op de stabiliteit van de constructie. De palen die voor stabiliteit zorgen van de constructie verliezen hun waarde wanneer de grond om hen heen verzwakt door gevolg van piping. Wanneer een heipaal geen stabiliteit meer heeft vervalt de stabiliteit van de gedragen constructie ook.

Ook bij het toepassen van ankers is het mogelijk dat de grond rondom het verankerde deel verzwakt door piping. Wel is de oplossing van dit probleem gemakkelijker dan bij heipalen. Heipalen dienen onder de constructie te zitten waar piping voorkomt. De verankering van de constructie kan verlengt worden naar een piping-loos gebied. Dit voorkomt verzwakking rondom de verankering en ook het instabiel raken van de constructie.

6.3.2. Opdrijvende deur

De constructie van een opdrijvende deur is anders opgesteld dan een balg. De opdrijvende deur zal uit de grond moeten komen, wat als scherm in de grond zal fungeren. Hierdoor zal de werking van piping minder optreden, er blijven echter bepaalde risico's aan een opdrijvende deur kleven. De risico's waar tijdens het ontwerpen van de constructie extra rekening mee gehouden moet worden zijn:

- Stabiliteit van de grondkerende constructie
- Draagvermogen van de fundering op staal
- Na zetting aan het eind van de toetsperiode is de constructie rondom nog steeds minimaal 1 meter ingebed in klei-/veenlaag

Stabiliteit van de grondkerende constructie

Door een gat in de dijk met een verticale wand dient hier een constructie te komen die ervoor kan zorgen dat de dijk niet afschuift. Dit kan opgelost worden door de wand verder de grond in te plaatsen waardoor hij het afschuivingsgewicht van de grond op kan vangen. Een andere manier is om een wand te maken met een horizontaal vlak dat onder de dijk komt te liggen. Wanneer de hoek tussen de wand en het horizontale gedeelte moment vast wordt gemaakt, zal het gewicht van de dijk ervoor zorgen dat de wand overeind blijft staan.

Draagvermogen van de fundering op staal

Doordat de gehele constructie veel beton bevat zal dit zich gaan uitbetalen in het gewicht van de constructie. Daarom is het van belang dat er een goede fundatie wordt aangebracht bij een opdrijvende deur. Net zoals bij de balg is het gebruik van heipalen niet handig bij een opdrijvende deur. Daarom zal er hier ook gebruik gemaakt moeten worden van een fundering op staal.

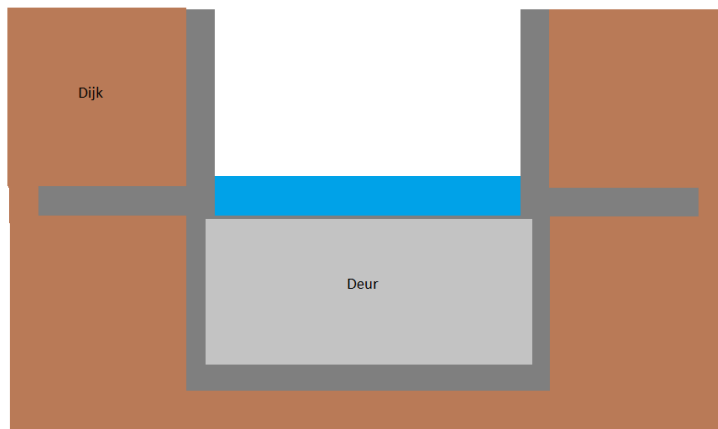
Wanneer het gewicht van de constructie te hoog is voor de ondergrond is het mogelijk om het oppervlak van de fundatie te vergroten. Door het vergroten van het oppervlak zal het gewicht per vierkante meter afnemen.

Na zetting aan het eind van de toetsperiode is de constructie rondom nog steeds minimaal 1 meter ingebed in klei-/veenlaag

Door het hoge gewicht van de constructie is het belangrijk om extra te kijken naar de zetting van de constructie. Ook wat betreft de piping wordt het aanbevolen dat er na zetting van de constructie nog een kleilaag van 1 meter onder de dragende constructie ligt.

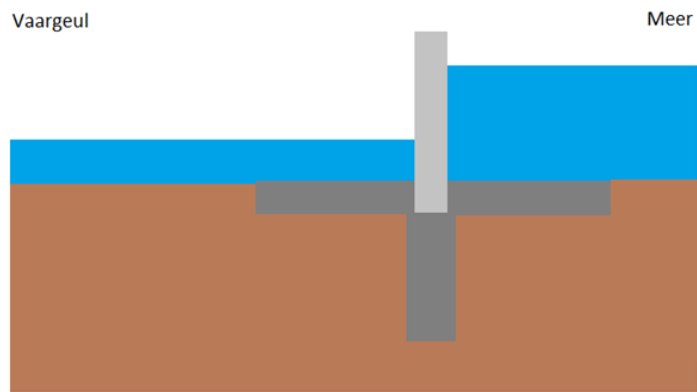
In figuur 16 is te zien dat er twee betonnen vloeren de dijk inlopen. Wanneer deze met een vaste hoek aan de grondkerende wanden zijn bevestigd, zullen zij indien sterk genoeg de wanden overeind houden. Door de druk die de dijk op de vloeren uitoefent zullen de wanden niet bezwijken.

Dwarsdoorsnede



Figuur 16: Vooraanzicht oprijvende deur met vloeren in de dijk m.b.t. stabiliteit van de grondkerende constructie

Voor de stabiliteit in de waterkerende constructie is een soortgelijke methode gebruikt om stabiliteit te garanderen. Hier zijn vloeren gebruikt in het deel in de geul. Wanneer dit ook met vaste hoeken wordt gemaakt, zal de waterkerende constructie niet kunnen bezwijken door gebrek aan stabiliteit. Deze vloeren zijn ook zinvol voor het funderen op staal. Wanneer de constructie te zwaar is voor de grondlaag die daar zit, zal de vloer groter gemaakt moeten worden. Dit brengt met zich mee dat het gewicht per vierkante meter afneemt waardoor het wel mogelijk is om te funderen op staal.



Figuur 17: Vloer toegevoegd voor de stabiliteit van de waterkerende constructie en de fundering op staal

Om stabiliteit te garanderen ten opzichte van piping zal er een kleilaag rondom de constructie moeten zitten. De klei zorgt ervoor dat er geen stroming rondom de constructie komt waardoor hij zijn stabiliteit niet verliest.

7. Dimensionering deur

In het onderzoeksvoorstel staat beschreven dat de deuren van een stormvloedkering berekend zouden worden. Hierbij werd er vanuit gegaan dat de stormvloedkering uit een puntdeur zou bestaan. In het verloop van het onderzoek is gebleken dat een puntdeur het water niet van beide zijde kan keren. Hierdoor is er gekozen om de deur van de opdrijvende deur te dimensioneren.

Belastingen

In het boek 'Voorschrift toetsen op veiligheid primaire waterkeringen' (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007) staan de belastingen beschreven die invloed kunnen hebben op een primaire waterkering. Bij het dimensioneren van een deur zijn maar enkele belastingen benodigd voor de berekening. Bij de veranderlijke belastingen zijn dit:

- Drukverschillen ten gevolge van waterstanden (maatgevende hoogwatersituatie, negatie verval)
- Drukverschillen ten gevolge van windgolven (inclusief eventuele golfklappen)

Naast de veranderlijke belastingen is er ook nog een bijzondere belasting. Deze bijzondere belastingen zijn niet altijd van toepassing bij een waterkering, dit moet echter een waterkering worden waar pleziervaart doorheen moet varen. De kans bestaat daarom dat er een aanvaring is met de stormvloedkering. Vandaar een bijzondere belasting:

- Aanvaringsbelasting

Permanente belastingen zijn niet meegenomen in de dimensionering van de deur. Dit omdat de gehele constructie deze krachten dient op te nemen en niet op de deur van de waterkering werken.

Opening in de dijk

De opening die er in de dijk gerealiseerd moet worden is 6,60 meter breed. De breedte komt voort uit het kennistafel rapport over Holwerd aan zee waarin deze breedte als voorwaarde is genomen. Ook stonden de dieptes erin waaraan de vaargeul moet voldoen om nog scheepvaart toe te kunnen laten bij eb. Dit betekent voor de scheepvaart een diepte van 1.2 meter bij een eb peil van -1,0 meter.

De dijkhoogtes zullen de komende jaren aangepast worden naar een hoogte van 11,5 meter boven NAP. Dit is opgegaan in de Wet op de waterkeringen. Doordat HaZ nog niet in de nabije jaren gerealiseerd wordt, wordt aangenomen dat de dijken rond die tijd al opgehoogd zijn. Hierdoor zal de deur een hoogte hebben van 13,7 meter.

Optimalisatie

In bijlage 5 staat de deur geschematiseerd met vijf hoofdliggers met daartussen tien dwarsliggers. Gekozen is om hiervan de profielen te berekenen. Om de deur optimaal gedimensioneerd te hebben zijn er nog verschillende mogelijkheden. Het veranderen van het aantal hoofd- en dwarsliggers kan hierbij een rol spelen.

7.1. Belastingen op de deur

De verschillende belastingen die op de deur werken kunnen ook nog verschillen in kracht. Door de verschillen in kracht en plaats hoeven de maximale belastingen niet voor het grootste moment te zorgen. In dit hoofdstuk zal ingegaan worden op welke mogelijkheden er zijn om tot de grootste belasting te komen. Daarvoor zullen de belastingen eerst uitgewerkt worden en daarna de mogelijke belastingcombinaties.

Vanuit het vorige hoofdstuk bekend dat dit de drie belastingen zijn die invloed op de deur hebben:

- Waterdruk
- Golfbelasting
- Aanvaringsbelasting

In bijlage 6 zijn de belastingen berekend. Ook zijn hierin de belasting combinaties behandeld. Eerst zijn de krachten op de dwarsliggers berekend en vervolgens de krachten op de hoofdliggers. Dit is gedaan omdat de dwarsliggers hun krachten overdragen op de hoofdliggers. Daarbij zit de grootste druk aan de onderkant van de deur. Daarom zijn de onderste twee lagen van de dwarsliggers berekend.

Maatgevende belastingen dwarsliggers:

Tabel 4: Maatgevende belastingen dwarsliggers

<i>oplegging</i>	<i>Max dwarskracht (kN)</i>	<i>Max moment (kN/m)</i>	<i>Oplegreactie onderzijde (kN)</i>	<i>Oplegreactie bovenzijde (kN)</i>
1.1	48,3	38,6	41,7	48,3
1.2	50	41,8	50	47,4
2.1	57	49,1	57	56
2.2	50	41,8	50	47,4
3	15,4	10,8	15,4	7,7
4	150	242	150	143

Elke combinatie is een ander cijfer in de tabel. Voor de uitwerking van de combinaties wordt u verwezen naar bijlage 7. Vanuit de belastingen die volgen uit de dwarsliggers zijn de belastingen berekend op de hoofdligger. De grootste waarden die hieruit voortkwam zijn gebruikt voor het dimensioneren van de liggers.

Maatgevende belastingen:

Tabel 5: Maatgevende belastingen hoofdliggers

<i>oplegging</i>	<i>Max dwarskracht (kN)</i>	<i>Max moment (kN/m)</i>	<i>Oplegreactie links (kN)</i>	<i>Oplegreactie rechts (kN)</i>
1	118	308	118	118
2	185	530	185	185
3	218	498	218	152
4	689	1161	689	689

7.2 Profielen van de deur

Het bepalen van de profielen staat in bijlage 8. Hier is naar voren gekomen dat de dwarsliggers een HEA 300 profiel krijgen en de hoofdliggers een HEA 600 profiel. Dit komt voort uit de belastingen die in de vorige hoofdstukken bepaald zijn.

Bij het bepalen van de dwarsliggers is de aanvaarbelasting bepalend. Deze zorgt voor het grootste moment in de dwarsliggers de stormvloed was echter bepalend voor de profielering van de hoofdligger. Dit komt doordat de aanvaarbelasting maar op één plek kon plaatsvinden. Door de druk van de stormvloed op de hoofdligger is het uiteindelijke moment hoger dan wanneer de aanvaarbelasting op de hoofdligger wordt geplaatst.

Vermoeiing

Er kan nog worden gekeken naar de vermoeiing van het staal. Door de krachten die constant op het staal werken kan het in verloop van tijd vermoeit raken. Hierdoor kunnen op een gegeven moment de krachten niet meer opgevangen worden waardoor de constructie kan bezwijken.

De vermoeiing van het staal kan wel berekend worden maar door de scope die wordt aangehouden in dit project is het niet mogelijk om dit hierin uit te voeren. Een oplossing voor de vermoeiing kan zijn om de profielen van HEB te maken. Dit is meer bestand tegen vermoeiing en gaat dus langer mee.

Composiet

Een andere optie is om de deur van composiet te maken. In het volgende hoofdstuk zal behandeld worden wat de voor- en nadelen zijn van composiet. De berekeningen met composiet zullen in vervolgonderzoek gedaan moeten worden, hierin kunnen dan de verschillen aangetoond worden met staal.

8. Welke innovaties zijn er in het gebruik van composiet en kunststof?

Composiet is een nieuwe materiaal soort welke gebruikt wordt in de civiele wereld. Bruggen en sluisdeuren zijn voorbeelden van constructies die van composiet gemaakt worden. Composiet als materiaal bestaat al veel langer. Zo werden er al in 1960 auto's gemaakt van composiet. Naast dat het al heel lang bestaat, is er soms ook verwarring over wat composiet is. Zo zijn er verschillende definities in de omloop waardoor er verwarring ontstaat. R.P.L Nijsen heeft in het 'Composieten Basiskennis' (Nijsen, 2015) de definities op een rij gezet en daar een volgende definitie aangegeven. De eerdere definities waren:

- 'combinatie van een sterker en zwakker materiaal'
- 'een materiaal uit verschillende delen samengesteld'
- 'combinatie van twee materialen'

Hier van heeft de heer R.P.L Nijsen een vernieuwde definitie van gemaakt die overkoepelend is voor de vorige definities.

"Een composiet is een materiaalconstructie, bestaande uit minimaal 2 macroscopisch nog te onderscheiden materialen die samenwerken om zo tot een beter resultaat te komen"

Deze definitie zal in dit rapport leidend zijn voor het woord composiet.

Composiet en bio-composiet

Tegenwoordig is er ook onderzoek gaande naar bio-composieten. Bio-composiet is een materiaal van dezelfde structuren en opbouw, er worden alleen andere materiaalsoorten gebruikt waardoor het goed afbreekbaar is. Op dit moment is het lastig om een composietproduct af te breken. Storten is niet meer mogelijk door regelgeving van de EU en het verbranden van composiet is ook lastig. Wanneer we het composiet door de natuur laten afbreken duurt het meer dan vijfhonderd jaar voor dat het afgebroken is. In Nederland produceren we per jaar zo'n 30.000 ton aan composiet afval. Dit kan vergeleken worden met een volle arena van afval.

Verwerken van composiet bestond voorheen nog voornamelijk uit het storten, verbranden en vermalen van het afval. Wanneer het afval vermalen werd, werd het gebruikt als vulling in beton. Hierbij gaat de kwaliteit van het materiaal wel achteruit wat op lange termijn voor zorgt dat de grondstof op raakt. Fiber care & recycling is druk bezig met onderzoek naar het recyclen van composiet. Hierbij is het doel dat de krachten van composiet niet achteruit gaan en dat er geen materiaal verloren gaat.

Dit onderzoek is op laboratoriumniveau geslaagd maar moet nog verder ontwikkeld worden voor grotere hoeveelheden. Tot die tijd is de afbraak van composiet nog niet goed mogelijk. Hiervoor is wel een andere oplossing. Dit is het maken van een bio-composiet, hierbij worden natuurlijke materialen gebruikt die ook weer afbreekbaar zijn met natuurlijke materialen.

Gerelateerde projecten

Om te onderzoeken of composieten kunstwerken ook toegepast kunnen worden bij HaZ zal er gekeken moeten worden naar gerelateerde projecten. In eerste instantie kijkt men naar andere sluisdeuren die zijn geproduceerd in composiet. Naast de sluisdeuren kan er ook gekeken worden naar bruggen. Wanneer het project HaZ door zal gaan komen er ook vernieuwde wegen waar ook bruggen in toegepast moeten worden.

In het Wilhelminakanaal te Tilburg zijn in het begin van 2016 composieten sluisdeuren geplaatst. Deze deuren vormen een wereldprimeur doordat de deuren een waterhoogte verschil van 7,90 meter kunnen keren. De reden dat hier composiet is gebruikt is de lange levensduur van het materiaal en de geringe onderhoud dat het nodig heeft.



*Figuur 18: Composieten sluisdeuren Wilhelminakanaal
Bron: FiverCore Europe, Largest fibre-reinforced polymer lock gates*

Naast de composieten sluisdeuren in Tilburg zijn er ook composieten sluisdeuren in Emmen geplaatst. Deze sluisdeuren hebben een voordeel in het gewicht, de sluisdeuren in Emmen wegen 2,5 ton per deur maar doordat de composieten constructie een drijvend vermogen heeft is de last om de scharnieren van de sluisdeuren maar 200 kilogram. Naast de reductie van het gewicht hebben de sluisdeuren het voordeel dat het minder onderhoudsgevoelig is.



*Figuur 19: Composieten sluisdeuren
Bron: InfraCore inside, Sluisdeuren*

Naast sluisdeuren worden er geregeld bruggen van composiet geplaatst door het hele land. Voor elke brug zijn andere eisen geweest waardoor de brug van composiet gemaakt is.



Visualisatie van het eindresultaat in vogelvlucht (NIO Architecten)



De brug gezien vanaf de weg (NIO Architecten)

Figuur 20: Composieten brugdek

Bron: Royal HaskoningDHV, Bijzondere vormgeving Amersfoortse brug

Door de brug in composiet te construeren werd het dek van de brug smaller. Hierdoor was het mogelijk om de tunnelbak minder diep uit te graven. Door een minder diepe tunnelbak hoefde de tunnel minder lang te worden. Met deze wijziging kon rond de zes ton bespaard worden.

Bij het vervangen van oude bruggen komt men nu vaak in de knoop met de nieuwe richtlijnen van de Eurocode. Hierin zijn de eisen verscherpt en moeten de funderingen van kunstwerken meer gewicht kunnen dragen. Maar omdat composiet een licht materiaal is hoeven de funderingen toch niet aangepast te worden waardoor er veel geld bespaard kan worden.



© HollandLuchtfoto

Figuur 21: Composieten brugdek

Bron: FiberCore Europe

Voor en nadelen van composieten

Over het algemeen heeft het materiaal enkele voor en nadelen. Dit kan veranderen wanneer je het vergelijkt met andere materialen met andere eigenschappen. Ten opzichte van staal is composiet erg licht van gewicht maar zijn de materiaalkosten aan de hoge kant. Ook zijn er lichtere bouwmaterialen maar deze zijn dan weer minder sterk dan composiet.

Voordelen	Nadelen
Gewichtsbesparend	Hoge materiaalkosten
Grote vrijheid in vorm, materiaal en proces	Rekenmethoden soms specialistisch
Eenvoudig te kleuren	Kleur- en glansbehoud niet altijd voorspelbaar
Lichtdoorlatend	Gedrag van details en verbindingen relatief onbekend
Hoge mate van integratie van functies mogelijk	Nabewerken nog niet ver ontwikkeld
Sterkte, stijfheid, thermische- en elektrische weerstand kunnen gemanipuleerd worden	Stijfheid en faalgedrag kunnen ongunstig zijn, gevoelig voor temperatuur, brand, en blikseminslag
Lage totale onderhoudskosten	Hoge investeringskosten
Waterbestendig en bestand tegen veel chemicaliën	Gevoelig voor UV-licht
Gebruik van duurzame materialen mogelijk	Recycling nog niet ver ontwikkeld
Automatisering mogelijk	Soms kapitaalintensieve productiemethoden

*Figuur 22: Voor- en nadelen composietmaterialen
Bron: Composieten Basiskennis, blz 16*

Bijdrage composiet voor Holwerd aan Zee

Composiet kan op verschillende manieren bijdragen voor Holwerd aan Zee. Dit omdat het project nog gerealiseerd moet worden en daarbij meerder bruggen en gebouwen gemaakt moeten worden waarbij er gebruik gemaakt kan worden van composiet.

Een composieten opdrijvende deur

Door de deur van de stormvloedkering van composiet te maken zullen er verschillende dingen veranderen. De grootste verandering zullen zitten in:

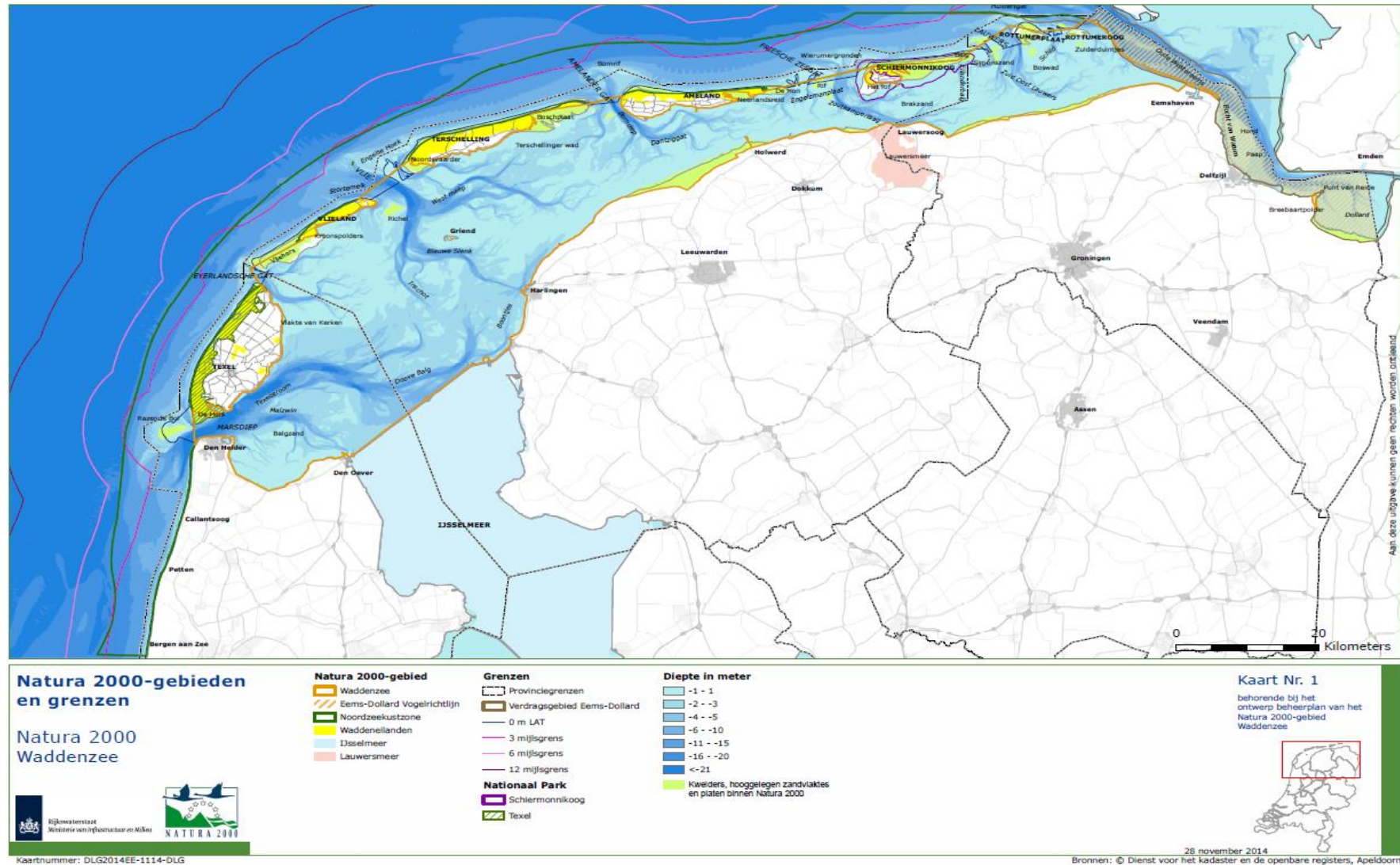
- Gewicht
- Sterkte
- Onderhoud

Het verschil in gewicht tussen composiet en staal is aanzienlijk. Hierdoor is het gemakkelijk om de deur omhoog te bewegen. Hierdoor hoeft er minder energie in de deur gestopt te worden. Dit maakt de gehele constructie duurzamer dan wanneer deze van staal is.

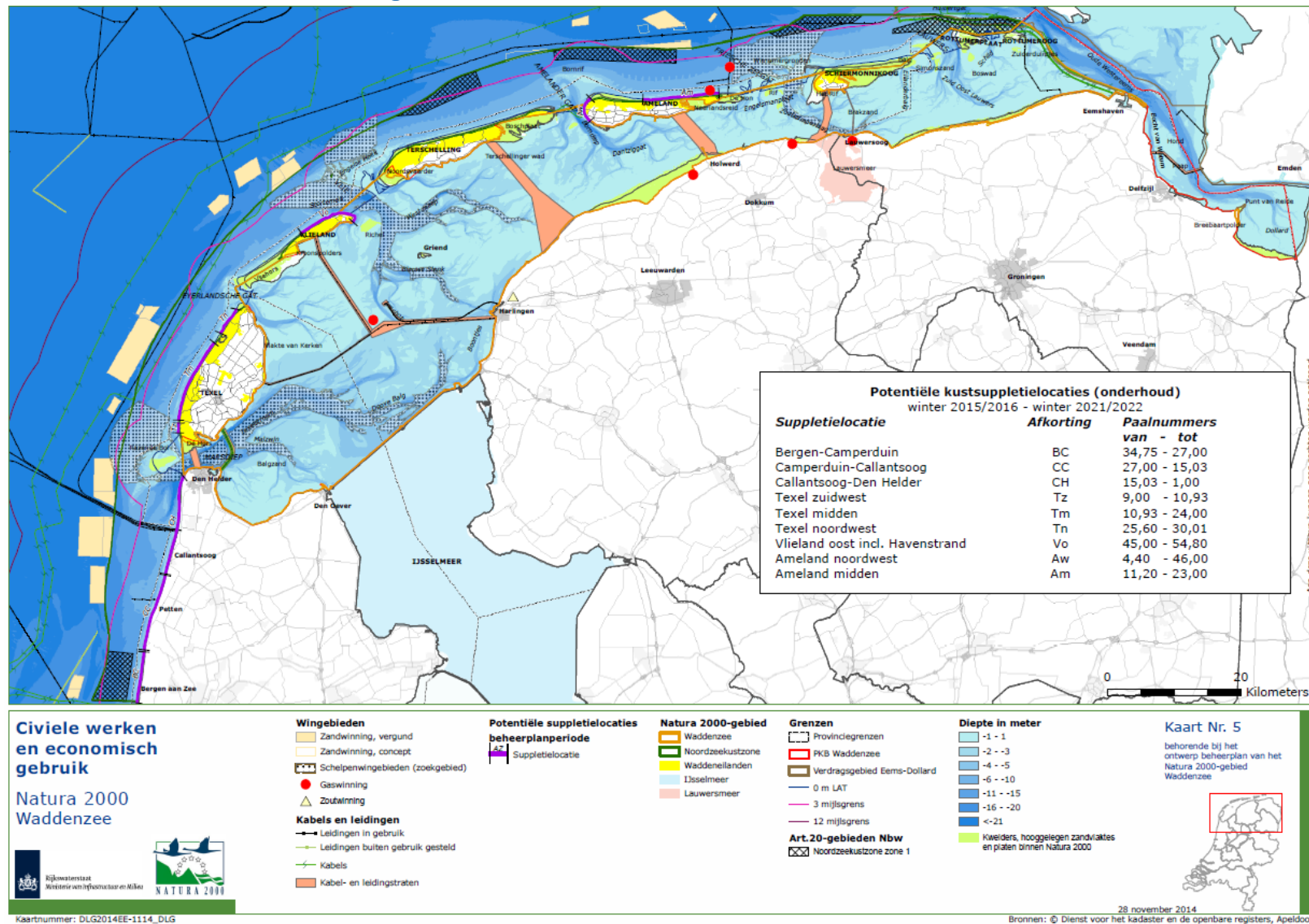
Composiet is vijfmaal zo sterk als staal, dit zal zichtbaar worden in de dikte van de deur. Doordat de deur minder dik hoeft te zijn kan er materiaal en ruimte bespaard worden. Hierdoor kan er geld bespaard worden, de kosten van composiet zijn echter hoger dan die van staal waardoor het geen verschil maakt.

Het grootste voordeel van composiet is de lage onderhoudskosten. Vaak wordt voor composiet de term 'fix-it and forget-it' gebruikt. Dit geeft al aan dat er nauwelijks meer aan gedacht hoeft te worden besteed aan het materiaal wanneer het er eenmaal ligt. Aangezien het onderhoud van een opdrijvende deur van staal veel onderhoud nodig heeft, is een deur van composiet zeker een goede vervanger om te bekijken.

Bijlage 1: Natura 2000 gebieden Waddenzee

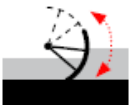
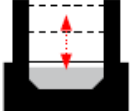


Bijlage 2: Civiele werken en economisch gebruik



Bijlage 3: eigenschappen type deur/ bewegingsmechanisme

TYPE DEUR / BEWEGINGS-MECHANISME	EIGENSCHAPPEN												
	maximale breedte deur [m]	maximale hoogte deur [m]	maximaal verval [m]	modulair uitbreidbaar [ja/nee]	2 richtingen keren [ja/nee]	gecontroleerd waterlevel [ja/nee]	schutsluis functie ³ [ja/nee]	openen met head mogelijk [ja/nee]	scheepvaart belemmering ¹ [categorie]	materiaal gebruik [categorie]	faalkans gevoeligheid ¹ [categorie]	onderhoud [categorie]	zichtbaarheid [categorie]
 sectordeur	15 - 40	8	2	ja	mogelijk	nee	mogelijk	?	geen	groot	groot	groot	gemiddeld
 baig	20 - 120	10	6	ja	ja	nee	nee	?	geen	laag	gemiddeld	laag	laag
 klep	2 - 6	8	2	ja	nee	nee	mogelijk	?	geen	gemiddeld	groot	groot	laag
 puntdeur	4 - 20	25	10	ja	nee	nee	ja	?	gemiddeld (bestje smal)	gemiddeld	laag	gemiddeld	gemiddeld
 swingdeur	20 - 80	20	6	nee	mogelijk	nee	nee	?	geen	groot	groot	laag	groot
 rolstuw	10 - 50	5	2	ja	nee	ja	nee	?	groot	groot	gemiddeld	groot	groot
 waaiendeur	4 - 20	20	10	nee	nee	nee	ja	?	gemiddeld (bestje smal)	groot	laag	gemiddeld	gemiddeld
 oprijvende deur	5 - 50	5	2	ja	ja	nee	mogelijk	?	geen	gemiddeld	gemiddeld (kan auto, maar kan ook vast zitten)	groot	laag

TYPE DEUR / BEWEGINGS-MECHANISME	EIGENSCHAPPEN												
	maximale breedte deur [m]	maximale hoogte deur [m]	maximaal verval [m]	modulair uitbereikbaar [ja/nee]	2 richtingen keren [ja/nee]	gecontroleerd waterlevel [ja/nee]	schutsluis functie ³ [ja/nee]	openen met head mogelijk [ja/nee]	scheepvaart belemmering ² [categorie]	materiaal gebruik [categorie]	faalkans gevoeligheid ¹ [categorie]	onderhoud [categorie]	zichtbaarheid [categorie]
 Poirée / schotten	1 - 4	5	3	ja	ja, = goed mogelijk	ja	nee	?	groot	groot	laag	veel	groot
 vizier (hor. as)	15 - 65	10	3	ja	mogelijk	ja	nee	?	gemiddeld	laag	laag	gemiddeld	groot
 radiaal stuw / sectordeur	20 - 100	8	6	ja	nee, = heel slecht mogelijk	ja	nee	?	groot	gemiddeld	laag	gemiddeld	groot
 hefdeur	10 - 60	12	4	ja	ja	ja	ja	?	gemiddeld	groot	laag	gemiddeld	groot
 plofdam	5 - 40	5	1	ja	ja	nee	nee	?	groot	groot	laag	laag (het is een weggooi kering)	groot
 roldeur	10 - 60	20	6	nee	ja	nee	ja	?	geen	groot	groot	groot	gemiddeld
 parachute	5 - 250 ?	20	5	ja	mogelijk	nee	mogelijk	?	geen	laag	gemiddeld	laag	laag
 segmentdeur	20 - 360	20	2	nee	nee	nee	nee	?	geen	gemiddeld	groot	groot	groot

Bijlage 4: uitwerking genoemde waterkerende concepten

Sectordeur

Er zijn twee sectordeur concepten, hiervan kan één concept water van beide kanten keren. Bij het andere concept is het alleen mogelijk om het water van een kant te keren. De sectordeur waar bij deze concepten over gesproken wordt, heeft als werking dat er een deur vanaf de grond omhoog bewogen kan worden waardoor het water gekeerd kan worden.



Balg

Een balgstuw is een kunststofballon die wanneer het nodig is gevuld kan worden met lucht of water. De ballon zal als kering werken tussen hoog en laag water. De waterkering kan water keren van beide kanten en heeft een maximaal verval van ongeveer 6 meter.



Opdrijvende deur

Een opdrijvende deur is een systeem waarbij de deuren vanuit de grond omhoog bewegen. Het voordeel aan dit concept is dat het nauwelijks zichtbaar is wanneer het niet van toepassing is. Wel zijn er veel werkzaamheden nodig om het concept te installeren.



Poirée / schotten

Het plaatsen van schotten is al een eeuwenoud systeem waarbij de schotten handmatig geplaatst moeten worden. Een nadeel van dit systeem is dat het veel tijd kost om de schotten te plaatsen en eruit te halen.



Vizier (horizontale as)

Een vizier is een constructie waarbij de boog boven de constructie het water geplaatst kan worden. Dit zorgt dan voor de scheiding van hoog en laag water.



Hefdeur

Een hefdeur werkt bijna hetzelfde als een vizier alleen is het hier een rechte constructie die ze van boven in het water laten zakken. Bij een vizier is dat een halve cirkel. Het is duidelijk te zien dat de deur een belemmering veroorzaakt voor schepen met een staande mast.

Plofdam

Een plofdam werkt ongeveer hetzelfde als een hefdeur alleen kan deze dam niet meer omhoog getrokken worden waardoor deze eerst dient afgebroken te worden voordat er weer scheepvaart door de geul kan.

Roldeur

Een roldeur is een constructie waarbij de deur vanaf de zijkant de geul in wordt geschoven. Een nadeel van dit type constructie is dat wanneer hij geen steun meer heeft aan de overkant, er een groot moment zal optreden.

Parachute

Een parachute wordt vaak gebruikt wanneer er een blijvende scheiding moet zijn tussen wateren. Dit kan bijvoorbeeld zijn omdat het water besmet kan zijn. De parachute kan niet gemakkelijk geplaatst of weggehaald worden waardoor het een tijdrovende klus is.



Bijlage 5: Multi criteria analyse

In deze bijlage staat uitgelegd hoe de multicriteria-analyse gemaakt is. Een multicriteria-analyse houdt in dat aan de eigenschappen van verschillende constructies een waarde wordt gegeven. Door het geven van een waarde aan een eigenschap zullen verschillende constructies een grotere voorkeur hebben ten opzichte van andere constructies.

De eigenschappen die beschreven staan in het onderzoek van Multifunctionele beweegbare waterkeringen (projectgroep afsluitbaar open Rijnmond, 2010) kunnen wel veranderen. Het is alleen niet ideaal om de eigenschappen te veranderen in verband met de kosten voor het materiaal.

- Breedte van de constructie
- Verval
- Schutsluis functie
- Faalkans constructie
- Hoeveelheid onderhoud
- Toegevoegde waarde voor het oplossen slipprobleem

In het volgende deel van de bijlage zullen de onderwerpen beschreven zijn. Uitgelicht zal worden waarom ze meegenomen zijn in de multicriteria-analyse en welke waarde aan het onderwerp wordt gegeven.

De waarden lopen van 1 tot en met 5 waarvan 1 nauwelijks waarde gehecht wordt aan de eigenschappen en bij 5 is het een belangrijke eigenschap in het onderzoek. De kwaliteit van de eigenschappen zijn opgedeeld in 3 waarden 1 tot en met 3. Hiervan heeft groen in de eigenschappen tabel de waarde van 3, oranje de waarde van 2 en rood de waarde van 1.

Maximale van de constructie

De maximale breedte van de constructie is meegenomen omdat de constructie de breedte van de geul wel moet kunnen overspannen. Wanneer de breedte van de geul goed toepasbaar is bij de constructie, zal dit een voorkeur hebben te opzichten van constructie typen die een te klein of te grote range hebben.

Om uit te zoeken of er een andere constructie beter naar voren komt wanneer de breedte van de geul vergroot wordt, zal de analyse tweemaal worden uitgevoerd. Een maal voor een breedte van 6,6 meter en nog een maal voor dan een breedte van 100 meter.

Waarde: 4

Verval

Het verval van het water bij Holwerd aan Zee bedraagt 5,9 meter. Dit betekent niet dat de eigenschappen met een maximaal verval niet kunnen. De constructie zal echter extra aanpassingen moeten ondergaan om wel aan de waarde te voldoen. Dit is normaal gesproken niet voordelig voor de constructie maar omdat hier de constructie nog ontworpen moet worden is het mogelijk om deze eigenschappen van de constructie aan te passen. De waarde die aan het verval wordt gegeven zal daarom niet hoog zijn.

Waarde: 2

Schutsluis functie

Om de werking van het spoelmeer te kunnen voorzien dient de waterkering te kunnen schutten. Zonder schutsluis functie heeft de constructie niet veel waarde voor HaZ. In het rapport Multifunctionele beweegbare waterkeringen (Projectgroep afsluitbaar open Rijnmond, 2010) staat bij enkele waterkeringen aangegeven dat het geen schutsluis functie heeft. Hier zijn voor HaZ enkele wijzigingen in aangebracht.

Waarde: 4

Zichtbaarheid constructie

De zichtbaarheid van de constructie is meegenomen denken aan het open landschap in het noorden van Friesland. Het is hierom niet de bedoeling dat de constructie veel zicht afneemt van de omgeving, het moet geen eyecatcher zijn door de grote van de constructie.

Waarde: 4

Faalkans constructie

Het falen van de constructie is zeker van belang in het onderzoek, de mogelijkheden zijn echter in de toekomst steeds toereikender om het falen van de constructie tegen te gaan.

Waarde: 3

Hoeveelheid onderhoud

Het onderhoud van de constructie is van belang voor de kosten van de constructie. Naast de kosten is het onderhoud een belemmering voor scheepvaart en de stormvloedkering kan dan niet in gebruik worden genomen. Dit is met het oog op Holwerd aan Zee wel van belang om het spoelmeer werkende te houden.

Waarde: 3

Toegevoegde waarde voor het slibprobleem

Dit is een eigenschap die in het rapport tot stand is gekomen. Als voorbeeld kan de balg voor extra lucht zorgen dat het slib naar het oppervlaktewater kan blazen. Dit zal het transport van het slib ten goede komen.

Waarde: 1

Uitkomsten voor een geul breedte van 6,6 meter:

Vragen/concepten	Sectordeur	Balg	Opdrijvende deur	Roldeur
Breedte constructie 5	15-40	20-120	5-50	10-60
Verval constructie3	2	6	2	6
Schutsluis functie4	Mogelijk	Mogelijk	Ja	Mogelijk
Zichtbaarheid constructie4	Gemiddeld	Laag	Laag	Gemiddeld
Faalkans constructie3	Groot	Gemiddeld	Gemiddeld	Groot
Hoeveelheid onderhoud 2	Groot	Laag	Groot	Groot
Toegevoegde waarde voor het slibprobleem1	Nee	Mogelijk	Nee	Nee
Totaal	35	48	50	41

Uitkomsten voor een opening van ongeveer 100 meter:

Vragen/concepten	Sectordeur	Balg	Opdrijvende deur	Roldeur
Breedte constructie	15-40	20-120	5-50	10-60
Verval constructie	2	6	2	6
Schutsluis functie	Mogelijk	Mogelijk	Mogelijk	Ja
Zichtbaarheid constructie	Gemiddeld	Laag	Laag	Gemiddeld
Faalkans constructie	Groot	Gemiddeld	Gemiddeld	Groot
Hoeveelheid onderhoud	Groot	Laag	Groot	Groot
Toegevoegde waarde voor het slibprobleem	Nee	Mogelijk	Nee	Nee
Totaal	30	58	41	41

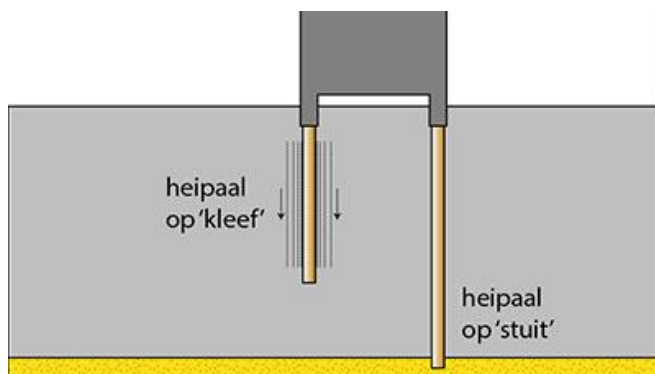
Bijlage 3: Faalmechanismes primaire waterkeringen

Het toetsen op stabiliteit van de constructie en het grondlichaam heeft te maken met de wijze waarop de constructie gefundeerd is. Wanneer de constructie niet stabiel op de grond staat kan deze verzakken of verschuiven waardoor er andere krachten op kunnen treden dan in het ontwerp berekend zijn. Deze krachten kunnen ervoor zorgen dat de constructie kan bezwijken onder de druk. De controle op stabiliteit van de constructie en het grondlichaam wordt aan de hand van de volgende punten bekeken:

- Draagvermogen van een fundering op palen (op druk belast, op trek belast, horizontaal belast);
- Draagvermogen van een fundering op staal;
- Stabiliteit van grondkerende constructies zoals damwanden en keermuren;
- Macrostabiliteit van het grondlichaam aansluitend op de constructie of het grondlichaam inclusief de constructie;
- Instabiliteit van het voorland;
- Erosie van bekleding;

Draagvermogen van fundering op palen

Paalfundatie kan op verschillende manieren gerealiseerd worden. De palen kunnen druk, trek en dwarskrachten opnemen en op de grond overbrengen. De grond kan deze krachten opnemen door wrijving met de ondergrond, op stuit funderen of door een combinatie van beide. Een op stuit belaste paal is dat de paal op een harde ondergrond staat waardoor hij niet verder de grond in kan zakken.



Funderen op staal

Funderen op staal is een andere mogelijkheid om de constructie te funderen. Dit gebeurt wanneer de ondergrond een dichtheid heeft die zo groot is dat paalfundering niet nodig is. De kans bestaat dat de ondergrond op locatie het gewicht niet aankan waardoor de constructie komt te verzakken. Hier is tijdens de ontwerpfase in dit onderzoek geen rekening mee gehouden waardoor de krachten van de constructie anders verdeeld worden. Hierdoor kan de constructie komen te bezwijken en zal hij daarna zijn taak als stormvloedkering niet meer uit kunnen voeren.

Stabiliteit van grondkerende constructies zoals damwanden en keermuren

Bij een afgraving zal de grond gaan schuiven. Dit kan voorkomen worden door eerst damwanden te plaatsen. De damwanden nemen de krachten op van de grond die afschuift. Wanneer de damwanden hierbij niet ver genoeg de grond in zijn geheid is het mogelijk dat ze kantelen door de druk van de grond. Dit kan ook voorkomen bij keermuren. Vandaar dat het belangrijk is om tijdens de ontwerpfase te kijken naar de stabiliteit van grondkerende constructies.

In het ontwerp van de opdrijvende deur zitten ook grondkerende muren. Deze hebben een vloer onder de dijk gekregen met een vaste hoek tussen de muur en de vloer. Dit moet voor voldoende stabiliteit zorgen van de grondkerende constructie. Wanneer het niet mogelijk is om een vloer aan te leggen zal de grondkerende muur verder de grond in gezet moeten worden. Net zo ver tot hij het moment van het afschuivende grond kan opvangen.

Macrostabiliteit van het grondlichaam aansluitend op de constructie of het grondlichaam inclusief de constructie en instabiliteit van het voorland

Macrostabiliteit van het grondlichaam heeft te maken met afschuiving. Door te veel water in de laag grond kan de korrelspanning zo laag zijn dat de grond gemakkelijk begint te schuiven. Ook door het plaatsen van constructie op grondlaag die een talud heeft, kan verschuiving veroorzaakt worden. De constructie zou de schuifspanningen kunnen overschrijden waardoor afschuiving veroorzaakt wordt. Een oplossing hiervoor zou kunnen zijn om de constructie goed te funderen onder de eerste lagen waar afschuiving kan voorkomen. Een andere optie is om de constructie niet op het talud te plaatsen.

Erosie van bekleding;

Door de stroming van het water en inslag van de golf kan de bekleding van de oevers beschadigd worden. Beschadiging aan de tenen van de oevers kan instabiliteit van het voorland veroorzaken. Hierdoor kan afschuiving van de grond tot stand komen. Goede monitoring aan de bekleding is daarom aangeraden. Ter voorkoming van een instabiele dijk.

Het controleren gebeurt voornamelijk door te kijken welke waarden gebruikt zijn bij de ontwerpfase van de constructie. Hierbij moet er gedacht worden aan:

- De waterstanden waarbij een uitgevaren deur tot een probleem zou kunnen leiden;
- De geometrie van de constructie (aantal, type en positie van aanwezige deuren);
- Het type scheepvaart;
- Procedurele en fysieke maatregelen om de kans op aanvaring te beperken;
- De aanvaringbestendigheid van de ‘dagelijkse keermiddelen’;
- De omvang van voor en achter de constructie gelegen gebieden.

Piping en Heave

Daarnaast zijn piping en heave belangrijke toetsonderwerpen voor een stormvloedkering. Wanneer dit plaatsvindt, kan er in de loop van de tijd instabiliteit van de constructie veroorzaakt worden. De kans dat piping en heave voorkomen zal afnemen wanneer de constructie voldoet aan de volgende eisen:

- De constructie is niet op palen gefundeerd;
- De constructie en eventuele kwelschermen worden rondom door een slecht doorlatend klei-/veenpakket omsloten;
- na zetting aan het eind van de testperiode is de constructie rondom nog steeds minimaal 1 m ingebed in een klei-/veenpakket waarbij er geen in- of uitredepunten voor piping via de aansluiting tussen grond en constructie kunnen ontstaan;
- het klei-/veenpakket aan de buitendijkse en binnendijkse zijde van de waterkering is stabiel;
- onder het kunstwerk aanwezig zandlagen zijn beoordeeld al ‘goed’ of ‘voldoende’ volgens toetsspoor piping en heave.

Bijlage 4: Belastingen op een primaire waterkering

Uit het “Voorschrift Toetsen op Veiligheid Primaire Waterkering” (Ministerie Verkeer en Waterstaat, 2007) zijn de belastingen gehaald die invloed hebben op een primaire waterkering. De krachten die in het voorschrift staan zijn:

- Permanente belastingen
 - eigen gewicht constructie (onderdelen);
 - gronddruk;
 - (grond) waterdruk (ook opdrijvende kracht);
- Veranderlijke belasting
 - Druk verschillen ten gevolge van waterstanden (maatgevende hoogwatersituatie, negatieve verval);
 - Drukverschillen ten gevolge van windgolven (inclusief eventuele golfklappen);
 - Stroming (inclusief eventuele daardoor veroorzaakte trillingen);
 - Scheepsgolven/translatiegolven (niet tijdens de maatgevende hoogwatersituatie);
 - Scheepstroming;
 - Troskrachten;
 - Verkeersbelastingen;
 - Temperatuurbelasting;
 - Winddrukken;
- Bijzondere belastingen
 - Aanvaring
 - Aardbeving
 - Explosie
 - Ijsbelasting
 - Stroming in geval van niet sluiten

Bij het berekenen van de deur voor Holwerd aan Zee zijn niet alle belastingen nodig. De krachten die druk uitoefenen op de deur zijn:

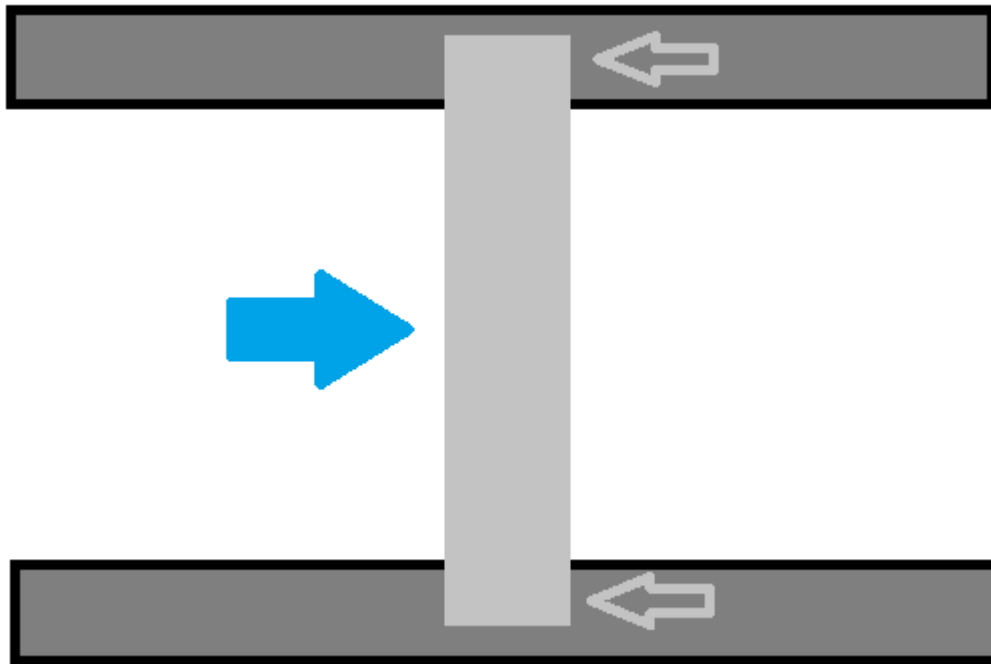
- Drukverschillen ten gevolge van waterstanden (maatgevende hoogwatersituatie, negatieve verval);
- Drukverschillen ten gevolge van windgolven (inclusief eventuele golfklappen);
- Aanvaring

De belastinggevallen die druk uitoefenen op de deur worden in de volgende bijlage behandeld.

Bijlage 5: Ontwerp nota

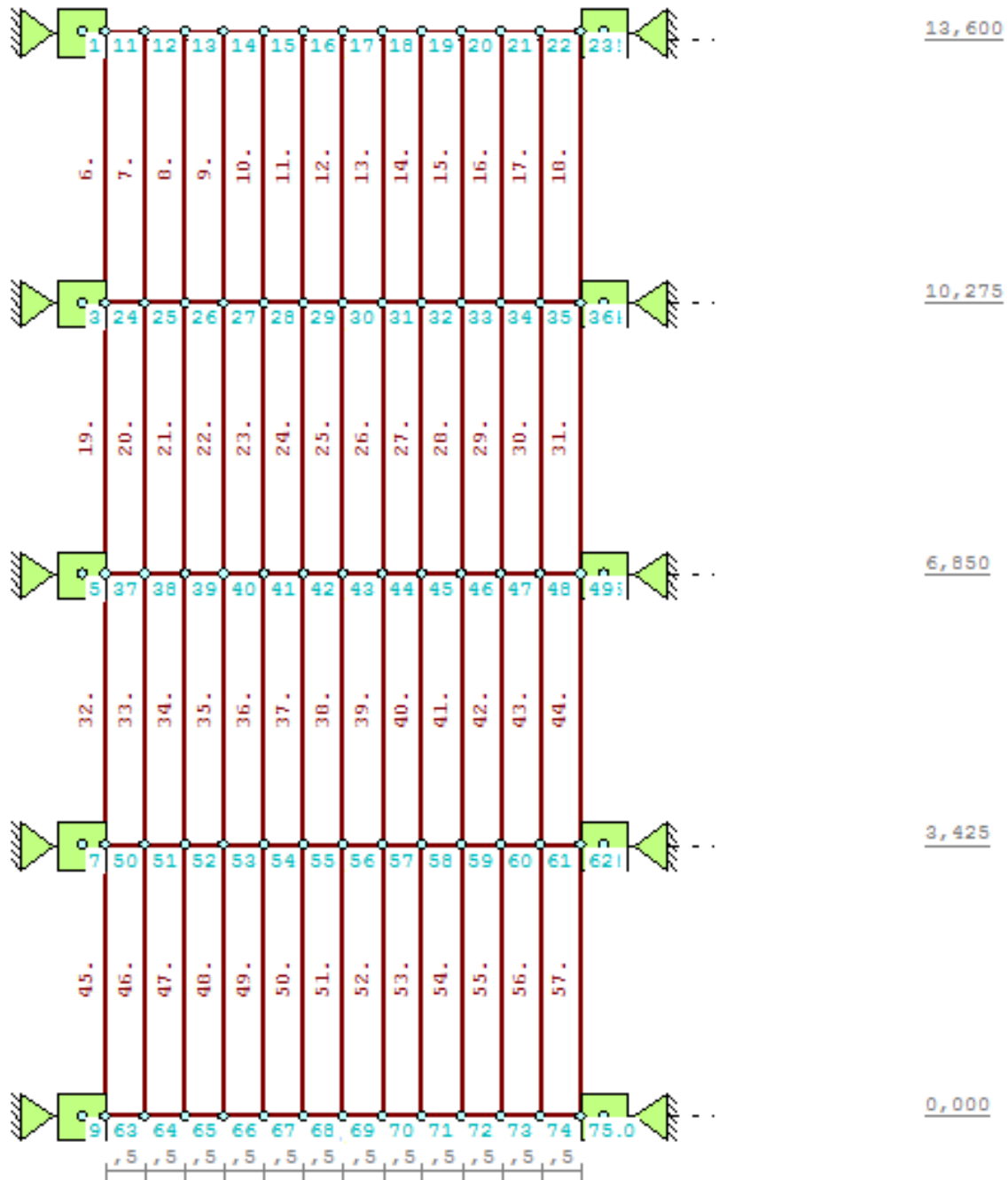
In deze bijlage zal toelichting plaatsvinden waarom welke keuzes zijn gemaakt in het dimensioneren van de deur.

De drijvende deur komt vanuit de grond langs twee gleuven aan de zijkanten naar boven. Deze gleuven zullen ook de opleggers zijn waar de deur zijn krachten aan af kan dragen.



Doordat de constructie twee steunpunten heeft, kan het ontwerp gaan lijken op een verticaal brugdek. Om de krachten op de deur verdeeld op te vangen is ervoor gekozen om vijf hoofdliggers over de hoogte te verdelen. De hoofdliggers zullen op dezelfde afstand van elkaar liggen en verbonden worden met dwarsliggers. Er is gekozen voor tien dwarsliggers die de hoofdliggers verbinden.

De geschematiseerde deur is op de volgende pagina te vinden. Hierin staan ook de afstanden tussen elke ligger aangegeven die gebruikt zijn voor de berekeningen van de profielen.



Bijlage 6: Belasting berekening

Waterspanning

De druk van het water op de deuren neemt per meter met 10 kN toe. Dit volgt uit een standaard waar het eigengewicht voor water per duizend kuub is maal tien door de zwaartekracht (normaalgesproken 9,81 maar voor het gemak is 10 aangenomen).

Golfbelasting

Vanuit “Leidraad voor kunstwerken” (TAW, 2003) is de rekenmethode gehaald voor het berekenen van de golfbelasting. Voor het berekenen van de golfbelasting op de deur zijn enkele gegevens nodig:

- Waterstand voor het berekenen van de waterkering
- Golfhoogte
- Golfperiode
- Golflengte

Waterstand voor het berekenen van de waterkering

In de leidraad wordt verwezen naar het “Hydraulisch Randvoorwaardenboek ” hier is echter in 2007 een nieuwe versie van uitgebracht waar in dit rapport rekening mee gehouden wordt. Zo zijn de gegevens voor Holwerd gehaald uit het “Hydraulisch Randvoorwaardenboek primaire waterkeringen” (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007). In tabel 3.1.6-6 staat het toetspeil waar de waterkering aan moet voldoen. Dit bedraagt een hoogte van 4,9 meter ten opzichte van NAP omdat er ook een deel zich onder water bevindt is de totale waterhoogte 7,1 meter.

Golfhoogte

Naast het toetspeil staat ook de golfhoogte beschreven waar rekening mee gehouden moet worden. Voor Holwerd betreft dit een hoogte van 1,75 meter.

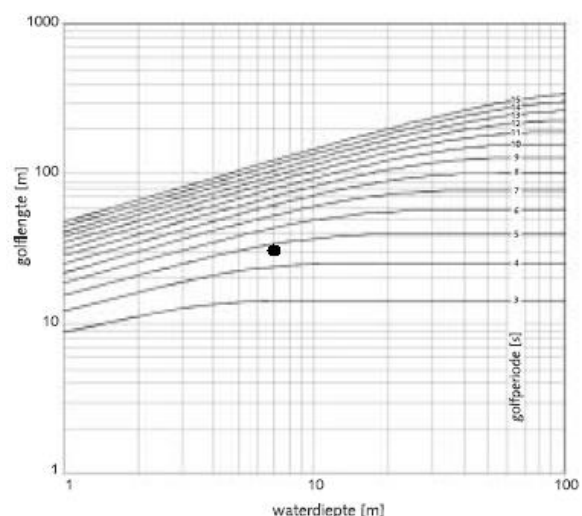
Golfperiode

De golfperiode staat echter niet in de tabellen. Hier is een aanname voor gedaan in vergelijking met de Marnewaard. Dit is een gebied dat onder Schiermonnikoog ligt en vergelijkbaar is met de dijk bij Holwerd. De golfperiode is hier 4,5 seconden.

Golflengte

De golflengte is een combinatie tussen de golfperiode en de waterstand in de geul. Beide gegevens zijn bekend, waaruit het vervolgens af te lezen uit de grafiek die in de leidraad staat.

Hieruit is af te lezen dat de golflengte rond de 30 meter ligt.



De rekenmethode die in de leidraad wordt gebruikt is ook aangehouden voor de golfbelasting.

$$\eta_0 = \frac{1}{2} k a_{kw}^2 \coth(kh) \quad (B5.7)$$

met: η_0 = de verhoging van de middenstand [m]
 a_{kw} = de halve golfhoogte voor het kunstwerk = $H_{d,refl} / 2$ [m]
 $H_{d,refl}$ = ontwerpgolfhoogte voor de constructie [m]
 k = het golfgetal van de inkomende golf = $\frac{2\pi}{L}$ [m⁻¹]
 L = de golflengte [m]
 h = waterdiepte voor de drempel [m]

Voor het berekenen van de middenstand is eerst het golfgetal nodig. Met een golflengte van 30 meter is het golfgetal 0.21 m⁻¹.

Voor de halve golfhoogte moet eerst de ontwerpgolfhoogte berekend worden voor de constructie. De ontwerpgolfhoogte wordt berekend in verschillende stappen.

$$H_d = 2,2 \cdot H_s \quad (B5.3)$$

met: H_d = ontwerpgolfhoogte van de inkomende golf vlak voor de constructie [m]

H_s is gegeven als 1,75 m voor Holwerd, dit betekent dat de ontwerpgolfhoogte van de inkomende golf vlak voor de constructie 3,1 meter is.

$$H_{d,refl} = (1 + \chi) \cdot H_d \quad (B5.5)$$

met: $H_{d,refl}$ = de ontwerpgolfhoogte voor de constructie [m]
 χ = de reflectiecoëfficiënt met een waarde tussen 0 en 1 [-]

De ontwerpgolfhoogte voor de constructie komt met de bovenstaande berekening uit op 6,1 meter. Voor χ is het getal 1 aangenomen om een extra veiligheidsmarge mee te nemen.

In de berekening voor de halve golfhoogte voor het kunstwerk is 6,1 meter gedeeld door twee wat dan uitkomt op een waarde van 3,1 meter.

Met deze waarde is de uitkomst voor de verhoging van de middenstand 0,98 meter.

Voor de maximale druk ter hoogte van de middenwaterstand wordt aangenomen:

$$p_1 = \rho g (a_{kw} + \eta_0) \quad (B5.8)$$

Hiermee kan de maximale druk berekend kan worden. Uit deze berekening volgt dat de maximale druk die door de golf uitgevoerd wordt op de constructie 40,02 kPa.

De druk aan de bodem (ter plaatse van het funderingsvlak van de wand) bedraagt volgens Sainflou:

$$p_0 = \frac{\rho g a_{kw}}{\cosh(kh')} \quad (B5.9)$$

De druk aan de onderzijde van de deur zal 0,79 kPa zijn.

Bij beide waarden zal nog een veiligheidsfactor van 1,25 toegepast worden. Dit maakt dat de golfbelasting bij het oppervlakte water niet 40,02 kPa is maar 50 kPa. Bij de onderkant van de deur zal dit een belasting van 0,99 kPa veroorzaken.

Aanvaringsbelasting

Aanvaringsbelasting wordt normaal ingeschat naar de waarde van het achterland. Omdat op dit moment het achterland nog ingedeeld moet worden en hier nog geen waarde aan is gegeven kan er één aanvaarbelasting geredeneerd worden.

De stormvloedkering is bedoeld om ook pleziervaart toe te laten in Holwerd. Gekeken naar de breedte en diepte van de geul is gekozen voor een aanvaarbelasting te kiezen ten gevolge van het schip 'STELLA FRISA'.



Dit schip heeft een gewicht van 90 ton. Met aanvaarsnelheid van 3 m/s geeft dit een belasting van 270 kN.

Bijlage 7: Belastingcombinaties

In deze bijlage zullen de belastingcombinaties gegeven worden. Dit is bij het dimensioneren van de deur van belang omdat niet alle combinaties maatgevende belastingen opleveren. Om de maatgevende belastingen te vinden moeten de extremen opgezocht worden die op de constructie kunnen werken.

Rekenend met de belastingen die op de deur werken zijn verschillende belasting combinaties opgesteld:

- Maximale waterstand aan de zeezijde met de gemiddelde vloedwaterstand aan de zijde van het spoelmeer;
- Maximale waterstand aan de zeezijde met minimale waterstand in het spoelmeer;
- Eb waterstand aan de zeezijde met de gemiddelde vloedwaterstand aan de zijde van het spoelmeer;

De overige krachten zullen fluctueren tussen de gegeven belastingcombinaties. Hierdoor zullen er uit de andere belastingcombinaties geen maatgevende belastingen ontstaan.

“Maximale waterstand aan de zeezijde met de gemiddelde vloedwaterstand aan de zijde van het spoelmeer”

Deze belastingcombinatie is opgenomen omdat met deze combinatie de grootste druk ontstaat aan de onderzijde van de constructie.

“Maximale waterstand aan de zeezijde met minimale waterstand in het spoelmeer”

Door het grootste verval tussen beide kanten van de constructie toe te passen zal hier het grootste moment ontstaan.

“Eb waterstand aan de zeezijde met de gemiddelde vloedwaterstand aan de zijde van het spoelmeer”

Dit zorgt voor een grotere belasting van de andere zijde waardoor dit ook meegenomen dient te worden in het onderzoek. Naar verwachting zullen hier geen maatgevende belastingen uit voortkomen maar de aanvaarbelaasting kan hier wel een extra rol in spelen. Dit zal verder uitgewerkt worden onder het kopje aanvaarbelaastingcombinaties.

Aanvaarbelaastingcombinatie

De aanvaarbelaasting is alleen meegenomen wanneer er geen stormvloed is. Dit is gedaan omdat het niet aannemelijk is dat er nog boten varen met een grote storm.

Combinaties dwarsligger

De belastingen die op de dwarsliggers zijn gezet zijn te vinden in bijlage 9 waar ook de berekeningen zijn uitgevoerd. In de tabel van de maatgevende belastingen op de dwarsligger staan verschillende opleggingen.

Oplegging 1.1 is de onderste dwarsligger met de belasting van de maximale waterstand + de golfbelasting met aan de andere zijde de gemiddelde vloedwaterstand

Oplegging 1.2 is de dwarsligger tussen de tweede en derde hoofdligger van onder. Deze dwarsligger geeft ook belastingen af aan de tweede hoofdligger van onder. Hierdoor zal deze het zwaarst belast worden.

Oplegging 2.1 is weer de onderste rij dwarsliggers met de maximale waterstand van zee. Alleen is hier aan de binnenzijde de gemiddelde laagwaterstand gezet. Hierdoor zullen de momenten maximaal worden.

Oplegging 2.2 is hetzelfde als oplegging 1.2 maar wordt samen op de hoofdligger gezet met 2.1

Oplegging 3 is aan de ene zijde van de constructie de gemiddelde laagwaterstand en aan de andere zijde de gemiddelde hoogwaterstand.

Oplegging 4 is oplegging 3 met de aanvaarbelasting erbij in het midden van de dwarsligger. Dit zal voor het grootste moment zorgen in de dwarsliggers.

Hieruit volgen een aantal belastingen die weergegeven worden in de onderstaande tabel.

Maatgevende belastingen dwarsliggers:

oplegging	Max dwarskracht (kN)	Max moment (kN/m)	Oplegreactie onderzijde (kN)	Oplegreactie bovenzijde (kN)
1.1	48,3	38,6	41,7	48,3
1.2	50	41,8	50	47,4
2.1	57	49,1	57	56
2.2	50	41,8	50	47,4
3	15,4	10,8	15,4	7,7
4	150	242	150	143

Combinatie hoofdligger

Vanuit de belastingen van de dwarsliggers kan de belasting bepaald worden op de hoofdligger. Hiervoor zijn vier verschillende combinaties opgesteld waarbij maatgevende belastingen gebruikt worden voor de berekening van de profielen.

Oplegging 1 zijn alle dwarskrachten vanuit oplegging 3 van de dwarskrachten op de hoofdligger. Plus eenmaal een belasting van 143 kN in het midden van de hoofdligger. Deze komt uit oplegging 4 van de dwarskrachten. Hierbij was er aanvaarbelasting gerekend in het midden van de dwarsligger.

Oplegging 2 komt ook vanuit de dwarskrachten van oplegging 3 alleen vindt de aanvaarbelasting nu plaats op de hoofdligger. Dit zorgt voor een groter moment in de hoofdligger.

Oplegging 3 is hetzelfde als oplegging 2 alleen vind de aanvaarbelasting nu 2,5 meter vanaf de zijkant van de constructie plaats. Dit komt doordat de boot waarmee de aanvaarbelasting wordt berekend vijf meter breed is. Het eerste gedeelte wat de constructie raakt is meestal het midden. Dit is 2,5 meter en dicht naar de zijkant van de constructie gaat niet lukken.

Oplegging 4 is de grootste belasting die vanuit de dwarsliggers komt. Dit is 106 kN per dwarsligger en dit geeft duidelijk het grootste moment in de hoofligger.

Maatgevende belastingen:

oplegging	Max dwarskracht (kN)	Max moment (kN/m)	Oplegreactie links (kN)	Oplegreactie rechts (kN)
1	118	308	118	118
2	185	530	185	185
3	218	498	218	152
4	689	1161	689	689

Bijlage 8: Bepalen van de profielen

Vanuit de berekeningen komen waarden voort die gebruikt worden voor het bepalen van de profielen. De maatgevende waarden die nodig zijn voor de berekening van de profielen zijn:

Ligger	Maximale dwarskracht (kN)	Maximaal moment (kN/m)
Dwarsligger	150	242
Hoofdligger	689	1161

Voor de maximale dwarskracht geldt $\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1,0$

Voor het maximale moment geldt $\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0$

Profielen bepalen aan de hand van het maximale moment

De profielen zijn bepaald door ze te controleren op het maximale moment.

$$M_{c,Rd} = W_{pl} * f_y$$

Voor de staal klasse is S235 gekozen. Dit is de f_y in de formule. Dit zal dus bij het soort profiel niet veranderen. W_{pl} is wel anders bij verschillende profielen en aan de hand van dat getal zal het profiel bepaald worden.

Voor de dwarsligger is een HEA 300 profiel gekozen. Die heeft een W_{pl} van 1260.

$$M_{c,Rd} = 296,1$$

242/296,1 is kleiner dan 1 dit betekend dat het profiel voldoende sterk is om het maximale moment op te nemen.

Dezelfde rekenmethode is gebruik om het profiel van de hoofdligger te bepalen. Hier kwam een HEA 650 profiel uit. Het profiel kan een maximaal moment van 1285 kN/m opnemen. Dit is meer dan de 1161 kN/m die op de deur werkt.

Controleren op dwarskracht

Nu de profielen bepaald zijn kunnen ze gecontroleerd worden op hun dwarskracht. Aan de had van de volgende formules zijn de dwarskrachten gecontroleerd:

$$V_{c,Rd} = A_v * 0,58f_y$$

$$A_v = A - 2(b_f - t_w - 2r) * t_f$$

De gegevens die nodig zijn voor deze formules zijn uit het tabellenboek voor bouwkunde gehaald. Wanneer deze formules zijn ingevuld komt er de maximale dwarskracht uit die de profielen kunnen hebben. De maximale dwarskracht die de HEA 300 op kan nemen is 627 kN en voor de HEA 650 geldt 1645 kN. Beide profielen kunnen de dwarskrachten opvangen.

Controle op vervorming

Door de juiste profielen in te voeren in Technosoft geeft het programma ook de vervorming aan van de profielen. Tijdens de grootste belasting heeft de dwarsligger een vervorming van 6,2 millimeter. De hoofdligger heeft met de grootste belasting een doorbuiging van 14,3 millimeter. Deze vervorming is zo klein dat hiervoor geen andere profilering nodig is.

Vermoeiing

Ook de vermoeiing van de constructie speelt een rol in het ontwerp van de liggers. Omdat de druk constant afwisselt en ook veel aanwezig is, is het handig om een ligger te kiezen die beter tegen vermoeiing kan. HEB profielen kunnen hier beter tegen dan HEA profielen. Hierom zal een HEB profiel voor deze kering beter van pas komen dan een HEA profiel. De verschillen zijn alleen niet aangetoond omdat dit niet in de scope van het onderzoek past.

Bijlage 9: uitkomsten Techosoft

Referenties

1. Drs. D.W. Takkebos, Drs. Maurits Schilt, 2015, De maatschappelijke kosten en baten Holwerd aan Zee, 22 blz
2. Dros, 2013, Alternatieven voor het baggeren in het Kikkertgat, versie 3, 48 blz
3. drs. S. van Schijndel, drs. M. Rutherglen, PRC, 2010, Aanvalsplan Krimp Holwerd, 112 blz
4. Dr.ir. P. Vellinga, 2015, Spoelmeer Holwerd aan Zee, 41 blz
5. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007, Allerheiligenvloed 2006, 70 blz
6. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007, Voorschrift Toetsen op Veiligheid Primaire Waterkeringen
7. R.P.L. Nijssen, 2015, Composieten Basiskennis, derde druk, Een VKCN-publicatie
8. Projectgroep afsluitbaar open Rijnmond, 2010, Multifunctionele beweegbare waterkeringen
9. Technische adviescommissie voor de waterkeringen, 2003, Leidraad voor kunstwerken, Nivo, Delft
10. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007, Hydraulisch Randvoorwaardenboek primaire waterkeringen
11. InfraCore inside, 2012, Sluisdeuren, 2 blz
12. Robin Kwast, 2013, Bijzondere vormgeving Amersfoortse brug, 2 blz
13. R. Figueiro, 2011, Fibrous and composite materials for civil engineering applications, WP WOODHEAD PUBLISHING
14. Anastasios P. Vassilopoulos, Thomas Keller, 2011, Fatigue of Fiber-reinforced Composites, Springer
15. Lawrence C. Bank, 2006, COMPOSITES FOR CONSTRUCTION, JOHN WILEY & SONS, INC.
16. Theo Stoutjesdijk, Marco de Kleine, John de Ronde, Tim Raaijmakers, 2012, Stormvloedkering Oosterschelde: ontwikkeling ontgrondingskuilen en stabiliteit bodembescherming, Hoofdrapport, Deltares
17. Robert 't Hart, Huub De Bruijn, Goaitske de Vries, 2016, Fenomenologische beschrijving, Deltares
18. K.d'Angremond, F.C. van Roode, 2001, Breakwaters and closure dams, VSSD 2001
19. Michael C.Y. Niu, 1992, COMPOSITE AIRFRAME STRUCTURES

Bronnen

<https://www.unesco.nl/cultuur/werelderfgoed>

<http://www.natura2000.nl/>

<http://www.fibercr.nl/>

<http://www.npsp.nl/textPage4.asp?ID=126>

<https://www.technischweekblad.nl/nieuws/sluisdeuren-van-composiet/item5551>

<http://www.fibercore-europe.com/index.php?lang=nl>