



Een studie naar de effecten van een regelwerk
op sedimenttransport richting het getijdemeer
voor Holwerd aan Zee

provinsje fryslân
provincie fryslân 

UNIVERSITEIT TWENTE.

Pieter Faber

UNIVERSITEIT TWENTE , S1960296 | PROVINCIE FRYLÂN

23-04-2021

Voorwoord

Dit is een rapport dat onderzoek doet naar de effecten die een regelwerk op het project Holwerd aan Zee kan hebben. Voor Holwerd aan Zee moet er een 'getijdemeer' binnen de dijk gecreëerd worden dat door een toegangsgeul met de Waddenzee verbonden is. Een regelwerk is een mechanisme dat de waterstroming kan 'regelen' bij het vullen en legen van het getijdemeer. Dit onderzoek is uitgevoerd voor provincie Fryslân om de mogelijkheden en effecten van regelwerken te verkennen.

Dit rapport is geschreven om de bachelor Civil Engineering aan de Universiteit Twente af te ronden. Samen met mijn begeleiders Anne Meijer, projectleider Holwerd aan Zee vanuit de provincie Fryslân, en Erik Horstman, assistent professor aan de Universiteit Twente, heb ik de onderzoeksdoelen en vragen geformuleerd.

Hoewel de oorspronkelijke bedoeling was om een inschatting te maken van de hoeveelheid sediment dat in het meer terecht komt per type regelwerk, is het onderzoek zich uiteindelijk meer gaan richten op de voor- en nadelen die verschillende typen regelwerken op het project hebben. Deze aanpassing is gedaan omdat sedimenttransport een complex proces is en er geen bruikbaar model beschikbaar was om mee aan de slag te gaan. Met de voor- en nadelen van de regelwerken is een analyse uitgevoerd van de meest geschikte regelwerken voor Holwerd aan Zee.

Dit rapport is als verkennende studie bedoeld voor vervolgstudies naar de gedetailleerde inrichting van Holwerd aan Zee. In dit rapport worden veel aannames en verwachtingen gepresenteerd voor (nog) onbekende effecten van verschillende regelwerken. Ook worden er suggesties gedaan om negatieve effecten te minimaliseren.

Ik bedank mijn begeleiders voor de hulp gedurende het schrijven van dit rapport. Anne Meijer heeft mij goed betrokken bij verschillende afspraken binnen het project waardoor het een interessante tijd is gebleven. Ook heeft hij mij met Erik Bruins Slot en Dirk Walinga in contact gebracht. Zij hebben mij op inhoudelijke punten geholpen. Het onderzoek is door Erik Horstman haalbaar voor mij gebleven. Erik heeft zelf veel ervaring met sedimenttransport en wist mij daardoor van de te complexe kant af te houden waardoor dit onderzoek in 12 weken afgerond kon worden.

Veel plezier bij het lezen van het rapport.

Pieter Faber

Enschede, 23-04-2021

Samenvatting

Stichting Holwerd aan Zee wil de verpaupering in de regio tegengaan door een getijdemeer binnen de dijk te creëren. Het getijdemeer wordt gevuld en geleegd via een 2km lange toegangsgeul tussen het getijdemeer en de Waddenzee. Het getij op de Waddenzee zorgt ervoor dat het meer zich vult en leegt. Het water dat het getijdemeer binnen stroomt is erg sediment rijk. Dit sediment slaat neer in de toegangsgeul en in het getijdemeer, waardoor grote baggerkosten en werkzaamheden nodig zijn voor het onderhoud van het getijdemeer.

Om dichtslibben van de toegangsgeul en het getijdemeer tegen te gaan kan er een regelwerk in de toegangsgeul worden geplaatst. Dit regelwerk bepaalt wanneer, en mogelijk welk deel van de waterkolom, het getijdemeer vol stroomt waardoor het meest sediment rijke water tegengehouden kan worden. Provincie Fryslân, leider van het project Holwerd aan Zee, heeft opdracht gegeven voor deze verkennende studie naar het effect dat verschillende types regelwerken op het getijdemeer hebben. Daarbij moet niet alleen gekeken worden naar de sediment inlaat, maar ook naar de effecten van een regelwerk op de bevaarbaarheid en de ecologie in het gebied. Hiervoor is de volgende onderzoeksvraag opgesteld: Wat is het meest functionele regelwerk voor Holwerd aan Zee, rekening houdend met de hoeveelheid sediment die het getijdemeer in komt, de toegankelijkheid voor schepen en de ecologische omstandigheden?

De functies die het regelwerk moet dienen zijn, het regelen van de waterstroom en het vormen van een primaire waterkering. Daarnaast zijn de wensen van de partijen betrokken bij Holwerd aan Zee omgezet naar criteria voor het regelwerk. De volgende criteria zijn hiervoor vastgesteld: de hoeveelheid sediment die het getijdemeer in stroomt, de mate waarin neergeslagen sediment uit de toegangsgeul gespoeld kan worden, de tijdspan waarin schepen het regelwerk kunnen passeren, de weerstand die het regelwerk voor vismigratie creëert, de bouw- en onderhoudskosten van een regelwerk, de mate van betrouwbaarheid, de mogelijkheid tot een duurzaam bouwwerk en de mate van toekomstbestendigheid van een regelwerk.

Aan de hand van de criteria en de eisen zijn conceptuele ontwerpen voor het regelwerk geselecteerd. De concepten zijn: schutdeuren, een zakkende muur, een kantelbare klep en een vaste muur met daarboven een hefdeur. Deze concepten zijn met verschillende maatvoeringen en openingsregimes in een basaal stromingsmodel doorgerekend om de stroomsnelheden bij inkomend getij te bepalen.

De vergelijking van de concepten is gedaan met een Multi-Criteria Analyse (MCA). Hiervoor zijn de verschillende varianten beoordeeld op de vastgestelde criteria.

- Om de sediment inlaat te minimaliseren moet de stroomsnelheid in de toegangsgeul bij het vullen van het meer zo laag mogelijk blijven. Het afsluiten van de toegangsgeul voor het onderste deel van de waterkolom heeft ook een positieve uitwerking.
- Om de toegangsgeul uit te spoelen gedurende eb, moet het regelwerk een grote stroomsnelheid bij het legen kunnen genereren. Dit wordt gedaan door het regelwerk dicht te zetten als het vloedpeil in het getijdemeer is bereikt. Wanneer het waterpeil in de toegangsgeul en op de Waddenzee gezakt is, wordt het regelwerk geleidelijk geopend waardoor het water met een hoge snelheid naar de Waddenzee stroomt.
- De doorvaart mogelijkheid wordt beoordeeld op de tijdspan waarin de toegangsgeul bevaarbaar is, wanneer de stroomsnelheid lager dan 0,8m/s is, en het regelwerk passeerbaar is.
- Vismigratie wordt verslechterd door objecten of condities die de doorgang van vissen verhinderen. Een regelwerk dat dichtstaat en grote stroomsnelheden die de vissen uit de toegangsgeul spoelen zijn voorbeelden van die obstructies.

- Het regelwerk is betrouwbaarder als het systeem al bekend is.
- Samen met een techneut zijn de regelwerken gerangschikt op bouw- en onderhoudskosten.
- De duurzaamheid van een regelwerk is beoordeeld door naar de duurzame materiaal keuze te kijken.
- De toekomstbestendigheid is afhankelijk van hoeveel overcapaciteit het regelwerk aan watervolume kan verwerken in het stromingsmodel.

De beoordeling van de criteria vormt samen met de wegingen van de criteria de MCA. De wegingen van de criteria zijn voor meerdere situaties geschetst omdat op dit moment nog niet duidelijk is waar de knelpunten voor het project Holwerd aan Zee zitten. Er is een scenario geschetst van hoe er nu naar het project wordt gekeken, waar de baggerwerkzaamheden en kosten niet acceptabel worden geacht en toerisme en natuur allebei belangrijk zijn. Daarnaast wordt er gekeken naar een scenario waar meer nadruk op de natuur moet komen, een scenario die is gefocust op toerisme en een scenario waarbij een nieuwe functie is gevonden voor het sediment dat het meer binnen stroomt. De weging per criteria is afhankelijk van de invloed van de belanghebbende partijen in de verschillende scenario's.

Voor de basis situatie en het scenario waarbij natuur het speerpunt is het onderstaande concept het best uit de MCA gekomen. Dit concept minimaliseert het sediment transport het getijdemeer in het meest. Door de kantelbare klep het eerste uur dicht te laten en de klep vervolgens langzaam onder het waterpeil in de toegangsgeul te laten zakken kan de stroomsnelheid in de geul laag gehouden worden. Daarnaast zorgt de schutsluis ervoor dat schepen het regelwerk een groot deel van de tijd kunnen passeren.

De beoordeling op elk van de criteria wordt gecombineerd met de wegingen van de criteria, waarmee dan de totaalscore van de MCA berekend kan worden. De wegingen van de criteria zijn voor meerdere scenario's geschetst omdat op dit moment nog niet duidelijk is waar de knelpunten voor het project Holwerd aan Zee zitten. Het eerste scenario schetst hoe er op dit moment naar het project wordt gekeken, waarbij de baggerwerkzaamheden en kosten niet acceptabel worden geacht en toerisme en natuur allebei belangrijk zijn. Daarnaast wordt er gekeken naar een scenario waar meer nadruk op de natuur moet komen, een scenario dat is gefocust op toerisme en een scenario waarbij een nieuwe functie is gevonden voor het sediment dat het meer binnen stroomt (en de inlaat van sediment dus positief wordt beoordeeld). De weging per criterium is bepaald op basis van de invloed van de belanghebbende partijen in de verschillende scenario's.

Voor de basis situatie en het scenario waarbij natuur het speerpunt is, is een regelwerk bestaande uit een kantelbare klep, 12m breedte, en een schutsluis (8m breedte voor de doorvaart van schepen) het best uit de MCA gekomen. Dit concept minimaliseert het sediment transport het getijdemeer in het meest. Door de kantelbare klep het eerste uur tijdens opgaand getij dicht te laten en de klep vervolgens langzaam onder het waterpeil in de toegangsgeul te laten zakken kan de stroomsnelheid in de geul laag gehouden worden en blijft de instroom van sediment in het meer laag. Daarnaast zorgt de schutsluis ervoor dat schepen het regelwerk een groot deel van de tijd kunnen passeren.

Wanneer blijkt dat de pleziervaart erg negatief tegenover beperkte in- en uitvaartijden staat of er een nieuwe functie voor het ingestroomde sediment gevonden wordt, komt een regelwerk bestaande uit punt-schutdeuren van 20m breedte als beste uit de MCA. Deze deur geeft weinig weerstand voor scheepsdoorvaart en is goedkoper dan andere concepten.

Dit rapport is een eerste verkenning van de mogelijkheden van verschillende regelwerken voor Holwerd aan Zee. Verdere onderzoeken moeten uitwijzen of het sedimenttransport naar het meer te beperken is, hoe groot het probleem van vismigratie is bij verschillende regelwerkconcepten is en wanneer boten verwacht worden naar of van Holwerd vandaan te varen.

De schutdeuren fungeren bij het vullen van het meer als open verbinding. De baggerwerkzaamheden die met een open verbinding ontstaan zijn niet aanvaardbaar bevonden door overheidsinstanties. Om deze optie niet uit te sluiten wordt geadviseerd resultaten van een onderzoek om dijkenklei van Waddenslib te maken, af te wachten. De punt-schutdeuren en de kantelbare klep met sluis komen voor alle beschreven scenario's als beste regelwerken uit de MCA. Deze regelwerken worden daarom geadviseerd te overwegen voor Holwerd aan Zee.

English summary for the Bachelor thesis

Stichting Holwerd aan Zee, the foundation of the initiators of the project Holwerd at Sea, wants to counter the impoverishment in the region of Holwerd, by building a tidal lake inland of the embankment at the Wadden Sea. The tidal lake will be filled and emptied through a 2km long connecting channel between the Wadden Sea and the tidal lake. The tide at the Wadden Sea will cause the water level in the tidal lake to fluctuate. The waterflow that enters the tidal lake when the water level is rising, holds high concentrations of sediment. This sediment will settle in the connecting channel and in the tidal lake, which causes high maintenance dredging costs.

To reduce the sediment entering the tidal lake, a flow-controlling structure can be placed at the entrance of the tidal lake. This structure controls when and which part of the water column will enter the tidal lake. Controlling this flow can decrease the amount of sediment that enters the tidal lake. The Province of Fryslân, project manager of Holwerd aan Zee, wants for this study to explore the effects of different flow-controlling structures in the project. While exploring the control structures, not only the sediment flow is monitored, but also the effects on the accessibility of the tidal lake for ships and the ecological environment. The main research question is: Which is the most functional flow-controlling structure for Holwerd at Sea, taking into account the amount of sediment entering the tidal lake, the accessibility for ships and the ecological environment.

Led by a customer requirements specification, the main functions for the control structure are set: controlling the waterflow and serving as the primary flood defence. From this customer requirements specification, wishes for the structure are taken and translated into criteria for the structure. These criteria are: the amount of sediment that enters the tidal lake, how well the connecting channel is cleared of sediment when the lake is draining, how much time the tidal lake is accessible for ships, the amount of resistance the structure causes to fish migration, the reliability of the structure, the building and maintenance costs and whether the structure is durable and future proof.

A number of concepts of flow-controlling structures were created, following the criteria: traditional lock doors, a barrier that lowers into the ground, a cantilevered barrier and a low fixed barrier with a movable barrier on top that can be lifted. For these concepts multiple flow velocity calculations are performed with a model. The concepts have been assessed for different measurements and opening regimes. The model determines the flow velocities in the connecting channel while the lake is being filled, to assess whether the channel is navigable for ships and how much sediment enters the tidal lake.

A multi-criteria analysis (MCA) is conducted to compare the different variants on their performance on the following criteria:

- To minimize the amount of sediment that enters the tidal lake, the flow velocity in the connecting channel has to be low and the lowest part of the water column should be stopped from entering the lake by the control structure while filling the lake.
- To flush excess sediments out of the connecting channel, the flow-controlling structure has to create high flow velocities while emptying the tidal lake. This can be done by retaining the water, by closing the structure, when the water level in the lake is at its maximum. When the water level in the channel and on the Wadden Sea have dropped, the structure will open, which causes the water to flow at high velocity through the channel.
- The accessibility for ships is optimized by minimizing the time that the flow velocity in the connecting channel is higher than 0,8m/s (above this velocity, ships can no longer sail safely).

- Fish migration is influenced negatively by high flow velocities and obstructing objects or conditions. When the lake is drained with high flow velocities through the channel, fish are flushed out of the channel.
- The reliability of the structure is assessed to be better if it is a known and much used structure.
- The costs of the different flow-controlling structures are rated in collaboration with a technician.
- Durability is assessed by the materials that can be used for the construction of the structure.
- How future proof the flow-controlling structure is depends on the amount of extra water volume that can pass the structure during one flood cycle.

The assessment of the structures on each of the criteria combined with the weights of the different criteria result in the final scores of the MCA. The weights of the criteria are defined for multiple possible scenarios, because it is not yet clear which criteria will be the bottlenecks for the project Holwerd aan Zee. One scenario is based on the view of the researchers that are currently working on the project, in which maintenance dredging is not accepted and nature and tourism are of equal importance. Next to that, a more nature-based scenario in which tourism is of high importance was considered, as well as a scenario in which the sediment that is trapped in the lake can be turned into a useful construction material (and thus sediment entering the tidal lake is no longer a negative effect). The weight of every criterion differs per scenario and is based on the influence of the relevant stakeholders.

The cantilevered barrier with a separate lock gate (for the passage of ships) is rated best in the MCA for the current view scenario and the nature focused scenario. This concept minimizes the transport of sediment into the tidal lake the most. The cantilevered barrier shuts the tidal lake the first hour when the tide is rising, so no sediment rich water will flow into the lake. After one hour, the cantilevered barrier opens slowly below the water level in the connecting channel to control the flow velocity of the water entering the tidal lake. It also blocks the lowest part of the water column by remaining partially lifted to minimize the amount of sediment entering the lake. The separate lock gates make sure that ships can pass the construction most of the time (except for the time the flow velocity in the connecting channel is too high, when the tidal lake is emptied).

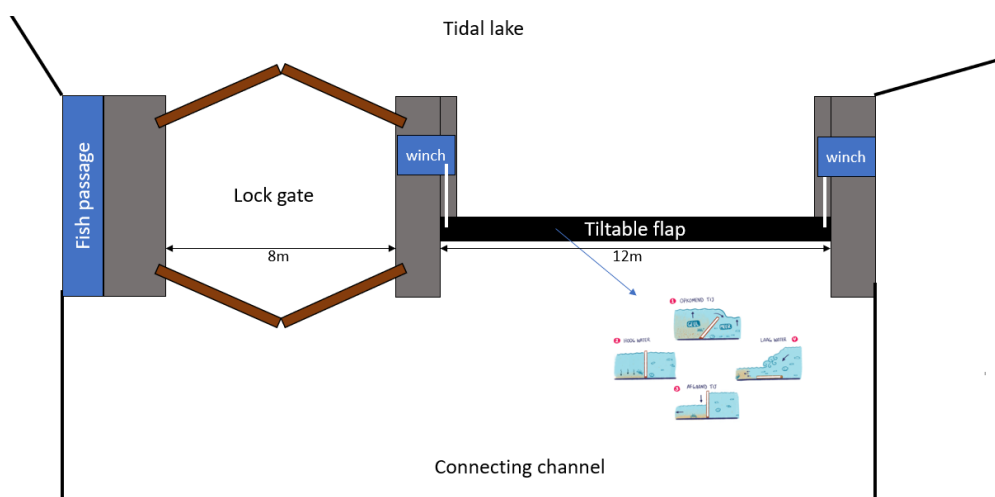


Figure 1, tiltable flap with a separate lock gate

When further research concludes tourism to be too negatively influenced by the partial accessibility of the cantilevered barrier or when a new function is found for the sediment that enters the lake, the flow-controlling structure consisting only of one set of traditional lock doors is rated best in the MCA. These traditional lock doors provide less resistance for ships to enter the tidal lake, it is cheaper, more durable and more future-proof.

The set of traditional lock doors acts as an open connection while the tidal lake is filled. Governmental organizations do not want to bear the costs for dredging the amount of sediment that enters the lake with an open connection, because these are too high. Therefore it is advised to wait for the results of a research to turn sludge from the Wadden Sea into clay that can be used in the construction of embankments.

The cantilevered barrier with a separate lock gate and the concept with only one set of lock doors are rated as the best options for all the scenario's. Therefore these concepts are advised to be taken into consideration for the project Holwerd aan Zee.

This report must be interpreted as a preliminary, explorative study into the possibilities and disadvantages of different types of flow-controlling structures for Holwerd at Sea. Further research will have to provide more detailed information on whether the amount of sediment entering the tidal lake can be limited, how much resistance the different flow-controlling mechanisms cause for the fish migration and how this effect can be reduced.

Inhoud

Voorwoord	1
Samenvatting.....	2
English summary for the Bachelor thesis	5
Lijst van figuren	11
Lijst van tabellen.....	12
1. Introductie	13
1.1 Context	13
1.2 Probleembeschrijving.....	15
1.3 Doel van het onderzoek en onderzoeksvragen.....	15
1.4 Afbakeningen.....	16
2. Methodologie	20
2.1 Eigenschappen rond het regelwerk.....	20
2.2 Functies, eisen en Criteria	20
2.3 Regelwerk concepten	21
2.4 Model analyse	21
2.5 Stroomsnelheden	22
2.6 Multi-Criteria Analyse.....	22
3. Situatie omschrijving	24
3.1 Profielen en volumes.....	24
3.2 Sediment concentraties in de waterkolom	25
3.3 Erosie van neergeslagen sediment.....	28
4. Functies en eisen	30
4.1 Functies	30
4.2 Eisen	30
5. Criteria	31
5.1 Criteria per Partij	31
5.2 Criteria definiëren	31
5.3 Criteria beoordeling.....	32
6. Regelwerk Concepten.....	34
6.1 Schutdeuren	34
6.2 Vaste muur met schuif	35
6.3 Zakkende muur.....	36
6.4 Kantelbare klep.....	38
7. Stromingsmodellen	41
7.1 Analyse stromingsmodellen	41

7.2	Reflectie stromingsmodellen.....	42
7.3	Stroomsnelheden	43
7.4	Getijdevolume en stroomsnelheden van de concepten	46
7.4.1	Schutdeuren	46
7.4.2	Vaste muur met schuif	47
7.4.3	Zakkende muur en kantelbare klep.....	49
8.	Multi-Criteria Analyse.....	52
8.1	Beoordeling	52
8.1.1	Schutdeuren concept dat gedurende de hele vloed-stroming open staat (variant 1)..	52
8.1.2	Vaste muur met schuif concept met een losse schutsluis (variant 2).....	53
8.1.3	Zakkende muur concept die ook als vaardoorgang fungeert (variant 3)	55
8.1.4	Zakkende muur concept met losse schutsluis (variant 4)	56
8.1.5	Kantelbare klep concept die ook als vaardoorgang fungeert (variant 5).....	57
8.1.6	Kantelbare klep concept met losse schutsluis voor de pleziervaart (variant 6).....	58
8.2	Scenario's	58
8.2.1	Basis situatie (scenario 1)	58
8.2.2	Natuurlijk scenario (nummer 2)	60
8.2.3	Toeristisch scenario (nummer 3).....	61
8.2.4	Scenario nieuwe functie sediment (nummer 4).....	61
8.3	Analyse	62
9.	Discussie	64
9.1	Sediment verplaatsing.....	64
9.2	stroomsnelheden	65
9.3	Situatie veranderingen	65
9.4	Andere sediment doelen	67
10.	Conclusie	69
11.	Aanbevelingen	71
Bijlage 1		72
	Inschatting getijdevolume	72
Bijlage 2		74
	onderbouwing technische wensen regelwerk	74
Bijlage 3		75
	Waterstand Waddenzee.....	75
	Water hoogte meer.....	76
	Doorstroom oppervlakte regelwerk.....	77
	Doorstroom oppervlakte en stroomsnelheid toegangsgeul	77

Stroomsnelheden	78
Bibliografie	80

Lijst van figuren

Figuur 1, huidige situatie (links; (Google, 2020)) en plan Holwerd aan Zee (rechts; (Stichting Holwerd aan Zee, 2019)).....	14
Figuur 2, schematische weergave van het gebied met NAP hoogtes (WP2018_1125_R1r1_Holwerd_aan_zee_definitief)	17
Figuur 3, Multi-Criteria Analyse voorbeeld	23
Figuur 4, inschatting van het profiel van de geul en het meer (Kollen & Stuiver, 2018)	24
Figuur 5, geul afmetingen	25
Figuur 6, meet locaties sediment concentraties (Perk, Van Rijn, Brinkkemper, & Koudstaal, 2019) ...	25
Figuur 7, meetresultaten locatie 1. De horizontale as is voor alle resultaten één getijdencyclus. Bovenaan is de waterhoogte ten opzichte van NAP, dan de gemiddelde stroomsnelheid en als laatste de slib en zand concentraties op verschillende waterhoogtes (Perk, Van Rijn, Brinkkemper, & Koudstaal, 2019).....	27
Figuur 8, De stroomsnelheden en sediment concentraties in mg/L, uitgezet tegen de fase van het getij. p10, p50 en p90 zijn representeren respectievelijk dood-, gemiddeld-, en springtij. T0 is aan de zijkant van de vaargeul Holwerd-Ameland en T1 is midden in de vaargeul (Perk, Van Rijn, Brinkkemper, & Koudstaal, 2019).	28
Figuur 9, voorbeeld vispassage (de Wit-passage (Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden, sd)).	33
Figuur 10, schutsluisdeuren	34
Figuur 11, stangen op uiteinde van de deuren van de schutsluis	35
Figuur 12, muur met vrije bovenkant.....	35
Figuur 13, voorbeeld van een hefdeur die in Moerdijk gebruikt wordt.....	36
Figuur 14, zakkende muur concept	36
Figuur 15, opdrijvende muur (Flow Defence, 2020). Als het water stijgt drijft de muur omhoog, hij kan dan met kabels of kettingen naar beneden worden getrokken in de ruimte. Links is de muur te zien en rechts de ruimte waar hij in kan zakken.	37
Figuur 16, boven aanzicht van de krachten op de zakkende muur.....	38
Figuur 17, werking kantelbare klep (Perk & Van Rijn, 2018).....	39
Figuur 18, van links naar recht: kantelbare klep boven aanzicht dicht/staand, bovenaanzicht klep open/liggend, zij aanzicht klep dicht staand en zij aanzicht half open.....	39
Figuur 19, krachten op de kantelbare klep in dichte stand. Links een bovenaanzicht en rechts een zij aanzicht	40
Figuur 20, waterstanden en stroomsnelheden voor schutdeuren die altijd open staan bij inkomende stroming	46
Figuur 21, waterstanden en stroomsnelheden voor schutdeuren die 90 minuten na eb open gaan ..	47
Figuur 22, waterstanden en stroomsnelheden voor de vaste muur met schuif met een schutsluis ernaast.....	48
Figuur 23, vaste muur met schuif die ook als vaardoorgang fungeert	48
Figuur 24, modelschets voor stroming bij uitspoelen getijdemeer	49
Figuur 25, zakkende muur of klep altijd 1 meter onder het waterpeil op de Waddenzee die ook als vaardoorgang fungeert.....	50
Figuur 26, kantelbare klep of zakkende muur die als vaardoorgang fungeert en de stroomsnelheid in de toegangsgeul minimaliseert.	50
Figuur 27, kantelbare klep of zakkende muur zonder vaardoorgang met lage stroomsnelheden in de toegangsgeul	51
Figuur 28, voorbeeld riooloverlaat.....	64
Figuur 29, luchtfoto Waddenzee bij de pier van Holwerd (Herman & Villars, 2016).....	66

Figuur 30, locaties van de drempel en de dijkdoorbraak.....	66
Figuur 31, verdieping in het meer waar sediment neerslaat	67
Figuur 32, aanbevolen concept voor Holwerd aan Zee, een kantelbare klep met een losse schutsluis.	69
Figuur 33, schematische tekening getijdemeer doorsnede	72
Figuur 34, waterstand metingen op de Waddenzee.....	75
Figuur 35, toegangseul profiel.....	78
Figuur 36, maten om doorstroomoppervlakte te berekenen	78

Lijst van tabellen

Tabel 1, de schuifspanning en bijbehorende stroomsnelheid waarbij zand-slib mengsels eroderen..	29
Tabel 2, wensen per stakeholder voor het regelwerk.....	32
Tabel 3, resultaten stromingsstudies	41
Tabel 4, getijddevolumes bij verschillende getijdeverschillen in het getijdemeer	44
Tabel 5, openingsregimes voor de smalle doorgang van de kantelbare klep of de zakkende muur concepten.....	51
Tabel 6, criteria wegenen basis situatie	59
Tabel 7, wegenen natuur scenario	60
Tabel 8, wegenen toeristisch scenario	61
Tabel 9, wegenen scenario met nieuwe functie voor sediment	62
Tabel 10, MCA analyse van de zes varianten voor alle scenario's. De hoogte van een variant op een scenario bepaald hoe goed de variant is (hoe hoger hoe beter)	62
Tabel 11, waterstanden met bijbehorende tijden	75
Tabel 12, waterpeilen per tijdstip voor het model.....	75

1. Introductie

In dit hoofdstuk wordt de context van het project Holwerd aan Zee uitgelegd, waarom het geïnitieerd is en wat de partijen zijn die er aan werken. Daarna volgt een probleemomschrijving die uitlegt waarom dit onderzoek plaatsvindt en wat de doelen van dit onderzoek zijn. Afsluitend worden afbakeningen vastgesteld om het onderzoek af te bakenen en haalbaar te maken.

1.1 Context

Holwerd is al enkele jaren in verval. De gemeente Dongeradeel is in 2010 onder de loep genomen door de Stuurgroep Experimenten Volkshuisvesting (van Schijndel & Rutherglen, 2010). Hierin is destijds al vastgesteld dat in de regio bevolkingskrimp gaande is en dat hierdoor grote economische schade op zal treden. Om dit te voorkomen zijn toen enkele plannen bedacht. Een Multi-Functioneel Centrum waar de scholen en sporten in worden gecombineerd, was het eerste idee. Het gebied leeg laten lopen om vervolgens een hoogwaardiger leefgebied te creëren waar andere mensen op af komen, was ook een optie. En bij de laatste twee varianten moest Holwerd een aantrekkelijke plaats worden voor toeristen: een looproute naar de veersteiger of het aanleggen van vakantiewoningen en een camping waren hierin de verkooppunten. Deze plannen hebben niet zoveel indruk kunnen maken op de gemeente, provincie of andere mogelijke investeerders. De plannen zijn opzijgeschoven en lijken op dit moment ook geen kans meer te maken in Holwerd.

Daarnaast is er een groeiend probleem op de Waddenzee tussen Holwerd en Ameland. De veerboot die Ameland bevoorraadt en alle toeristen daar heen brengt, heeft zijn eigen vaargeul. Deze vaargeul vult zich langzaam met sediment waarna de geul weer tot de juiste diepte en breedte gebaggerd moet worden. Het bagger volume neemt echter ieder jaar meer toe en dus ook de kosten daarvoor. De oorzaak van deze toenemende dichtslibbing van de vaargeul is nog niet precies duidelijk. Er wordt druk gezocht naar een oplossing om die kosten te verminderen.

Vier inwoners van Holwerd zijn op zoek gegaan naar een manier om de verpaupering van de regio tegen te gaan. Het plan dat zij hebben bedacht is een getijdemeer van ongeveer 35 hectare naast Holwerd te creëren, dat doorgang geeft tot de Waddenzee, genaamd Holwerd aan Zee. Dit plan moet Holwerd weer een interessante locatie maken om te gaan wonen en het moet toeristen aantrekken om de unieke locatie te bewonderen. Om dit plan te realiseren, moet de dijk langs de Waddenzee doorgebroken worden, wat geheel tegen de aard van de Nederlandse bevolking is. Dit plan is door veel organisaties omarmd, omdat het meer binnen de dijk voor een unieke ecologische flora en fauna kan zorgen. In Figuur 1 is te zien wat de huidige situatie is (links) en wat het beoogde plan (rechts) is. Het meer zal helemaal tot in het dorp strekken en zal via een geul vanaf de originele dijk tot aan de zee verbonden worden met de Waddenzee.



Figuur 1, huidige situatie (links; (Google, 2020)) en plan Holwerd aan Zee (rechts; (Stichting Holwerd aan Zee, 2019))

Holwerd aan Zee moet met name het toerisme in het gebied gaan stimuleren. Huisjes op eilandjes in het meer en huisjes rondom het meer zullen toeristen trekken. Er wordt ook nagedacht om boten doorgang te kunnen bieden vanaf de Waddenzee naar het getijdemeer. Dit zou een haven in Holwerd interessant kunnen maken. Het unieke gebied dat dit plan creëert, en de mogelijkheden die het biedt, trekt veel dagjesmensen en toeristen aan. Dit project kan dus een grote boost aan de lokale economie gaan geven.

Het getijdemeer zou ook een doorspoelende werking op de vaargeul Holwerd-Ameland kunnen hebben. Op dit moment wordt de vaargeul gebaggerd om sediment, en dan met name slib, uit de geul te halen en dan ergens anders weer te lozen. Deze baggerwerkzaamheden op zee brengen enorme kosten met zich mee. Het getijdemeer zal voor een grotere stroming door de vaargeul zorgen als het getijdemeer bij eb-stroming leegloopt. Deze stroming wordt dan door de vaargeul gespoeld en kan veel van het sediment en slib met zich meenemen. Dit kan mogelijk miljoenen euro's besparen op baggerkosten van de vaargeul. Dit effect moet nog verder onderzocht worden. Eerst moet er duidelijkheid komen over stromingspatronen op de Waddenzee. Daarnaast moet onderzocht worden of het weggespoelde sediment uit het begin van de vaargeul niet in een ander deel van de vaargeul neerslaat, waardoor de noodzaak om te baggeren enkel verplaatst wordt.

Holwerd aan Zee is een groot project dat door grote partijen ondersteund wordt. De Stichting Holwerd aan Zee heeft een intentieovereenkomst gesloten met Vogelbescherming Nederland BV (mede namens It Fryske Gea, Staatsbosbeheer en Waddenvereniging), gemeente Noardeast-Fryslân, Wetterskip Fryslân en provincie Fryslân. Ook de LTO steunt namens de landbouwsector de intentieovereenkomst. Samenvattend moet door de aanleg van het getijdemeer de hele regio weer op gaan bloeien. Ook zou het voordelige neveneffecten moeten hebben, zoals het creëren van een uniek ecologisch gebied in Nederland. Hoe dit allemaal in wordt gepast is nog niet precies duidelijk.

Het project wordt geleid door de stuurgroep Holwerd aan Zee. De stuurgroep staat in contact met alle belanghebbende partijen en probeert ieders wens zo goed mogelijk mee te nemen. Partijen waarmee wordt samengewerkt zijn instanties vanuit de overheid (Rijkswaterstaat en Deltaprogramma Wadden), natuurorganisaties (Staatsbosbeheer, It Fryske Gea, Vogelbescherming Nederland en de Waddenvereniging) en gemeentes in de regio. Daarnaast wordt er gewerkt met Universiteiten en Hogescholen, de Waddenacademie, investeerders en onderzoeksbureaus.

1.2 Probleembeschrijving

Of Holwerd aan Zee ook echt door zal gaan, is nog niet zeker. Verder onderzoek moet duidelijkheid bieden over de haalbaarheid, uitvoerbaarheid, betaalbaarheid en het onderhoud van Holwerd aan Zee. Deze onderzoeken gaan dan bijvoorbeeld over het reduceren van de baggerkosten in de vaargeul tussen Holwerd en Ameland, de sediment aanvoer richting het getijdemeer en de mogelijke aansluiting op het binnenwater van Fryslân.

De aanleiding voor dit onderzoek komt voort uit een tekort aan informatie over het functioneren van getijdemer en de precieze uitkomst van het gebruik van een regelwerk op het transport en neerslaan van slib. Mede omdat deze informatie ontbreekt, is er nog geen duidelijke voorspelling gedaan over de specifieke werking van Holwerd aan Zee. Er is tot nu toe vooral onderzoek gedaan naar de stroming het meer uit (Herman & Villars, 2016) en nog maar weinig naar de stroming het getijdemeer in. Er is al wel een model dat het sedimenttransport vanaf de Waddenzee tot en met het beleefmeer simuleert zonder regelwerk (Perk & Van Rijn, 2018), maar nog niet voor de situatie met een regelwerk.

Nadat er is onderzocht welke waterstroming het spoelmeer zal genereren wanneer het waterpeil in het getijdemeer vrij mee kan stijgen en dalen met het getij (Kollen & Sweco, Slib beleefmeer Holwerd aan Zee, 2018) (Perk & Van Rijn, 2018), is er nu interesse in de effecten op de doorstroming met een regelwerk. Zo'n regelwerk kan het water bijvoorbeeld een bepaalde tijd na vloed vasthouden voordat het wordt losgelaten uit het getijdemeer, zodat er in een korte periode een grotere waterstroom de Waddenzee opgaat. Een groter verschil tussen de waterhoogtes in het getijdemeer en de Waddenzee zorgt vanzelfsprekend voor een hogere stroomsnelheid. Dit zou sediment, en dan met name slib, uit de vaargeul Holwerd-Ameland moeten spoelen. Maar het regelwerk zou ook kunnen bijdragen om de toestroom van slib naar het getijdemeer tegen te gaan.

Er is op dit moment nog geen duidelijkheid over de precieze effecten van een regelwerk op het sediment transport van en naar het getijdemeer. Wat vooral belangrijk is, is dat het slib niet neerslaat in het openingssysteem van het regelwerk, waardoor het systeem zijn werking zou kunnen verliezen. Ook moeten er geen grote hoeveelheden sediment het getijdemeer binnen stromen. Het meer moet een toeristische trekpleister zijn en daar passen geen grote baggerwerkzaamheden bij.

1.3 Doel van het onderzoek en onderzoeksvragen

Dit onderzoek moet duidelijkheid gaan bieden over de werking en effectiviteit van een regelwerk dat geplaatst kan worden bij Holwerd aan Zee. Er moet een duidelijk beeld komen over de types regelwerken, hoe deze functioneren en onder welke omstandigheden ze goed of niet goed werken. Er moet ook een inventarisatie van de situatie bij Holwerd aan Zee komen, naar de specifieke eigenschappen van dit terrein en het ontwerp. Aan de hand hiervan kan een inschatting gemaakt worden van het transport van sediment rond een bijpassend regelwerk, en hoe eventuele problematiek rondom het regelwerk opgelost kan worden. De hoofdvraag die hieruit volgt is:

Wat is het meest functionele regelwerk voor Holwerd aan Zee, rekening houdend met de hoeveelheid sediment die het getijdemeer in komt, de toegankelijkheid voor schepen en de ecologische omstandigheden.

Ten eerste is er duidelijkheid nodig rond de toekomstige situatie bij Holwerd aan Zee. Alle factoren rondom het regelwerk moeten duidelijk zijn. De verschillen in waterhoogtes bij eb en vloed en de verwachte verandering daarvan in de toekomst door zeespiegelstijging zijn hierin belangrijk, omdat dit de hoeveelheid waterverplaatsing bepaalt omdat het meer een groter oppervlak heeft als het water hoger staat. Ook het type en de hoeveelheid sediment dat naar het getijdemeer stroomt vanaf de Waddenzee is van belang om iets te kunnen zeggen over het verspreidingspatroon en de hoeveelheid

sediment die het getijdemeer binnenkomt. Het meer kan in een situatie zonder regelwerk vrij met het getij van de Waddenzee meebewegen. Dit vormt de referentie situatie voor de vergelijking van de effecten van het regelwerk verderop in deze studie. Om deze doelen te bereiken is de volgende deelvraag opgesteld:

Deelvraag 1. Hoe gedraagt de waterstand zich aan de binnen- en buitendijkse zijde en hoeveel sediment komt het meer binnen zonder regelwerk?

Daarna worden alle criteria voor het regelwerk van Holwerd aan Zee op een rij gezet. Het is belangrijk dat het regelwerk de doelen van het getijdemeer ondersteund. Het regelwerk zou als doorlaat voor schepen en als waterkering kunnen functioneren. Over zulke punten moet duidelijkheid komen om later te kunnen beoordelen of de regelwerken aan deze eisen en wensen voldoen. Daarom is de volgende deelvraag opgesteld:

Deelvraag 2. Wat zijn de eisen, functies en criteria waaraan het regelwerk bij Holwerd aan Zee moet voldoen?

Om later te kunnen zeggen welk regelwerk het best bij Holwerd aan Zee past, zal eerst duidelijk moeten worden hoe de regelwerken de stroming naar het getijdemeer beïnvloeden en of de stroming mogelijk ook de sediment inlaat kan beperken. Het doel van dit onderzoek is om zo weinig mogelijk sediment in het getijdemeer te krijgen, maar het getijdemeer mag zijn spoelende functie ook niet verliezen. De toegangseul moet zo veel mogelijk worden uitgespoeld om baggerkosten daar te voorkomen. De stroming die het getijdemeer binnenkomt moet ook niet te veel sediment gaan bevatten. In eerste instantie wordt gezocht naar mogelijke regelwerken die in Holwerd aan Zee ingepast kunnen worden:

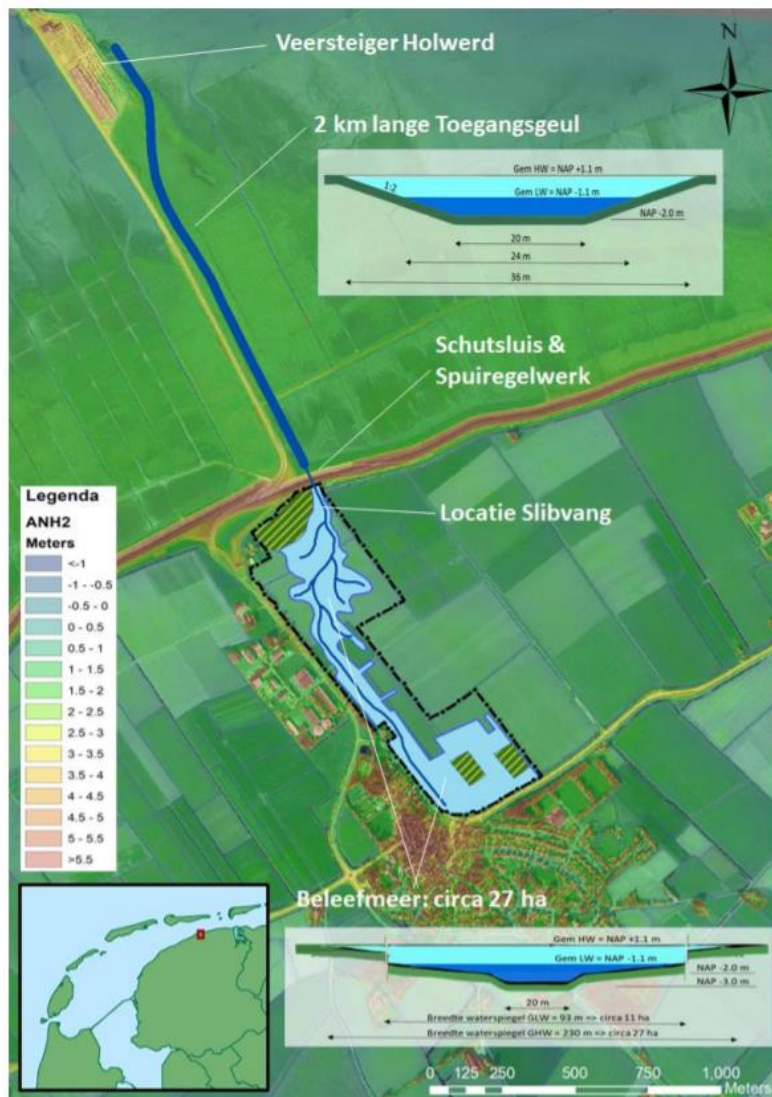
Deelvraag 3: Wat zijn gangbare regelwerk concepten voor Holwerd aan Zee en hoeveel sediment laten deze het meer binnen?

Daarna worden verschillende typen regelwerken met elkaar vergeleken om te kunnen zeggen welke regelwerken er goed bij Holwerd aan Zee passen. Het regelwerk moet voldoen aan alle criteria die bij deelvraag 2 gevonden worden. Om hier een goede keuze in te maken, is het belangrijk om alle geschikte regelwerken op een rij te zetten en de voor- en nadelen voor Holwerd aan Zee tegen elkaar af te wegen. Daarna moet er een vergelijking plaats vinden tussen de verschillende types regelwerken, en volgt er een advies voor het meest geschikte regelwerk voor Holwerd aan Zee:

Deelvraag 4. Welke regelwerken passen er het beste bij Holwerd aan Zee?

1.4 Afbakeningen

Het regelwerk gaat het effect van de waterstroming vanaf de vaargeul Holwerd-Ameland naar het spoelmeer beïnvloeden. De versterking van de stroming naar de Waddenzee zal door het regelwerk groter zijn en daarmee de vaargeul Holwerd-Ameland mogelijk beter uitspoelen. Maar dat effect wordt in dit onderzoek buiten beschouwing gelaten. Dit onderzoek zal vooral gaan over de types regelwerken en het beperken van het sedimenttransport richting het getijdemeer. Figuur 2 laat een schematische weergave van het meer zien en de geul naar de Waddenzee, met bijbehorende afmetingen en hoogtes ten opzichte van NAP.



Figuur 2, schematische weergave van het gebied met NAP hoogtes (WP2018_1125_R1r1_Holwerd_aan_zee_definitief)

De toegangsgeul naar het getijdemeer is nog niet aangelegd, maar voor het water dat hierdoorheen gaat stromen wordt aangenomen dat het gelijkwaardig is aan het water bij de pier van Holwerd. Sediment metingen zijn daar al gedaan en zullen gebruikt worden om de sediment verspreiding rondom het regelwerk en in het getijdemeer te voorspellen. Het onderzoek zal niet actief de verandering in sediment concentraties aan het begin van de vaargeul Holwerd-Ameland, bij de veersteiger Holwerd, vaststellen. De waarden die daar bekend zijn, zullen enkel als rekenmiddel gebruikt worden omdat de veranderingen in de concentraties op de Waddenzee te complex zijn binnen het kader van dit onderzoek. Daarnaast is de grootte van het getijdemeer verwaarloosbaar ten opzichte van de Waddenzee en wordt aangenomen dat er weinig verandering in sediment concentraties op de Waddenzee zal zijn door de aanleg van een getijdemeer.

In deze studie wordt aangenomen dat het regelwerk in de dijk geplaatst zal worden. Er wordt ook aan varianten gedacht waarbij dit verder in de toegangsgeul geplaatst zal worden, maar dat blijft hier buiten beschouwing. Schepen zullen te allen tijde naar de Waddenzee moeten kunnen gaan, dus het regelwerk zal als sluis moeten fungeren of er moet een aparte sluis naast komen. Het is van groot belang dat het regelwerk en de structuur er omheen sterk genoeg zijn om aan de waterveiligheidseisen van nu en mogelijk voor de toekomst (met het oog op zeespiegelstijging) te voldoen. Maar dit is geen

punt dat in dit onderzoek mee zal worden genomen. Er wordt aangenomen dat de waterkering sterk genoeg gemaakt kan worden.

Naast een regelwerk in de dijkdoorbraak, kan ook gekozen worden om de waterkering naar de buitenkant van het getijdemeer te verplaatsen. Er zou dan een dijk om het getijdemeer gebouwd moeten worden. Omdat een open verbinding tussen het getijdemeer en de Waddenzee te veel sediment in het getijdemeer en in de toegangsgeul veroorzaakt, zal deze optie niet verkend worden in deze studie. Daarnaast onttrekt de dijk het zicht op het, toeristisch aantrekkelijke, getijdemeer en komt er een hoge dijk tegen het dorp aan.

Het getijdemeer zal een brak meer moeten worden om het interessant te maken voor natuur. Het zoute water komt van de Waddenzee en het zoete water moet uit het Friese binnenwater komen. Hoeveel de instroom vanuit het binnenwater zal zijn en wat voor impact dit heeft op de zoet/zout verhouding in het meer is nog niet bekend. Wetterskip Fryslân zal dit nog uit moeten zoeken. Deze verhouding heeft impact op waar het sediment neer zal slaan in het getijdemeer, maar dit zal niet onderzocht worden binnen deze studie. De studie is gefocust op het regelwerk en daarom wordt er aangenomen dat het water in het meer dezelfde eigenschappen heeft als het water op de Waddenzee. Hierdoor kunnen bekende valsnelheden van het sediment, en de stroomsnelheid waarbij neergeslagen sediment weer geërodeerd wordt, gebruikt worden.

De regelwerken zullen ook beoordeeld worden op hoe goed ze neergeslagen sediment in de toegangsgeul kunnen uitspoelen. Hiervoor is een stromingsmodel nodig dat de eb-stroming simuleert vanuit het meer naar de Waddenzee. Bij het simuleren hiervan komen te hoge snelheden voor, waardoor er “backwatercurves” ontstaan. Omdat het gecreëerde model hier niet mee kan werken, is dit effect buiten beschouwing gelaten en zijn de stroomsnelheden niet kwantitatief maar kwalitatief beoordeeld. Hierdoor kan ook minder worden gezegd over de migratie van vissen. Vissen kunnen bij hogere stroomsnelheden niet tegen de stroming in zwemmen of worden meegenomen door de stroming. Er wordt wel een inschatting gemaakt van dit fenomeen, maar deze is niet ondersteund door een doorgerekend model.

Vismigratie is een complex proces. In het rapport wordt naar de fysieke invloed van het regelwerk op de doorlaat mogelijkheid voor vissen gekeken. Maar vismigratie bestaat uit veel componenten. Er bestaan verschillende soorten vis die zich op verschillende manieren verplaatsen. Passieve vissen, zoals paling en bot, laten zich met de stroming meevoeren. Als deze vissen naar het getijdemeer willen zwemmen komen deze vissen van de bodem af, om in de vloed-stroming meegevoerd te worden. gedurende de ebstroom blijft dit type op de bodem liggen om niet weggespoeld te worden. Als de geul uitgespoeld wordt kunnen deze passieve vissen toch weggespoeld worden. daarnaast zijn er ook actieve vissen, zoals de spiering, zeeprik en rivierprik. Actieve vissen verplaatsen in stilstaand water en kunnen tegen (kleine) stroom inzwemmen. Ook kunnen deze vissen over obstructies heen zwemmen. Daarnaast zijn er ook externe mogelijkheden om de vismigratie te bevorderen. Nevengeulen bij de toegangsgeul die niet uitgespoeld worden kunnen door vissen gebruikt worden om toch in de geul te blijven als het getijdemeer geleegd wordt. Ook kan er een vispassage naast het regelwerk geplaatst worden. Omdat dit te complexe processen zijn om hier te beoordelen, kunnen de beoordelingen afwijken van wat ze daadwerkelijk moeten zijn.

Het getij op de Waddenzee is erg dynamisch. Het verschil tussen dood-, spring- en gemiddeld tij is groot. Voor de stroomsnelheid berekeningen wordt in dit rapport enkel gewerkt met gemiddeld tij, omwille van de omvang van dit onderzoek.

Deltares, WaterProof, Leo van Rijn Sediment Consultancy en Arcadis zijn op het moment dat dit onderzoek plaatsvindt ook bezig met onderzoek naar de effecten van slib- en sedimentatie om te

komen tot een optimaal ontwerp voor Holwerd aan Zee. Het uitgangspunt hierbij is dat er een meer moet komen, maar zij zijn vrij in de keuze van het ontwerp van het complete systeem. Hierdoor kunnen de ontwerpen van het getijdemeer en de toegangseul nog gaan veranderen. Binnen dit onderzoek wordt echter uitgegaan van het ontwerp zoals dat is weergegeven in Figuur 2.

2. Methodologie

De methodologie bevat alle methodes die gebruikt worden om tot het eindresultaat van deze studie te komen: een analyse van regelwerken die (mogelijk) bij Holwerd aan zee passen. Mensen, rapporten en programma's die hebben bijgedragen aan het tot stand komen van (tussen)resultaten worden vermeld met bijbehorende bijdrages.

2.1 Eigenschappen rond het regelwerk

De eigenschappen van het water dat het getijdemeer in gaat stromen zijn nodig om later een voorspelling te doen van het sediment transport het meer in. Het totale watervolume dat het meer binnenstroomt en de tijdsduur waarin dit gebeurt leiden tot de stroming het meer in. Deze tijdsspan is niet een vast gegeven waardoor er later mee gewerkt kan worden om de stroming te optimaliseren.

Wat wel vast staat zijn het eb- en vloed-peil en de grootte van het meer. Volgens het laatste rapport (WaterProof, 2020) zal het meer 35 hectare oppervlakte krijgen bij vloed-peil. Het profiel van het meer staat nog niet vast, waardoor het exacte volume niet te berekenen valt, maar Sweco heeft al een kostenraming gemaakt waarbij schetsontwerpen zijn gemaakt die waarschijnlijk vrijwel overeenkomen met het daadwerkelijke definitieve profiel (Kollen & Stuiver, 2018). Deze profielen zullen daarom gebruikt worden om de oppervlakte van het getijdemeer bij eb-peil in te schatten.

De sedimentconcentratie in het water dat het getijdemeer binnen stroomt is ook van groot belang. Deze concentratie is niet meetbaar omdat het meer en de geul nog niet gerealiseerd zijn, maar de concentratie net voor de verbindingsecul is wel bekend. Voor een morfologisch onderzoek van de vaargeul Holwerd-Ameland van Waterproof zijn sedimentconcentratie metingen gedaan (Perk & Van Rijn, 2018). Deze worden geanalyseerd om een duidelijk beeld te vormen van het type sediment dat zich in het water bevindt en de verspreiding ervan ten opzichte van de waterdiepte.

2.2 Functies, eisen en Criteria

Het regelwerk kan meerdere functies vervullen. Naast dat het de waterstroming in en uit het getijdemeer kan controleren kan het regelwerk ook als waterkering gaan dienen. Omdat boten het getijdemeer vanaf de Waddenzee moeten kunnen bereiken, zou het regelwerk ook nog als vaardoorgang kunnen fungeren.

Om de eisen en criteria voor het regelwerk te vinden zal de mening van de grootste/meest belanghebbende partijen in kaart moeten worden gebracht. Veel criteria zijn te vinden in de Klant-eisenspecificatie Holwerd aan Zee die door Arcadis is opgesteld. Hierin wordt gesproken met stichting Holwerd aan Zee, werkgroep natuur, provincie Fryslân, gemeente Noardeast Fryslân, Wetterskip Fryslân en Rijkswaterstaat. Er zijn wensen van stakeholders, maar er zijn ook stakeholders die eisen stellen voor het regelwerk waaraan het regelwerk moet voldoen. Als het hier niet aan voldoet worden er geen vergunningen of budget verleend.

Er wordt ook met de Provincie Fryslân gesproken over de partij die het regelwerk in eigendom zal krijgen en wie het beheer en onderhoud van het regelwerk uit zal voeren. Er is met de belanghebbende partijen een document opgesteld van de verwachte eigenaar en de beheerder van alle bouwwerken van Holwerd aan Zee. Ook het regelwerk is hier onderdeel van. De eigenaar en de beheerder zijn de meest belanghebbende partijen voor het regelwerk.

Naast de input uit bovenstaande documenten zal er ook gesproken worden met medewerkers van verschillende werkgroepen binnen Holwerd aan zee. Met Erik Bruins Slot, waterbouwkundige en coastal- eco-engineer bij de Provincie Fryslân en onder andere lid van de werkgroep natuur van project Holwerd aan Zee, zal gesproken worden over de kansen en knelpunten vanuit het natuur, morfologisch

en waterbouwkundig perspectief. Ook de projectleider van Holwerd aan Zee vanuit de provincie Fryslân, Anne Meijer, zal hier zijn kijk op delen.

De wensen van de stakeholders moeten vervolgens vertaald worden naar criteria voor het regelwerk. De stakeholders willen dat het regelwerk gaat bijdragen aan bepaalde prestaties of juist dat het niet de natuurlijke processen belemmert. Deze wensen kunnen soms ook eisen zijn waardoor het niet van meerwaarde is voor het getijdemeer maar dat het een harde randvoorwaarde is. Deze eisen worden van te voren vastgesteld. Van de wensen wordt een lijst gemaakt met onderliggende onderbouwingen.

Daarnaast vindt er een analyse plaats van het gewicht van de verschillende criteria. Afhankelijk van hoeveel geld een partij inbrengt, welke belangen een partij representeert en of ze landelijke normen moeten handhaven, wordt bepaald of een partij veel invloed kan uitoefenen. De wensen van de verschillende partijen hoeven niet allemaal hard nageleefd te worden. Hier ligt dus ook nog een belangrijk vraagstuk om later met de criteria een regelwerk te beoordelen. De weging van de criteria komt vooral voort uit gesprekken met mensen die aan het project werken. Anne Meijer van provincie Fryslân heeft hier de algemene visie op als project leider vanuit de Provincie Fryslân. Erik Bruins Slot, eco-engineer bij provincie Fryslân, zit in verschillende werkgroepen voor Holwerd aan Zee. Hij zal zijn mening over de criteria en de wegingen ervan geven, waardoor er een zo goed mogelijke analyse kan worden gedaan van de totale prestaties van de verschillende regelwerken.

2.3 Regelwerk concepten

Hier wordt op zoek gegaan naar mogelijke regelwerken die in de toegangsgeul van Holwerd aan Zee geplaatst zouden kunnen worden. Deze concepten worden geselecteerd op goede prestaties op de punten die in de bepaalde criteria naar voren komen. In de studies van Deltares en WaterProof zijn al twee types regelwerken naar voren gekomen die door hen als goede oplossingen werden gezien. Door deze te analyseren komen sterke en zwakke punten naar voren die gebruikt kunnen worden om andere concepten te ontwerpen.

Ook komen er suggesties voor oplossingen van het sediment probleem vanuit het parallelle onderzoek van Deltares en WaterProof. Deze suggesties worden meegenomen in de selectie van verschillende regelwerken die in deze studie beschouwd zullen worden.

De concepten worden gespecificeerd tot een niveau waar het type deur en het type openingsmechanisme vast staan. Hoe zwaar een deur is en hoeveel kracht er op komt te staan is geen vraagstuk voor dit onderzoek. Er wordt voornamelijk met concepten gewerkt die al eerder zijn toegepast, waardoor de realisatie van de gebruikte concepten geen probleem zou moeten zijn. Concepten die nieuwe of niet gangbare mechanismes bezitten zullen minder presteren op het betrouwbaarheids- en het onderhoudskosten criterium.

Om de betrouwbaarheid van het regelwerk te kunnen beoordelen moet de methode van openen en sluiten duidelijk zijn. Ook is het belangrijk om te weten of het regelwerk de veiligheid nog garandeert als het openingsmechanisme niet werkt, dus of het regelwerk vanuit zichzelf het water vanaf de Waddenzee tegen kan houden gedurende stormen of dat de deur mechanisch op zijn plek wordt gehouden. Hier wordt voor elk van de concepten aandacht aan besteed.

2.4 Model analyse

Er zijn al drie studies gedaan naar de waterstromen en/of het sediment transport rondom het getijdemeer. Sweco, Deltares en WaterProof zijn de uitvoerders van deze studies en hebben hier rapporten over uitgebracht.

Deze studies en de modellen die daarbij zijn gemaakt worden vergeleken. In eerste instantie wordt gekeken naar de aannames die voor de modellen zijn gedaan. Ook de methodes waarmee dit is gedaan worden uitgelicht, om later te kunnen bepalen welke resultaten hier uit gebruikt kunnen worden om een voorspelling te doen hoeveel sediment het getijdemeer binnenstroomt bij de verschillende regelwerken die vergeleken worden in deze studie.

Vervolgens worden de verschillen tussen de modellen naar voren gehaald. Deze verschillen worden met behulp van de achterliggende aannames en methodes verklaard als dit mogelijk is. Met deze kennis over de studies wordt samengevat welke methodes en aannames over worden genomen voor het zelf te ontwikkelen stromingsmodel dat een voorspelling moet gaan doen van het sedimenttransport naar het getijdemeer.

2.5 Stroomsnelheden

De stroomsnelheden in de toegangsgeul en door de sluis zijn bepalend voor de hoeveelheid sediment die het getijdemeer binnenkomt. Hoe hoger deze snelheden, hoe meer sediment er het getijdemeer binnen komt. Om dit te bepalen wordt er een stromingsmodel gemaakt.

Dit model is gebaseerd op de methodes die bij het evalueren van de al gedane studies naar voren zijn gekomen. Deze studie past een model in Excel toe, waarin met tijdsstappen van tien minuten de water verplaatsing in en uit het getijdemeer wordt berekend. Met deze waterverplaatsing en de dimensies van de toegangsgeul en het regelwerk kan er een inschatting gemaakt worden van de stroomsnelheden in de toegangsgeul, de hoeveelheid sediment die het getijdemeer binnen zal komen, en of schepen nog door de toegangsgeul en door het regelwerk kunnen varen gedurende het vullen van het getijdemeer.

Het model is aanpasbaar zodat meerdere openingsregimes en afmetingen van de regelwerken doorgerekend kunnen worden. Hierdoor kan voor ieder concept het meest optimale afmetingen en openingsregime gesimuleerd worden, waardoor deze concepten later beoordeeld kunnen worden.

2.6 Multi-Criteria Analyse

Om uiteindelijk tot een advies te komen voor het meest functionele regelwerk voor Holwerd aan Zee, zal een Multi-Criteria Analyse (MCA) gedaan worden met de vastgestelde criteria voor de ontworpen regelwerk-concepten. Een Multi-Criteria Analyse beoordeelt meerdere varianten op vastgestelde criteria met een weging per criterium. De weging van een criterium wordt vervolgens vermenigvuldigt met de score van een variant. De scores worden per variant bij elkaar opgeteld tot een somscore zoals in Figuur 3 met een voorbeeld analyse is weergegeven. Deze somscore bepaalt welke variant het meest optimaal is.

De gewogen somscore van locatie A komt bijvoorbeeld voort uit de som van:

- de beoordeling van oppervlakte vermenigvuldigt met het gewicht van oppervlakte ($1,00 \cdot 3$)
- de beoordeling van capaciteit vermenigvuldigt met het gewicht van capaciteit ($0,28 \cdot 2$)
- de beoordeling van afstand vermenigvuldigt met het gewicht van afstand ($0,82 \cdot 2$)
- de beoordeling van pachtsom vermenigvuldigt met het gewicht van pachtsom ($0,00 \cdot 1$)
- de beoordeling van geluidhinder vermenigvuldigt met het gewicht van geluidhinder ($0,00 \cdot 0,5$)

Criterium	Gewicht	Locatie A	Locatie B	Locatie C	Locatie D
Oppervlak	3	1.00	0.76	0.12	0.00
Capaciteit toegangswegen	2	0.28	0.00	1.00	0.24
Afstand tot treinstation	2	0.82	1.00	0.18	0.00
Pachtsom	1	0.00	0.67	1.00	0.80
Geluidhinder	0.5	0.00	1.00	0.50	0.50
Gewogen somscore:		5.19	5.46	3.97	1.53
Voorkeursvolgorde:		2	1	3	4

Figuur 3, Multi-Criteria Analyse voorbeeld

De score van een concept kan soms kwantitatief beoordeeld worden, zoals de stroomsnelheid door de toegangsgeul die bepaalt hoeveel sediment het meer binnen stroomt, en anders kwalitatief, via een rangschikking, zoals de inschatting van de kosten van een regelwerk.

Omdat er nog veel onduidelijk is over de uitwerking van Holwerd aan Zee op punten zoals sediment inlaat, vismigratie en de locaties van recreatie, is er geen harde analyse te maken van de effecten van de verschillende regelwerken op de situatie. Wat straks echt belangrijke knelpunten blijken te zijn voor het doorvoeren van het project zal uitwijzen waar in het ontwerp van het getijdemeer en het regelwerk de nadruk op moet komen te liggen, en dus ook wat de belangrijkste eigenschappen van het regelwerk moeten zijn. De belangrijkste eigenschappen hangen af van de gewichten van de vastgestelde criteria.

Om toch de regelwerken tegen elkaar af te wegen worden er meerdere scenario's geschetst waarvoor een MCA uitgevoerd wordt, waarbij de gewichten verdeling voor de verschillende criteria wordt gevarieerd. Situaties die uitgewerkt worden zijn een situatie waarin de natuurwaarde de overhand zal hebben, een situatie waar toerisme als speerpunt naar voren komt en een situatie waarbij sediment inlaat als onbelangrijk wordt aangenomen.

3. Situatie omschrijving

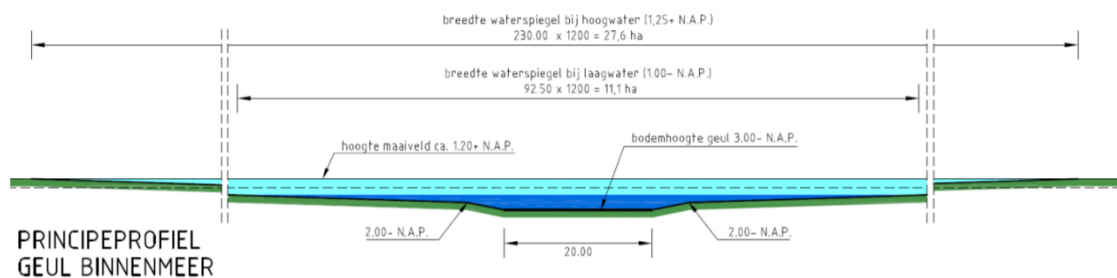
Uit een gesprek met provincie Fryslân is voort gekomen wat de huidige plannen voor Holwerd aan Zee zijn. De grootte van het meer zal 35 hectare bij vloed-peil worden. Het regelwerk komt in de dijkdoorbraak waar ook de toegangseul het getijdemeer in komt. Het gemiddelde getijdeverschil op de Waddenzee nabij Holwerd is 2,25m in 2019. Bij doottij en springtij wordt het getijdeverschil lager en hoger, maar in de meeste gevallen zal het rond het gemiddelde getij zitten. De zomer en winter metingen die door WaterProof zijn uitgevoerd laten zien dat het getij wel van maximaal eb en vloed peil verschilt (tussen de -1,8 en +1,7m t.o.v. NAP) maar dat het verschil in één cyclus altijd ongeveer twee meter is (Perk, Van Rijn, Brinkkemper, & Koudstaal, 2019). De zeespiegel langs de Nederlandse kust is de laatste 128 jaar met gemiddeld 1,9 mm per jaar gestegen (Rijksoverheid, 2018). De ontwerp levensduur van het regelwerk moet 100 jaar zijn volgens Wetterskip Fryslân.

De mondiale zeespiegelstijging is op het moment ongeveer 4 mm per jaar. Dit is hoger dan de stijging in de Waddenzee. De stijging wordt mondiaal ook ieder jaar groter. Op de Waddenzee is hier nog weinig van te zien, maar de verwachting is dat dit niet zo zal blijven volgens diverse onderzoekers in een rapport van de Waddenacademie (Waddenacademie, 2021).

3.1 Profielen en volumes

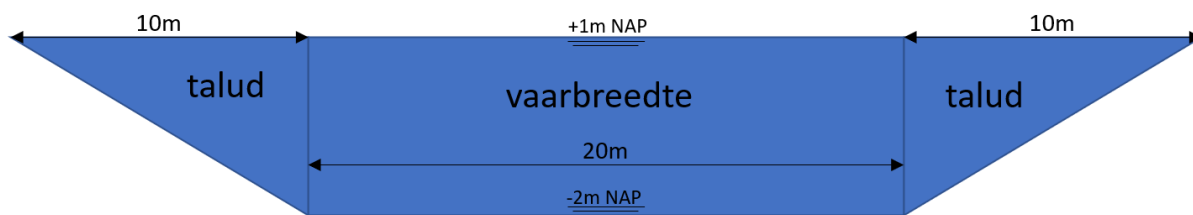
Aan de hand van het verwachte profiel dat te zien is in Figuur 4 en de resulterende getijdevolumes volgend uit de modelstudies kan een inschatting van het watervolume in het meer worden gemaakt. Zie Bijlage 1 voor de berekening van het getijdevolume.

Zowel laag- als hoogwater zullen stijgen bij zeespiegelstijging. Het getijvolume zal hierbij niet toenemen als je uitgaat van verticale oevers van het getijdemeer. Omdat de oevers al bijna tot de zijkant van het aangekochte gebied rijken wordt dit ook aangenomen. Daardoor zal het getijdevolume in het meer niet veranderen. Wel moet dit in het latere ontwerp van Arcadis meegenomen worden bij het ontwerpen van de kades en de zijkanten van het getijdemeer.



Figuur 4, inschatting van het profiel van de geul en het meer (Kollen & Stuiver, 2018)

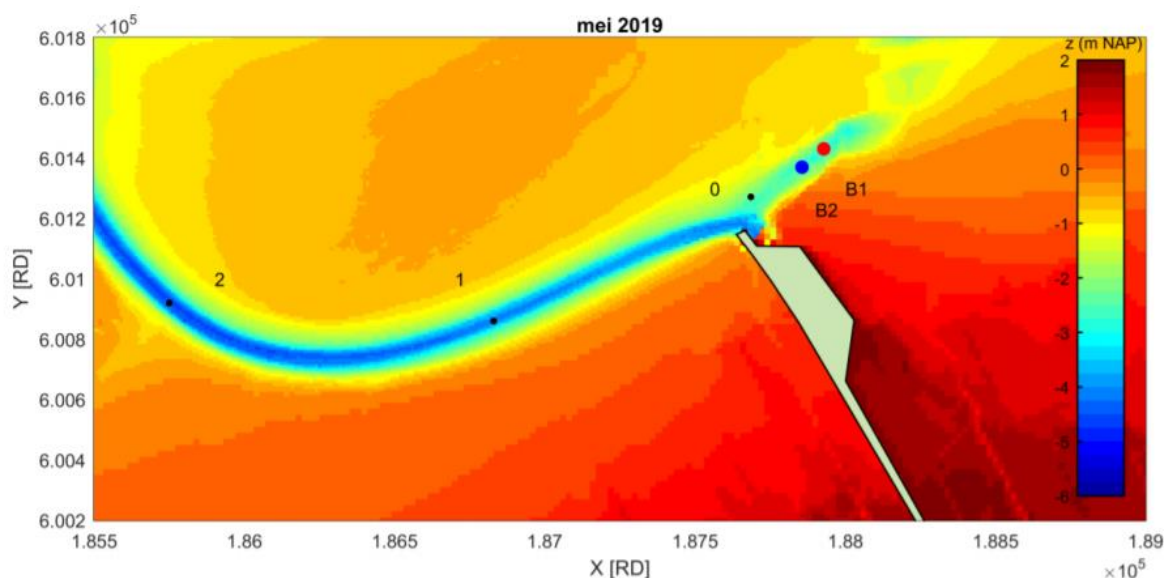
Voor de toegangseul voor Holwerd aan Zee bestaat ook nog geen ontwerp dat vastligt. Op dit moment wordt vastgehouden aan een geul zoals beschreven in Figuur 5. Dit is een geul die de beoogde pleziervaart door kan laten. Flauwe taluds zijn vriendelijk voor de vissen die door de toegangseul naar het meer moeten kunnen komen en omgekeerd. In de ondiepe regionen bevinden zich meer waterplanten en het water is er rustiger, waar vissen zich veel meer door aangetrokken voelen (FLORON, 2018). Wat de steilheid van de taluds wordt is nog niet duidelijk, dus worden de in Figuur 5 getoonde maatvoeringen, de inschatting verschaft door Provincie Fryslân, gehanteerd. Bij laag water (-1m NAP) is er nog steeds een waterdiepte van één meter waardoor pleziervaart en vissen nog goed door de geul kunnen komen.



Figuur 5, geul afmetingen

3.2 Sediment concentraties in de waterkolom

De sediment concentraties in het water dat het meer binnen zal treden worden gelijk geacht aan de concentraties bij de pier van Holwerd, zoals aangegeven in de afbakening van deze studie. De concentraties zijn gemeten door WaterProof in samenwerking met Leo van Rijn (Perk, Van Rijn, Brinkkemper, & Koudstaal, 2019). Alle informatie die in deze paragraaf volgt over de hoeveelheden sediment en de eigenschappen daarvan komt uit dat rapport. De metingen in locatie 1, te zien in Figuur 6, zijn het meest van waarde, omdat dit punt het dichtst bij de pier ligt en in de vaargeul. Deze concentraties zullen gebruikt worden om later een inschatting te maken van de hoeveelheid sediment die het meer binnen zal stromen.



Figuur 6, meet locaties sediment concentraties (Perk, Van Rijn, Brinkkemper, & Koudstaal, 2019)

Voor locatie 1 zijn metingen gedaan naar de hoeveelheden zand en slib op verschillende waterhoogtes gedurende één getijdencyclus. De resultaten van die metingen zijn weergegeven in Figuur 7. Voor alle vier de grafieken is op de X-as dezelfde tijd uitgezet. In de bovenste grafiek is de waterhoogte bij ieder tijdstip te zien. Daaronder is de gemiddelde stroomsnelheid van het water op de locatie van de meting te zien. Bij de hoogste waterstand (de top in de bovenste grafiek) is de stroomsnelheid bijna nul omdat er dan bijna geen waterverplaatsing is.

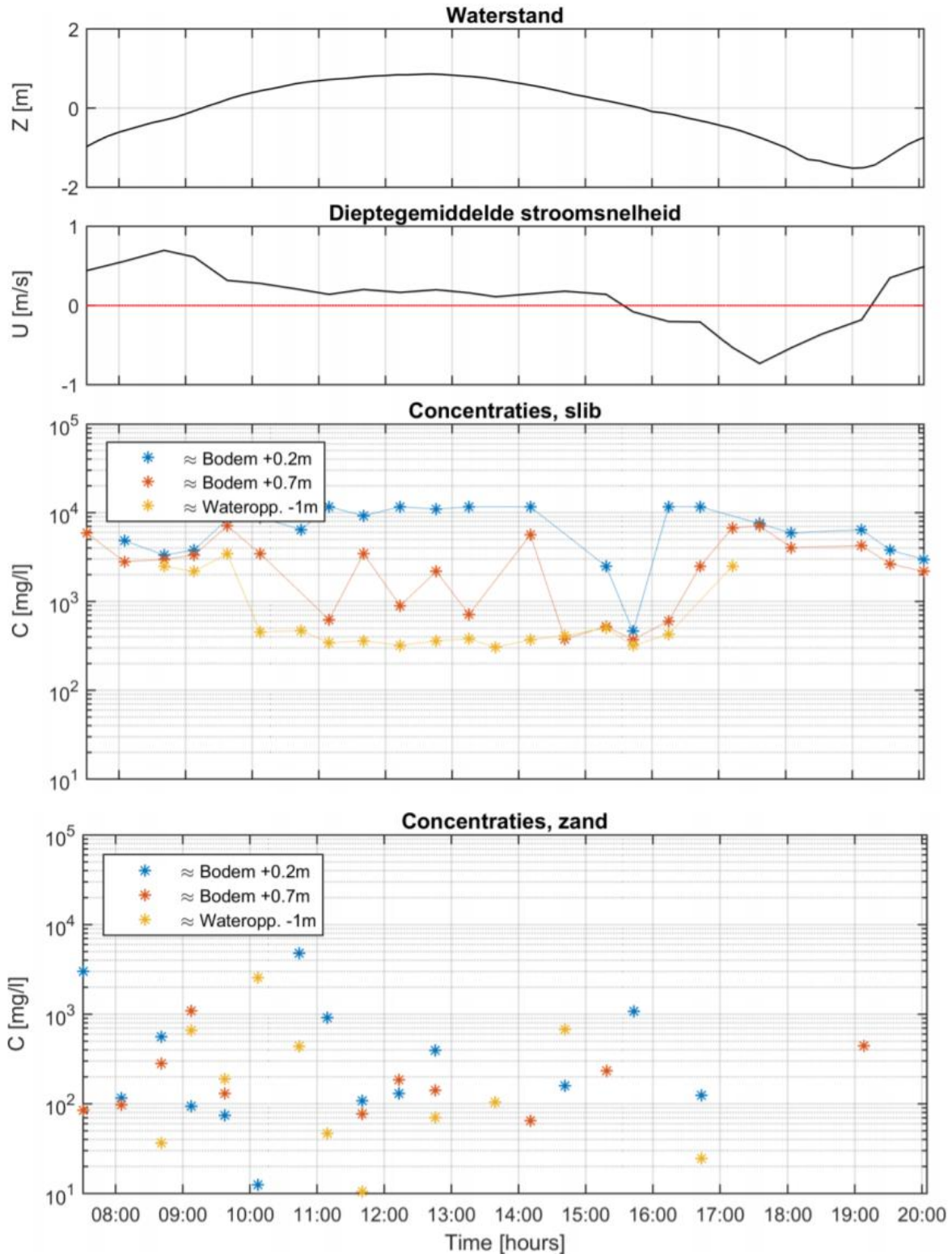
Figuur 7.c en d geven de concentraties van respectievelijk slib en zand op bepaalde waterhoogtes weer gedurende een getijdencyclus. Ook deze grafieken volgen dezelfde fase van de cyclus als de bovenste grafieken waardoor er aan verschillende momenten tijdens de cyclus verschillende eigenschappen kunnen worden verbonden.

Één van de eigenschappen die in de metingen opvalt, is de lage hoeveelheid slib in de bovenste waterkolom (1 m onder het wateroppervlak) bij de vloed-stroming met een lage stroomsnelheid.

Tussen 10:30 en 14:00 uur in de grafieken loopt de waterstand naar zijn hoogste punt (Figuur 7.a). In deze periode is de stroming in de vaargeul erg klein zoals te zien is in de stroomsnelheid grafiek (Figuur 7.b). In die periode valt op dat de concentratie slib nabij het wateroppervlak erg klein is (gele lijn in Figuur 7.c) en nabij de bodem erg hoog (blauwe lijn in Figuur 7.c). Dit verschil is met name groot omdat de schaal voor de concentraties logaritmisch is ($3 \cdot 10^2$ mg/l nabij het wateroppervlak t.o.v. 10^4 mg/l nabij de bodem). Bij hogere stroomsnelheden vallen deze concentratieverschillen weg en zit er ongeveer evenveel slib in alle delen van de waterkolom.

Voor de zandfractie is echter vrijwel niets over te concluderen over het verloop van de zandconcentratie in de getijcyclus. WaterProof heeft zelf geen lijn door deze grafiek getrokken omdat er geen patroon in de metingen te vinden is.

Deze eigenschappen van de variatie van de sedimentconcentratie in de waterkolom bij verschillende stroomsnelheden worden gebruikt om later te beoordelen hoeveel sediment het meer binnen kan stromen. De voorgestelde regelwerken hebben allen een uniek effect op de stroming het meer in en ze hebben dus ook invloed op de sediment inlaat.

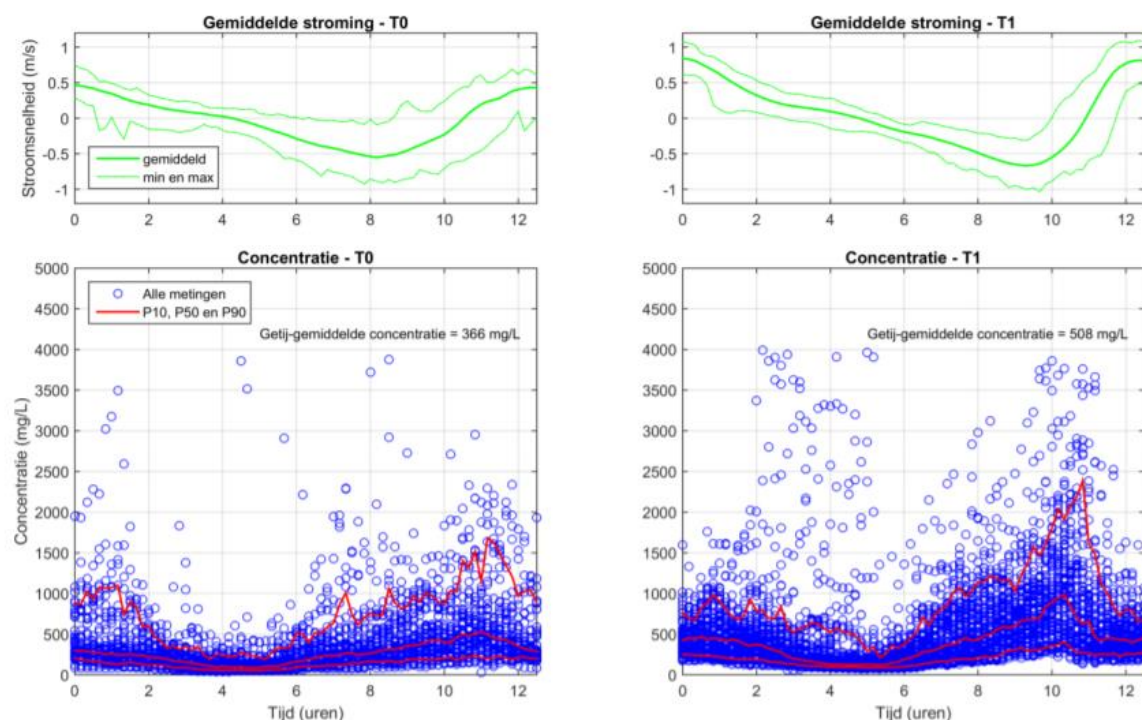


Figuur 7, meetresultaten locatie 1. De horizontale as is voor alle resultaten één getijdencyclus. Bovenaan is de waterhoogte ten opzichte van NAP, dan de gemiddelde stroomsnelheid en als laatste de slib en zand concentraties op verschillende waterhoogtes (Perk, Van Rijn, Brinkemper, & Koudstaal, 2019).

Figuur 8 laat de totale sedimentconcentratie op locatie 1, te zien in Figuur 6, in de vaargeul Holwerd-Ameland zien. De gemiddelde sedimentconcentratie bij getijdestroming nabij de pier in de vaargeul Holwerd-Ameland is 366mg/L tot 508mg/L. De lage gemiddelde waarde is gemeten aan de zijkant van

de vaargeul voor T_0 in Figuur 8. T_1 in Figuur 8 geeft de waarden weer die midden in de geul gemeten zijn. Om dit in perspectief te plaatsen: het totale volume water dat het getijdemeer binnen stroomt is ongeveer $3 \cdot 10^8$ L, wat met de lage concentratie resulteert in ongeveer 10^5 kg sedimentinstroom per getij, als hetzelfde water het getijdemeer binnenstroomt als zich in de vaargeul bevindt.

Deze waarden kunnen een indicatie geven van de hoeveelheid sediment die het meer binnen stroomt met elk getij. Ook valt in deze grafieken op dat de eerste vloed-stroming hogere concentraties bevat dan de rest van de stroming. De eerste vloed-stroming vindt plaats rond 10:30 in de bovenste grafieken van Figuur 8. Dat is het punt waarom stroomsnelheden van negatief naar positief gaan. Op het tijdstip van dat kantelpunt zijn de pieken in de sedimentconcentratie-grafieken ook te zien. Deze pieken nemen vrij snel af maar bevatten hogere sedimentconcentraties dan de latere vloed-stroming (van ~01:30 tot ~05:00). Voor T_1 is dit ongeveer drie keer zo'n hoge concentratie en voor T_0 gaat het om een factor twee.



Figuur 8, De stroomsnelheden en sediment concentraties in mg/L, uitgezet tegen de fase van het getij. p10, p50 en p90 zijn respectievelijk dood-, gemiddeld-, en springtij. T_0 is aan de zijkant van de vaargeul Holwerd-Ameland en T_1 is midden in de vaargeul (Perk, Van Rijn, Brinkkemper, & Koudstaal, 2019).

3.3 Erosie van neergeslagen sediment

Een eigenschap die ook van belang is, is de erosie van het sediment dat neerslaat in de toegangsgeul en in het getijdemeer. Als dit bijvoorbeeld in de geul gebeurt, moet het geërodeerde sediment wel weer afgevoerd kunnen worden. Tabel 1 laat de stroomsnelheden zien waarbij waargenomen zandslib mengsels eroderen en door de stroming mee genomen worden. Bij een stroomsnelheid van 1,3 m/s erodeert al het oppervlakte sediment en wordt het meegenomen door de stroming zoals te zien is in de oppervlakte erosie kolom in Tabel 1. Bij die stroomsnelheid vindt er oppervlakte erosie plaats bij alle dichtheden neergeslagen sediment (deze dichtheden zijn in kolom 3 van Tabel 1 weergegeven). Deze waarde is van belang bij het uitspoelen van de toegangsgeul en de beoordeling ervan. De locaties zijn onbelangrijk in de tabel. Ze geven aan waar neergeslagen sediment met een bepaalde dichtheid weg is gehaald in de vaargeul Holwerd-Ameland, maar het gaat er enkel om dat alle geobserveerde dichtheden weggespoeld kunnen worden bij de genoemde stroomsnelheid.

Tabel 1, de schuifspanning en bijbehorende stroomsnelheid waarbij zand-slib mengsels eroderen.

	Nr. proef	Droge dichtheid (kg/m ³)	Oppervlakte erosie		Massa erosie	
			Tau_kritiek (N/m ²)	U_kritiek (m/s)	Tau_kritiek (N/m ²)	U_kritiek (m/s)
Loc 102, -0,3 km	A	300±30	0,25	0,40	0,45	0,55
	B	330±30	0,35	0,48	0,60	0,63
	C	500±30	0,45	0,55	0,75	0,70
	D	710±50	1,0	0,80	1,40	0,95
Loc 2, 1km	E	700±30	1,5	1,0	2,5	1,3
Loc 3, 2km	F	1100±50	2,5	1,3	2,9	1,4
Loc 4, 3km	F	1100±50	2,5	1,3	2,9	1,4
Loc 6, 4km		n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Loc 7, 5km	G	1500±50	0,4	0,5	-	-
Loc 10, 6km	G	1500±50	0,4	0,5	-	-

4. Functies en eisen

4.1 Functies

Een regelwerk kan meerdere functies vervullen. Een regelwerk kan een concept van een deur zijn die het water tegen houdt en ook een doorgang voor schepen biedt. Het is ook mogelijk dat er naast het regelwerk nog een aparte schutsluis moet komen omdat het regelwerk niet de benodigde vaardiepte kan garanderen of te veel dicht is. Het getijdemeer moet een positief effect hebben op het toerisme in het gebied rond Holwerd en een uniek ecologisch gebied creëren. Het regelwerk moet dit ondersteunen.

Om de doelen van het project Holwerd aan Zee te halen, zou het regelwerk de volgende functionaliteiten moeten hebben:

- Waterstroming controleren
- Doorgang voor schepen
- Doorgang voor vis

4.2 Eisen

Bepaalde criteria voor Holwerd aan Zee zijn harde eisen (randvoorwaardes) voor het ontwerp van het regelwerk. Als aan die eisen niet wordt voldaan, wordt het ontwerp niet goedgekeurd.

Een opening in de Waddenzee-dijk zorgt voor een situatie die niet aan de waterveiligheidseisen voldoet. Het te plaatsen regelwerk (of andere constructie) moet deze veiligheid verzekeren. Een deur of muur kan deze veiligheid verwezenlijken in de dijkdoorbraak. Er kan ook gedacht worden aan een waterkering om de rest van het getijdemeer heen in plaats van bij de inlaat. Dan ontstaat er een open verbinding tussen het getijdemeer en de Waddenzee, die veel sediment binnen laat. Dit is alleen geen optie omdat de aanleg van een dijk rond het gehele meer het zicht op het natuurgebied in het getijdemeer wegneemt en het voor een grote muur om het dorp Holwerd zorgt. Daarom wordt er in deze studie alleen met naar regelwerken gekeken die in de dijkdoorbraak te plaatsen zijn. Wanneer niet aan de veiligheidseisen voldaan wordt, kan het project vanuit Wetterskip Fryslân en dus ook vanuit Rijkswaterstaat geen goedkeuring krijgen. De sluiting en stabiliteit van het regelwerk bij storm/ in storm seizoen is een vereiste die hieruit volgt. Daarnaast moet het regelwerk ook voor doorgang voor vissen en schepen zorgen. De minimale restricties hiervan zijn nog niet bekend, daarom worden deze eisen als wensen beschouwd.

5. Criteria

De criteria die zijn opgesteld zijn onder verdeeld over de verschillende stakeholders. Criteria die voor het regelwerk gelden zijn gehaald uit de klant-eisenspecificatie die is opgesteld door Arcadis (Arcadis, 2020). Hierin is met belanghebbende partijen gesproken over hun wensen voor Holwerd aan Zee met de nadruk op de sluis, het regelwerk en de geul. Veel van de wensen komen uit de functies die het regelwerk voor het meer moet bieden, vandaan.

5.1 Criteria per Partij

Als eerste worden de criteria van provincie Fryslân naar fysieke wensen vertaald. De hoofdpunten voor de provincie zijn het aantrekken van toerisme, een stuk nieuwe natuur voor vissen en vogels creëren en kosten reductie van het baggeren in de vaargeul Holwerd-Ameland, in het getijdemeer en in de toegangsgeul. Daarbij in het oog houdend de kosten voor de bouw en het onderhoud en de bekendheid van de provincie met bepaalde systemen.

Gemeente Noardeast Fryslân heeft geen directe wensen voor het regelwerk. Zij willen een vaardoorgang naar de Waddenzee en geven aan geen baggerkosten op zich te kunnen nemen. Ook Rijkswaterstaat zegt geen wensen te hebben voor het regelwerk. Wel geeft Rijkswaterstaat aan in het oog te houden dat er ook plannen worden onderzocht om de pier van Holwerd verder de zee op te bouwen om de vaargeul korter te maken en dus de baggerkosten te reduceren.

Wetterskip Fryslân heeft wel wensen voor het regelwerk. Het Wetterskip wil een garantie hebben dat het regelwerk niet kan vast- of dichtslippen. Daarnaast staat duurzaamheid hoog in het vaandel bij Wetterskip Fryslân.

Stichting Holwerd aan Zee heeft meerdere wensen met betrekking tot leefbaarheid en natuur. Zij zien Holwerd aan Zee als een project voor het dorp en de natuur en daarom moet er zo duurzaam mogelijk gedacht worden. Hergebruik van materiaal en esthetiek ten opzichte van de omgeving zijn belangrijke punten. De toegang tot het meer vanaf de Waddenzee mag niet getij gebonden zijn en moet dus zo veel mogelijk gewaarborgd blijven. Als het meer uitgebreid wordt aan de westzijde van Holwerd moet het regelwerk dat ook aankunnen (toekomstbestendigheid).

Werkgroep Natuur wil dat zo veel mogelijk het getij van de Waddenzee gevolgd wordt. Een grote open verbinding heeft daarom hun voorkeur en als dit niet kan, moet het regelwerk zo veel mogelijk open staan. Omdat deze werkgroep aanvoelt dat een openverbinding niet door zal kunnen gaan, zijn zij met het volgende motto gekomen: Natuurlijkheid met de hand op de kraan. Erik Bruins Slot, eco-engineer, legt er de nadruk op dat het plaatsen van een regelwerk in een spoelmeer niet bevorderend is voor de aantrekking van vissen. Er van uitgaand dat het meer nog steeds een brak meer moet worden, zal bij de leegloop van het getijdemeer een zoete lokstroom de Waddenzee opgaan. Deze lokstroom trekt vissen naar het getijdemeer toe. Als door het regelwerk het water lang vastgehouden wordt in het meer, waardoor er maar een korte tijd een zoete lokstroom is, zullen weinig vissen de weg naar het meer vinden. In een kortere tijd het getijdemeer uitspoelen zorgt ook voor een sterkere stroming door de geul, waardoor vissen minder makkelijk in het getijdemeer kunnen komen. Daarom is hun wens om het regelwerk zo veel mogelijk open te houden.

5.2 Criteria definiëren

De wensen moeten worden vertaald naar criteria. De vertaling van de wensen is te vinden in

Bijlage 2

onderbouwing technische wensen regelwerk. De vertaalde wensen zijn in Tabel 2 weergegeven met bijbehorende stakeholder.

Tabel 2, wensen per stakeholder voor het regelwerk

nummer	wensen	Stakeholder(s)
1	Sediment inlaat minimaliseren	Provincie Fryslân,
2	Maximaliseren doorvaart mogelijkheden pleziervaart	Provincie Fryslân, stichting HaZ
3	Uitspoelen van de toegangsgeul	Provincie Fryslân,
4	Maximale betrouwbaarheid van de deuren	Provincie Fryslân,
5	Duurzame mogelijkheden voor de bouw/beheer van het regelwerk	Wetterskip Fryslân, stichting HaZ
6	Vismigratie	Werkgroep Natuur
7	Bouw- en onderhoudskosten*	Toekomstig eigenaar*
8	Toekomstbestendigheid	Stichting HaZ
*Naast de in de hierboven vernoemde wensen behoort het kostenplaatje ook tot de beoordeling van het regelwerk. Omdat de eigenaar en onderhoudende partij nog niet bekend zijn is dit ook geen wens van een partij. Maar degene die het product moet gaan bouwen en onderhouden zal dit erg belangrijk vinden.		

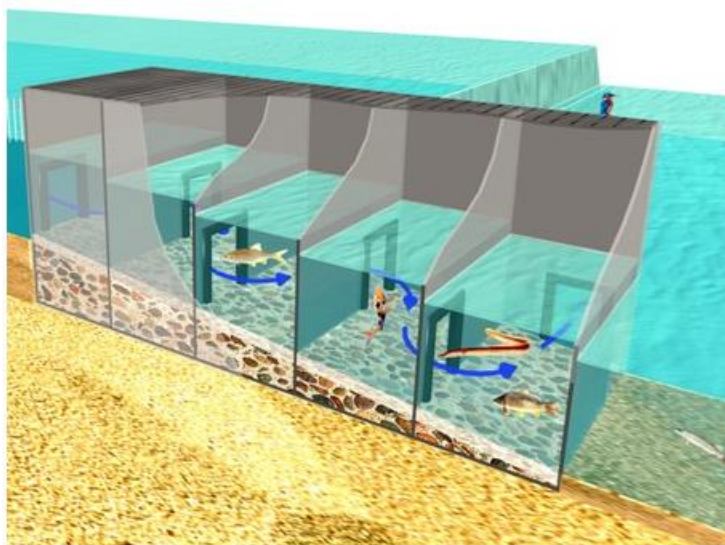
5.3 Criteria beoordeling

Hoe de criteria worden beoordeeld, is te lezen in onderstaande beschrijvingen genummerd per wens zoals deze ook in Tabel 2 genummerd zijn.

1. **Sediment inlaat minimaliseren:** De stroomsnelheid door de geul en de sluis bepaalt de hoeveelheid sediment inlaat, samen met de concentratie sediment in het water (dit laatste kan echter niet gecontroleerd worden). Hoe groter de stroomsnelheid bij ingaand getij is hoe slechter de prestatie van een regelwerk op dit punt wordt beoordeeld. Hoe lager de stroomsnelheden hoe minder sediment het meer bereikt. De eerste waterstroming vanaf eb die het getijdemeer binnenkomt neemt groter concentraties mee. Als deze buiten kan worden gehouden komt er minder sediment binnen en wordt het concept beter beoordeeld. Daarnaast kan het onderste deel van de waterkolom mogelijk tegengehouden worden. Dit deel van de waterkolom bevat hogere concentraties bij lage stroomsnelheden waardoor ook dit een positieve uitwerking op de hoeveelheid sediment die het meer binnenkomt kan hebben.
2. **Maximaliseren van de doorgang voor de pleziervaart:** Het maximaliseren van de doorgang voor de pleziervaart wordt voornamelijk bepaald door de tijd dat het regelwerk open kan staan. Indien er een losse schutsluis naast het regelwerk wordt gebouwd, zal doorvaart bijna altijd mogelijk zijn, maar dit zal automatisch de kosten verhogen. Sommige regelwerk concepten kunnen ook alleen water nabij het wateroppervlak doorlaten, maar hier is op dat moment niet met alle types schepen doorheen te varen. De hoeveelheid tijd waarin schepen wel door het regelwerk kunnen varen in het toeristische seizoen is de maatstaf voor dit criterium.
3. **Uitspoelen van de toegangsgeul:** Om de toegangsgeul uit te spoelen moet de stroomsnelheid minimaal 1,3m/s zijn bij het leeglopen van het getijdemeer. Als het regelwerk hier niet voor kan zorgen, zal de geul toch dichtslibben en brengt dit baggerkosten met zich mee. Hoe meer de stroomsnelheid lager dan 1,3 m/s is bij ebstroom, hoe slechter de beoordeling hierop is. Ook de aansluiting van het regelwerk op de sluis bepaalt of al het sediment afgevoerd zal

worden (zie Figuur 24 voor een voorbeeld waarbij het regelwerk niet goed op de toegangsgeul aansluit).

4. **Maximale betrouwbaarheid van de deuren:** De maximale betrouwbaarheid van de deuren heeft voor de provincie de voorkeur. Zij willen vooral een deur gebruiken waar al meer mee wordt gewerkt zodat zij al op de hoogte zijn van onderhoudsmaatregelen en dergelijke. De bekendheid van een oplossing en of deze al in gebruik is bij andere regelwerken, zal hier positief beoordeeld worden.
5. **Duurzame mogelijkheden voor bouw/beheer van het regelwerk:** Of een regelwerk ook daadwerkelijk van duurzame materialen gebouwd kan worden hangt van het type deur of extra waterkering af. Er zal gekeken worden naar de opties in uitvoering van de deuren en de levensduur van de materialen.
6. **Vismigratie:** Het optimaliseren van de vismigratie wordt beoordeeld op de hoeveelheid tijd dat er zich een obstructie in de water doorlaat bevindt, of vissen een andere toe- en uitgang tot het getijdemeer hebben en of de gecreëerde situatie met het regelwerk aantrekkelijk is voor vissen. Hoe langer de open verbinding tussen het getijdemeer en de Waddenzee is verbroken, des te negatiever de beoordeling op dit criterium. Vissen zullen door een zoete lokstroom aangetrokken worden. De lokstroom moet zo lang in stand blijven dat vissen het meer kunnen bereiken. Als het meer in een korte tijd wordt leeggespoeld, is de lokstroom maar kort waarneembaar voor vissen, waardoor ze het meer waarschijnlijk niet gaan vinden/bereiken. Ook zijn te grote stroomsnelheden het meer uit niet wenselijk, omdat de vissen die op weg zijn naar het meer dan weer de geul uit worden gespoeld. Nevengeulen die in de taluds worden verwerkt kunnen dit mogelijk beperken. Bij te veel obstructie door het regelwerk, kan ook een vispassage geplaatst worden waardoor vissen toch ten alle tijden kunnen passeren. Een voorbeeld hiervan is te zien in Figuur 9.
7. **Bouw- en onderhoudskosten:** De verwachte bouw- en onderhoudskosten zullen gerangschikt worden van lage tot hoge kosten. Hiervan zal een inschatting gemaakt worden samen met technici bij provincie Fryslân, om zo de regelwerk concepten te rangschikken.
8. **Toekomstbestendigheid:** Hoe toekomstbestendig het regelwerk zal zijn, hangt af van het getijdvolume dat de deur door kan laten in een getijdencyclus. Als het getijdemeer (bijna) hetzelfde eb- en vloed-peil kan houden met een toename van de omvang van het getijdemeer dan zijn er geen aanpassingen nodig bij een uitbreiding van het getijdemeer.



Figuur 9, voorbeeld vispassage (de Wit-passage (Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden, sd))

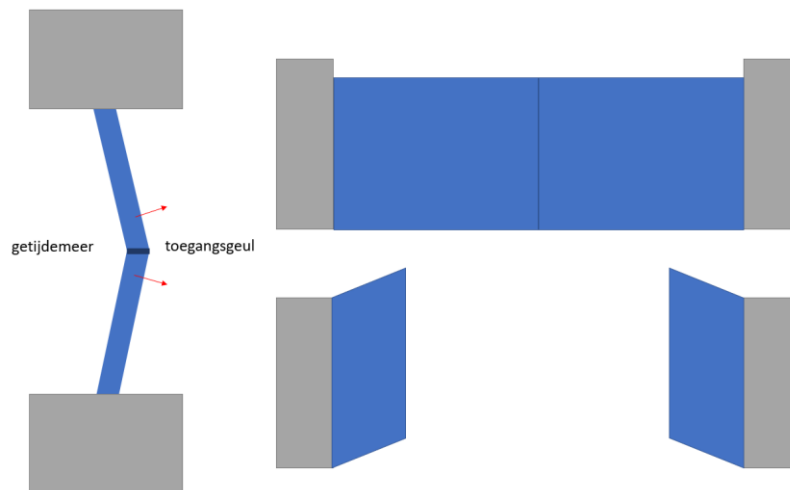
6. Regelwerk Concepten

In dit hoofdstuk zullen regelwerk concepten naar voren komen die toepasselijk lijken voor de locatie in de dijkdoorbraak. Een open verbinding is geen optie door de randvoorwaarde van de waterveiligheid. Alleen in het geval dat de stormvloedkering naar de randen van het getijdemeer wordt verplaatst kan dit, maar dit past niet bij het toeristische doel van Holwerd aan Zee en wordt dan ook niet als optie beschouwd. De concepten die wel naar voren komen zijn concepten die veelbelovend worden geacht door de auteur en andere betrokken partijen.

6.1 Schutdeuren

Schutdeuren worden door de Provincie Fryslân als voorkeur gegeven. Met deze deuren hebben zij veel en goede ervaring waardoor dit concept goed te installeren is en bekend is hoe dit onderhouden moet worden. De schutdeuren staan met de punt naar de Waddenzee toe om de functie als waterkering te verwezenlijken. Als het hoog water op de Waddenzee is, zullen de deuren door de waterdruk dicht gedrukt worden waardoor er geen externe krachten voor nodig zijn om het water tegen te houden.

Deze deuren kunnen de eerste stroming die het meer binnen komt tegenhouden om de sediment rijkste waterstroom het getijdemeer niet in te laten. Hiervoor blijft de deuren gesloten bij de ebstand totdat de grote concentraties weg zijn. De schutdeuren gaan ook als doorgang voor de pleziervaart dienen. De breedte van de deuren is zo breed mogelijk. Omdat de toegangsgeul maar 20 meter breed is voordat de taluds beginnen worden ook de deuren samen niet breder dan 20 meter. Een verbreding in het einde van de toegangsgeul is een optie. Deze verbreding zal alleen voor lokale daling in stroomsnelheid zorgen, waardoor daar meer sediment neerslaat en minder goed uit te spoelen is. Figuur 10 geeft een bovenaanzicht, vooraanzicht van dichte deuren en een vooraanzicht met open deuren weer.



Figuur 10, schutsluisdeuren

Om de deur te openen is een mechanisme nodig. Het kan bediend worden met een stang die op het einde van de deur bevestigd wordt zoals in Figuur 11 te zien is. Dit mechanisme neemt wel met zich mee dat de deur open wil gaan als de waterhoogte in het getijdemeer hoger is dan in de Waddenzee. Als het waterpeil in het getijdemeer (veel) hoger is dan in de toegangsgeul, staat er waterdruk op de deuren vanaf het getijdemeer. Omdat de punt van de deuren naar de toegangsgeul is gericht, duwt de waterdruk de deuren dan open. Door het openingsmechanisme wat zwaarder uit te voeren kunnen de deuren wel in deze positie worden gehouden.

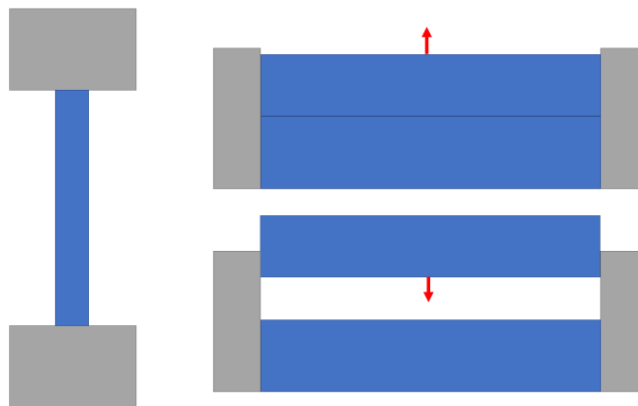


Figuur 11, stangen op uiteinde van de deuren van de schutsluis

De schutdeuren zijn meestal van hout gemaakt maar er zijn ook ontwikkelingen rond schutdeuren die van composiet gemaakt kunnen worden. Dit materiaal heeft als voordelen dat het veel lichter en sterker is en een langere levensduur heeft (Kroon, 2016)..

6.2 Vaste muur met schuif

De rechter schematische tekeningen in Figuur 12 geven de vooraanzichten van de muur en schuif weer. Bovenaan is de schuif gesloten voor waterdoorlaat en onderaan is het geopend door de schuif omhoog te trekken. Het onderste deel, de muur, van het regelwerk is niet beweegbaar. Het kan bijvoorbeeld een betonnen of stalen obstructie zijn die het water tegenhoudt totdat het waterpeil hoger is dan de hoogte van de obstructie. Hierdoor kan het waterpeil in het getijdemeer niet lager komen dan de hoogte van de vaste muur. Hierdoor gaat een deel van het getijdenvolume verloren afhankelijk van hoe hoog de muur wordt. Het bovenste deel is een schuif die omhoog kan om water door te laten en omlaag kan om het water tegen te houden.



Figuur 12, muur met vrije bovenkant

Het bovenste deel van de kering is eigenlijk een hefdeur zoals in Figuur 13 een voorbeeld is weergegeven. De hefdeur heeft als voordeel dat de muur door de zwaartekracht sluit. Dus als het mechanisme om de deur te openen en sluiten niet werkt zal de deur wel als waterkering fungeren. de hefdeur zal omhoog getakeld worden met staalkabels of kettingen. Hoe hoog deze deur getakeld wordt bepaald of hij ook als scheepdoorlaat kan fungeren of niet. Als de hefdeur bij openen net boven het waterpeil komt kunnen de schepen er niet door en moet er een losse schutsluis komen. Hoe hoger hij daarboven komt hoe meer schepen er doorheen kunnen komen. Voor zeilboten is zelfs een constructie nodig zoals in Figuur 13 te zien is. Als er betonnen palen neer worden gezet waartussen de schuif hoog

genoeg kan komen, kunnen boten hier onderdoor varen. Deze hoge constructie brengt wel grote kosten met zich mee.

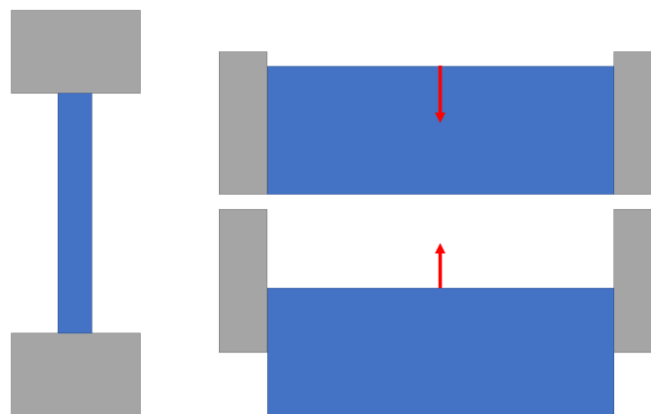


Figuur 13, voorbeeld van een hefdeur die in Moerdijk gebruikt wordt.

De andere optie is om een schutsluis naast deze constructie te bouwen. Hier kunnen de schepen dan altijd doorheen, ook al is er een groot watersverschil tussen de Waddenzee en het getijdemeer. De toegangsgeul is 20 m breed, als hier een schutsluis naast de schuif kom is er minder ruimte over voor de schuif. Hierdoor wordt de doorlaat wel smaller waardoor het getijdemeer mogelijk minder getijdeverschil krijgt. Dit concept is het enige concept dat het zicht vanaf het getijdemeer op de toegangsgeul gaat ontnemen, maar met simpele principes de inlaat van sediment naar het getijdemeer kan reduceren.

6.3 Zakkende muur

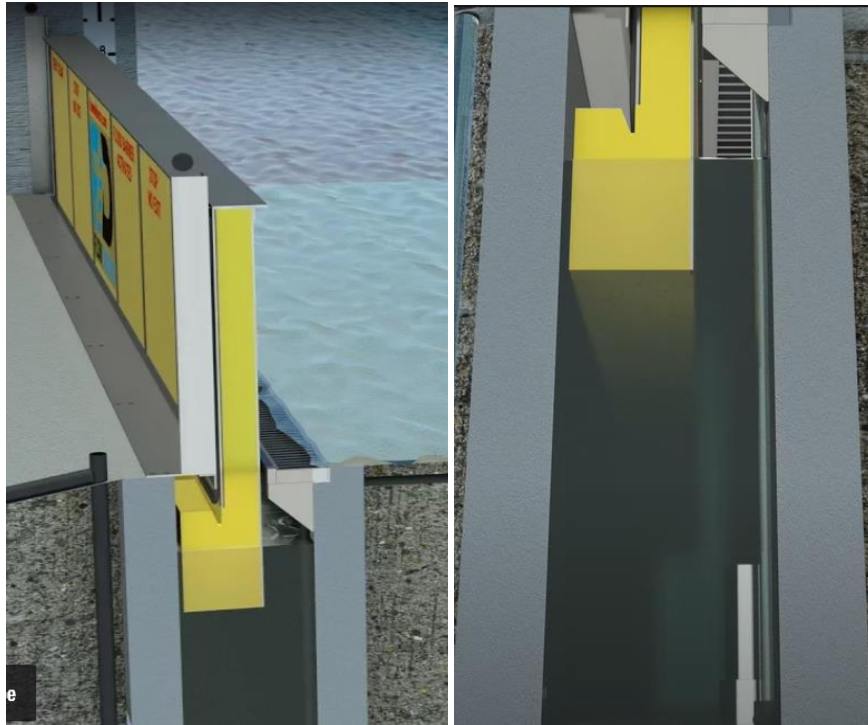
Omdat het eerste deel van de vloed-stroming relatief veel sediment bevat, is het tegenhouden van de eerste vloed-stroming een methode om sediment inlaat te reduceren. Ook is er bij lagere stroomsnelheden een significant kleinere sediment concentratie in de stroming nabij het wateroppervlak. Beide punten kunnen gerealiseerd worden met een verticaal beweegbare muur. Door de eerste stroming tegen te houden moet het getijdemeer wel in een kortere tijdspan gevuld worden, waardoor de gemiddelde stroomsnelheid stijgt. Hogere stroomsnelheden zorgen wel voor meer sediment transport. Figuur 14 geeft een schematische weergave van dit concept.



Figuur 14, zakkende muur concept

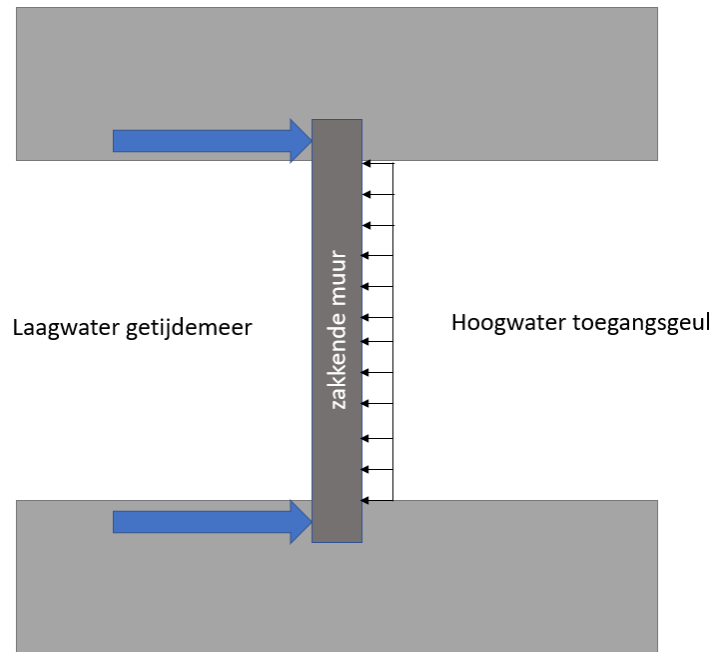
De zakkende muur zou ook een prima alternatief voor de doorlaat voor schepen kunnen zijn. De muur moet dan een afstand onder de waterstand blijven (ongeveer één meter). Buiten het hoogseizoen kan de muur ook door een “brugwachter” worden gestuurd als de opening optimaler is als deze kleiner is dan één meter. De muur kan dan bijvoorbeeld op 50 cm onder het waterpeil staan. Als er dan schepen aan komen, laat de brugwachter de muur zakken tot 1 m onder het waterpeil waardoor de schepen er overheen kunnen varen.

Deze muur kan op twee manieren open en dicht worden gedaan. De muur kan een opdrijvende muur worden of een muur die opgetakeld moet worden. Voor beide methodes verdwijnt de muur in de grond, zoals de linker afbeelding in Figuur 15 laat zien. De deur kan opdrijvend worden gemaakt door luchtkasten in de deur te verwerken. Er is dan enkel een ketting aan de onderkant van de deur nodig om hem onder water te trekken. Als de deur niet opdrijvend is moet deze omhoog worden getrokken.



Figuur 15, opdrijvende muur (Flow Defence, 2020). Als het water stijgt drijft de muur omhoog, hij kan dan met kabels of kettingen naar beneden worden getrokken in de ruimte. Links is de muur te zien en rechts de ruimte waar hij in kan zakken.

Bij grotere waterstandsverschillen is de druk van de deur op de constructie er om heen erg groot. Figuur 16 laat een model zien van de krachten die dan op de deur plaats vinden. Bij hoogwater in de toegangsgeul en laagwater in het getijdemeer zorgt de grotere waterdruk aan de kant van de toegangsgeul ervoor dat er grote krachten op de zijkanten van de zakkende muur komen te staan.



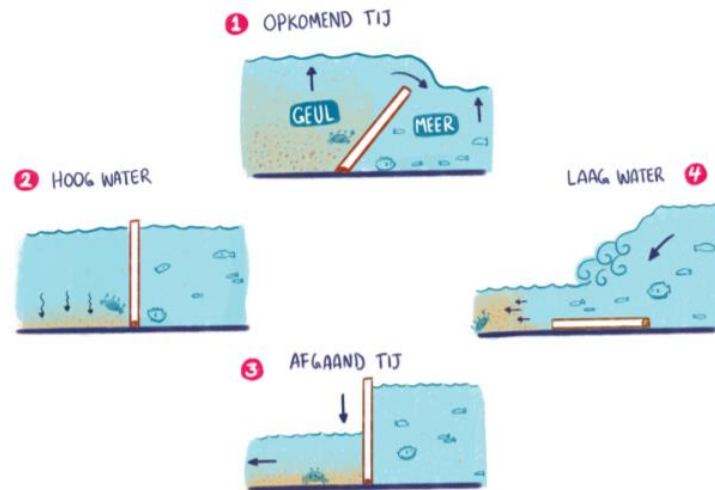
Figuur 16, boven aanzicht van de krachten op de zakkende muur

De zijkant van de muur drukt door die waterdruk, op de constructie waardoor er weerstand op het omhoog en omlaag bewegen van de deur komt te staan. Hierdoor kan het openen van het regelwerk een probleem zijn. Door meerdere segmenten van deze muur te creëren worden deze krachten verdeeld, waardoor de weerstand ook lager is. De muur beweegt omhoog en omlaag door geleiders aan de zijkant. Een rolsysteem zorgt voor de laagste weerstand om de deur op en neer te bewegen. Dit kan in de slibrijke omgeving mogelijk voor defecten zorgen waar wel rekening mee moet worden gehouden.

In de ruimte onder de muur, waar de muur bij openen in verdwijnt, mag geen sediment komen zitten omdat de muur er dan niet meer in past. Dit sediment moet weg gespoeld worden om het regelwerk werkend te houden. Om dit op te lossen kan met luchtinjectie worden gewerkt om het slib daar weg te blazen (Kroon, 2016).

6.4 Kantelbare klep

Als laatste is de klep die door WaterProof is gebruikt in een model meegenomen als optie voor Holwerd aan Zee. De klep heeft onderaan een kantelpunt waardoor hij op de grond ligt, of overeind kan worden getrokken. Dit omhoog trekken gebeurt door middel van staalkabels, kettingen of een hydraulische arm. Als de muur helemaal rechtop getrokken is, staat deze tegen de constructie van het regelwerk te leunen. Figuur 17 laat de werking van de klep zien en Figuur 18 laat zien hoe het regelwerk door de constructie in staande stand niet verder kan draaien doordat het tegen de constructie aan leunt en hoe het geopend kan worden met een hydraulische arm. In Figuur 17 lijkt de klep beide kanten op te kunnen kantelen, maar dat is voor dit concept niet het geval. De klep kantelt richting de Waddenzee en als de muur rechtop staat komt hij tegen de constructie te staan.

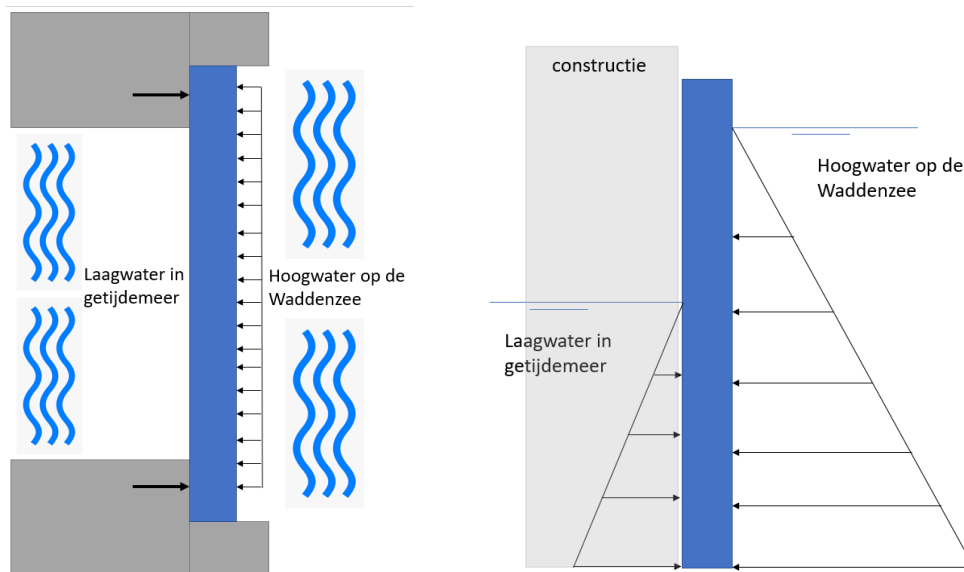


Figuur 17, werking kantelbare klep (Perk & Van Rijn, 2018)



Figuur 18, van links naar recht: kantelbare klep boven aanzicht dicht/staand, bovenaanzicht klep open/liggend, zij aanzicht klep dicht staand en zij aanzicht half open.

De klep wordt omhoog getrokken door kabels of kettingen die bevestigd zijn aan de uiteindes van de klep. Ergens op de constructie komt dan om de klep omhoog te trekken. Als de hydraulische arm gebruikt wordt, moet er een mechanisme in de constructie gebouwd worden die de arm in en uit kan schuiven. Als het stormt op de Waddenzee, en het waterpeil op de Waddenzee hoger is dan in het getijdemeer, zal de deur zichzelf dicht houden. De waterdruk vanaf de Waddenzee op de deur is dan groter dan vanuit het getijdemeer waardoor hij tegen de constructie aandruwt zoals te zien is in Figuur 19. Daarnaast kan het water in het getijdemeer ook vast gehouden worden als het op de Waddenzee eb aan het worden is door de muur recht op te houden met de kabels of hydraulische arm.



Figuur 19, krachten op de kantelbare klep in dichte stand. Links een bovenaanzicht en rechts een zij aanzicht

7. Stromingsmodellen

Er zijn al studies uitgevoerd die het sedimenttransport tussen de Waddenzee en het getijdemeer trachten te voorspellen. Deze modellen zullen geanalyseerd en geëvalueerd worden in dit hoofdstuk om een eerste indruk te schetsen van de dynamiek van het systeem. Daarna wordt een eigen model gemaakt dat de stroom snelheden in de toegangsgeul en de waterstanden simuleert, mede gebaseerd op eigenschappen of formules uit modellen die positief naar voren zijn gekomen. Met dit gecreëerde model worden vervolgens de concepten doorgerekend en openingsregimes bepaald.

7.1 Analyse stromingsmodellen

Deltares heeft een numeriek model gemaakt dat is gebaseerd op rekenregels voor berekeningen van het debiet door doorlaatmiddelen (Henissen & Meire, 1998). Dit kan gebruikt worden voor een getijdemeer met een open doorgang. Hiermee wordt de waterstroom het getijdemeer in en uit in kaart gebracht. Wat de watersnelheden op verschillende plaatsen in het meer zijn, wordt niet duidelijk vanuit dit model. Het doel van het model was ook enkel om de waterstroming die ontstaat op de Waddenzee bij het uitspoelen van het getijdemeer in kaart te brengen. Met het model valt alleen te voorspellen hoeveel sediment uit de vaargeul op de Waddenzee gespoeld wordt en niet hoeveel sediment er in de geul en in het meer gaat zitten.

WaterProof heeft een FLUSHING-BASIN/SEDHAR model gebouwd dat samen met Delft3D de sediment verspreiding simuleert. Met een dieptekaart en gemeten waterstanden in de getijdencycli als input geeft dit model de verspreiding van sediment als output (Perk & Van Rijn, 2018). In dit model worden aan de hand van stroomsnelheden, wateruitwisseling van het getijdemeer en de Waddenzee en de waterstanden (FLUSHING-BASIN) gekeken waar het sediment naartoe getransporteerd wordt. De valsnelheid, verblijftijd en de wateruitwisseling bepalen de aanslibbing. Het doel van dit model is om de aanslibbing in de geul en het getijdemeer in kaart te brengen zonder een regelwerk. Dit om een nul-situatie te schetsen en een voorspelling te doen hoeveel sedimentatie er op zal treden als er wel een regelwerk geplaatst wordt.

Sweco heeft met een evenwichtsprofiel een stromingsmodel gemaakt (Kollen, Slib beleefmeer Holwerd aan Zee, 2018) dat berekent hoeveel watervolume er per seconde nodig is om de vaargeul Holwerd-Ameland uit te spoelen (van de Kreeke & Brouwer, 2017). Hier wordt gekeken naar wat voor type sediment er ligt en hoe groot de geul zou moeten zijn om de stroomsnelheden zodanig te beperken dat het voor boten bevaarbaar blijft. Ook in deze studie is geen oog voor de hoeveelheid sediment die het meer binnen stroomt en er weer uit stroomt. Er wordt niet naar de stroming in het getijdemeer gekeken, enkel de stroming die door de geul moet gaan en de bevaarbaarheidseisen zijn in dit onderzoek als doel gesteld. De hoeveelheid sedimentatie in het meer is als indicatie gegeven. Dit is overgenomen van het rapport van WaterProof.

De resultaten van de studies die zijn gedaan naar de waterstromen in en uit het getijdemeer zijn te zien in Tabel 3. Alle drie de bestaande studies hebben verschillende uitgangspunten gebruikt. Zoals hierboven al beschreven is, zijn ook de doelen van de studies niet allemaal hetzelfde. De uitgangspunten zijn in Tabel 3 aangegeven.

Tabel 3, resultaten stromingsstudies

eigenschap	Deltares	Deltares	WaterProof	WaterProof	Sweco
Oppervlakte getijdemeer (m ²)	350.000	350.000	270.000	270.000	270.000
Getijdeverschil op de Waddenzee (m)	2,23	2,23	2,25	2,25	2

Getijdeverschil in het getijdemeer (m)	1,45	1,48	~2	~2	2
Getij volume (m ³)	478.860	471.396	450.000	450.000	550.000
Geul afmetingen breedte (m) ; bodemhoogte (m tot N.A.P.)	35 ; -2,27	35 ; -2,27	20 ; -3	20 ; -3	15 ; -2
Maximale eb-stroom in de geul (m/s)	1,23	1,39	0,6	1,65	1
Maximale vloed-stroom in de geul (m/s)	0,76	0,76	0,9	0,9	1
Maximale eb-debiet (m ³)	25	31			
Aanslibbing getijdemeer per jaar (m ³ /jaar)	-	-	100.000 tot 180.000	130.000 tot 230.000	120.000 tot 360.000
Regelwerk ja of nee	Nee	Ja (open dicht)	Nee	Ja (oppervlakte water inlaat)	Nee
Doel	Situatie schetsen met kleine open sluis	Invloed regelwerk (schutdeuren) op stroomsnelheden vinden	Situatie schetsen met grote open verbinding	Aanslibbing meer en toegangsgeul beperken	Permanente toegang tot Holwerd

7.2 Reflectie stromingsmodellen

Deltares model:

Het model van Deltares geeft als onverwachte output dat het meer met een regelwerk een groter getijdeverschil vertoont dan zonder. Het regelwerk houdt het water gedurende de eb-stroom wat langer vast, maar hierdoor wordt alleen het tegenovergestelde resultaat verwacht. Waar dit resultaat vandaan komt, is onduidelijk.

Het regelwerk dat Deltares gebruikt om de effecten te monitoren is een deur die enkel helemaal open of dicht kan. De deur staat open tot het meer zijn maximale waterstand heeft bereikt, om het water dan een half uur tot een uur vast te houden zodat het waterpeil in de Waddenzee een stuk lager is dan in het getijdemeer. Wanneer de sluis dan open gaat, ontstaat er een grote stroming richting de Waddenzee. Hierdoor is het maximale eb-debiet van de situatie met een regelwerk ook 15% hoger dan zonder regelwerk. De afname in het totale kombergingsvolume van het getijdemeer valt hierbij in het niet. Deze hogere stroming moet de toegangsgeul beter uitspoelen en mogelijk ook de vaargeul Holwerd-Ameland. De simulatie van de stroming is gebaseerd op simpele waterverplaatsing formules voor hoogteverschillen en dus betrouwbaar.

WaterProof model:

Wat opvalt in de resultaten van het model van WaterProof is dat de waterhoogte verschil in het getijdemeer veel groter is dan in het model van Deltares. Het getijdeverschil in het getijdemeer is vrijwel even groot als op de Waddenzee, ook met een regelwerk.

WaterProof gebruikt voor het vasthouden van het water een kantelbare klep. Het regelwerk dat daar gebruikt wordt, heeft echter nog een toepassing: het tegenhouden van de stroming in het onderste deel van de waterkolom. Uit metingen die WaterProof samen met Leo van Rijn heeft uitgevoerd is naar voren gekomen dat het water nabij het wateroppervlak veel minder sediment en slib bevat dan het onderste deel van de waterkolom in de vaargeul bij de pier van Holwerd. Het regelwerk dat zij hiervoor gebruikt hebben is te zien in Figuur 17. Het regelwerk is een kantelbare muur die het water over de muur laat stromen.

Zonder regelwerk is gewerkt met een open verbinding van 20m breed, dezelfde breedte als de vaargeul. Omdat er dan geen constructies in de waterdoorgang naar het getijdemeer zitten, is er minimale weerstand in de stroming. Het kan dan waarschijnlijk worden geacht dat het meer het getij van de Waddenzee kan volgen. Er is nog wel weerstand van de bodem en taluds van de toegangsgeul die dit (deels) kan beïnvloeden.

Met het regelwerk wordt echter een groot deel van het doorstroomoppervlak weggenomen. Als alleen de bovenste 20% van de waterkolom over het regelwerk heen kan stromen verkleint het doorstroomoppervlak al met een factor 5. De kleine afname van het verwachte getijdeverschil op het getijdemeer ten opzichte van de Waddenzee (zie Tabel 3), is opmerkelijk. Het simpelere model van Deltares, met een volledig open verbinding, laat wel van een reductie in getijdeverschil zien. Het meer in het Waterproof model is wel kleiner waardoor er minder water het meer in hoeft te stromen waardoor een groter getijdeverschil wel aannemelijk is.

Het model van WaterProof brengt het sedimenttransport in kaart door middel van berekeningen met de valsnelheden van de sediment deeltjes, de waterverplaatsing en de stroomsnelheden waarbij het neergeslagen sediment weer met de stroming mee wordt genomen. Het regelwerk lijkt alleen maar negatieve invloed te hebben op de aanslibbing. Dit is een vertekend beeld omdat de geul ook vol slibt zonder regelwerk. Met een regelwerk wordt dit slib weer uitgespoeld door de snellere eb-stroming. Volgens het model zal er meer slib in de geul dan in het meer komen te liggen en zal het regelwerk tot een reductie van 40% tot 60% van de aanslibbing in de toegangsgeul leiden.

Omdat het getijverschil discutabel is, net als het voorspelde getijdevolume van het getijdemeer, zal de eb-stroom met een regelwerk mogelijk ook lager uitvallen waardoor de toegangsgeul niet zo goed uitgespoeld wordt als het model doet vermoeden. De 40% tot 60% kan daardoor lager uitpakken.

Sweco model:

Het model van Sweco is in veel opzichten afwijkend van de andere modellen. De grote van het getijdevolume is niet reëel met het wateroppervlak dat later in dit rapport naar voren zal komen. Het doel achter de studie van Sweco was om de toegangsgeul altijd begaanbaar te houden, waardoor het geen toeval is dat de studie op een maximale stroomsnelheid van 1m/s. Met deze relatief lage stroomsnelheid zal het sediment in de toegangsgeul niet helemaal uitgespoeld worden. dit is in paragraaf 3.3 al vastgesteld op 1,3m/s, maar bij 1m/s worden bijna alle dichtheden sediment meegenomen. Wat voor type sediment er in de toegangsgeul komt te liggen na één getijdencyclus is nog niet bekend. Mogelijk is 1m/s al genoeg om alles weg te spoelen.

7.3 Stroomsnelheden

Met het profiel van het getijdemeer is al vastgesteld hoe groot het getijdevolume in het getijdemeer is met verschillende waterhoogtes (bijlage 1). Nu is de vraag hoe snel de waterhoogte in het meer mee stijgt en daalt met de verschillende types sluizen en de verschillende formaten daarvan. Ook bestaat de vraag of het water dat het getijdemeer binnen komt nog wel hetzelfde concentratieprofiel heeft als het water bij de pier van Holwerd. Turbulente stromingen kunnen met name de kleinste deeltjes (de

slib fractie) laten verspreiden door de hele water stroom. Turbulente stroming treedt op bij het hoge stroomsnelheden en bij obstructies in het doorstroomprofiel. Wanneer dit optreedt hangt dus af van de ruwheid van het profiel waar de waterstroom door heen gaat (de toegangsgeul), hoe veel het regelwerk het doorstroomoppervlakte verkleint en wat de stroomsnelheden zijn. Er wordt wel een inschatting gemaakt voor wanneer het optreedt maar dit is te ingewikkeld om voor de concepten te berekenen. Het in Figuur 7 gepresenteerde concentratieprofiel, waarbij zich weinig sediment in de waterlaag nabij het wateroppervlak bevindt, kan door grote stroomsnelheden meer gemixt worden, waardoor zich op iedere waterhoogte ongeveer evenveel sediment bevindt.

De hoeveelheid water die het getijdemeer komt, bepaald het getijdeverschil. De verschillende volumes zijn hieronder weergegeven in Tabel 4. Hier is duidelijk in te zien dat het getijdevolume relatief veel groter wordt dan het getijde hoogte verschil. Dit komt omdat het getijdemeer taluds heeft die heel licht oplopen en het getijdemeer daardoor qua wateroppervlak veel groter wordt bij een kleine toename van de waterstand.

Tabel 4, getijdevolumes bij verschillende getijdeverschillen in het getijdemeer

getijde verschil (m)	getij volume (m ³)
0	0,00E+00
0,1	1,15E+04
0,2	2,41E+04
0,3	3,78E+04
0,4	5,25E+04
0,5	6,83E+04
0,6	8,52E+04
0,7	1,03E+05
0,8	1,22E+05
0,9	1,42E+05
1	1,63E+05
1,1	1,86E+05
1,2	2,09E+05
1,3	2,33E+05
1,4	2,59E+05
1,5	2,85E+05
1,6	3,13E+05
1,7	3,41E+05
1,8	3,71E+05
1,9	4,02E+05
2	4,33E+05

De stroomsnelheid van het water dat het getijdemeer binnen stroomt, bepaalt mede wat de sedimentconcentratie en verspreiding in het water is en dus ook hoeveel sediment daadwerkelijk het meer binnen komt. Dit is belangrijk omdat het sediment in sneller stromend water zich meer verspreidt. Bij een groter getijde verschil wordt het getijde volume veel groter waardoor er meer water het meer in stroomt in de zelfde tijdsspan. In hoofdstuk 3 is al naar voren gekomen dat de stroomsnelheid en de sedimentconcentraties en verspreiding ervan in de waterkolom verband met elkaar hebben.

Wat opvalt in de grafieken van Figuur 7, is dat als het water sneller stroomt er bijna geen verschil meer zit in de concentraties slib op de verschillende waterhoogtes. Bij lagere stroomsnelheden is hier echter een duidelijk verschil in. Dan is de concentratie slib in de bovenste waterkolom duidelijk lager dan nabij de bodem. Als de stroomsnelheid in de toegangsgeul in de buurt komt van 0,8m/s dan is de concentratie in de hele waterkolom hetzelfde.

De reflectie van de al bestaande modellen heeft al naar voren laten komen dat de grootte van de sluis bepalend zal zijn voor het totale watervolume in het getijdemeer dat per getij uitgewisseld wordt. Deltares heeft met een kleinere doorgang tussen de toegangsgeul en het getijdemeer gewerkt (6,6 meter breed), waardoor het getijde verschil meteen 25% lager is dan op de Waddenzee. Tabel 4 geeft een indicatie van het getij volume bij dit getijdeverschil. Bij 25% afname van het getijdeverschil, dus bij een getijdeverschil van 1,5 m in plaats van 2,25 m, zal het getij volume met ongeveer 35% teruglopen.

Voor de vertaling van het getijvolume naar stroomsnelheden in de geul, zal de stroming het meer in berekend worden met vrije stroming. De formule hiervoor (Henissen & Meire, 1998) is hieronder weergegeven:

$$Q = m * A * \sqrt{2 * g * \Delta H}$$

Waarin:

$$Q = \text{debiet} \left(\frac{m^3}{s} \right)$$

$$m = \text{afvoercoëfficiënt} (-)$$

$$g = \text{gravitatieversnelling} \left(\frac{m}{s^2} \right)$$

$$\Delta H = \text{waterhoogte verschil binnen en buiten (m)}$$

$$A = \text{doorstroomoppervlak (m}^2\text{)}$$

De afvoercoëfficiënt is een waarde die de efficiëntie van het doorstroom mechanisme, de toegangsgeul en het regelwerk, bepaalt. Bij een waarde van 1,0 is er geen weerstand in de doorlaat en met een waarde van 0 is er zo'n grote weerstand dat er geen water doorheen komt. Een afvoercoëfficiënt van 0,8 is in de studie van Deltares gebruikt. Dit is geschat aan de hand van praktijkervaring van experts (expert judgement) binnen Deltares. Met een gevoeligheidsanalyse laten ze zien dat met deze coëfficiënt een nauwkeurigheid van maximaal 20% wordt bereikt. Deze waarde wordt in deze casusstudie overgenomen, omdat er geen reden gevonden is om van deze waarde af te wijken.

Om de stroomsnelheden in de geul en door het regelwerk te berekenen, wordt het waterhoogte verschil tussen het meer en de Waddenzee dus constant beïnvloed door de doorlaat van het water naar het getijdemeer. Dit waterhoogteverschil zorgt voor een groter energiehogteverschil, maar heeft daarnaast, afhankelijk van het type regelwerk, ook invloed op het doorstroomoppervlak. Bij hoger water is het doorstroomoppervlak groter (als de onderkant van het regelwerk gefixeerd is). Om hiermee te rekenen, is een model gemaakt in Excel dat per tijdstap van 10 minuten de stroomsnelheid berekent, het verplaatste water bijhoudt en hiermee de waterhoogtes update, waarna met deze nieuwe hoogtes weer een tijdsspan aan stroming volgt. Bijlage 3 laat de precieze stappen zien waarmee de stroomsnelheden en de totale getij volumes zijn gemodelleerd.

7.4 Getijdevolume en stroomsnelheden van de concepten

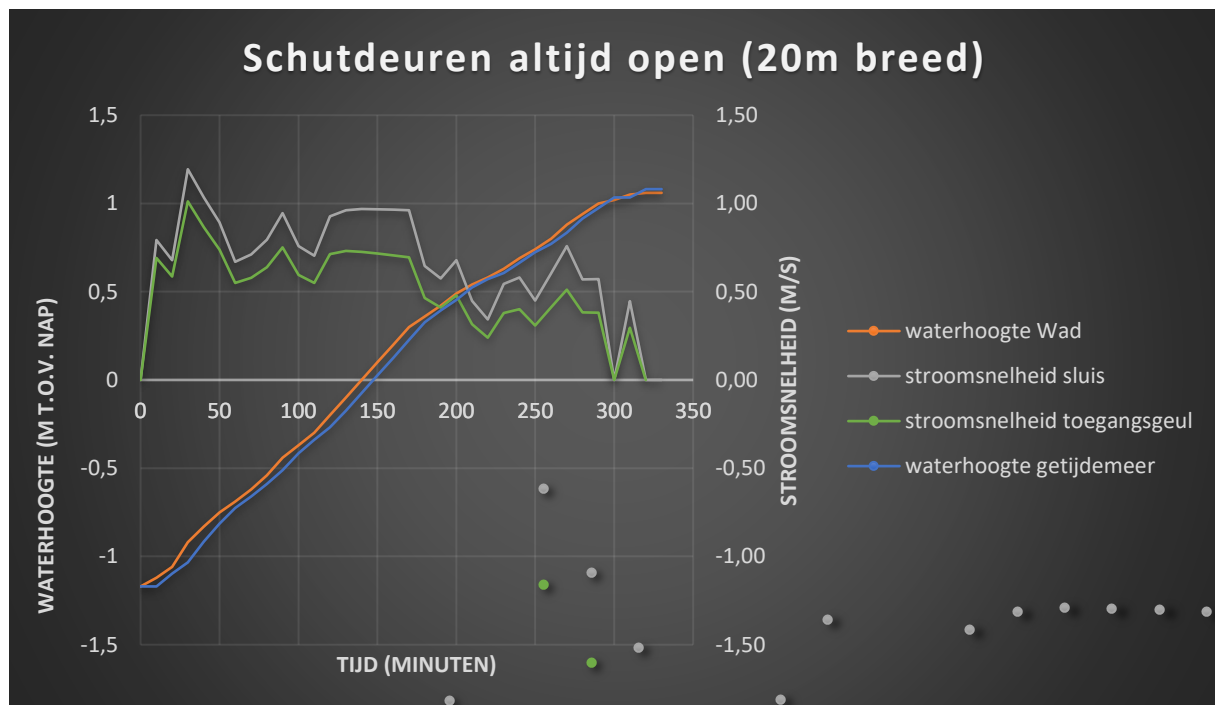
Het model wordt vervolgens gebruikt om de haalbaarheid en de invloeden van de concepten door te lichten. Stroomsnelheden door de geul en sluis beïnvloeden de bevaarbaarheid en de hoeveelheid sediment die meegenomen wordt door de stroming. Hiervoor zijn meerdere openingsregimes per concept getest om de beste opties over te laten voor de MCA die na dit hoofdstuk volgt.

7.4.1 Schutdeuren

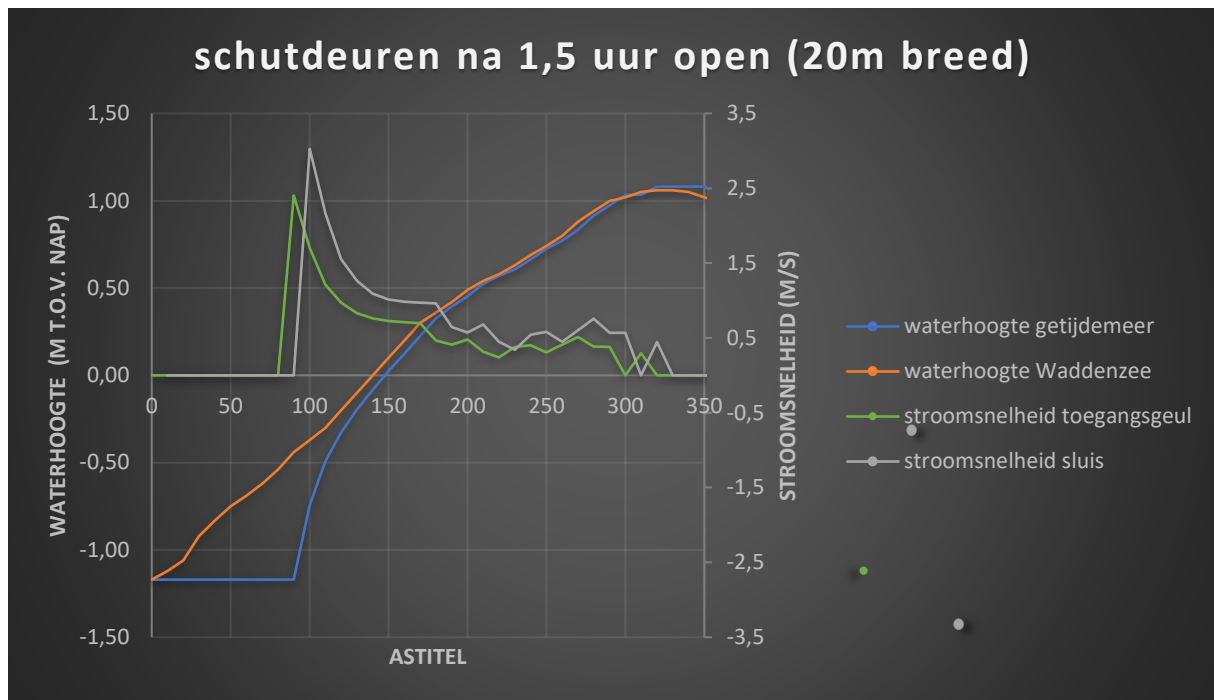
Als eerste zijn de resultaten van de schutdeuren gepresenteerd. Hier zijn twee opties voor gemodelleerd om de beste variant te kunnen kiezen. Beide hebben een breedte van 20 meter en laten de waterstand in het getijdemeer meestijden tot het vloed-peil van de Waddenzee, in 1 cyclus. De eerste variant, Figuur 20, laat de deur gedurende de vloed-stroming altijd open staan.

De deur wordt in de tweede variant, Figuur 21, de eerste anderhalf uur dicht gehouden. Dit is gedaan om de eerste vloed-stroom niet binnen te laten om de stroming met de hoogste concentraties sediment het getijdemeer niet in te laten komen.

Variant twee heeft naast de anderhalf uur dicht ook de daarop volgende tijd een stroomsnelheid in de toegangsgeul die te hoog is voor de pleziervaart om te passeren (hoger dan $\sim 0,8\text{ m/s}$ (Kollen & Sweco, 2018) (Rijkswaterstaat, 2017)). Hierdoor kunnen er gedurende de vloed-stroom ongeveer 3 uur geen schepen passeren. Deze hoge stroomsnelheden aan het begin van het openen neemt ook nog eens veel sediment mee.



Figuur 20, waterstanden en stroomsnelheden voor schutdeuren die altijd open staan bij inkomende stroming



Figuur 21, waterstanden en stroomsnelheden voor schutdeuren die 90 minuten na eb open gaan

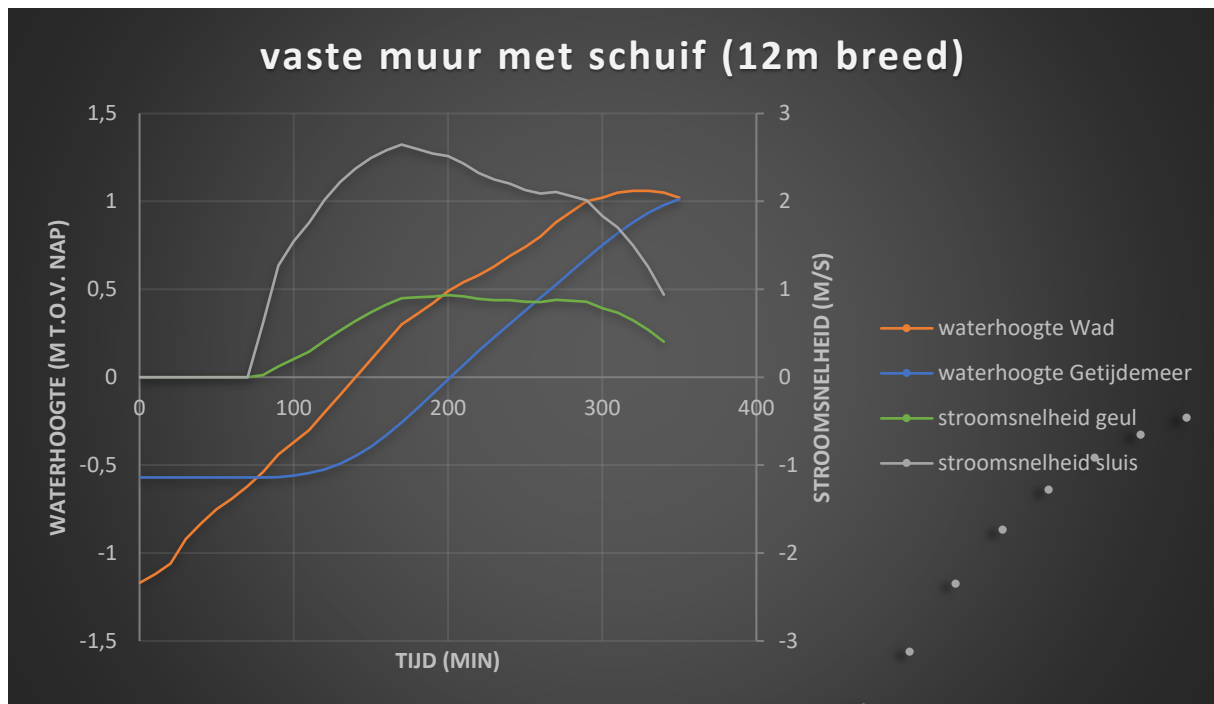
Alleen de schutdeuren die altijd open staan worden meegenomen in de MCA. Door de eerste vloedstroming tegen te houden wordt de stroomsnelheid in de eerste stroming die wel binnenkomt erg hoog. Deze hogere stroomsnelheid neemt veel sediment met zich mee waardoor er toch nog veel sediment in het getijdemeer terecht komt. Ook is de geul in die periode niet bevaarbaar als de deuren de eerste stroming tegen houden. Als de deuren altijd open staan kan er 30 minuten na eb al gevaren worden.

7.4.2 Vaste muur met schuif

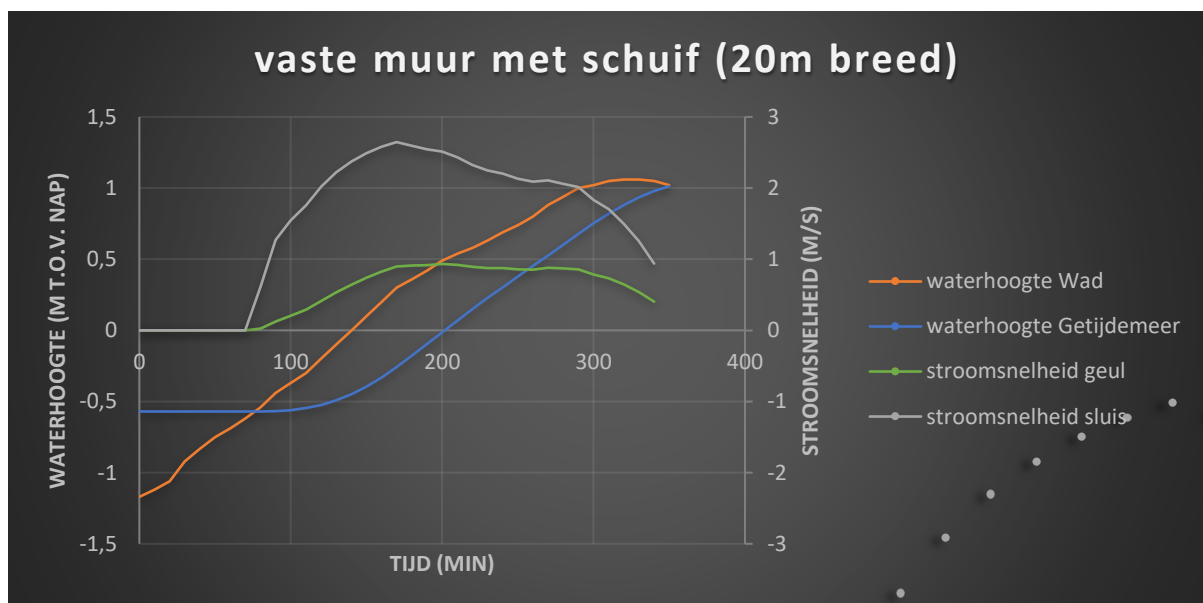
De vaste muur van dit concept zorgt er in eerste instantie voor dat de waterstand in het getijdemeer niet lager komt dan -0,6m t.o.v. NAP, omdat de muur tot deze hoogte komt. Deze hoogte van de muur is gekozen omdat dit de waterstand op de Waddenzee is in een gemiddelde cyclus, 90 minuten na eb.

Voor de vaste muur met schuif zijn ook 2 varianten doorgerekend. Variant 1 bevat een losse schutsluis waar boten door kunnen passeren. De resultaten hiervan zijn te zien in Figuur 22. De stroomsnelheid in de geul is voor een groot deel rond de vaarbaarheid limiet (0,8 m/s), waardoor de doorvaarbaarheid al discutabel is.

Variant 2 fungeert ook als vaardoorgang. De volledige breedte van de toegangseul is gebruikt voor de muur met schuif. Boten moeten over de muur heen varen waardoor dit pas vanaf een waterhoogte van 0,4 m NAP mogelijk is. Figuur 23 laat echter zien dat de stroomsnelheden over de muur de gehele vloedstroming te hoog zijn.

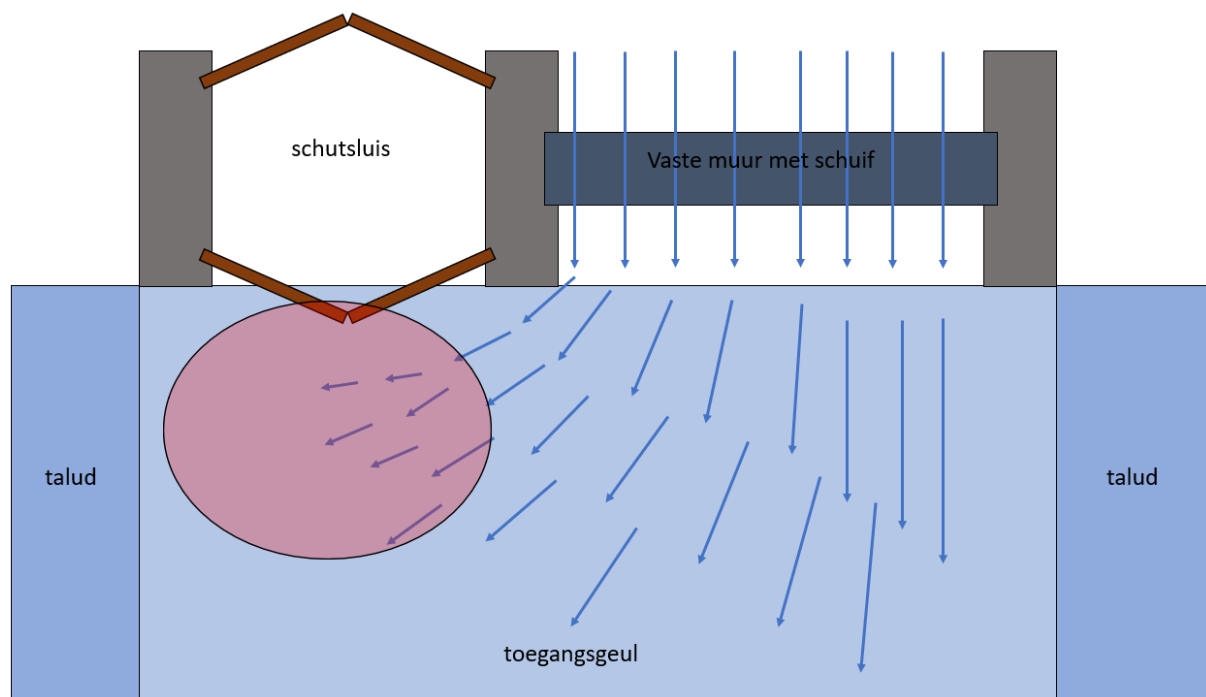


Figuur 22, waterstanden en stroomsnelheden voor de vaste muur met schuif met een schutsluis ernaast



Figuur 23, vaste muur met schuif die ook als vaardoorgang fungeert

Hierdoor is alleen variant 1, met een losse schutsluis, nog interessant om door te lichten als optie in de MCA. Deze variant verliest wel ongeveer 10cm maximaal vloed-waterpeil, waardoor er minder water in het meer zit, waardoor het getijdemeer en de aanvoergeul minder krachtig uit te spoelen zijn. Ook de schutsluis die er naast moet komen voor de scheepsdooorgang zorgt ervoor dat de geul mogelijk niet helemaal uitgespoeld wordt net achter de schutsluis, omdat het water daar van een smal regelwerk in een brede toegangsgeul over stroomt. Figuur 24 geeft hier een weergave van. De lengte van de pijlen geeft een indicatie van de stroomsnelheid. Het rood gearceerde gebied is de regio die niet goed uitgespoeld wordt bij het uitspoelen van het getijdemeer. Door de schutsluis zo nu en dan wel leeg te laten lopen kan dit verholpen worden, maar dan stroomt het hele getijdemeer leeg en is er op dat moment geen scheepsdooorgang.



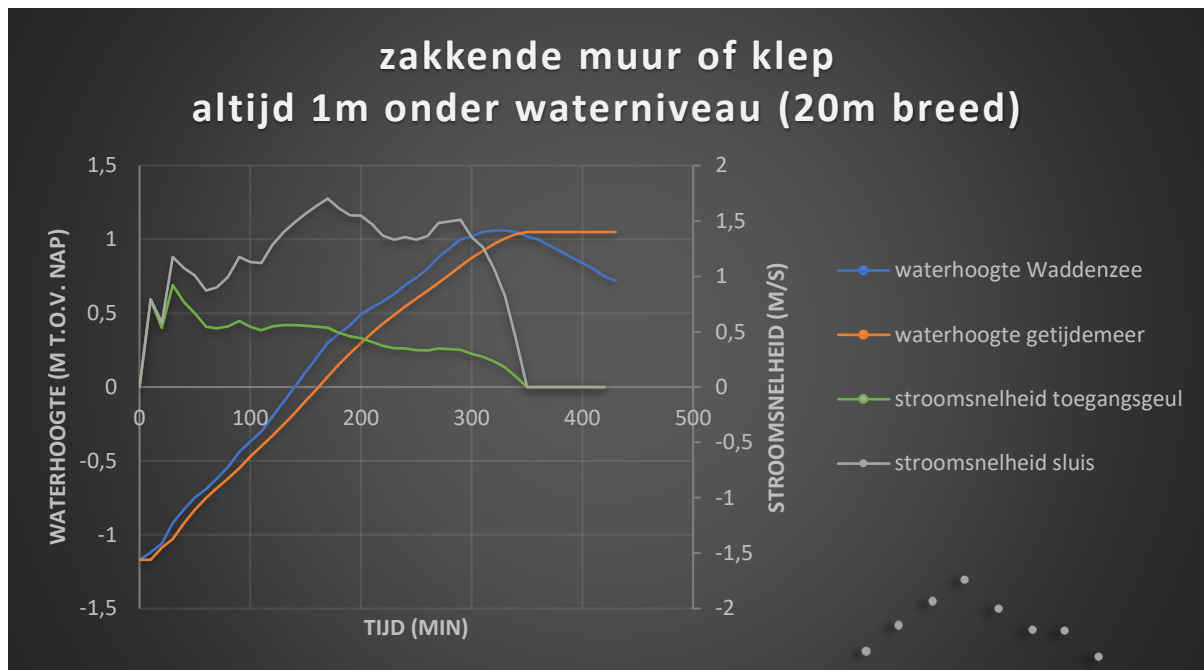
Figuur 24, modelschets voor stroming bij uitspoelen getijdemeer

7.4.3 Zakkende muur en kantelbare klep

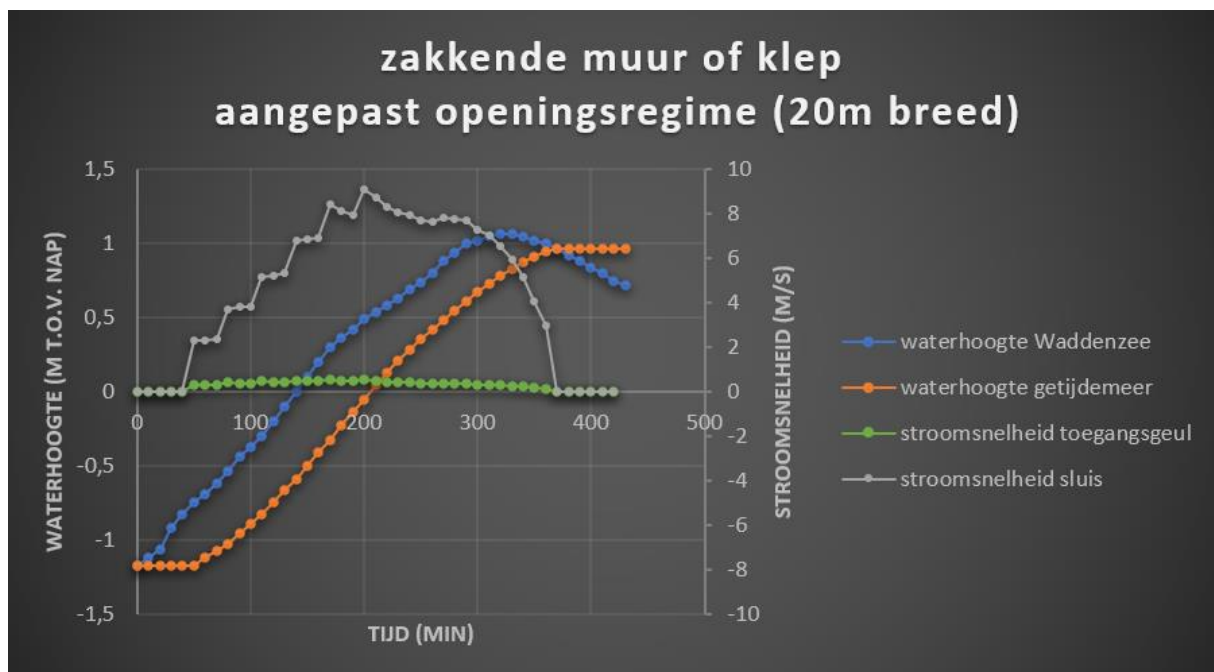
Als laatste zullen de stroomsnelheden van de zakkende muur en klep gepresenteerd worden. Omdat allebei de concepten dezelfde werking hebben, ze kunnen vanaf de bodem tot iedere hoogte het water afsluiten. Voor deze concepten zijn ook weer 2 varianten gemaakt. Variant één waarbij de kering altijd 1m onder het waterniveau wordt gehouden, te zien in Figuur 25, en variant twee waarbij het eerste uur geen stroming door wordt gelaten en de stroomsnelheid in de toegangsgheul laag wordt gehouden, te zien in Figuur 26. Om in de tweede variant de stroomsnelheid in de toegangsgheul laag te houden, begint de muur na 60 minuten met een opening van 50cm, na ieder half uur wordt deze opening 10cm groter waardoor er na 4 uur de opening van 1m onder het waterpeil is gecreëerd.

Alleen het bovenste deel van de waterkolom door laten stromen brengt echter ook een negatieve uitwerking met zich mee: de stroom snelheid door het regelwerk is veel te hoog om er doorheen te kunnen varen. Hierdoor is de open verbinding gedurende bijna de hele vloed-stroom niet vaarbaar voor de pleziervaart. Het regelwerk is voor variant 1 tot 330 minuten na eb niet bevaarbaar. Variant 2 is pas na 350 minuten bevaarbaar.

Gedurende de eb-stroming is dit niet het geval, omdat de muur dan helemaal open is (vlak ligt) en het doorstroomoppervlak veel groter is. Gedurende deze stroming is kan er wel over het regelwerk worden gevaren.



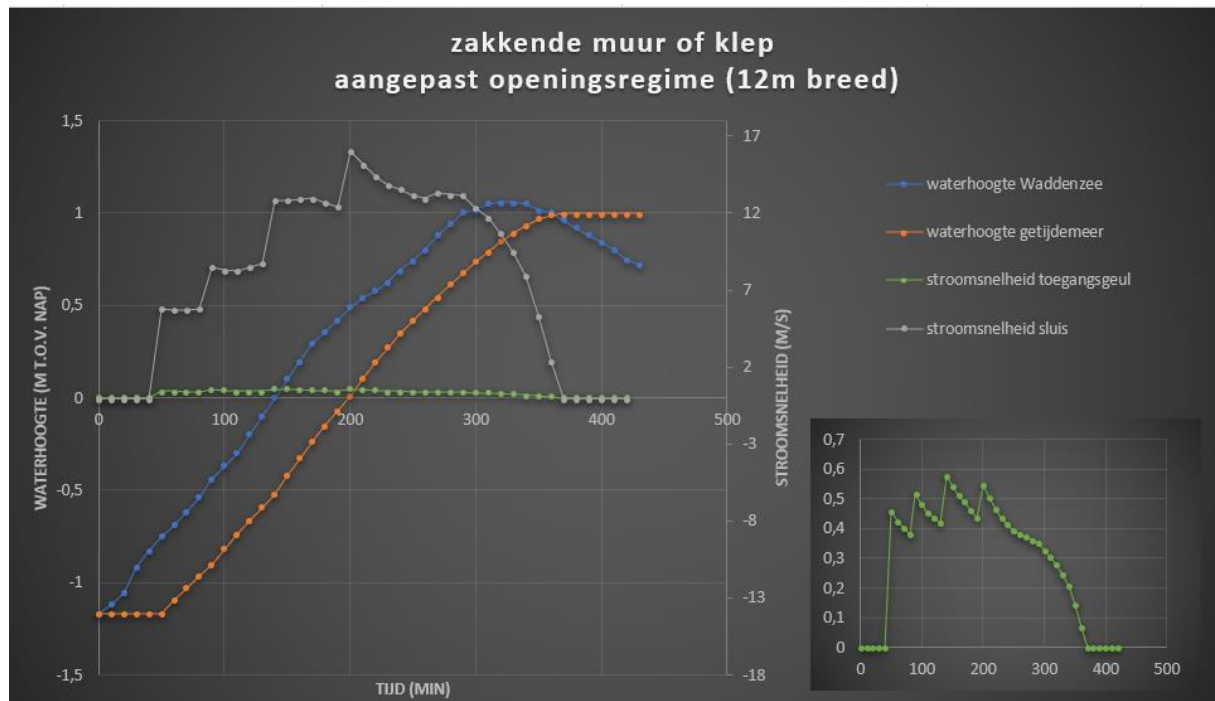
Figuur 25, zakkende muur of klep altijd 1 meter onder het waterpeil op de Waddenzee die ook als vaardoorgang fungeert



Figuur 26, kantelbare klep of zakkende muur die als vaardoorgang fungeert en de stroomsnelheid in de toegangsgeul minimaliseert.

De tweede variant waarin er grotendeels geen doorvaartmogelijkheid is, Figuur 26, kan ook smaller ontworpen worden waardoor er nog een losse schutsluis naast gebouwd kan worden. Deze smallere sluis neemt waterstanden en stroomsnelheden mee die in Figuur 27 zijn gepresenteerd. Door de losse schutsluis naast het regelwerk treedt hetzelfde fenomeen op als bij de vaste muur met schuif, dat in Figuur 24 is uitgebeeld. Het gebied achter de schutsluis zal niet goed uitgespoeld worden. Er is ook een ander openingsregime nodig om het meer nog wel vol te laten lopen met deze smallere opening. De resultaten in Figuur 27 zijn verkregen met openingsregimes die in Tabel 5 gepresenteerd zijn. in de grafiek is een uitvergroting van de stroomsnelheid door de geul toegevoegd waarin te zien is dat de

stroomsnelheid nooit boven de 0,6m/s komt. Dit is van alle concepten de laagste waarde. Daarentegen zijn de stroomsnelheden over het regelwerk het aller grootst. De grote stroming over de klep of muur kan er voor zorgen dat niet alleen het bovenste deel van de waterkolom het getijdemeer in stroomt. Turbulente stroming over de klep of muur kan er voor zorgen dat de waterkolom zich voor de muur (deels) vermengt, waardoor het sedimentconcentratieprofiel gemixt wordt.



Figuur 27, kantelbare klep of zakkende muur zonder vaardoorgang met lage stroomsnelheden in de toegangsgeul

Tabel 5, openingsregimes voor de smalle doorgang van de kantelbare klep of de zakkende muur concepten

Tijdsspan (minuten)	Opening onder waterniveau Waddenzee (cm)
0 tot 50	0
50 tot 80	30
80 tot 130	50
130 tot 190	80
190 tot eind	130

Omdat variant 1 maar voor 20 extra minuten zorgt waarin gevaren kan worden dan er in variant 2 kan, worden alleen de openingsregimes van variant 2 doorgelicht in de MCA. Variant 2 houdt meer sediment buiten het getijdemeer, door de eerste stroming buiten het getijdemeer te houden. Boten kunnen in variant 2 ten alle tijden in de vaargeul zijn. Als het meer is leeg gestroomd, en het eb peil is bereikt, zitten er nog boten in de toegangsgeul. Variant 1 heeft in die periode een stroomsnelheid die de geul niet vaarbaar maakt.

8. Multi-Criteria Analyse

In deze paragraaf zal de Multi-Criteria Analyse uitgevoerd worden voor de regelwerken die zijn beschreven. Samen met Erik Bruins Slot, Anne Meijer en Dirk Walinga (allen provincie Fryslân) zijn de concepten beoordeeld op de diverse criteria. De analyse is gedaan voor meerdere scenario's, omdat de precieze uitwerking van doelen van het project Holwerd aan Zee nog niet duidelijk zijn. De wegingen van de diverse criteria zijn opgesteld door naar de invloed van de stakeholders te kijken die een specifiek criterium belangrijk vinden. Omdat de knelpunten van het Project Holwerd aan Zee nog niet bekend zijn. Daarom zijn er verschillende scenario's gecreëerd om een verwachting te schetsen per scenario. De wegingen zijn alleen een indicatie van de diverse scenario's. Voor een precieze verdeling moeten er overleggen tussen de belanghebbende partijen komen, waarin ze tot een consensus moeten komen over het belang van de verschillende criteria. Door de beperkte duur en omvang van deze studie is dit niet voor deze studie gedaan. Door voor verschillende scenario's een regelwerk als meest toepasselijk aan te wijzen kan hier later in andere studies mogelijk op terug gegrepen worden.

8.1 Beoordeling

Alle concepten die behandeld zijn bij het stromingsmodel worden beoordeeld op de criteria die zijn vastgesteld in hoofdstuk 5. De beoordeling zal op een schaal tussen de 0 en 10 plaats vinden waarbij nul de slechtste optie is en tien de meest optimale. De verschillende concepten krijgen variant nummers om later duidelijk naar te kunnen verwijzen.

8.1.1 Schutdeuren concept dat gedurende de hele vloed-stroming open staat (variant 1)

Deze variant van een regelwerk is het schutdeuren concept dat in de regelwerk concepten is uitgewerkt. De schutdeuren, 20m breed, staan hier altijd open op een klein deel van de eb-stroming (wanneer het meer leegstroomt naar de Waddenzee toe) na. Gedurende de tijd dat de sluis dicht blijft, ontstaat er een klein waterhoogte verschil tussen het getijdemeer en de toegangsgeul waardoor de geul (iets) beter uitgespoeld wordt.

1. **Sediment inlaat:** De schutdeuren krijgen een **2** voor de sediment inlaat het getijdemeer in. De eerste, sediment rijke stroming komt het meer binnen en de stroomsnelheid in dit deel is ook vrij hoog. Het regelwerk kan de onderste stroming niet tegen houden, waardoor grote hoeveelheden sediment het meer binnen zullen stromen.
2. **Doorvaart:** Boten kunnen de schutdeuren altijd passeren op enkele uren na vloed na. Hierin wordt een waterhoogte verschil tussen het getijdemeer en de toegangsgeul gecreëerd. Daarna wordt de toegangsgeul uitgespoeld, waardoor de stroomsnelheden in de toegangsgeul nog te hoog zijn om er doorheen te varen. Hierdoor is uiteindelijk drie tot vijf uur van de eb-stroming geen doorgang. Een totale cyclus bestaat uit 13 uren. De doorvaart score is 10 voor een regelwerk dat altijd te passeren valt en er wordt voor ieder uur dat het niet passeerbaar is, één punt afgetrokken. Daarom krijgt dit regelwerk hier een **5** voor.
3. **Uitspoelen:** De stroming door de schutdeur kan de toegangsgeul goed uitspoelen. Als het openingsmechanisme zwaar uitgevoerd wordt, waardoor een hoger waterpeil in het beleefmeer vastgehouden kan worden, kan de toegangsgeul goed uitgespoeld worden. Op dit punt krijgt deze variant een **10**. De schutsluis zal net zo breed worden als het diepste deel van de toegangsgeul waardoor de sluis de toegangsgeul helemaal gelijkmatig uit kan spoelen.
4. **Betrouwbaarheid:** De deuren worden met een stang in de gewenste positie gedrukt, waarna de deur in die positie blijft bij een hogere waterstand op de Waddenzee. De puntdeuren worden dan tegen elkaar aangedrukt waardoor ze dicht blijven. Omdat de deur wel in die positie gebracht moet worden kan dit bij storingen, een stroomuitval of een defect van een mechanisme, een probleem zijn. Er kan een systeem worden geplaatst waarmee de schutdeuren met de hand opengemaakt kunnen worden. Dit werd vroeger ook al gebruikt en

kan hier ook voor extra zekerheid zorgen. Het vele gebruik van dit type sluis en de positieve ervaringen er mee ondersteunen de betrouwbaarheid van het regelwerk ook. De betrouwbaarheid van de deur is beoordeeld met een **9**.

5. **Duurzaamheid:** De duurzame mogelijkheden voor de schutdeur zijn groot. De deur wordt meestal grotendeels van hout gemaakt met stalen ondersteuning. Het gebruik van hout is beter dan het gebruik van staal. Zoals in paragraaf 6.1 al naar voren is gekomen, kunnen de deuren tegenwoordig ook van composiet worden gemaakt. Composiet is veel lichter dan de traditionele deur als de deur even sterk is gemaakt. Ook de levensduur van composiet is langer dan van hout. Of dit ook in zoute omgevingen geldt, is niet bekend. Hierdoor krijgen de schutdeuren een **8** op de duurzame mogelijkheden voor dit regelwerk.
6. **Vismigratie:** De vistoegankelijkheid van het getijdemeer met de schutdeuren die bijna altijd open staan, is zeer goed. Als het regelwerk echter gebruikt wordt om ook de toegangsgeul uit te spoelen staat de deur een tijd dicht tijdens eb. Daarnaast zorgt het uitspoelen van de toegangsgeul ook voor grote stroomsnelheden tijdens de eb-stroming, die de vissen uit de toegangsgeul kan spoelen. Het tweede deel van de eb-stroom zorgt wel voor een zoete lokstroom de Waddenzee op, waardoor vissen aangetrokken worden. Als de vissen dan bij het meer aankomen door de toegangsgeul staan de deuren open en kunnen ze zonder obstructie het meer in zwemmen. Hier ontvangt deze variant een **7** voor.
7. **Kosten:** De bouw- en onderhoudskosten van de schutdeuren worden niet hoog ingeschat. Schutdeuren worden al veelvuldig gebruikt waardoor er bijna geen onderzoeks- en ontwerp kosten nodig zijn. De variant van composiet brengt wel hogere kosten met zich mee door de prijs van het materiaal. Onderhoud aan de deur is ook niet groot. Composieten deuren hebben bijna geen onderhoud nodig en houten deuren hebben eens in de ~10 jaren “cosmetisch onderhoud” nodig (Monstersche Sluis, 2009). De schutdeur kan ook een 1-deurs variant worden, waardoor maar één openingsmechanisme nodig is. Mechanismes om schutdeuren mee te besturen zijn veel gebruikt en niet duur. Alle bewegende delen zijn boven water waardoor onderhoud minimaal is. Hierdoor worden de kosten met een **10** beoordeeld.
8. **Toekomstbestendigheid:** De schutdeuren kunnen het complete getijdeverschil in het getijdemeer garanderen. Een uitbreiding van het getijdemeer veroorzaakt geen groot verschil, waardoor de stroming in de toegangsgeul te hoog wordt of het getij niet in stand gehouden kan worden. Daarom krijgt de schut variant een **9** op dit criterium.

8.1.2 Vaste muur met schuif concept met een losse schutsluis (variant 2)

Het vaste muur met schuif concept is in deze variant uitgebreid met een additionele schutsluis. Zonder de schutsluis is bijna geen doorvaart mogelijk, waardoor deze optie niet is doorgelicht. De breedte van het regelwerk is 12m en de schutsluis krijgt een breedte van 8m. De schuif zal gedurende de vloedstroming omhoog staan en de eerste eb-stroming vanuit het getijdemeer tegenhouden om enkele uren later de toegangsgeul uit te kunnen spoelen. Naast deze constructie komt een vispassage, om vismigratie ook bij vloed mogelijk te maken.

1. **Sediment inlaat:** De vaste muur houdt de eerste vloed-stroming van de Waddenzee naar het getijdemeer tegen, welke het sediment rijkst is. Hiermee wordt dus veel sediment buiten het getijdemeer gehouden. De stroomsnelheden in de toegangsgeul zijn ook erg laag, waardoor sediment al neerslaat in de toegangsgeul en er relatief lage concentraties slib in het bovenste deel van de waterkolom zitten. De stroomsnelheid kan zo laag worden gehouden, omdat er minder water in het meer hoeft te komen. Omdat de muur de onderste stroming tegen houdt, wordt ook daarmee veel sediment buiten het getijdemeer gehouden. Bij hogere waterpeilen is het deel dat tegen wordt gehouden, echter nog maar klein. De kantelbare klep en zakkende

muur kunnen de stroomsnelheid in de geul ook nog lager houden waardoor de vaste muur een score van **7** krijgt.

2. **Doorvaart:** Voor het maximaliseren van de doorvaart van de pleziervaart krijgt dit regelwerk een **7**. De schutsluis zorgt ervoor dat schepen altijd het getijdemeer in en uit kunnen. Alleen als de schuif omhoog gaat om de toegangsgeul uit te spoelen, is de stroomsnelheid in de toegangsgeul te hoog (1,3 m/s om al het sediment af te voeren), waardoor schepen daar dan niet kunnen varen. De sluis wordt wel als kleine obstructie gezien in vergelijking met een open verbinding. De periode waar niet in gevaren kan worden is ongeveer twee tot drie uur.
3. **Uitspoelen:** Het uitspoelen van de toegangsgeul kan met dit regelwerk behoorlijk goed. De schuif zorgt ervoor dat het water op vloed-peil in het getijdemeer vast gehouden kan worden. De vaste muur zorgt er echter wel voor dat het getijdvolume behoorlijk kleiner is waardoor de geul weer minder uitgespoeld wordt. Het in Figuur 24 gepresenteerde fenomeen, waardoor het gebied voor de sluis niet wordt uitgespoeld, treedt ook hier op. De stroming over de muur is smaller en moet over de muur stromen waardoor er per seconde minder volume door de geul stroomt. Hierdoor wordt het uitspoelen met dit regelwerk met een **6** beoordeeld.
4. **Betrouwbaarheid:** De betrouwbaarheid van dit regelwerk is goed. De muur staat vast en de schuif kan met een simpel systeem omhoog getakeld worden. Als er een storing is, kan de schuif altijd zakken omdat de schuif aan kabels of kettingen hangt. Er is met het toevoegen van de schutsluis wel voor meerdere systemen gezorgd, wat meerdere faalmethodes oplevert. Daarom krijgt dit concept een **8** op het betrouwbaarheids criterium.
5. **Duurzaamheid:** Duurzame mogelijkheden voor dit concept bestaan. De schuif kan van allerlei materialen gemaakt worden, maar bevat bijna altijd een stalen constructie. Er kan hout of composiet gebruikt worden om de oppervlakte van de schuif te vullen. De muur zit onder water en is een vaste barrière. Het meest voor de hand liggend is om deze van beton te maken of mogelijk staal. Voor duurzame mogelijkheden krijgt de deur een **7** omdat ze er wel zijn, maar net minder inpasbaar dan bij de schutdeuren.
6. **Vismigratie:** De vismigratie met de vaste muur is niet goed. De vissen zitten vooral in het onderste deel van de waterkolom waar ook precies de muur als obstructie staat. Hierdoor moet er een vispassage naast het regelwerk geplaatst worden om toch een doorgang te creëren. De muur zorgt er wel voor dat de stroomsnelheden in de toegangsgeul na het kort uitspoelen van de geul vrij laag blijven. Hierdoor kunnen vissen zich goed door de toegangsgeul bewegen. De vispassage zorgt nadat het meer de waterhoogte van de muur heeft bereikt ook nog voor een kleine leegloop en dus een zoete lokstroom waardoor vissen de passage wel kunnen vinden. Omdat vissen alleen via de vispassage naar binnen zullen gaan, krijgt het regelwerk een **4** op dit criterium.
7. **Kosten:** In vergelijking met de schutdeuren moet hier een schutsluis geplaatst worden voor de bevaarbaarheid, naast de vaste muur en de schuif. De muur, waarschijnlijk gegoten beton, en de schuif, bediend met staalkabels die door een lier omhoog getrokken wordt, zijn ook geen hele dure objecten. De constructie voor een zakkende muur die later komt zijn veel groter. Zowel de schutsluis als de hefdeur brengen geen grote onderhoudskosten met zich mee, maar het gaat wel in tweevoud met dit dubbele systeem. Hierdoor krijgt dit systeem een **6** voor de kosten.
8. **Toekomstbestendigheid:** De boten varen niet over de muur, maar door een schutsluis. Een vergroting van het meer zal dus niet zorgen voor hogere snelheden door de sluis. Het getijdemeer bereikt wel gewoon het vloed-peil van de Waddenzee in de modellen en dus zal een vergroting hier geen problemen in veroorzaken. De stroomsnelheid in de toegangsgeul is echter al 0,9m/s, en die snelheid zal door een uitbreiding van het meer hoger worden. Dit kan

eigenlijk niet en daarom is deze oplossing minder toekomstbestendig dan de schutdeuren en wordt het beoordeeld met een **7**.

8.1.3 Zakkende muur concept die ook als vaardoorgang fungeert (variant 3)

Het zakkende muur concept is in deze variant uitgevoerd waarbij het ook de scheepsdoorlaat is. De muur is hier dan 20m breed. Gedurende de vloed-stroming heeft de muur een opening die de stroomsnelheid in de toegangsgeul minimaliseert, zoals in Tabel 5 gepresenteerd is, en gedurende de eb-stroming wordt het water enkele uren vastgehouden om de toegangsgeul mee uit te spoelen. Daarna zakt de muur de grond in tot dat de vloed-stroming weer komt. Naast deze constructie komt een vispassage, om vismigratie ook bij vloed mogelijk te maken.

1. **Sediment inlaat:** De zakkende muur zorgt voor vrij lage watersnelheden in de toegangsgeul en laat alleen het sediment arme water in de bovenste waterkolom door. De muur houdt ook te eerste vloed-stroming buiten. Hij presteert minder dan de zakkende muur en de kantelbare klep met een losse schutsluis die hierna nog volgen doordat de stroomsnelheid in de geul hoger is. Deze lagere prestatie komt door de hogere stroomsnelheden. Daarom krijgt dit concept een **8**.
2. **Doorvaart:** De zakkende muur is alleen het laatste half uur van de vloed-stroming passeerbaar. De zakkende muur heeft drie uur na het eb peil, een opening waar schepen overheen zouden kunnen varen, maar de stroomsnelheid over de muur is dan te groot. Gedurende de eb-stroming kunnen boten de muur wel passeren nadat de geul is uitgespoeld. Omdat het regelwerk ongeveer zeven uur niet te passeren is, krijgt de zakkende muur hier een **3** voor.
3. **Uitspoelen:** Het uitspoelen van de toegangsgeul kan perfect met deze variant. Het vloed-peil kan in het getijdemeer vastgehouden worden en bij het laten zakken van de muur kan het water door de hele toegangsgeul naar de Waddenzee stromen, omdat de deur de hele breedte van de toegangsgeul bestrijkt. Hierdoor krijgt de zakkende muur een **10** op dit criterium.
4. **Betrouwbaarheid:** De betrouwbaarheid van de zakkende muur is niet hoog. Het concept wordt nog weinig gebruikt en het in Figuur 16 gepresenteerde fenomeen waar de muur klem wordt gedrukt in het mechanisme bij grote waterverschillen, zorgen voor vraagtekens bij de functionaliteit van het concept. Als het water in het getijdemeer vastgehouden wordt, en het waterpeil in de toegangsgeul lager wordt, komt die spanning op het mechanisme te staan, waardoor er erg grote krachten nodig zijn om de muur te laten zakken. Wanneer de muur als opdrijvende muur wordt uitgevoerd, wordt er wel voor gezorgd dat hij ook bij storingen het hogere waterpeil op de Waddenzee nog tegen kan houden wat wel weer voor extra zekerheid zorgt. Met luchtinjectie moet het sediment in de ruimte onder de muur weggeblazen worden wat ook weer een extra systeem is. Door de vele onzekerheden wordt dit regelwerk met een **4** beoordeeld op betrouwbaarheid.
5. **Duurzaamheid:** De materiaalkeuze voor deze muur is niet groot. De muur moet opdrijvend zijn waardoor lichte materialen nodig zijn en er luchtdichte luchtkasten in verwerkt moeten worden. Het composiet is een goede optie om de muur licht te houden. Dit is een duurzaam alternatief zoals al bij de schutdeuren was vastgesteld. De luchtkasten kunnen van allerlei materialen worden gemaakt, maar moeten wel luchtdicht zijn (bijvoorbeeld gelaste stalen compartimenten aan de zijkant van de muur). Deze variant krijgt daarom een **6** op de duurzame mogelijkheden.
6. **Vismigratie:** De vismigratie met deze muur is net als bij de vaste muur niet heel goed. Gedurende de vloed-stroom maakt alleen de vispassage visdoorlaat mogelijk. De spoelende functie van de muur maakt de vismigratie ook minder. Wat de zakkende muur wel beter heeft dan de vaste muur is dat gedurende de eb-stroom de muur helemaal weg is en vissen vrij door kunnen zwemmen. Daarom krijgt deze muur hier een **5** voor.

7. **Kosten:** De bouw- en onderhoudskosten zullen voor deze muur erg hoog zijn. De opdrijvende deur is een uniek bouwwerk dat in de grond moet kunnen verdwijnen. Hiervoor moet een constructie onder het regelwerk gemaakt worden waar de deur in kan zakken. Onderhoud aan het luchtinjectie systeem en de geleiders aan de zijkant zal vrij regelmatig moeten gebeuren. Ook is het erg belangrijk dat de luchtkasten in goede staat blijven, wat extra kosten met zich mee brengt. Als er geen luchtkasten in de deur worden verwerkt moet de deur met cylinders omhoog geduwd worden. Dit is een bewegend deel onderwater, wat grote onderhoudskosten met zich mee brengt. De kosten voor deze variant worden het hoogst ingeschat en krijgt daarom een **2**.
8. **Toekomstbestendigheid:** Het regelwerk brengt al een hoge stroomsnelheid door de doorgang met zich mee. Als het meer groter wordt, wordt de tijdsspan waarin deze doorgang niet begaanbaar is voor de pleziervaart nog groter. Op het gebied van getijdeverschil kan de zakkende muur wel meer water doorlaten zonder andere negatieve effecten en krijgt daarom toch een **5** op dit criterium.

8.1.4 Zakkende muur concept met losse schutsluis (variant 4)

In deze variant is de zakkende muur niet de scheepsdoorlaat. Er zit een schutsluis, van 8m breed, naast waardoor de breedte van de muur nog maar 12m is. deze muur heeft een openingsregime, zoals in Tabel 5 gepresenteerd is, waardoor de stroomsnelheden door de toegangsgeul geminimaliseerd worden. De muur houdt net als de brede muur (variant 3) de eerste eb-stroming tegen waarna de geul wordt uitgespoeld en de muur in de bodem zakt. Ook dit concept heeft een vispassage naast het regelwerk om vissen gedurende de vloedstroming toch het meer in te kunnen laten.

1. **Sediment inlaat:** De sedimentinlaat die de zakkende muur zonder scheepsdooorgang veroorzaakt, is het meest optimaal van alle concepten. Figuur 27 liet al zien dat de stroomsnelheden door de toegangsgeul minimaal kunnen worden gehouden met een geoptimaliseerd openingsregime. Ook de sedimentrijke eerste vloed-stroming wordt buiten gehouden, waardoor de inlaat geminimaliseerd is. Omdat dit de beste score is die hier te behalen valt en nog wel een groot getijdeverschil met zich mee neemt, krijgt dit concept hier een **10** voor.
2. **Doorvaart:** De doorvaart voor dit concept is gelijk aan die van de vaste muur met schuif. Gedurende uitspoelen kan niet gevaren worden en verder kan er altijd door de sluis gevaren worden. Het pluspunt dat de zakkende muur met zich mee neemt, is dat na het eerste spoelen met de eb-stroom de muur en de schutsluis opengelaten kunnen worden waardoor er nu gewoon een open verbinding gecreëerd is. Met dit pluspunt is de score die de zakkende muur met een schutsluis krijgt een **8**. Het is geen 10 omdat er gedurende het uitspoelen van het meer één of twee uur niet gevaren kan worden.
3. **Uitspoelen:** Het uitspoelen van de toegangsgeul is net zo goed als de brede kantelbare klep. Het water wordt bij het vloedpeil enkele uren vastgehouden. Door bij de eb-stroom ook de schutsluis open te zetten is de hele breedte van het regelwerk een open verbinding. Daarom krijgt ook dit regelwerk een **10** voor het uitspoelen.
4. **Betrouwbaarheid:** De betrouwbaarheid is gelijk geschaald met die van de brede zakkende muur en krijgt dus ook een **4**. Dit is gedaan omdat de toegevoegde schutsluis voor extra faalkansen zorgt wat voor minder betrouwbaarheid zorgt. De smallere muur brengt daarentegen minder risico met zich mee omdat er dan ook minder grote krachten op het zak en hijsmechanisme staat. Omdat de muur ook geen doorgang voor schepen is, kan hij ook in kleinere secties worden verdeeld.
5. **Duurzaamheid:** de schutsluis kan met het duurzame composiet gemaakt worden. Daarnaast kan de klep in deze variant in kleinere delen worden opgedeeld, en kan hier voor minder sterke

materialen worden gekozen. Omdat dit meer mogelijkheden biedt dan de brede muur krijgt dit concept een **7**.

6. **Vismigratie:** De vismigratie is gedurende de vloed-stroom slecht. Alleen de vispassage is gedurende die tijd een doorgang tot het getijdemeer voor de vissen. Gedurende de eb-stroom is de muur helemaal naar beneden waardoor vissen hier vrij doorheen kunnen zwemme. Ook is de stroming bij het net openen veel te groot, omdat de toegangsgeul dan uitgespoeld wordt. Omdat de smallere muur een gelijkmatigere lokstroom genereert dan de brede zakkende muur wordt deze met een **6** gewaardeerd.
7. **Kosten:** De kosten worden gelijk geschat aan de kosten van de brede zakkende muur. De schutsluis is een extra systeem en brengt extra kosten met zich mee, maar de smallere zakkende muur heft deze extra kosten ook weer op. Daarom krijgt ook dit concept een **2** op dit criterium.
8. **Toekomstbestendigheid:** De toekomstbestendigheid van de muur is goed. De stroomsnelheden in de toegangsgeul zijn nu erg laag waardoor een kleine uitbreiding niet voor veel verandering zal zorgen. Een groter meer zal mogelijk wel het getijdeverschil in het meer reduceren, omdat de doorgang niet heel breed is, maar omdat die nu nog bijna helemaal in stand gehouden is, zal dit niet tot grote veranderingen leiden. Daarom krijgt dit concept hier een **7** voor.

8.1.5 Kantelbare klep concept die ook als vaardoorgang fungeert (variant 5)

De kantelbare klep werkt net als de zakkende muur maar dan zakt de klep niet, maar kantelt hij naar de bodem. Doordat de stromingsmodellen voor beide concepten gelijk is, scoort deze variant hetzelfde op de punten 1, 2, 3, 6 en 8 als de zakkende muur variant die ook als vaardoorgang fungeert (variant 3). Daarom zijn daar alleen de scores vermeld.

1. **Sediment inlaat: 8**
2. **Doorvaart: 3**
3. **Uitspoelen: 10**
4. **Betrouwbaarheid:** De betrouwbaarheid van de klep is goed. Er wordt veel met kleppen gewerkt om stromingen van hoog naar laag te stoppen of te reduceren. De klep zal ook het water uit het meer tegen moeten houden, waardoor de lierkabel of ketting de klep op zijn plaats moet houden zoals in Figuur 18 is geschetst. Bij storm en hoogwater op de Waddenzee moet de klep wel omhoog getakeld worden, maar de hogere waterstand aan de Waddenzee kant houdt de klep op zijn plaats. Als er dan storing of een defect optreedt zal de klep gewoon als barrière blijven werken. De klep zal alleen wel de eerste vloed-stroming tegen moeten houden, waardoor de waterstand dan hoger in de geul is dan in het meer. Hierdoor drukt het water aan de kant van de geul, de klep omhoog. De klep moet daarom zwaar genoeg uitgevoerd worden, zodat het water de deur dan niet omhoog kan duwen. Door deze punten krijgt de klep een **8** op de betrouwbaarheid.
5. **Duurzaamheid:** Duurzame mogelijkheden voor de klep zijn er wel, maar in bredere uitvoering wordt eigenlijk altijd met staal gewerkt. Omdat de schepen hierdoor moeten, is een brede klep nodig en wordt dit met een **2** beoordeeld.
6. **Vismigratie: 5**
7. **Kosten:** De klep is een concept waar veel mee wordt gewerkt. Een grote as bij de bodem en lieren die de klep op gewenste positie brengen zijn de enige toevoegingen die nodig zijn. De as zit onder water en zal daarom moeilijk te vervangen zijn, als dit nodig is. In het zoute water zijn deze componenten onderhoudsgevoelig en daarmee ook duur. De kabels of kettingen waarmee de klep opgehesen wordt slijten en bewegen ook onderwater waardoor de

verwachting is dat deze onderhoudsgevoelig zijn. Daarom wordt de klep met een **5** gewaardeerd voor de kosten.

8. Toekomstbestendigheid: 5

8.1.6 Kantelbare klep concept met losse schutsluis voor de pleziervaart (variant 6)

De kantelbare klep werkt net als de zakkende muur maar dan zakt de klep niet, maar kantelt hij naar de bodem. Doordat het stromingsmodel voor beide concepten gelijk is, scoort deze variant hetzelfde op de punten 1, 2, 3, 6 en 8 als de zakkende muur variant met losse schutsluis (variant 4). Daarom zijn daar alleen de scores vermeld.

1. Sediment inlaat: 10

2. Doorvaart: 8

3. Uitspoelen: 10

4. Betrouwbaarheid: De betrouwbaarheid is iets kleiner voor de smalle klep, omdat er een schutsluis naast de betrouwbare klep komt. Daarom wordt deze met een **7** gewaardeerd.

5. Duurzaamheid: De duurzame mogelijkheden zonder doorvaart zijn groter, omdat de klep nu in secties opgedeeld kan worden. Dan kunnen ook minder sterke materialen als composiet gebruikt worden. Ook de schutsluis kan van duurzamer materiaal dan staal worden gemaakt waardoor de klep hier een **7** voor krijgt. Het materiaal dat gebruikt wordt mag alleen niet te licht zijn, waardoor de muur niet meer laag te kunnen houden is, nadat de eerste vloedstroming is tegen gehouden.

6. Vismigratie: 6

7. Kosten: De schutsluis zorgt wel voor meer kosten dan de brede klep, omdat de klep op zichzelf geen duur systeem is. De onderhoudskosten aan de systemen zullen echter wel toenemen door de toevoeging van de dubbele schutdeuren. Daarom wordt de klep met de schutsluis met een **4** gewaardeerd voor de kosten en onderhoud.

8. Toekomstbestendigheid: 7

8.2 Scenario's

De criteria krijgen zoals vermeld wegen afhankelijk van het geschetste scenario. Hiervoor wordt een inschatting gemaakt van het gewicht dat een criterium in dat scenario heeft. Dit wordt gedaan op een schaal van één tot tien, waarbij een criterium weging van 10 het belangrijkste criterium is.

8.2.1 Basis situatie (scenario 1)

De weging van de verschillende criteria van een basis scenario wordt hier opgesteld. In het basis scenario is het vooral belangrijk dat het getijdemeer en de toegangsgeul niet vol slibben. Hier baggeren is erg duur en komt de toeristische functie die er voor moet zorgen dat Holwerd weer een interessant gebied wordt niet ten goede. Voor deze toeristische functie is de doorvaart ook belangrijk, maar daar wel ondergeschikt aan omdat bezoekers per boot geacht worden dit van te voren te plannen. Holwerd ligt (nog) niet op een doorlopende route, daarom komt de pleziervaart niet zomaar naar Holwerd toe voor een dagtripje. In het gehele Waddengebied is de trend dat er minder vaarbewegingen zijn en meer langdurige passanten (NHLStenden, 2021).

De betrouwbaarheid van de deuren heeft niet een grote rol, omdat alle deuren in principe te ontwerpen en te bouwen zijn. Of de deuren ook altijd zullen functioneren zoals bedoeld, is alleen uit ervaring te halen. Hierdoor krijgen bekende concepten de voorkeur. Bepaalde types deuren staan bij de provincie beter op papier door ervaringen dan andere deuren, maar dit mag de keuze voor Holwerd aan Zee niet te veel bepalen omdat de neven effecten tot grote financiële en natuurlijke kosten kunnen leiden.

De duurzame mogelijkheden voor het regelwerk worden ook niet belangrijk geacht. De uitvoering van de deur brengt wel uitstoot bij het produceren teweeg, die met goede materiaal keuzes gemakkelijk gereduceerd kan worden. Daarom wordt het wel in de beoordeling meegenomen. Naast de duurzaamheid van het regelwerk is het ook van belang dat het regelwerk volstaat voor de mogelijke uitbreiding van het meer als de connectie met het binnenwater voor pleziervaart wordt gecreëerd.

Holwerd aan Zee moet een gebied worden waar vogels en vissen een uniek gebied kunnen betreden. Aangezien een obstructie de toegang voor vissen kan vermoeilijken of zelfs ontnemen, is dit wel een belangrijk punt. Een deel van het budget komt van de Vogelbescherming die ook de vissen hoog in het vaandel heeft. Voor hen is de passeerbaarheid voor vissen dus ook van groot belang.

Als laatste zijn er de bouw- en onderhoudskosten. Hoeveel geld er bespaard wordt bij het regelwerk kan geïnvesteerd worden in andere zaken van Holwerd aan Zee. Een natuurvriendelijker gebied, de haven of het verwezenlijken van de connectie met het zoete binnenwater zijn hier voorbeelden van.

8.2.1.1 Weging basis scenario

De wegingen voor het basis scenario, die hier onder worden bepaald, zijn in Tabel 6 te zien.

- In het basis scenario is het sediment inlaat minimaliseren het belangrijkste. Dit lijkt op dit moment het grootste probleem, waardoor dit een weging van 10 krijgt.
- Daarna volgt de kosten van het regelwerk. De gemeente en provincie geven aan dat zij geen (grote) onderhoudskosten van het regelwerk willen krijgen. Dit criteria krijgt een 9.
- Hierna volgen de vismigratie en de doorvaart voor schepen. Beide zijn hoofddoelen van het project Holwerd aan zee en moeten worden bereikt. daarom krijgen beide criteria een weging van 8.
- Het uitspoelen van de toegangsgeul krijgt een 7. Het is belangrijk dat er niet te veel sediment in de geul neerslaat. Bij te veel sediment in de toegangsgeul kunnen boten niet meer door de geul heen varen. Als het meer echter één of meerdere getijde cyclussen niet de geul uit kan spoelen, komt er direct een laag neergeslagen sediment in de geul. Als die niet meteen uitgespoeld wordt krijgt het neergeslagen sediment een hoge dichtheid en is het moeilijk weg te spoelen. Het is onoverkomelijk dat een boot dit dan 'los moet ploegen' (dit komt voort uit ervaringen in Nessmerziel, Duitsland).
- De betrouwbaarheid van het regelwerk krijgt een weging van 4. Omdat het regelwerk als primaire kering gaat functioneren, is het wel van belang dat het een betrouwbaar systeem is, maar ook nieuwe mechanismes zouden hiervoor kunnen zorgen.
- Als laatste volgen de duurzaamheid en toekomstbestendigheid van het regelwerk. Deze krijgen beide een 2 als score omdat ze geen invloed hebben op belangrijke effecten in en om het getijdemeer.

Tabel 6, criteria wegingen basis situatie

nummer	wensen	weging
1	Sediment inlaat minimaliseren	10
2	Maximaliseren doorvaart mogelijkheden pleziervaart.	8
3	Uitspoelen van de toegangsgeul	7
4	Maximale betrouwbaarheid van de deuren	4
5	Duurzame mogelijkheden voor de bouw/beheer van het regelwerk	2
6	Vismigratie	8
7	Bouw- en onderhoudskosten	9
8	Toekomstbestendigheid	2

8.2.2 Natuurlijk scenario (nummer 2)

Als de Vogelbescherming Nederland en de Wadden Academie oordelen dat de ecologie in het meer niet voldoet aan de verwachtingen, wordt hun budget ook niet vrij gesteld. Wanneer dit het geval lijkt te zijn bij het ontwerpen van het getijdemeer moet er meer nadruk op de ecologie komen.

Als de natuur een grotere functie gaat vertolken in de keuzes voor Holwerd aan Zee kan de keuze van het regelwerk anders uitpakken. Een groot punt voor de objecties die gemaakt worden tegen het regelwerk, is de hoeveelheid tijd waarin vissen niet het getijdemeer in kunnen zwemmen. Door het onderste deel van de waterkolom niet door te laten en de toegangsgeul uit te spoelen, kan de hoeveelheid sediment dat in het getijdemeer en toegangsgeul komt te liggen worden verminderd. Als beide functies niet worden gebruikt, zou je een open verbinding hebben waarmee het meer binnen enkele jaren vol lijkt te slibben (Perk & Van Rijn, 2018) en er gebaggerd zal moeten worden. Dit baggeren is erg natuur onvriendelijk door de uitstoot van de motoren van de schepen en de overlast die op het meer en op de bodem van het meer gecreëerd wordt. De woeling die bij het baggeren op de bodem ontstaat, afschrikkend voor vissen en verstoort de ecologie. Daarom is de sediment inlaat nog steeds van groot belang binnen dit scenario, maar het uitspoelen van de toegangsgeul is minder interessant. De plezierdoorvaart wordt minder belangrijk omdat het meer in dit scenario meer natuur impulsen nodig heeft. De kosten die nodig zijn voor zo'n natuur gefocust systeem zijn van minder grote invloed, omdat met de keuze van natuur expliciet niet voor de financieel meest aantrekkelijke versie gekozen wordt.

8.2.2.1 Weging natuur scenario

Voor het natuur scenario veranderen dus enkele gewichten, die hierboven genoemd zijn, ten opzichte van het basis scenario. Tabel 7 laat de gewichten voor dit scenario zien.

- De pleziervaart weging gaat van een 8 naar een 4 omdat in deze situatie is gebleken dat er te weinig ecologische mogelijkheden zijn. Er valt budget weg als natuur mijlpalen niet gehaald worden, waardoor de toeristische pleziervaart minder belangrijk wordt.
- Het gewicht van het uitspoelen van de geul gaat van een 7 naar een 3. Om de natuur een impuls te geven, hoeft de geul niet vrij te zijn van onderhoud.
- Vismigratie weging gaat van een 8 naar 10, omdat de ecologie in het meer belangrijker is dan in de basis situatie van uitgaan was.
- De weging van de kosten gaat van een 9 naar een 6, omdat de uitvoering van het regelwerk er voor moet zorgen dat ecologische doelen gehaald worden. Zonder deze doelen valt er budget voor het project weg, waardoor een duurder regelwerk daar ondergeschikt aan is (het regelwerk kost vele malen minder dan het budget).

Tabel 7, wegingen natuur scenario

nummer	wensen	weging
1	Sediment inlaat minimaliseren	10
2	Maximaliseren doorvaart mogelijkheden pleziervaart.	4
3	Uitspoelen van de toegangsgeul	3
4	Maximale betrouwbaarheid van de deuren	4
5	Duurzame mogelijkheden voor de bouw/beheer van het regelwerk	2
6	Visdoorlaat optimaliseren	10
7	Bouw- en onderhoudskosten	6
8	Toekomstbestendigheid	2

8.2.3 Toeristisch scenario (nummer 3)

Holwerd aan Zee is geïnitieerd om de omgeving een (economische) impuls te geven. Als verwacht wordt dat Holwerd aan Zee te weinig toerisme op te leveren, kunnen afwegingen in het ontwerp van Holwerd aan Zee veranderen. Voor meer toerisme zou het regelwerk zo veel mogelijk passeerbaar voor boten moeten zijn, om het bezoek aan Holwerd van boten zo aantrekkelijk mogelijk te maken. Andere criteria voor het regelwerk zullen daar dan ondergeschikt aan worden.

De toegangsgeul daarentegen moet wel uitgespoeld worden. Deze lijkt volgens de modellen compleet vol te slibben zonder spoelfunctie van het getijdemeer waardoor schepen met een zekere diepgang er op een bepaald moment niet meer doorheen kunnen. De toegangsgeul hoeft echter niet helemaal leeg gespoeld worden, dit kan s 'nachts of buiten het toeristische seizoen gedaan worden. Het toerisme is ook gebaat bij een natuurlijke uitstraling van het meer, waar de vispopulatie ook een belangrijk aandeel in heeft.

8.2.3.1 Wegingen toeristisch scenario

De wegingen van de criteria in het toeristische scenario zijn in tabel 8 weergegeven. Hoe deze zich verhouden tot het basis scenario is hier onder uitgewerkt.

- Het meer mag meer volstromen met sediment dan in de basis situatie. Het sediment kan buiten het toeristische seizoen, uit het meer gehaald worden. Daarom gaat de weging op dit criterium van 10 naar 4.
- Het maximaliseren van doorvaart is het belangrijkste criterium waardoor het regelwerk het toerisme positief kan beïnvloeden. Daarom krijgt dit criterium een weging van 10, in plaats van 8, in het toeristische scenario.
- Het uitspoelen van de geul is minder belangrijk dan in het basis scenario omdat dit buiten het toeristische seizoen of s 'nachts weg gehaald kan worden. Daarom gaat de weging op dit criterium van 7 naar 6.
- De visdoorlaat was al belangrijk in de basis situatie en blijft hier een 8.

Tabel 8, wegingen toeristisch scenario

nummer	wensen	weging
1	Sediment inlaat minimaliseren	4
2	Maximaliseren doorvaart mogelijkheden pleziervaart.	10
3	Uitspoelen van de toegangsgeul	6
4	Maximale betrouwbaarheid van de deuren	4
5	Duurzame mogelijkheden voor de bouw/beheer van het regelwerk	2
6	Visdoorlaat optimaliseren	8
7	Bouw- en onderhoudskosten	9
8	Toekomstbestendigheid	2

8.2.4 Scenario nieuwe functie sediment (nummer 4)

Het scenario zonder regelwerk dat door WaterProof geschetst is, wordt op dit moment niet als optie gezien voor Holwerd aan Zee. De grote hoeveelheden sediment die uit het meer gebaggerd moeten worden zijn niet goed voor de natuur en het toerisme. Daarnaast zorgt het ook voor grote baggerkosten die één van de partijen betalen wil.

Er lopen wel onderzoeken naar de mogelijkheden om van met name slib een bouwstof te maken. Dit kan door het slib op het land te laten drogen. Als dit succesvol blijkt te zijn, komt er een andere kijk op de slib inlaat en komt er waarschijnlijk ook een ander regelwerk als meest optimaal naar voren.

8.2.4.1 Wegingen scenario met nieuwe functie sediment

Ten opzichte van het basis scenario verandert alleen de weging van het sediment in tabel 9. Sediment wordt in deze situatie niet meer als (groot) probleem gezien. Het grootste deel van het sediment kan in het getijde meer op één plaats verzameld worden door een slibvang te plaatsen. Als het slib hier weg wordt gehaald kan het niet ergens anders in het meer neerslaan. Daarom heeft het sediment inlaat minimaliseren criterium in dit scenario een 1 in plaats van een 10.

Tabel 9, wegingen scenario met nieuwe functie voor sediment

nummer	wensen	weging
1	Sediment inlaat minimaliseren	1
2	Maximaliseren doorvaart mogelijkheden pleziervaart.	8
3	Uitspoelen van de toegangsgeul	7
4	Maximale betrouwbaarheid van de deuren	4
5	Duurzame mogelijkheden voor de bouw/beheer van het regelwerk	2
6	Visdoorlaat optimaliseren	8
7	Bouw- en onderhoudskosten	9
8	Toekomstbestendigheid	2

8.3 Analyse

De beoordeling van de verschillende concepten op de opgestelde criteria en de wegingen resulteert in een totaal score van de varianten op de scenario's. In de Methodes is te zien hoe dit berekend wordt. Tabel 10 laat de scores zien van de varianten zien. Hoe hoger de score is hoe beter de variant in bijbehorend scenario presteert. Deze scores zijn verbonden met een kleuren schema, waarbij de schaal van (donker) groen tot rood loopt.

Tabel 10, MCA analyse van de zes varianten voor alle scenario's. De hoogte van een variant op een scenario bepaald hoe goed de variant is (hoe hoger hoe beter)

nummer	Scenario nr.1	Scenario nr.2	Scenario nr.3	Scenario nr.4	Variant 1	Variant 2	Variant 3	Variant 4	Variant 5	Variant 6
1	10	10	4	1	2	7	8	10	8	10
2	8	4	10	8	5	7	3	8	3	8
3	7	3	6	7	10	6	10	10	10	10
4	4	4	4	4	9	8	4	4	8	7
5	2	2	2	2	8	7	6	7	2	7
6	8	10	8	8	7	4	5	6	5	6
7	9	6	9	9	10	6	2	2	5	4
8	2	2	2	2	9	7	5	7	5	7
Totaal score scenario 1					346	314	270	344	305	374
Totaal score scenario 2					270	252	222	278	248	302
Totaal score scenario 3					334	280	218	290	253	320
Totaal score scenario 4					328	251	198	254	233	284

Een kantelbare klep is volgens deze analyse de beste optie voor het basis scenario (scenario 1) en een scenario waar de nadruk op de natuur ligt (scenario 2). Als er een nuttige functie voor het ingestroomde sediment wordt gevonden (scenario 4) is de schutdeur de betere variant met deze wegingen. Ook wanneer de nadruk op toerisme wordt gelegd (scenario 3) komt de schutsluis er als beste optie uit.

Variant 3, de zakkende muur die ook als vaardoorgang dient, is voor alle scenario's het slechtst beoordeeld. Ook varianten 2, 4 en 5 komen niet als aantrekkelijke oplossingen uit de MCA. De zakkende muur heeft dezelfde stromingseigenschappen dan de kantelbare klep, maar is minder betrouwbaar en duurder, waardoor deze variant minder wordt beoordeeld. De vaste muur komt ook niet als veel belovend concept uit de analyse.

Ongeacht het scenario dat zich voor Holwerd aan Zee zal vormen komen de schutsluis en kantelbare klep met een losse schutsluis als meest kansrijke opties naar voren. De scores op deze concepten zijn dusdanig groter dat de andere opties niet kansrijk lijken te zijn.

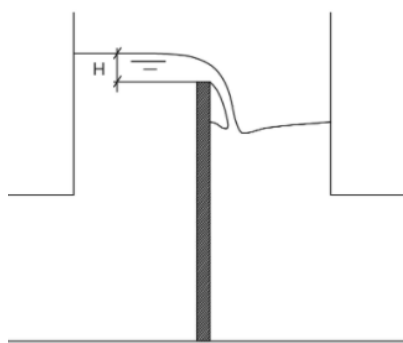
9. Discussie

9.1 Sediment verplaatsing

Het is niet duidelijk hoeveel sediment er gedurende de vloed-stroming neerslaat in de toegangsgeul. Hierdoor is ook niet in te schatten wat voor stroomsnelheden nodig zijn om de geul uit te spoelen en hoe lang die snelheden nodig zijn. Wat de sediment concentraties uiteindelijk in de toegangsgeul zullen zijn als het getijdemeer er is, is nog niet duidelijk. Deltares is op dit moment een onderzoek aan het doen naar het sediment transport in de Waddenzee. Met name de baggerwerkzaamheden in de vaargeul en de plaats van lozing lijkt invloed te hebben op de concentraties in de vaargeul Holwerd-Ameland. Wat de uiteindelijke concentraties zullen zijn, trachten Deltares en WaterProof in hun onderzoek, dat parallel aan dit onderzoek loopt, te ontdekken.

De toegangsgeul wordt door de meeste concepten die in deze casusstudie gebruikt zijn, uitgespoeld door water in het getijdemeer vast te houden op het vloedpeil en later los te laten. Hoe goed de toegangsgeul uitgespoeld wordt zou beoordeeld worden door ook de eb-stroming, wanneer het meer leeg stroomt, te simuleren. Omdat dit complexer bleek te zijn dan gedacht, is dit niet gelukt om in het model te verwerken. Zogenaamde “backwatercurves” zorgen ervoor dat de waterhoogte niet in de hele toegangsgeul gelijk is. De stroomsnelheid in de toegangsgeul hangt voor een groot deel af van de waterstand. Door deze punten met elkaar te combineren is er met weinig zekerheid iets over het uitspoelen van sediment te zeggen en is dit ook niet kwantitatief gedaan. Er is wel een kwalitatieve beoordeling gedaan om de mogelijkheden die de regelwerken bieden om het sediment uit de toegangsgeul te spoelen te vergelijken.

Er wordt in het rapport ook aangenomen dat de sediment inlaat substantieel wordt gereduceerd als alleen de stroming in de bovenste waterkolom doorgelaten wordt. Met de sedimentconcentratie verspreiding door de waterkolom is dit een aanname die gedaan is, maar als de stroomsnelheid over een overlaat te groot wordt, is dit mogelijk niet meer het geval. Dirk Walinga (technisch projectleider bij provincie Fryslân) benoemd als voorbeeld dat er overlaten, zie Figuur 28, in de riolering verwerkt zit waar ook gewerkt wordt met het principe dat het meeste vuil in het onderste deel van de waterkolom zit. Uiteindelijk komt er toch veel vuil in het openwater terecht, als de overlaten gebruikt worden. De kans bestaat dat dit ook zal gebeuren bij de kantelbare klep.



Figuur 28, voorbeeld riooloverlaat

Als sediment het getijdemeer wel binnenkomt, slaat het ergens in het getijdemeer neer. Hoe snel dit gebeurt zal uit de modellen van Deltares en WaterProof voort moeten komen. Het is het meest voordelig als het sediment net achter het regelwerk neerslaat, waardoor een deel bij het legen van het getijdemeer weer weggespoeld wordt. Als dit gebeurt is de inlaat van sediment gedurende de vloed-stroming minder belangrijk dan wanneer al het sediment diep het meer op stroomt.

9.2 stroomsnelheden

Aan sommige eigenschappen hangen nog wel veel onzekerheden vast. De afvoercoëfficiënt die is gebruikt om de stroming het getijdemeer in te berekenen, is overgenomen uit een rapport van Deltares waarin ook effecten van een regelwerk werden onderzocht. Deze coëfficiënt is voor alle regelwerken gelijk gebleven. Of dit ook de goede coëfficiënt is, is niet zeker. Het regelwerk dat nu als meest geschikt is bestempeld, krijgt het getijdemeer niet helemaal gevuld tot het vloedpeil van de Waddenzee. Als de coëfficiënt lager is, en er dus meer weerstand door het regelwerk ontstaat, zal het getijdeverschil in het getijdemeer nog verder afnemen. Getij in het getijdenmeer is een randvoorwaarde, omdat dit samen met het brakke water in het getijdemeer voor een unieke ecologische plek gaat zorgen. Dus als het getijdeverschil te ver afneemt zal dit als een groot negatief punt worden aangemerkt.

9.3 Situatie veranderingen

De mogelijkheid bestaat ook dat de situatie bij Holwerd helemaal verandert. De vaargeul Holwerd-Ameland blijft niet zonder te baggeren in stand. Er loopt een onderzoek vanuit Rijkswaterstaat om te kijken wat de beste oplossing is om Ameland bereikbaar te houden (Rijkswaterstaat, 2020). Hiervoor zijn twee opties opgesteld. De eerste optie is om de huidige vaargeul in stand te houden en te kijken naar minimalisatie van de baggerkosten. Als tweede is de optie om de vaargeul vanaf Ferwert, een plaats meer naar het westen langs de waddenkust, te laten lopen omdat daar een natuurlijk profiel in de Waddenzee ligt waar de veerboot doorheen kan varen. Deze optie brengt mogelijk veel kleinere baggerkosten met zich mee. De laatste optie zorgt ervoor dat er geen veerboot meer door de vaargeul bij Holwerd hoeft en de pier (deels) afgebroken wordt. Hierdoor zal de vaargeul bij Holwerd in zijn natuurlijke balansprofiel terugkeren. Hoe dit profiel er precies uit ziet, is onbekend. Op luchtfoto's van Deltares is wel duidelijk te zien dat de natuurlijke geulen in de Waddenzee minder zwevend sediment bevatten. Figuur 29 laat zien dat de gecreëerde vaargeul, waar de veerboot doorheen vaart, compleet troebel is. De natuurlijke geulen die hoger (oostelijker van Holwerd) in Figuur 29 te zien zijn, zijn veel blauwer en dus minder troebel. Dit is een indicatie dat er noemenswaardig lagere concentraties in de natuurlijke geulen zit. Als er een natuurlijk balansprofiel bij Holwerd komt, is de sediment aanvoer naar het meer waarschijnlijk lager.



Figuur 29, luchtfoto Waddenzee bij de pier van Holwerd (luchtfoto verkregen van Deltares)

Daarnaast ligt ook nog een vraagstuk betreffende het sediment dat het getijdemeer en de toegangsgeul uitgespoeld wordt. Waar komt dit sediment terecht? Het sediment wordt de Waddenzee opgespoeld bij het uitspoelen van de toegangsgeul. Dit komt dan waarschijnlijk ook weer terug als het water vanaf de Waddenzee weer naar het getijdemeer stroomt als het vloed wordt. Wat hier de balans in wordt, is niet bekend.

Naast de optie om alleen een regelwerk in de dijkdoorbreking te plaatsen, wordt er ook gekeken naar een variant waarbij er een 'natuurlijk drempel' veel eerder in de geul wordt geplaatst. Deze drempel zorgt ervoor dat, net als bij de kantelbare klep, de eerste sediment rijke vloed-stroming niet door wordt gelaten. Hierna kan het water vrij naar het meer stromen in deze variant. Dit heeft als positieve eigenschap dat het sedimentrijke water niet eens de toegangsgeul inkomt. Figuur 30 laat de locaties van de drempel en de dijkdoorbreking zien.



Figuur 30, locaties van de drempel en de dijkdoorbraak

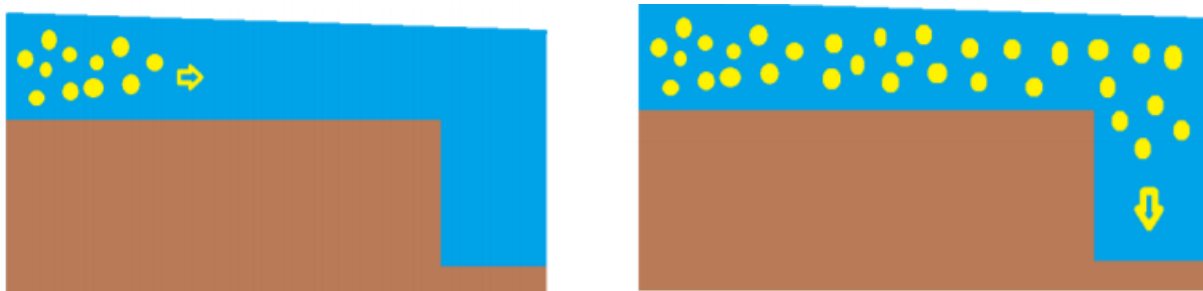
Als het waterpeil hoger dan de drempel komt, stroomt het water niet alleen door de toegangsgeul, maar moet het water in deze variant ook over de kwelder naar de toegangsgeul stromen. De toegangsgeul wordt dan uitgebreid met nevengeulen, zogenaamde slenken, waar vissen zich in een rustige omgeving naar het getijdemeer kunnen verplaatsen. Bij het uitspoelen van het meer moet de stroming niet door de neven geul(en) stromen, waardoor vissen zich hier rustig kunnen begeven.

Boten op de Waddenzee plannen meestal om bij hoogwater te gaan varen. Hierdoor hebben zij vrijheid om te varen waar ze willen, omdat ze dan niet in de vaargeul hoeven te blijven. Door het meer dicht te zetten gedurende deze periode, kan een deel van de wadvvaarders dit als een negatief punt zien en niet naar Holwerd komen. De eventuele schutsluis naast een regelwerk haalt deze obstructie deels weg. Het is nog onbekend hoe lang de toegangsgeul onbegaanbaar blijft voor boten, nadat het regelwerk open is gezet om de toegangsgeul uit te spoelen. Als dit te lang duurt is dit van grote invloed op de toegankelijkheid van het getijdemeer voor de pleziervaart.

Er kan voor gekozen worden om de open verbinding enkel in de toeristische seizoenen te handhaven en in de minder toeristische seizoenen de deur zoals normaal te gebruiken. Ook de baggerinspanningen kunnen buiten het toeristische seizoen gepland worden, waardoor de toeristen er zelf geen last van hebben. De inwoners zien dit natuurlijk wel gebeuren. Hierdoor kan de sediment inlaat over een lange periode voor een deel gereduceerd worden, maar staat het regelwerk toerisme niet in de weg.

9.4 Andere sediment doelen

Het sediment binnen het meer houden kan ook nog onderzocht worden als een optie. Als het gecontroleerd binnen kan worden gehaald waardoor het op één plek neerslaat, is het sediment er mogelijk wel makkelijker uit te halen. Door lokaal de stroomsnelheid te verlagen, door middel van een verdieping in het getijdemeer profiel, zal veel sediment neerslaan. Figuur 31 laat dit proces zien. Als hier van te voren een mechanisme geplaatst wordt die het sediment er uit kan halen, kan een groot deel van het sediment zonder baggerschepen worden weggehaald.



Figuur 31, verdieping in het meer waar sediment neerslaat

Dit kan ook een kans zijn om met het sediment, en dan met name het slib, iets nuttigs te doen. Van slib valt namelijk dijkensleem te maken, door middel van een Kleirijperij. Hier loopt een pilot voor in Groningen (eemsdollard2050, 2020) waar slib wordt gedroogd om er een bouwstof voor de dijken van te maken. Dit kan een oplossing zijn voor de sediment problematiek bij Holwerd aan Zee.

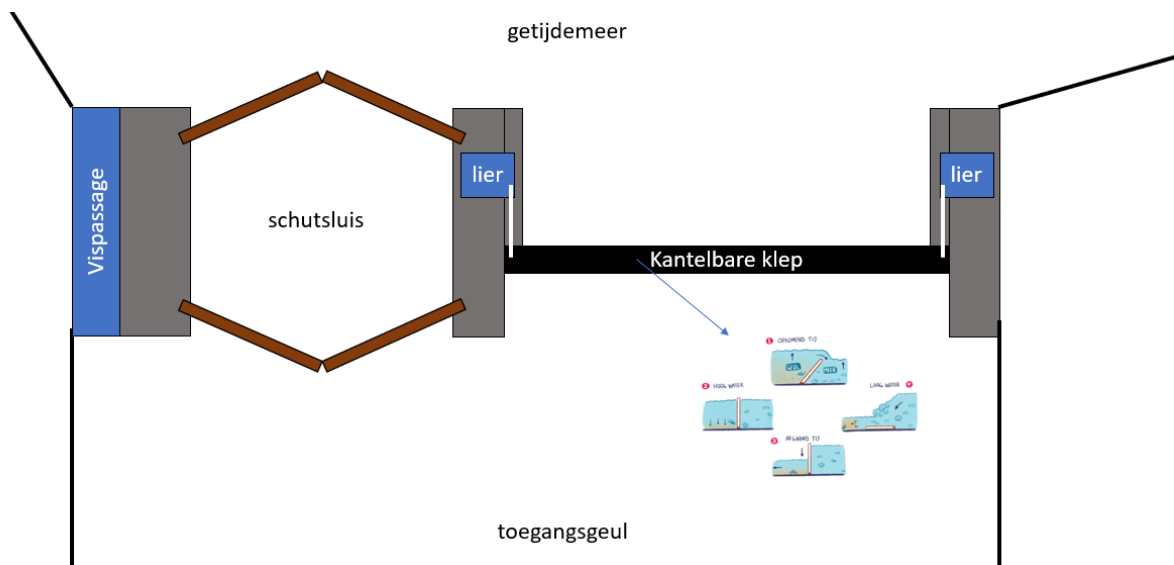
Alle bovengenoemde onzekerheden en varianten hebben invloed op de keuze van het regelwerk dat in de dijkdoorbreking komt. De prestaties van regelwerken op criteria hangen hier vanaf. De kantelbare klep wordt bijvoorbeeld minder goed beoordeeld als deze niet zo veel sediment tegenhoudt als gedacht. Belangrijk is dat de maatregelen wel aan de eisen en voorwaarden van financiers blijft voldoen. Om dit geld toch te krijgen moeten de wegingen van criteria veranderen of moeten bepaalde wensen randvoorwaardes worden. Hierdoor kan de uitgevoerde analyse alleen als inschatting

geïnterpreteerd worden. De studie is met een verkennend doel gestart om de effecten van een regelwerk op het project Holwerd aan Zee te voorspellen. Hier is zo goed mogelijk invulling aan te geven, maar omdat het een complexe omgeving is op de Waddenzee en er geen model is die de invloed van een regelwerk in kaart kan brengen, zijn de voorspellingen niet te verifiëren.

10. Conclusie

De hoofdvraag van het onderzoek is: Wat is het meest toepasselijke regelwerk voor Holwerd aan Zee waarbij rekening wordt gehouden met de hoeveelheid sediment dat het getijdemeer in komt, wanneer schepen het getijdemeer kunnen bereiken en hoe visvriendelijke omstandigheden het creëert?

Het antwoord daarop verkregen uit dit onderzoek is een kantelbare klep met een losse schutsluis of een regelwerk bestaande uit één paar schutdeuren. De kantelbare klep met losse schutsluis, weergegeven in Figuur 32, maakt optimaal gebruik van de omstandigheden die voor het getijdemeer en de waterstroming voorspeld zijn. Een regelwerk concept van schutdeuren is daarentegen goedkoper, betrouwbaarder en beter voor de doorvaart van schepen. In de conclusie wordt uitgelegd hoe deze regelwerk concepten naar voren zijn gekomen.



Figuur 32, aanbevolen concept voor Holwerd aan Zee, een kantelbare klep met een losse schutsluis.

De toegangsgeul is de connectie tussen de Waddenzee en het getijdemeer. Met getijdemeer moet getijdewariaties gaan vertonen door het waterpeil van de Waddenzee te volgen. Vanaf het moment dat het eb is, stijgt het water in de Waddenzee en komt er water door de toegangsgeul naar het getijdemeer toe. Nadat het vloedpeil is bereikt, stroomt het water vanuit het getijdemeer weer terug naar de Waddenzee.

Het regelwerk moet ervoor zorgen dat de sediment inlaat van het getijdemeer geminimaliseerd wordt, sediment uit de toegangsgeul gespoeld kan worden, schepen het getijdemeer kunnen bereiken en dat er vismigratie naar het brakke getijdemeer plaatsvindt.

De eerste vloed-stroming, de eerste 1 á 1,5 uur na laagwater, die het getijdemeer binnenkomt als het getijdemeer gevuld wordt en het water van de Waddenzee naar het getijdemeer stroomt, bevat significant grotere concentraties sediment dan tijdens de rest van de vloed periode. Ook bevat het bovenste deel van de waterkolom minder hoge concentraties dan het onderste deel van de waterkolom, als de stroomsnelheden laag blijven.

Het getijdemeer is bereikbaar voor schepen als de stroomsnelheid in de toegangsgeul onder de 0,8 m/s blijft. De tijdsduur waarin schepen door de geul kunnen varen en het regelwerk kunnen passeren, bepaalt hoe goed een regelwerk de doorvaart voor schepen ondersteunt. Gedurende de tijdspan dat het getijdemeer uitgespoeld wordt, kunnen er geen schepen in de toegangsgeul zijn. De

stroomsnelheid is daar dan te hoog. Wat deze tijdspan is, wordt in het parallelle onderzoek van WaterProof onderzocht.

De invloed van het regelwerk op de vismigratie wordt vooral bepaald door de fysieke barrière die het regelwerk vormt en de stroomsnelheden die het regelwerk door de geul bij het vullen en legen van het getijdemeer creëert.

Verschillende concepten zijn voor de bovenstaande criteria, de duurzaamheid, betrouwbaarheid, toekomstbestendigheid en bouw- en onderhoudskosten, beoordeeld. De kantelbare klep met de losse schutsluis en het schutdeuren concept komen als beste naar voren in verschillende scenario's. Deze scenario's zijn gecreëerd omdat nog niet duidelijk is waar de knelpunten voor Holwerd aan Zee zitten.

De kantelbare klep zakt volgens een schema waarbij de stroomsnelheden in de toegangsgeul minimaal blijven. Door de klep net onder het waterpeil van de toegangsgeul te laten zakken, ontstaat er een klein doorstroomoppervlakte waardoor er niet te grote hoeveelheden water het meer binnen komen. Hierdoor blijft de stroomsnelheid in de toegangsgeul laag. De klep laat alleen het bovenste deel van de waterkolom door waardoor minder sediment het getijdemeer binnen komt. Daarnaast zorgt de lage stroomsnelheid in de toegangsgeul ervoor dat veel sediment daar al neerslaat. Dit sediment komt helemaal niet het meer binnen. Op het moment dat de geul uitgespoeld wordt na, kunnen schepen ten alle tijden door de schutsluis het meer bereiken, omdat de stroomsnelheid zo laag blijft in de toegangsgeul.

De vismigratie is bij de kantelbare klep niet optimaal. Dit komt door de tegenstrijdigheid die de vismigratie en de sediment problematiek met zich mee brengt. Vissen zwemmen in de onderste waterkolom die de klep juist tegenhoudt om sediment buiten te houden. Daarnaast moet de stroomsnelheid bij eb-stroming laag blijven om vissen in de toegangsgeul niet de Waddenzee op te spoelen, maar om de toegangsgeul niet dicht te laten slibben moet deze met grote stroomsnelheden uitgespoeld worden. De vispassage zorgt ervoor dat vissen toch het regelwerk kunnen passeren ook als deze omhoog staat, maar een open verbinding is aantrekkelijker.

Als er een oplossing gevonden wordt om het sediment, en dan met name slib, af te voeren of een nuttige functie te geven is het schutdeuren concept de aantrekkelijkste optie. Gewone schutdeuren die bijna altijd voor een open verbinding zorgen komen ook beter uit de Multi-Criteria Analyse als het toerisme een knelpunt wordt voor Holwerd aan Zee. Deze is vriendelijker voor vismigratie en een open verbinding staat hoger aangeschreven als vaardoorgang dan een sluis. De grote reductie in kosten bij het kiezen voor een schutdeur zorgt er ook voor dat deze beter uit de MCA komt bij een scenario die meer op toerisme gefocust is. Door sediment inlaat te accepteren en dit buiten het toeristische seizoen weg te halen, baggeren, komt dit concept beter uit de analyse.

11. Aanbevelingen

Om een beter beeld te krijgen van de effecten van de verschillende regelwerken wordt geadviseerd om de doorvaarbaarheid en de vismigratie beter door te lichten.

De doorvaarbaarheid is beoordeeld voor gemiddeld getij, maar het is op de Waddenzee vaak dood- of springtij. De diepte van de geul kan dan niet toereikend zijn, of te grote stroomsnelheden kunnen de toegangsgeul onbevaarbaar maken. De toegangsgeul (en mogelijk het stuk er achter) moet helemaal leeg zijn van schepen, wanneer het getijdemeer geleegd wordt om de toegangsgeul uit te spoelen. Met een geul van 2 kilometer moet al enige tijd voordat dit gebeurt duidelijk zijn voor boten dat ze de toegangsgeul niet in kunnen. Hoe haalbaar en hoe erg dit door bootgebruikers wordt gezien als een obstakel moet nog onderzocht worden. Om hier een duidelijk totaalbeeld van te schetsen kunnen er tijdsschema's gemaakt worden die impliceren wanneer de toegangsgeul en het regelwerk passeerbaar zijn, om te kunnen beoordelen of hoeveelheid tijd waarin het meer te bereiken genoeg is.

Ook wordt er geadviseerd om experts uit te laten zoeken bij wat voor omstandigheden vissen het meer nog zullen betreden. Vismigratie is een belangrijk doel voor Holwerd aan Zee, maar het is nog onduidelijk wat voor invloed het regelwerk op de vismigratie heeft. Wat voor types vis er naar Holwerd zullen zwemmen, hoe die vissen zich verplaatsen (door zelf te zwemmen of door met de stroming mee te gaan) en wanneer deze vissen zich verplaatsen kan hier duidelijkheid in verschaffen. Door een tekort aan kennis en beschikbare informatie, heeft dit onderzoek mogelijk onvoldoende over de vismigratie kunnen voorspellen.

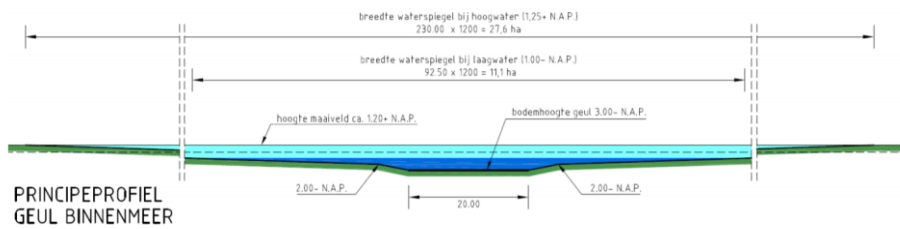
Daarnaast kan er nog door waterbouwkundigen naar de beoordeling van de regelwerken gekeken worden. Of een klep ook daadwerkelijk het onderste deel van de stroming, en dus ook het sediment uit dat deel van de waterkolom, tegenhoudt is een vraag waar geen zekerheid over is. Als punten zoals deze geverifieerd worden, of juist verkeerde assumpties blijken te zijn, kan dit als vast gegeven worden aangenomen of juist worden verworpen. Nu liggen er veel eigenschappen waar een regelwerk wel op wordt beoordeeld, maar die zijn niet met 100% zekerheid vastgesteld.

De optie om het ingestroomde sediment een nuttige toepassing te geven wordt geadviseerd om goed te onderzoeken. Diverse criteria voor het regelwerk en het spoelmeer zijn in strijd met elkaar waardoor er bijna altijd een consensus in moet worden gezocht. Sediment inlaat minimaliseren en vismigratie optimaliseren zijn twee doelen van het regelwerk die in strijd met elkaar zijn. Voor de vismigratie moeten stroomsnelheden beperkt blijven als het getijdemeer leegstroomt, en om de geul uit te spoelen moet de stroomsnelheid zo hoog mogelijk zijn. Zulke tegenwerkende principes zijn er meer met het sediment transport. Als er een nuttige functie voor sediment gevonden wordt en het sediment kan op één plaats verzameld worden, dan kan een criterium, de sediment inlaat, van het regelwerk weg gestreept worden.

Klei rijpen lijkt veelbelovendste optie om van het slib dat het meer betreed iets nuttigs te maken. Door klei te laten drogen wordt dit weer een vaste massa waarmee dijkenglei of landbouwgrond gecreëerd kan worden. Daarom wordt geadviseerd om de mogelijkheden om de mogelijkheden om dit te drogen bij Holwerd uit te zoeken.

Bijlage 1

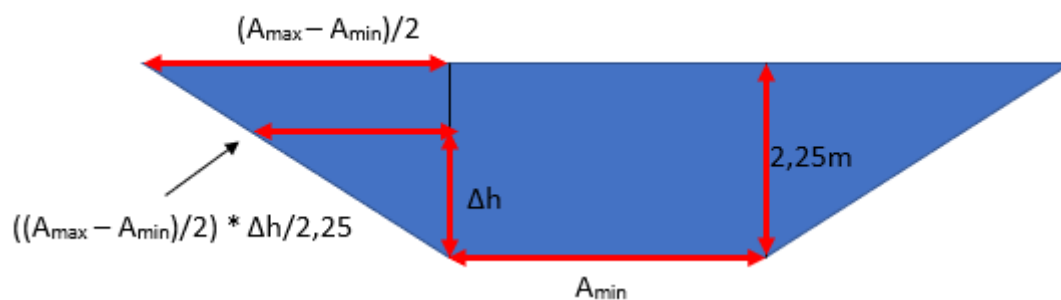
Inschatting getijdevolume



- Bij laag water is er een water oppervlakte van ~11 hectare (1m- NAP)
- bij hoog water is er een water oppervlakte van ~35 hectare (1,25m+ NAP)
- Bij het uitspoelen wordt aangenomen dat het meer helemaal op laag waterpeil komt.
- De zijanten van het meer lopen in een rechte diagonale lijn op naar de zijkant



Hierdoor ontstaat een trapeze vormige doorsnede voor het midden van het meer zoals in de afbeelding hierboven te zien is. Als deze trapeze geëxtrapoleerd wordt voor het hele meer valt het getijdevolume voor verschillende eb- en vloed-peilen makkelijk te berekenen. Een schematische tekening van de oppervlaktes is te zien in Figuur 33.



Figuur 33, schematische tekening getijdemeer doorsnede

$$V = A_{min} * \Delta h + \frac{1}{2} * \frac{(A_{max} - A_{min}) * \Delta h}{2,25} * \frac{1}{2} * \Delta h * 2$$

$V = \text{getij volume (m}^3\text{)}$

$A = \text{oppervlakte (m}^2\text{)}$

$$\Delta h = \textit{getijde verschil (m)}$$

Als de bekende waarden in worden gevuld is het resultaat:

$$V = 110.000 * \Delta h + 53.333 * \Delta h^2$$

Bijlage 2

onderbouwing technische wensen regelwerk

Provincie Fryslân

- zo weinig mogelijk sediment het beleefmeer in laten komen om het getijdemeer zo aantrekkelijk mogelijk te houden voor toeristen en toekomstige dieren zoals vissen en vogels. Als er veel sediment in het meer terecht komt moet dit ook weer weggehaald worden door middel van baggeren. Dit is een industriële bezigheid, die niet in een natuurgebied thuis hoort. De grote stroming die ontstaat bij het baggeren is niet aantrekkelijk voor vissen en gedurende dit onderhoud zullen ook vogels uit dit gebied wegblijven.
- Boten moeten zo veel mogelijk toegang houden tot het beleefmeer vanaf de Waddenzee en terug. De stroming die ontstaat bij het vullen en legen van het meer in de toegangsgeul moet zo veel mogelijk onder de 0,8m/s blijven om toeristenvaart mogelijk te houden (Kollen, 2018). Holwerd moet een haven krijgen waar mensen zo heen kunnen varen. De pleziervaart vaart met boten tot een diepgang van 1m tot 1,5m (NHLStenden, 2021) . Er moet zo weinig mogelijk onder dit waterpeil gekomen worden in de toegangsgeul en sluis om de toegang te kunnen garanderen. Met een laagwaterpeil van -1,2m N.A.P. moet de bodem van de geul en de sluis op -2,7 liggen.
- De stroming naar de Waddenzee bij het legen van het meer moet zo'n hoog mogelijke piek snelheid hebben om de toegangsgeul uit te spoelen. Hierbij wordt veel tot al het sediment uit de toegangsgeul gespoeld en er wordt er ook sediment uit de vaargeul Holwerd-Ameland gespoeld. Hoeveel dit is, is nog niet bekend en wordt onderzocht door Deltares, WaterProof en Leo van Rijn in opdracht van de provincie Fryslân. Wel staat vast dat een hogere pieksnelheid van de stroming meer neergeslagen sediment mee neemt en wordt het dus beter uitgespoeld.
- De provincie heeft een voorkeur voor puntdeuren met een krukdrijfstangmechanisme omdat ze hier al ervaring mee hebben met gebruik en onderhoud.

Wetterskip Fryslân

- Een regelwerk dat dicht blijft in storm periodes heeft het Wetterskip zijn voorkeur om de veiligheid te kunnen waarborgen.
- Het regelwerk moet zo duurzaam mogelijk zijn. Een lange levensduur en duurzame materiaal keuze zijn voorkeuren die daar bij horen.

Stichting Holwerd aan Zee

- De stichting heeft duurzaamheid ook hoog in het vaandel. Het is een natuur project. Daarom moet er over de levenscyclus van de te gebruiken materialen na worden gedacht.
- Altijd toegang voor schepen omdat de toeristische werking van de haven anders weg valt.
- Het regelwerk moet ook een uitbreiding van het meer aan de west kant van Holwerd aan kunnen. Hier liggen plannen voor in fase 3 van het project Holwerd aan Zee. Met dit extra stuk meer moet een connectie worden gemaakt met de Friese binnenwateren.

Werkgroep natuur

- Zo veel mogelijk een open verbinding omdat vissen dan geen weerstand hebben in de verplaatsing van de Waddenzee in en uit het getijdemeer.
- Spoelende functie van het meer minimaliseren

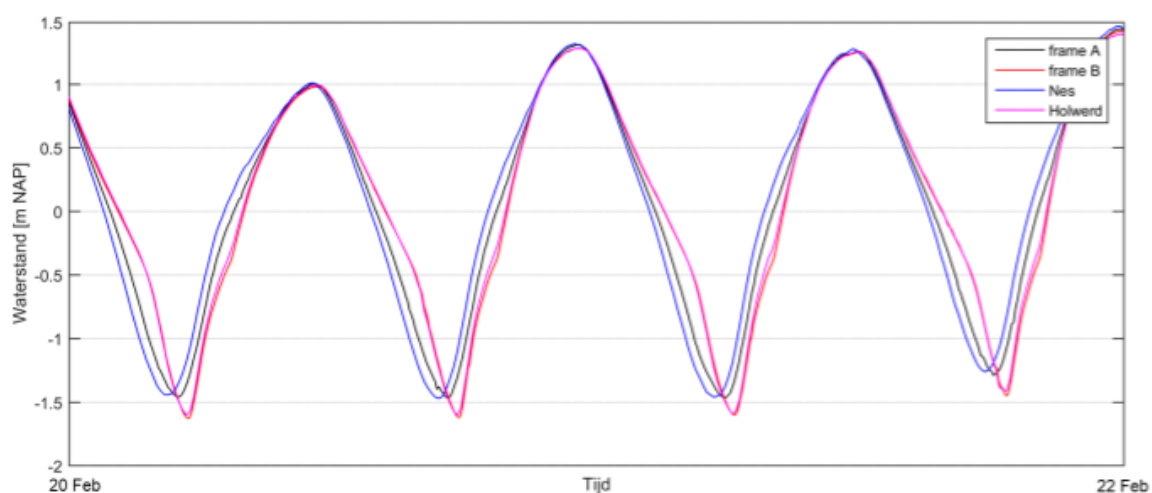
Bijlage 3

Waterstand Waddenzee

In het model moet de waterstand nabij de pier van Holwerd worden geïmplementeerd. Deze waterstanden zijn gemeten door WaterProof en kunnen dus gebruikt worden. Voor het model gaat het enkel om de instroom van sediment, dus wordt er alleen naar de tijd tussen het laagste eb-punt en het moment dat het waterpeil in het getijdemeer hoger wordt dan op de Waddenzee gekeken. Tabel 11 en Figuur 34 laten respectievelijk waterpeilen op bepaalde tijdstippen zien en de vorm waarin getijdencycli zich voortbewegen.

Tabel 11, waterstanden met bijbehorende tijden

Tijd	7.28	8.37	9.37	11.29	12.25	14.28	15.34	16.46	17.35	18.33	19.26
Water stand	-0,2	-0,6	-1,1	-0,3	0,3	1,0	1,2	0,8	0,5	0,2	-0,1



Figuur 34, waterstand metingen op de Waddenzee

Met deze informatie wordt per 10 minuten een waterpeil vastgesteld waar dan mee gerekend kan worden, om na deze 10 minuten de variabelen die hierna nog volgen bij te kunnen werken en een nieuwe 10 minuten periode te simuleren. De gemiddelde waterpeilen voor respectievelijk laag- en hoogwater zijn: -1,17m NAP en +1,06 NAP. Deze waarden zullen aangehouden worden voor de minimale en maximale waterpeilen om een situatie te schetsen van een gemiddeld scenario. De waterpeilen per tijdstip zijn te zien in Tabel 12.

Tabel 12, waterpeilen per tijdstip voor het model

Waterstand (m t.o.v. NAP)	Tijd (minuten vanaf laag water)
-1,17	0
-1,12	10
-1,06	20
-0,92	30
-0,83	40

-0,75	50
-0,69	60
-0,62	70
-0,54	80
-0,44	90
-0,37	100
-0,3	110
-0,2	120
-0,1	130
0	140
0,1	150
0,2	160
0,3	170
0,36	180
0,42	190
0,49	200
0,54	210
0,58	220
0,63	230
0,69	240
0,74	250
0,8	260
0,88	270
0,94	280
1	290
1,02	300
1,05	310
1,06	320
1,06	330
1,05	340
1,02	350
1	360
0,96	370
0,92	380
0,88	390
0,84	400
0,8	410
0,75	420
0,72	430

Water hoogte meer

Het getijdevolume is in Bijlage 1 vastgesteld als een functie van het getijdeverschil. Dit verschil bepaald dus hoeveel het volume toe neemt. Om vast te kunnen stellen wat het waterpeil in het meer is als er eenmaal water binnen is gestroomd moet deze formule omgezet worden. Een formule omzetten kan op de volgende manier gebruikmakend van algebra voor kwadratische vergelijkingen (Mathway, 2021):

$$y = a * x^2 + b * x + c$$

$$x = -\frac{b}{2a} \pm \sqrt{\frac{y}{a} + \frac{b^2}{2a} - \frac{c}{a}}$$

De formule die omgezet moet worden is:

$$V = 110.000 * \Delta h + 53.333 * \Delta h^2$$

$$V = \text{getij volume (m}^3\text{)}$$

$$\Delta h = \text{getijde verschil (m)}$$

Het getijdevolume kan niet negatief worden en het getijdeverschil ook niet. Daarom gelden de volgende voorwaarden:

$$V \geq 0 \quad \text{en} \quad \Delta h \geq 0$$

$$a = 53.333$$

$$b = 110000$$

$$c = 0$$

Als hiermee de formule wordt omgezet zoals hierboven gedaan is dan komt het volgende er uit:

$$\Delta h = -1,0313 \pm \sqrt{\frac{V}{53333} + 1,0635}$$

$$\Delta h \geq 0 \quad \text{dus: } \Delta h = -1,0313 + \sqrt{\frac{V}{53333} + 1,0635}$$

De waterhoogte in het meer is gelijk aan de waterhoogte bij eb (-1,17m NAP) plus het getijde verschil dat bij het totale ingestroomde getijdevolume hoort.

Doorstroom oppervlakte regelwerk

Het doorstroom oppervlakte van de sluis is afhankelijk van de breedte van het regelwerk en de afstand van het wateroppervlak tot de onderkant van de sluis. Voor de schutsluis is dit de onderkant van de deur, en voor de zakkende muur en de vaste muur met klep is dit de hoogte van de muur. Hoe groter deze oppervlakte is, hoe meer water er het getijdemeer instroomt.

Doorstroom oppervlakte en stroomsnelheid toegangsgedul

Het doorstroom oppervlakte van de toegangsgedul wordt bepaald om de stroomsnelheid in de gedul te monitoren. De stroming door de gedul is het volume dat het meer binnen komt per tijdseenheid. De snelheid in de gedul is dan alleen nog afhankelijk van het doorstroom oppervlakte. Dus:

$$v = \frac{Q}{A}$$

Waarin

$$v = \text{stroomsnelheid } \left(\frac{m}{s}\right)$$

$$Q = \text{debiet } \left(\frac{m^3}{s}\right)$$

$$A = \text{doorstroomoppervlakte (m}^2\text{)}$$

Deze stroomsnelheid bepaald hoeveel sediment het getijdemeer binnen komt bij de vloed-stroom en hoeveel sediment de toegangsgeul uitgespoeld wordt bij de eb-stroom.

Het doorstroom oppervlakte is te berekenen gebaseerd op het profiel zoals weergegeven in Figuur 35 dat is vastgesteld in paragraaf Situatie omschrijving. De formule die dan gemaakt kan worden is gebaseerd op oppervlaktes van het grote vierkant en de 2 driehoeken aan de zijkant zoals in Figuur 36 is uitgebeeld:

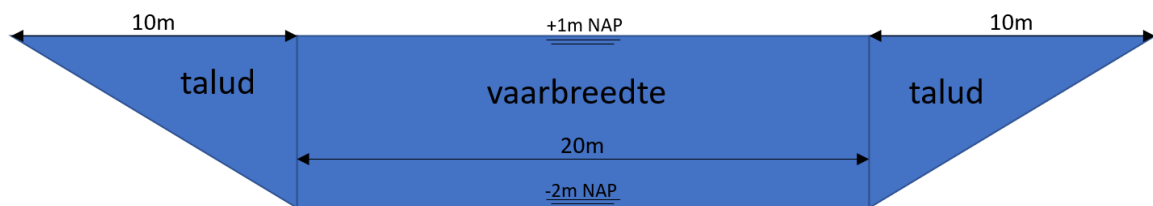
$$A = 20 * (h + 2) + \left(\frac{1}{2} * \left((h + 2) * 10 * \frac{h + 2}{3} \right) \right) * 2$$

$$A = 20 * h + 40 + \frac{10h^2}{3} + \frac{40h}{3} + \frac{40}{3} = \frac{10h^2}{3} + \frac{100h}{3} + \frac{160}{3}$$

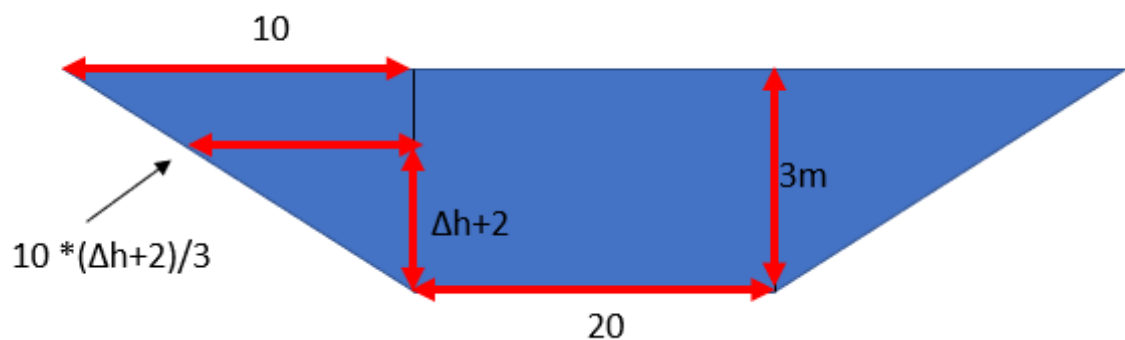
Waarin

$A = \text{doorstroom oppervlakte (m}^2\text{)}$

$h = \text{waterhoogte ten opzichte van NAP (m)}$



Figuur 35, toegangsgeul profiel



Figuur 36, maten om doorstroomoppervlakte te berekenen

Stroomsnelheden

De stroomsnelheden in de toegangsgeul en door het regelwerk hangen af van het debiet dat het getijdemeer binnen komt, en het oppervlakte waar het doorheen stroomt. De formule hiervoor is:

$$v = \frac{Q}{A}$$

Waarin:

$$v = \text{stroomsnelheid} \left(\frac{m}{s} \right)$$

$$Q = \text{debiet} \left(\frac{m^3}{s} \right)$$

$$A = \text{doorstroomoppervlakte} (m^2)$$

Voor iedere tijdsstap komt een nieuwe stroomsnelheid naar voren. Hiermee kunnen grafieken per concept worden gemaakt die de waterstanden op de Waddenzee en in het getijdemeer en de stroomsnelheden in de toegangseul en door het regelwerk, uitgezet tegen de tijd.

Bibliografie

- Arcadis. (2020). *Klant-eisenspecificatie Holwerd aan Zee*.
- eemsdollard2050. (2020). *pilot-kleireiperij*. Opgehaald van eemsdollard2050.
- FLORON. (2018). *Oevers voor vissen, effectiviteit van natuurvriendelijke oevers onderzocht*.
- Flow Defence. (2020). *Flood barrier installation*. Opgehaald van flowdefence: <https://flowdefence.com.au/flood-barrier-installation/>
- Google. (2020). *Maps*. Opgehaald van google: <https://www.google.nl/maps>
- Henissen, J., & Meire, P. (1998). *Inrichting van het gecontroleerd overstromingsgebied Kruibeke-Bazel-Rupelmonde: berekeningen i.v.m. de toepassing van een gereduceerd getij in de polder van Kruibeke*. Brussel: Instituut voor Natuurbeschoud.
- Herman, P., & Villars, N. (2016). *Analyse Vaargeul Holwerd-Ameland*. Deltares.
- Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden. (sd). *vispassage*. Opgehaald van HDSR: <https://www.hdsr.nl/werk/schoon-water/investeren-toekomst/vispassages/vispassage/>
- Kollen, J. (2018). *Slib beleefmeer Holwerd aan Zee*. SWECO.
- Kollen, J., & Stuiver, J. (2018). *Uitgangspunten schetsontwerp en budgetraming*. SWECO.
- Kollen, J., & Sweco. (2018). *Slib beleefmeer Holwerd aan Zee*.
- Kroon, T. (2016). *Slimme stormvloedkering Holwerd aan Zee*.
- Mathway. (2021). *algebra*. Opgehaald van Mathway: <https://www.mathway.com/popular-problems/Algebra/212621>
- Monstersche Sluis. (2009). *de deuren*. Opgehaald van monsterschesluis: <http://monsterschesluis.nl/de-deuren/>
- NHLStenden, E. T. (2021). *Bouwsteen Ambitie Vaarrecreatie, Holwerd aan Zee*.
- Perk, L., & Van Rijn, L. (2018). *Beleefmeer Holwerd aan Zee; Verkennende berekeningen naar aanslibbing en mogelijkheden voor reductie*. Waterproof Marine Consultance & services B.V.
- Perk, L., Van Rijn, L., Brinkkemper, J., & Koudstaal, K. (2019). *Metingen Holwerd-Ameland, Meetresultaten en laboratoriumanalyse metingen januari-maart 2019*. WaterProof.
- Perk, L., Van Rijn, L., Brinkkemper, J., & Koudstaal, K. (2019). *Metingen Holwerd-Ameland, Meetresultaten en laboratoriumanalyse T1 metingen sept-okt 2019*. WaterProof.
- Rijksoverheid. (2018). *Zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust en mondiaal, 1890-2017*.
- Rijkswaterstaat. (2017). *Richtlijnen Vaarwegen 2017*.
- Rijkswaterstaat. (2020). *Oplossingsrichtingen bereikbaarheid Ameland opgesteld*. Opgehaald van Rijkswaterstaat: <https://www.rijkswaterstaat.nl/nieuws/archief/2020/01/oplossingsrichtingen-bereikbaarheid-ameland-opgesteld>
- Stichting Holwerd aan Zee. (2019). Opgehaald van Holwerd aan Zee: <https://www.holwerdaanzee.nl/>

van de Kreeke, J., & Brouwer, R. (2017). *Tidal inlets*.

van Schijndel, S., & Rutherglen, M. (2010). *AANVALSPAN KRIMP HOLWERD*.

Waddenacademie. (2021). *klimaatverandering en ecologie*.

WaterProof. (2020). *Samenvattend kennisdocument slibhuishouding Holwerd aan Zee*.