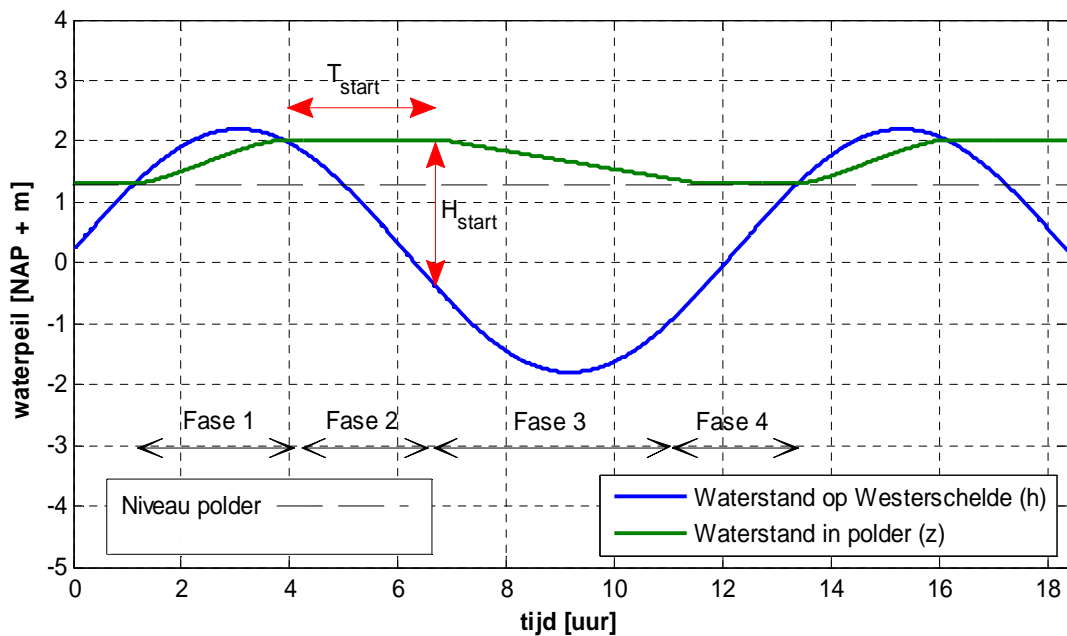


# DE ENERGIEPOLDER

## Haalbaarheidsstudie naar een getijcentrale langs de Westerschelde



Afstudeerscriptie  
Leslie Mooyaart

Juni 2009



# DE ENERGIEPOLDER

## Haalbaarheidsstudie naar een getijcentrale langs de Westerschelde

Student: Leslie Mooyaart  
Universiteit: TU Delft  
Faculteit: CiTG  
Master: Hydraulic Engineering  
Studentennummer: 1180983

### **Afstudeercommissie**

Prof. drs. ir. J.K. Vrijling	TU Delft
Ir. J. Van Duivendijk	TU Delft
Ir. W. Peperkamp	TU Delft
Dr. ir. S.N. Jonkman	TU Delft / Royal Haskoning
Ir. J.H. Maas	Delta NV

Opdracht uitgevoerd in samenwerking met:





## Voorwoord

Dit rapport is een afstudeerscriptie voor de studie Civiele Techniek, Master Hydraulic Engineering, aan de TU Delft. Deze haalbaarheidsstudie is daarom vooral gericht op de civiel technische aspecten van het plan voor een getijcentrale langs de Westerschelde.

Voor diegene die vooral geïnteresseerd zijn in de opwekking getij-energie wordt aangeraden om hoofdstukken 2, 3, 9 en 12 te lezen. Voor lezers die bekend zijn met de opwekking van getij-energie en willen weten hoe deze getijcentrale ontworpen is, wordt geadviseerd om hoofdstuk 4 tot en met 11 te bestuderen. Voor de lezers die meer inzicht in de kosten voor het project willen krijgen, wordt voorgesteld om hoofdstuk 9, paragrafen 7.8 en 8.7 en appendix D te bekijken.

In december 2007 ben ik voor het eerst in contact gekomen met de opwekking van getij-energie. Toen is mij gevraagd om de TU Delft te helpen met een haalbaarheidsstudie naar een getijcentrale in de Brouwersdam als studentenassistent. Ik heb toen veel geleerd over de hydraulische modellering van getij-energie. Tijdens deze studie kwam het idee naar voren om ook bij Bath in Zeeland te kijken naar een getijcentrale. Deze locatie zou door het grotere tijverschil economisch aantrekkelijker zijn voor winning van getij-energie. Ik was gelijk enthousiast voor dit plan. In augustus 2008 besloot ik daarom dit als mijn afstudeeronderwerp te kiezen. Ik ben nog steeds blij met die keuze, aangezien ik gedurende mijn afstuderen met veel plezier aan het project heb gewerkt.

Hierbij wil ik tevens alle leden van mijn afstudeercommissie graag bedanken. Zij hebben allen veel waardevolle tijd besteed om mijn stukken door te lezen en correcties aan te brengen. De uitgebreide begeleiding die ik ontvangen heb van dhr. Peperkamp en dhr. Van Duivendijk waardeerde ik zeer. Ook de inzet van dhr. Jonkman om het project op de kaart te zetten verdient een vermelding. Tevens wil ik de afdeling Kust & Rivieren van Royal Haskoning in Rotterdam en in het specifiek Erik Arnold bedanken voor de ontvangst op hun kantoor. Ten slotte wil ik mijn waardering uitspreken voor mijn moeder, die nodige correcties in de spelling en de grammatica heeft aangebracht.

Delft, juni 2009

Leslie Mooyaart



## Summary

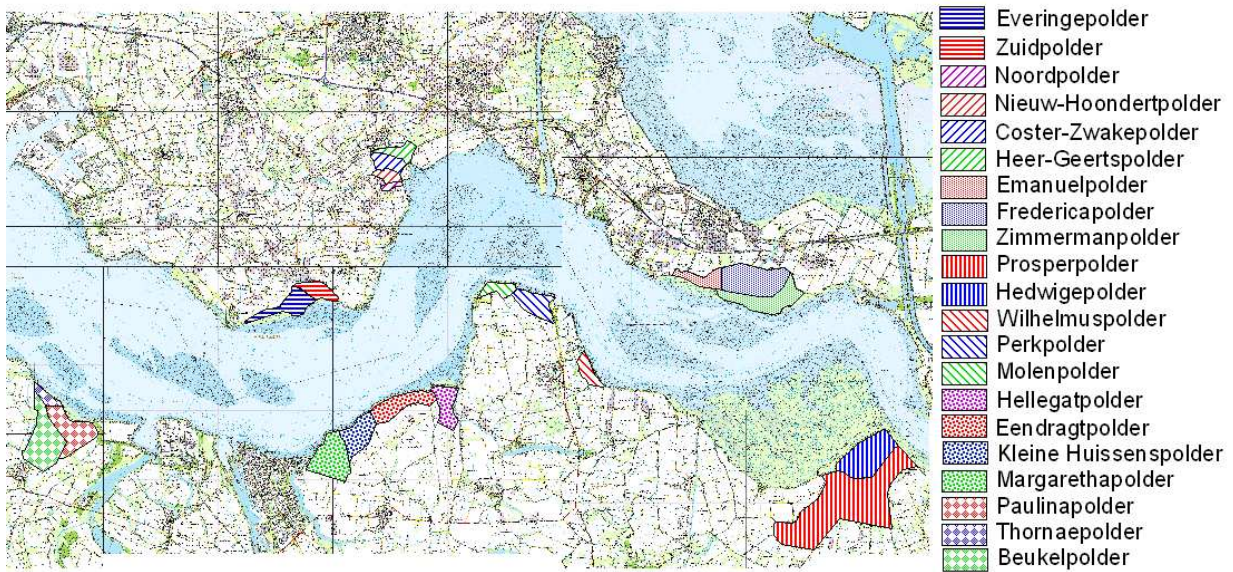
In the Netherlands 6,8% of the total electricity production came from renewable energy sources. Electricity was 17 % of the total energy consumption in that year. In total 1,2% of the energy consumption was therefore renewable. The objective of the cabinet to get 20% of the energy from renewable energy sources will therefore be a major challenge. All available means should therefore be employed to reach this objective.

Tidal energy did not seem feasible for the Netherlands, as the tidal difference is relatively small. After research done for a tidal power plant at the Brouwersdam it turned out that production of tidal energy could become attractive when combined with other social interests, such as improving the ecology of the area.

On the 11<sup>th</sup> of March 2005 the Netherlands signed an agreement about the Western Scheldt. This agreement said that Hertogin Hedwigepolder should be given back to the estuary. This had to be done to compensate nature loss due to deepening of the Western Scheldt as a result of shipping requirements. By combining the desire of the cabinet for more energy production from renewable energy sources with the plans to compensate for nature loss in the Western Scheldt the idea came to gain tidal energy from polders. Because of this new function of the polder it is called the energy polder.

The aim of this study is to research the economical and technical feasibility of a tidal power plant along the Western Scheldt. The attention in this study lays on the design of the structures needed for the tidal power plant. With this design a good insight in the costs is obtained.

First methods of gaining tidal energy where compared. There it became clear that turbines using kinetic energy where less efficient. It would produce 65 – 99,9 % less energy than a turbine that produces electricity from potential energy would do. Examples of these last mentioned turbines are Bulb-turbines which where placed in the run-of-river plants in the Netherlands and the tidal power plant in La Rance.



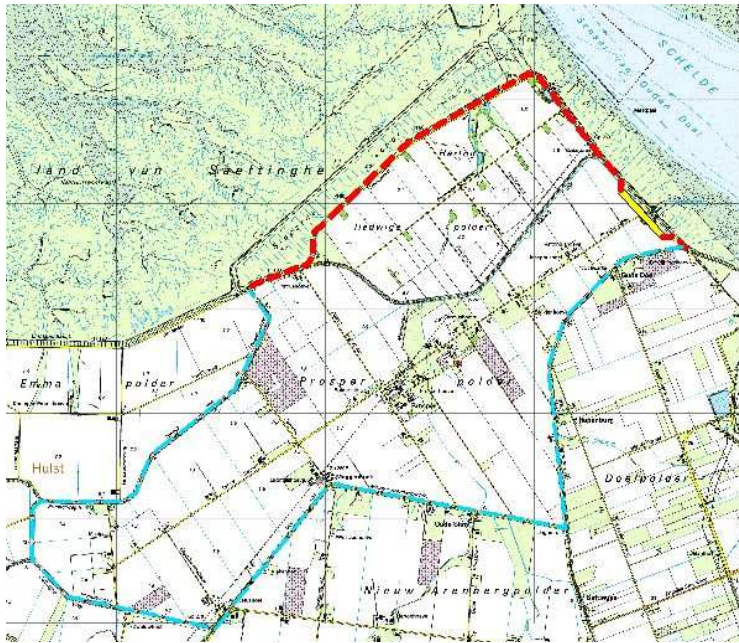
**Figure 1; Analysed (not densely populated) polders for concept of energy polder**

Next the most suitable polder for the concept of the energy polder was found. This was done by analyzing geographic data of polders which were not densely populated (see Figure 1). After this analysis it turned out that a combination of the Prosperpolder and the Hertogin Hedwigepolder could produce the most energy. This alternative was therefore worked out.

The main findings as a result of working out this alternative can be summarized in the following matter:

- the ground level of these two polders is relatively high. The Prosperpolder lays around 1,5 meter above sealevel and the Hertogin Hedwigepolder lays around 1,9 meter above sealevel. Because of this relatively high ground level the head during ebb is relatively high compared to the head during flood. A tidal power plant is therefore chosen which produces energy during ebb with turbines. During flood the polder is filled with the help of sluices.
- The tidal power plant will be located at the east side of the Prosperpolder. This is shown in Figure 2. This location is chosen because the distance to the Western Scheldt is short and the ground level of the polder relatively low. The costs for the channels to the Western Scheldt will than be low and a big part of the water in the polder can than be used for energy generation.

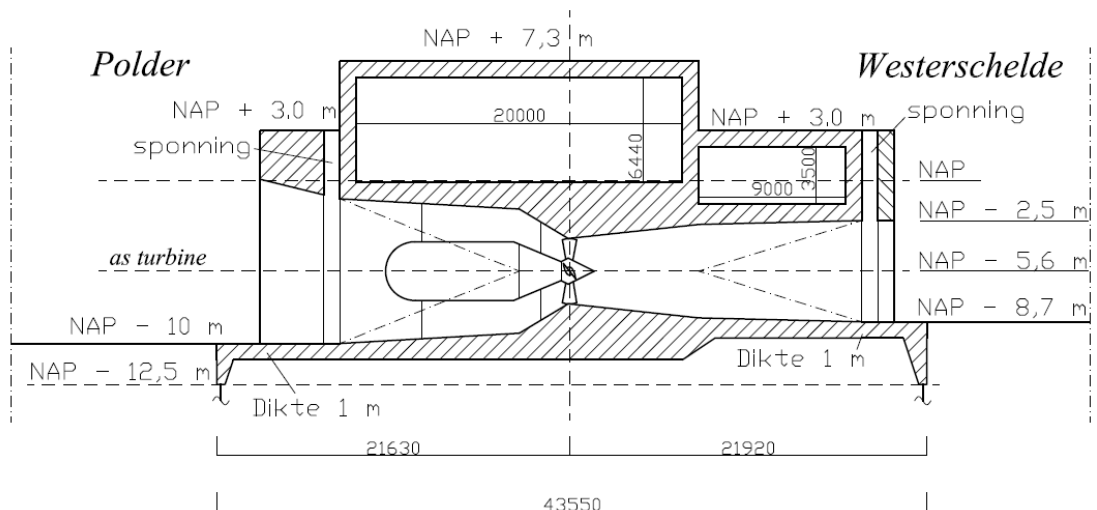




- Getijcentrale
- Primary dike
- Old dikes behind primary dike

**Figure 2; Location tidal power plant**

- The turbines will be constructed behind the current primary dike. The tidal power plant will therefore be protected for flooding during construction. After this construction phase the tidal power plant will be connected to the primary dike.
- Old dikes lying behind this primary dike have to be adjusted to be suitable to retain water in the polder. It is proposed to make these dikes less steep, so as to limit the wave run-up.
- Bulb-turbines are chosen for this tidal power plant. These turbines can get a high efficiency, are the least fish unfriendly and are used for a big part in current tidal power plants and run-of-riverplants in the world. A cross-section of the designed turbine is shown in Figure 3. They have a diameter of 4 meter at the smallest section and have an rated power of 4,3 MW.



**Figure 3; Cross-section turbine**

- With the help of a cost-benefit analysis it is determined that 5 turbines with a width of 9 meter and 9 sluices with a width of 30 meter should be build to deliver the cheapest energy. The width of the tidal power plant is also

determined by room that is required between the turbines and the sluices (33 meter). The total width of the tidal power plant therefore becomes 348 meter.

- The average volume of water with which the polder is filled is 11,2 million cubic meter. This is 7,5% of the average tidal volume. The tidal difference in the direction of Antwerp will therefore become less. The effect on the water level will stay within a few decimeters.

The following can be concluded about the cost and benefits of placing a tidal power plant at the Hertogin Hedwige- and Prosperpolder.

- This tidal power plant annually produces 64,3 GWh of electricity. The biggest part of this will be produced during normal and spring tide.
- The costs of the tidal power plant are determined with two different methods. Method 1 uses an estimate for the planned run-of-river plant in Borgharen and regression according to turbine supplier Alstom. Method 2 uses data on run-of-river plants that were build in the Netherlands. The costs of the tidal power plant according to this methods were respectively 79,2 and 86,3 million euro.
- An economic model is used to determine the ratio between cost en benefits. An energy price is determined to get invested money back in 20 and in 40 years. This was done for both cost methods and is shown in Table 1.

<b>Return period</b>	<b>Cost method 1</b>	<b>Cost method 2</b>
20 jaar	14,2	15,5
40 jaar	10,8	11,9

**Table 1; Energy prices for different return periods and different cost methods in cent/kWh**

To make a complete feasibility study environmental effects due to implementing the tidal power plant should be considered. First research should be done on possible facilities for fish migration. An analysis for different fish species and there method of migration should be made. After this other ecological effects can be estimated.

## Samenvatting

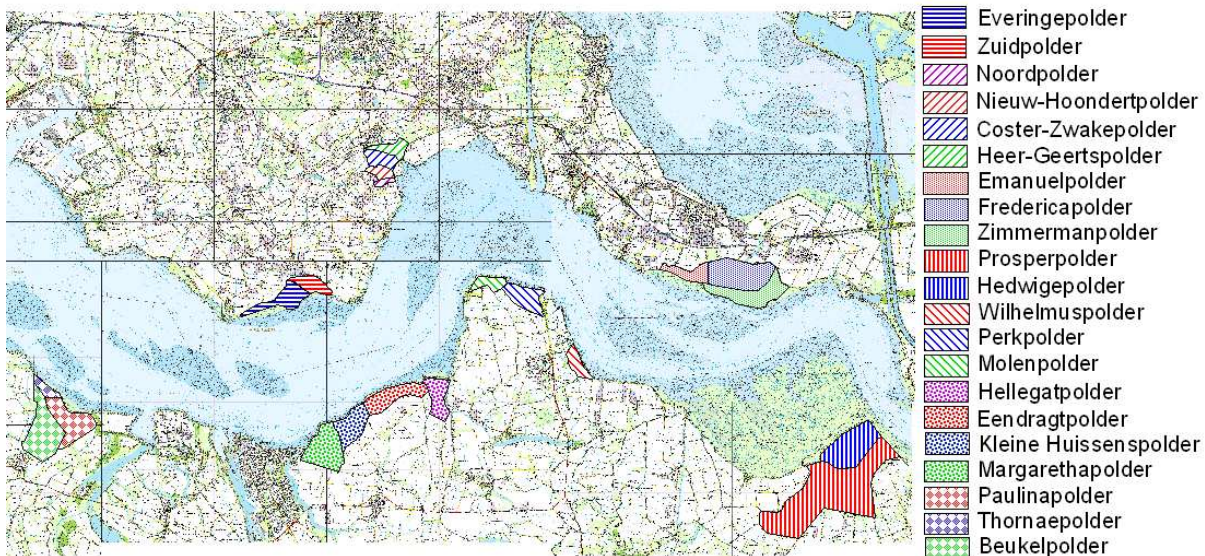
In Nederland kwam in 2007 6,8 % van de elektriciteitsproductie uit duurzame bronnen. Elektriciteit was in dat jaar 17 % van het totale energieverbruik. In totaal was dus 1,2 % van het energieverbruik duurzaam. De kabinetsdoelstelling om in 2020 20 % van de energiewinning uit duurzame bronnen te laten komen, is daarom een grote uitdaging. Alle middelen zullen daarom aangegrepen moeten worden om deze doelstelling te halen.

Getij-energie leek een lange tijd niet haalbaar voor Nederland, omdat het tijverschil langs de kust relatief klein is. Na onderzoek voor een getijcentrale bij de Brouwersdam bleek dat de productie van getij-energie economisch aantrekkelijk kan worden wanneer het gecombineerd wordt met andere maatschappelijke belangen, zoals de verbetering van de ecologie van het gebied.

Op 11 maart 2005 zijn de Scheldeverdragen door Nederland ondertekend, waarin onder andere staat dat de Hertogin Hedwigepolder 'ontpolderd' zou moeten worden. Dit moest gedaan worden om te compenseren voor natuurverlies door het uitdiepen van de Westerschelde ten behoeve van scheepvaart naar Antwerpen. Door de plannen voor natuurherstel in de Westerschelde te combineren met de wensen van het kabinet voor duurzame energiewinning is bedacht om met polders getij-energie te winnen. Door deze nieuwe functie van de polder wordt hij de energiepolder genoemd.

Het doel van deze studie is om de economische en technische haalbaarheid van een getijcentrale langs de Westerschelde te onderzoeken. De aandacht wordt in deze studie gericht op het ontwerp van de constructies benodigd voor een getijcentrale. Dit om inzicht te krijgen in de kosten voor het project.

Allereerst is bekeken welke methode van elektriciteitsopwekking uit getij-energie het meest geschikt was. Daaruit bleek dat turbines die elektriciteit opwekken uit kinetische energie 65 – 99,9% minder energie opbrengen dan turbines die elektriciteit opwekken uit potentiële energie. Voorbeelden van zulke turbines zijn de Bulb-turbines die geplaatst zijn in de riviercentrales in Nederland en in de getijcentrale van La Rance.



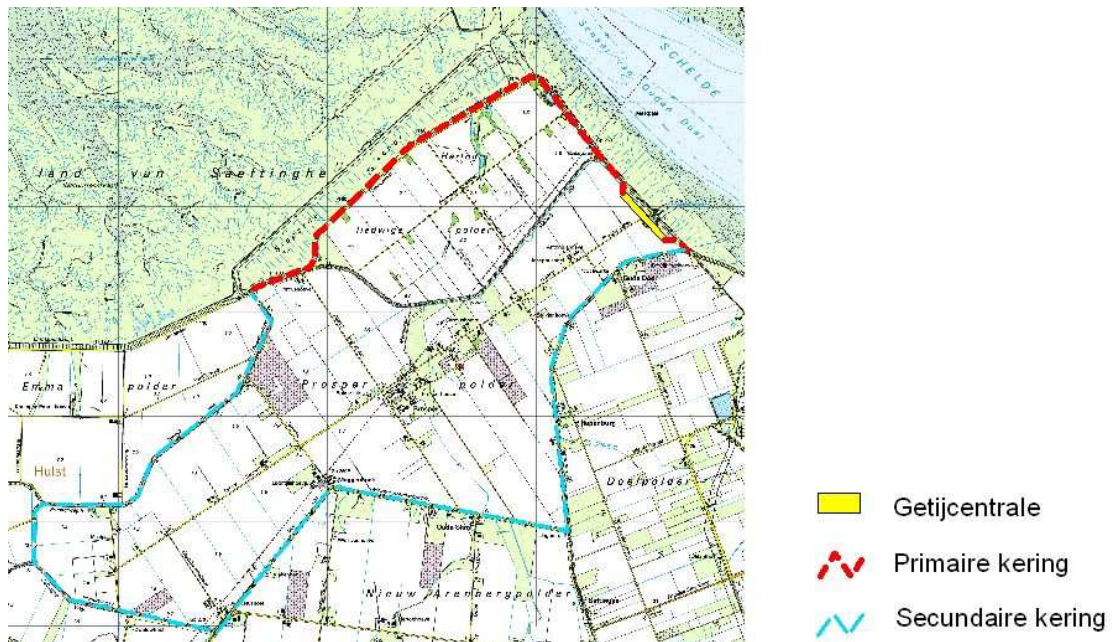
**Figuur 0.1; Beschouwde polders voor concept energiepolder**

Vervolgens is uitgezocht welke polder het meest geschikt zou zijn om te fungeren als energiepolder. Daarbij is een analyse gedaan aan de hand van geografische gegevens van weinig bebouwde polders (zie Figuur 0.1). Daaruit bleek dat een combinatie van de Hertogin Hedwigepolder met de Prosperpolder de meeste energie opleverde. Dit alternatief is daarom verder uitgewerkt.

De belangrijkste ondervindingen die gemaakt zijn in voor een getijcentrale in de Hertogin Hedwigepolder en Prosperpolder, zijn als volgt samen te vatten:

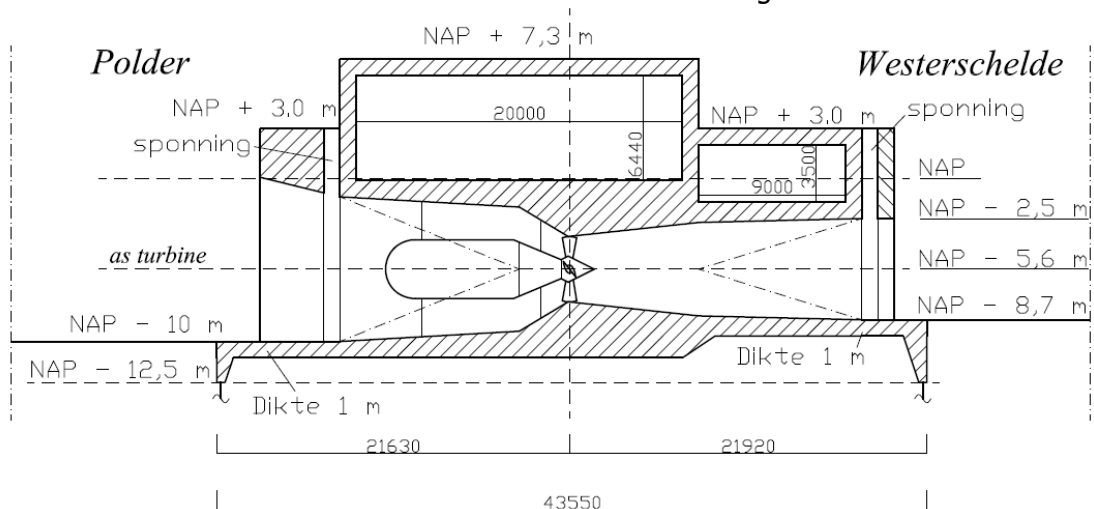
- Het maaiveld van deze twee polders ligt relatief hoog. De Prosperpolder ligt gemiddeld op NAP + 1,5 m en de Hertogin Hedwigepolder ligt gemiddeld op NAP +1,9 m. Door deze hoge maaiveldligging is het verval tijdens eb relatief groot ten opzichte van het verval tijdens vloed. Er is daarom gekozen voor een getijcentrale die energie opwekt tijdens eb met turbines. Tijdens vloed wordt de polder gevuld met behulp van sluisen.
- Er is voor gekozen om deze getijcentrale te plaatsen aan de Oostzijde van de Prosperpolder (zie Figuur 0.2). Dit is gedaan omdat de afstand tot de Westerschelde klein is en het niveau in de polder relatief laag. De kosten voor de aanstroomkanalen zijn dan laag en een groot gedeelte van het water in de polder is dan te gebruiken voor energiewinning.





**Figuur 0.2; Ligging getijcentrale in Prosperpolder**

- De turbines zullen in de bouwfase worden aangelegd achter de bestaande primaire waterkering. Tijdens de bouw is de constructie daardoor beschermd tegen overstromingen. Daarna wordt de getijcentrale aangesloten op de primaire waterkering en wordt daardoor zelf onderdeel van deze primaire waterkering.
- De achterliggende dijken zullen geschikt moeten worden gemaakt om water in de Hertogin Hedwig- en Prosperpolder te houden. Daarvoor is voorgesteld om het talud van dijken flauwer te maken, zodat de golfoploop beperkt wordt.
- Er is gekozen om Bulb-turbines te plaatsen in deze getijcentrale. Deze behalen een hoog rendement, zijn het minst visonvriendelijk en zijn bij een groot gedeelte van de huidige getijcentrales en laag verval riviercentrales in de wereld toegepast. Deze turbines hebben een diameter van 4 meter bij de smalste doorsnede en hebben een geïnstalleerd vermogen van 4,3 MW. Een verticale doorsnede van deze turbine is te zien in Figuur 0.3.



**Figuur 0.3; Doorsnede turbine**

- Met behulp van een kosten-baten analyse is bepaald dat er 5 turbines met een breedte van 9 meter en 9 inlaatwerken met een breedte van 30 meter

gebouwd moeten worden voor de levering van de goedkoopste energie. De breedte van de getijcentrale wordt tevens bepaald door de ruimte die nodig is tussen de sluisen en de turbines voor de aanstroomconstructie (33 meter). De totale breedte van de getijcentrale wordt daardoor 348 meter.

- Het gemiddelde volume water waarmee de polder gevuld wordt, is 11,2 miljoen kubieke meter. Dit is 7,5 % van het gemiddelde getijvolume. Hierdoor zal de getijslag richting Antwerpen minder toenemen. Het effect op de waterstand blijft echter binnen enkele decimeters.

Ten aanzien van de kosten en de opbrengsten kunnen de volgende zaken geconcludeerd worden:

- Er wordt met deze getijcentrale 64,3 GWh aan elektriciteit per jaar geproduceerd. Het grootste gedeelte hiervan zal gewonnen worden bij normaal en springtij.
- De kosten voor de getijcentrale zijn bepaald met twee verschillende methoden. Methode 1 maakt gebruik van een begroting van een geplande riviercentrale in Borgharen en regressie volgens turbineleverancier Alstom. Methode 2 maakte gebruik van gegevens over riviercentrales die gebouwd zijn in Nederland. De kosten volgens deze twee methoden zijn respectievelijk 79,2 miljoen euro en 86,3 miljoen euro.
- Een economisch model is gebruikt om de verhouding tussen kosten en baten te bepalen. Daarbij is de energieprijis bepaald om geïnvesteerd geld terug te verdienen in 20 en 40 jaar. Dit is gedaan voor de twee methoden voor kostenberekeningen en is te zien in Tabel 0.1.

<b>Terugverdientijd</b>	<b>Kostenmethode 1</b>	<b>Kostenmethode 2</b>
20 jaar	14,2	15,5
40 jaar	10,8	11,9

**Tabel 0.1; Energieprijzen voor kostenmethoden en terugverdientijd in cent/kWh**

Voor een complete haalbaarheidsstudie dienen milieueffecten door de getijcentrale bekeken te worden. Daarbij zal allereerst gekeken moeten worden naar voorzieningen om vismigratie mogelijk te maken. Daarvoor zal een analyse gemaakt moeten worden van de verschillende vissoorten en hun methode van migratie. Daarna kan bekeken worden welke invloed de getijcentrale heeft op andere ecologische aspecten.

# Inhoudsopgave

1	Inleiding .....	1
1.1.	Historische schets .....	1
1.2.	Probleemstelling .....	1
1.3.	Doel.....	3
1.4.	Aanpak .....	3
2	Getij .....	5
2.1.	Inleiding.....	5
2.2.	Begrippen .....	5
2.3.	Getij op de oceaan .....	5
2.4.	Getij in estuaria .....	12
2.5.	Getij in de Westerschelde .....	14
2.6.	Waterstanden in de Westerschelde.....	17
3	Opwekking van energie uit getij.....	19
3.1.	Inleiding.....	19
3.2.	Getij-energie uit potentiële energie.....	19
3.3.	Getij-energie uit kinetische energie.....	24
3.4.	Vergelijking .....	26
3.5.	Conclusie .....	29
4	Selectie van alternatieven.....	30
4.1.	Inleiding.....	30
4.2.	Bebouwing .....	30
4.3.	Energieopbrengst.....	32
4.4.	Keuze type centrale.....	34
4.5.	Conclusie .....	34
5	Hertogin Hedwigepolder en Prosperpolder .....	35
5.1.	Inleiding.....	35
5.2.	Randvoorwaarden .....	35
5.3.	Functionele eisen .....	49
6	Globaal plan en uitvoeringswijze .....	51
6.1.	Inleiding.....	51
6.2.	Locatie .....	51
6.3.	Bouwmethode .....	52
6.4.	Veiligheidssysteem .....	55
7	Turbines .....	59
7.1.	Inleiding.....	59
7.2.	Turbines voor getij-energie .....	59
7.3.	Typen turbines .....	60
7.4.	Onderdelen turbine .....	62
7.5.	Afmetingen.....	64
7.6.	Karakteristieken turbine.....	70
7.7.	Visvriendelijkheid turbine.....	75
7.8.	Kosten .....	76

8	Sluizen.....	82
8.1.	Inleiding .....	82
8.2.	Uitgangspunten ontwerp .....	82
8.3.	Geometrie.....	83
8.4.	Hydraulica.....	87
8.5.	Stabiliteit.....	90
8.6.	Sterkte.....	92
8.7.	Kosten .....	93
9	Modellen.....	97
9.1.	Inleiding .....	97
9.2.	Hydraulisch model .....	97
9.3.	Economisch model .....	103
10	Optimalisatie .....	106
10.1.	Inleiding .....	106
10.2.	Methode .....	106
10.3.	Resultaten.....	108
10.4.	Eigenschappen getijcentrale .....	111
11	Ontwerp getijcentrale .....	113
11.1.	Inleiding .....	113
11.2.	Eigenschappen getijcentrale .....	113
11.3.	Bouwmethode .....	114
11.4.	Aan- en uitstroomconstructies.....	120
11.5.	Aansluiting op primaire kering.....	123
12	Operatie getijcentrale .....	125
12.1.	Inleiding .....	125
12.2.	Waterstanden.....	125
12.3.	Verval en volume .....	126
12.4.	Energieopbrengst.....	129
13	Conclusies.....	131
14	Aanbevelingen.....	133
15	Referenties .....	134

## Appendices

Appendix A: Bepaling kerende hoogte en betrouwbaarheid kering

Appendix B: Constructief ontwerp sluizen

Appendix C: Toepasbaarheid concept energiepolder

Appendix D: Kosten

Appendix E: Tekeningen getijcentrale



## Lijst van figuren

- Figuur 0.1; Beschouwde polders voor concept energiepolder  
Figuur 0.2; Ligging getijcentrale in Prosperpolder  
Figuur 0.3; Doorsnede turbine  
Figuur 1.1; Stappenplan  
Figuur 1.2; Methodiek die gehanteerd is bij ontwerpproces  
Figuur 2.1; Krachtenwerking door maan en rotatie aarde [29]  
Figuur 2.2; Rotaties aarde en maan gedurende twee getijcycli [29]  
Figuur 2.3; Declinatie van maan ten opzichte van aarde [29]  
Figuur 2.4; Oorzaak voor ontstaan van eendaagse componenten [6]  
Figuur 2.5; Schematische voorstelling van baan van de maan om de aarde  
Figuur 2.6; Invloed van maan en zon op getij [13]  
Figuur 2.7; Uitleg verschil omlooptijd maan en maanmaand  
Figuur 2.8; Voorbeeld van asymmetrisch getij [13]  
Figuur 2.9; Versterking van getij in Westerschelde [13]  
Figuur 2.10; Getijvolume in Westerschelde [13]  
Figuur 2.11; Overschrijdingskans van tijverschillen in 2009 - 2010 bij Bath  
Figuur 2.12; Toename van het gemiddelde tijverschil [13]  
Figuur 2.13; Verschil tussen gemeten waterstanden en getijvoorspellingen per 10 minuten in 2007  
Figuur 3.1; Schematische weergave energiewinning uit water  
Figuur 3.2; Voorbeeld stroomturbine [20]  
Figuur 3.3; Verhouding tussen vermogen en stroomsnelheid [7]  
Figuur 3.4; Verhouding tussen stroomsnelheid en rendement [7]  
Figuur 3.5; Uitleg bij variabelen  $h_{inlaat}$  en LLWS [6]  
Figuur 4.1; Overzicht van overgebleven polders langs de Westerschelde  
Figuur 5.1; Dichtheid water in Westerschelde  
Figuur 5.2; Foto van voorland bij Prosperpolder  
Figuur 5.3; Dijkprofiel van primaire kering  
Figuur 5.4; Landzijde (links) en zeezijde (rechts) van primaire kering Prosperpolder  
Figuur 5.5; Hertogin Hedwige- en Prosperpolder  
Figuur 5.6; Hertogin Hedwige- en Prosperpolder met hoogtegegevens ingetekend  
Figuur 5.7; Schematische hoogteprofielen  
Figuur 5.8; Hoogteprofiel Nederlands gedeelte Hertogin Hedwige- en Prosperpolder  
Figuur 5.9; Aangenomen hoogteprofiel Belgisch gedeelte Prosperpolder  
Figuur 5.10; Hoogteprofiel voor Hertogin Hedwige- en Prosperpolder  
Figuur 5.11; Volume water aanwezig in polders bij bepaalde waterstand  
Figuur 5.12; Invloed van maximale waterstand in polder op energieopbrengst  
Figuur 5.13; Achterliggende dijk van Prosperpolder  
Figuur 5.14; Dijkprofiel secundaire waterkering  
Figuur 5.15; Invloed op energieopbrengst van hoogte doorlaatmiddel t.o.v. NAP  
Figuur 6.1; Locatie van getijcentrale  
Figuur 6.2; Bovenaanzicht bouwput riviercentrale Alphen aan de Maas  
Figuur 6.4; Resultaten tweede veiligheidstoetsing primaire waterkeringen [25]  
Figuur 6.5; Grondmateriaal nodig voor verbetering dijk  
Figuur 7.1; Straflo-turbine (links) en Bulb-turbine (rechts) [18]  
Figuur 7.2; Prestatiecurven voor vaste (links) en verstelbare (rechts) schroefbladen [10]  
Figuur 7.3; Verstelbare (links) en niet-verstelbare turbine (rechts) [18]  
Figuur 7.4; Foto van schematisatie turbine op meterkast bij Alphen aan de Maas

Figuur 7.5; Globale afmetingen Bulb-turbine [19]  
Figuur 7.6; Dwarsdoorsnede turbine Alphen aan de Maas [37]  
Figuur 7.7; afmetingen stroombuis  
Figuur 7.8; Onderdelen ten behoeve van berekening volume bovenconstructie  
Figuur 7.9; Onderdelen ten behoeve van berekening volume bij stroombuis  
Figuur 7.10; Drukverloop zonder (links) en met (rechts) cavitatie [15]  
Figuur 7.11; Doorsnede turbine  
Figuur 7.12; promille van passerende vissen die geraakt worden door turbinebladen [5]  
Figuur 7.13; Invloed diameter voor getij-centrale met hetzelfde totale vermogen  
Figuur 7.14; Invloed aantal turbines op gemiddeld prijs per turbine  
Figuur 8.1; Dijkprofiel  
Figuur 8.2; Bovenaanzicht getijcentrale  
Figuur 8.3; Bovenaanzicht beschouwd inlaatwerk  
Figuur 8.4; Doorsnede bij stramienlijn 2  
Figuur 8.5; Doorsnede bij stramienlijn 3  
Figuur 8.6; Doorsnede bij stramienlijn A en D  
Figuur 8.7; Doorsnede bij stramienlijn B en C  
Figuur 8.8; Doorsnede bij aansluiting op dijk  
Figuur 8.9; Verticale doorsnede schuif  
Figuur 8.10; Afmetingen rib  
Figuur 8.11; Dwarsdoorsnede sluis met grenzen voor hydraulische eigenschappen  
Figuur 8.12; Afvoercoëfficiënten voor overlaten bij La Grande [34]  
Figuur 8.13; Krachtenoverzicht van belang bij een stabiliteitsanalyse  
Figuur 8.14; referentiegeval kantelen  
Figuur 8.15; Bezijden van ondergrond bij excentrische belasting  
Figuur 9.1; Waterstandverloop voor polder en Westerschelde met getijcentrale  
Figuur 9.2; Variatie van energieprijzen op 5 januari 2009  
Figuur 9.3; Functie debiet verval bij turbine  
Figuur 9.4; Startperiode voor tijverschil van 3 m (links) en van 6 m (rechts)  
Figuur 9.5; Relatie tussen startverval en startperiode bij gemiddeld doortij  
Figuur 10.1; Relatie tussen verschillende eigenschappen van getijcentrale [10]  
Figuur 10.2; Methodiek voor bepaling optimum  
Figuur 10.3; Aantal turbines vs energieopbrengst  
Figuur 10.4; Aantal turbines vs kosten  
Figuur 10.5; Aantal turbines vs energieprijzen  
Figuur 10.6; Aantal sluizen vs energieprijzen  
Figuur 10.7; Startverval vs energieopbrengst  
Figuur 10.8; Ontwerpverval vs energieprijzen  
Figuur 11.1; Bovenaanzicht getijcentrale  
Figuur 11.2; Tekening van bouwmethode 1  
Figuur 11.3; Methoden voor bemaling voor bepaalde diepte [12]  
Figuur 11.4; Creatie van bouwputten bij alternatief 2  
Figuur 11.5; Tekening van bouwmethode 2  
Figuur 11.6; Creatie van bouwkuip bij alternatief 3  
Figuur 11.7; Tekening van bouwmethode 3  
Figuur 11.8; Aanleg aanstroomconstructie  
Figuur 11.9; Invloed van aanlegdiepte uitstroomkanaal op energiewinning  
Figuur 11.10; Bovenaanzicht aan- en uitstroomconstructies  
Figuur 11.11; Doorsneden aanstroomconstructie bij turbines en sluizen  
Figuur 11.12; Bovenaanzicht aansluiting op primaire kering  
Figuur 12.1; Waterstanden in Westerschelde tussen 1 februari en 16 februari 2008

- Figuur 12.2; Waterstand in de polder tussen 1 februari en 16 februari 2008  
Figuur 12.3; Gemiddelde verval gedurende 2008  
Figuur 12.4; Onderschrijding van verval tussen 1 en 16 februari  
Figuur 12.5; Volume water in polder tijdens getijden tussen 1 en 16 februari  
Figuur 12.6; Opgewekt vermogen tussen 1 februari en 16 februari 2008  
Figuur 12.7; Vermogen tijdens operatie tijdens getijcycli tussen 1 en 16 februari 2008  
Figuur 12.8; Duur van operatie tijdens getijcycli tussen 1 februari en 16 februari 2008  
Figuur 12.9; Energieopbrengst tijdens getijcycli tussen 1 februari en 16 februari 2008

## Lijst van tabellen

- Tabel 0.1; Energieprijzen voor kostenmethoden en terugverdientijd in cent/kWh  
Tabel 2.1; Periode van getij-componenten  
Tabel 2.2; Vloed en ebduur bij peilstations Westerschelde  
Tabel 2.3;  $C_{\text{bernshstein}}$  voor verschillende peilstations [28]  
Tabel 2.4; Relatieve amplitudes op verschillende locaties in de Wereld  
Tabel 4.1; Bebouwing in polders  
Tabel 4.2; Kenmerken overgebleven polders na selectie bebouwing  
Tabel 4.3; Potentieel energieopbrengst en vermogen voor polders  
Tabel 5.1; Getijkarakteristieken bij Hertogin Hedwige- en Prosperpolder  
Tabel 5.2; Getijgegevens bij Bath en Prosperpolder  
Tabel 5.3; Dichtheid water in Westerschelde  
Tabel 5.4; Significante golfhoogte en piekperiode voor golven uit polder  
Tabel 5.5; Veiligheidsfactoren voor belastingen  
Tabel 6.1; Overslagdebiet bij bepaalde aanleghoogte  
Tabel 7.1; Verschillen rivier- en getijcentrale  
Tabel 7.2; Verhouding in kosten tussen verstelbare en vaste bulb-turbine  
Tabel 7.3; Verhouding diameter/ontwerpverval voor getijcentrales  
Tabel 7.4; Vergelijking afmetingen voor stroombuis Bulb-turbine  
Tabel 7.5; Bepaling volume stroombuis  
Tabel 7.6; Waarden voor volume bovenconstructie  
Tabel 7.7; Waarden voor volume om stroombuis  
Tabel 7.8; Visuele toelichting op parameters  $H_s$  en  $H_n$   
Tabel 7.9; Verhouding dampspanning temperatuur  
Tabel 7.10; Vergelijking tussen kosten Linne en formules Swane en Gilles  
Tabel 7.11; Kosten riviercentrales Nederland [37]  
Tabel 8.1; Veiligheidsfactoren voor faalmechanismen  
Tabel 8.2; Wapeningspercentage volgens SCIA ESA PT  
Tabel 8.3; Tot nu toe berekende kosten voor inlaatwerk  
Tabel 8.4; Begroting inlaatwerk  
Tabel 9.1; Acties bij operatie getijcentrale  
Tabel 9.2; Verdeling van kosten voor elektromechanische onderdelen  
Tabel 9.3; Rehabilitatie  
Tabel 10.1; Resultaten van eerste twee optimalisatiecyclussen  
Tabel 10.2; Netto contante waarde voor kostenmethode 1 [miljoen euro]  
Tabel 10.3; Netto contante waarde voor kostenmethode 2 [miljoen euro]  
Tabel 10.4; Energieprijzen voor kostenmethode 1 en 2 [cent/kWh]  
Tabel 13.1; Kenmerken van getijcentrale bij Hertogin Hedwige- en Prosperpolder  
Tabel 13.2; Energieprijzen voor kostenmethoden en terugverdientijd in cent/kWh

# Symbolenlijst

## Hoofdletters

A	oppervlak
B	breedte
D	diameter
F	kracht
G	gravitatieconstante van Newton
H	verval
I	investeringen
K	kosten
L	lengte
M	massa
N	aantal
P	vermogen
Q	debiet
R	amplitude getij
T	periode
V	volume
Z	hoek ten opzichte van centrum van de aarde

## Kleine letters

a	aantal
c	constante
d	diepte
f	factor
g	zwaartekrachtsversnelling
h	waterstand
k	prijs per eenheid
l	afstand
m	afvoercoefficient
n	rotatiesnelheid turbine
p	druk
r	straal
rv	rentevoet
t	tijd
u	golfsnelheid
v	snelheid van water
z	hoogte

## Griekse letters

$\gamma$	veiligheidsfactor
$\Delta$	verschil
$\zeta$	gedeelte van getij dat getijcentrale werkt
$\eta$	rendement
$\rho$	dichtheid
$\sigma$	constante van Thoma
$\varphi$	fase
$\omega$	rotatiesnelheid

## Overig

GHW	Gemiddeld Hoogwater
$H_{s,max}$	maximaal toelaatbare hoogte voor cavitatie
LLWS	Laag Laagwater spring
$N_s$	specifieke snelheid
$p_v$	dampspanning
$Y_s$	belastingfactor
$Y_z$	volumiek gewicht zand

## Subscript

aaarde	de aaarde
atm	atmosfeer
az	aaarde om zon
bassin	bassin
bath	Bath
bernshtein	bernshtein
bouwjaar	in bouwjaar
civiele	voor civiele werken
d	ontwerp
dag	een dag
euro/gulden	euro naar gulden
g	generator
gem	gemiddeld
getij	getij
gilles	Gilles
inlaatwerk	inlaatwerk
j	jaar
K1	een ééndaagse component
M2	een tweedaagse component
ma	maan om aaarde
maan	de maan
n	netto
nieuw	nieuw
O1	een ééndaagse component
oud	oud
polder	polder

pool	poolparen
prosper	Prosperpolder
sluis	sluis
spring	bij springtij
start	bij starten met turbineren
ster	een ster
swane	Swane
t	turbine
verb	verbetering
vul	tijdens vullen
w	water
ws	Westerschelde
zee	op zee
zon	de zon





# 1 Inleiding

## 1.1. Historische schets

De winning van getij-energie bestaat al eeuwen lang. Laatst zijn er in Noord-Ierland zelfs resten gevonden van een getijmolen daterend uit 787 na Chr. [21]. De opgewekte energie werd gebruikt voor het malen van graan. Resten van zulke getijmolens zijn gevonden langs de kusten van onder andere Frankrijk, Engeland en Canada. In het Deben estuarium in Engeland staat nog steeds een getijmolen uit 1170 met een scheprad uit de 18<sup>e</sup> eeuw met een diameter van 6 meter. Deze was nog in operatie tot 1957. In La Rance werkten de getijmolens nog steeds voordat de getijcentrale werd gebouwd die er nu staat [10].

Ook in Nederland is er getij-energie gewonnen met getijmolens. Zo is in het Schelde-estuarium getij-energie opgewekt. De eerste getijmolen stond in Zierikzee (1220) en er zijn ook getijmolens geweest in Bergen op Zoom, Biezelinge, Goes, Hulst, Middelburg, Ossenisse, Reimerswaal, Sas van Gent, Tholen, Veere en Vlissingen. Het grootste gedeelte van de getijmolens is echter verdwenen tijdens de industriële revolutie in de 19de eeuw.

In de 20ste eeuw is opnieuw geprobeerd om in Zeeland elektriciteit uit het getij op te wekken, namelijk bij de schutsluizen in Hansweert. Het zou hierbij gaan om de eerste moderne getijcentrale in de wereld. De getijcentrale is uiteindelijk niet aangelegd omdat de Eerste Wereldoorlog uitbrak. Alle apparatuur moest namelijk uit Duitsland komen. De man achter dit plan was ir. J.A. Ringers, later Directeur-Generaal van Rijkswaterstaat en na de Tweede Wereldoorlog Minister van Wederopbouw.

In het buitenland is wel ervaring opgedaan met de winning van getij-energie op grote schaal. De eerste en tot nu toe grootste getijcentrale is in 1964 gebouwd in Frankrijk, La Rance, met een maximaal vermogen van 240 MW. Naast deze centrale is er op dit moment een 3,9 MW getijcentrale in China, Jiangxia en een 20 MW getijcentrale in Canada, Annapolis. In Korea wordt bij Sihwa op dit moment een getijcentrale gebouwd van 250 MW. Daarnaast bestaan serieuze plannen in Engeland, Argentinië, Brazilië, Australië, Rusland, Canada, China, India, Mexico en de Verenigde Staten voor de bouw van getijcentrales. Het meest indrukwekkende plan is de Penzhinsk centrale in het Oosten van Rusland met een vermogen van 21,4 GW en een opbrengst van 71,4 TWh/jaar.

## 1.2. Probleemstelling

In Nederland kwam in 2007 6,8 % van de elektriciteitsproductie uit duurzame bronnen. Elektriciteit was in dat jaar 17 % van het totale energieverbruik [14]. In totaal was dus 1,2 % van het energieverbruik duurzaam. De kabinetsdoelstelling om in 2020 20 % van de energiewinning uit duurzame bronnen te laten komen, is daarom een grote uitdaging. Alle middelen zullen daarom aangegrepen moeten worden om deze doelstelling te halen.

Windenergie lijkt nu het meest economisch verantwoorde duurzame alternatief. Het heeft echter een lastig te voorspellen bron en produceert niet continu. Het opslaan van de geproduceerde windenergie lijkt, zeker in Nederland, op dit moment niet economisch haalbaar. Het opstellen van windmolens zal daarom nog altijd gecombineerd moeten worden met de productie van relatief eenvoudig op te starten olie- en gascentrales.

Ook anderen bronnen bieden weinig perspectief. Zo lijkt het niet haalbaar om meer energie uit waterkracht in de Nederlandse rivieren te halen. Zonne-energie is in de huidige staat van ontwikkeling nog te duur om zelfs op grote schaal op zonnige locaties te concurreren met de huidige energiemarkt.

Getij-energie leek een lange tijd niet haalbaar voor Nederland, omdat het tijverschil langs de kust relatief klein is. Na onderzoek voor een getijcentrale bij de Brouwersdam bleek dat de productie van getij-energie economisch aantrekkelijk kan worden wanneer het gecombineerd wordt met andere maatschappelijke belangen, zoals de verbetering van de ecologie.

Het Westerschelde gebied wordt door sommigen gekarakteriseerd als het laatste natuurlijke estuarium van Nederland. Toch bepalen vooral invloeden van de mens het huidige uiterlijk van dit estuarium. Zo is het getij er in de afgelopen twee eeuwen verdubbeld – en neemt het nog steeds toe – door inpoldering en door verdieping van Westerschelde ten behoeve van de scheepvaart naar Antwerpen. Om voor de menselijke invloeden op de natuur te compenseren, is voorgesteld om polders terug te geven aan de natuur.

Op 11 maart 2005 zijn daarvoor de Scheldeverdragen door Nederland ondertekend, waarin onder andere staat dat de Hertogin Hedwigepolder 'ontpolderd' zou moeten worden. Sindsdien is er een felle discussie gaande tussen de voorstanders – voornamelijk ecologen en milieuactivisten – en de tegenstanders – vooral bewoners van de provincie Zeeland. In december 2007 heeft de Tweede Kamer ingestemd met de Scheldeverdragen mits een commissie de mogelijkheden voor alternatieven voor ontpoldering zou onderzoeken. Deze commissie werd geleid door oud-VVD minister Ed Nijpels. De commissie kwam op 21 oktober 2008 tot de conclusie dat er geen beter alternatief was voor natuurherstel dan ontpoldering van de Hertogin Hedwigepolder<sup>1</sup>.

Door de plannen voor natuurherstel in de Westerschelde te combineren met de wensen van het kabinet voor duurzame energiewinning is bedacht om met polders getij-energie te winnen. Door deze nieuwe functie van de polder wordt hij de energiepolder genoemd.

---

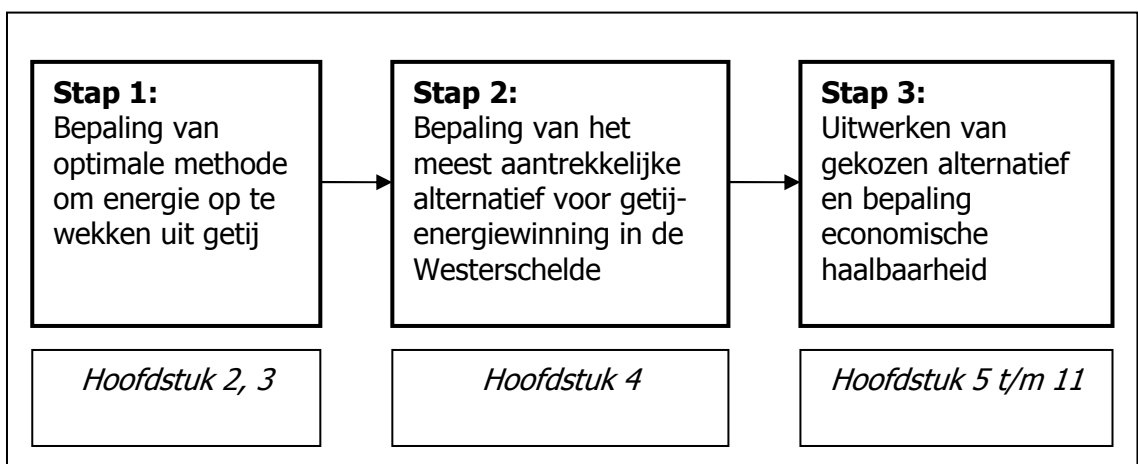
<sup>1</sup> 17 april 2009 is door minister Verburg voorgesteld om in plaats van ontpoldering van de Hedwigepolder natuurherstel buitendijks te realiseren. Het voorstel moet nog door de Europese commissie goedgekeurd worden.

### 1.3. Doel

Het doel van deze studie is om de economische en technische haalbaarheid van een getijcentrale langs de Westerschelde te onderzoeken. De aandacht wordt in deze studie gericht op een ontwerp van de constructies benodigd voor een getijcentrale om inzicht te krijgen in de kosten voor het project.

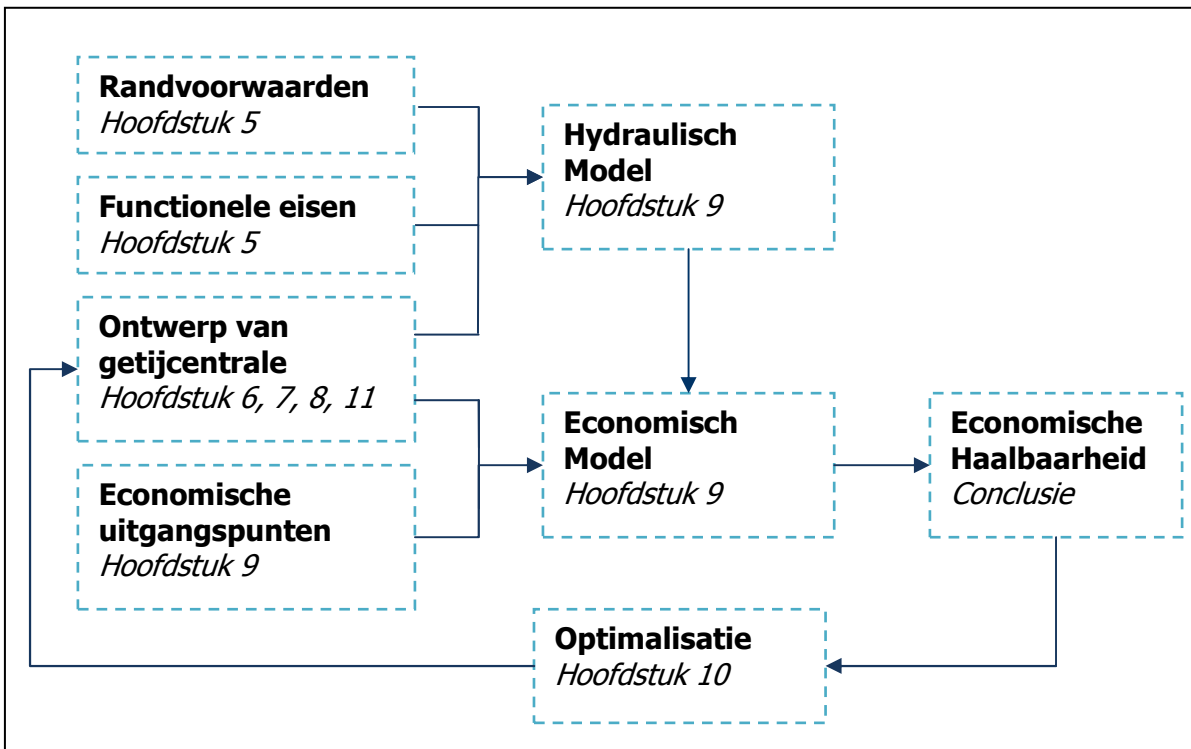
### 1.4. Aanpak

Allereerst is gekeken naar de oorsprong van het getij en de mogelijkheden om daaruit energie op te wekken. Vervolgens is bepaald welk alternatief het meest haalbaar lijkt voor de ontwikkeling van getij-energie. Dit alternatief is vervolgens uitgewerkt. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 1.1.



**Figuur 1.1; Stappenplan**

Bij de uitwerking van het gekozen alternatief zijn eerst de randvoorwaarden van de locatie bepaald. Daarna is een globaal ontwerp van de getijcentrale gemaakt. Vervolgens is met een hydraulisch model en een economisch model een eerste schatting gegeven over de haalbaarheid. Aan de hand van de verworven kennis is het ontwerp van de getijcentrale verbeterd. Zo is de ontwerpcyclus meerdere malen doorgelopen. Tijdens het ontwerp zijn daarbij ook de randvoorwaarden, functionele eisen, economische uitgangspunten en de modellen nauwkeuriger geworden. In Figuur 1.2 is dit schematisch weergegeven.



**Figuur 1.2; Methodiek die gehanteerd is bij ontwerpproces**

In dit rapport wordt het eindproduct getoond van de doorlopen ontwerpcyclus. Daarvoor worden eerst de randvoorwaarden en functionele eisen beschreven in Hoofdstuk 5. Dan wordt het plan voor de getijcentrale toegelicht in Hoofdstuk 6. Daarna worden de ontwerpen van de belangrijkste civiele constructies toegelicht in Hoofdstukken 7 en 8. Dan zijn de belangrijkste invoerparameters voor het hydraulische en economische model bekend en worden de werking van de modellen in Hoofdstuk 9 uitgelegd. De resultaten van deze modellen en de optimale keuze voor het ontwerp van de getijcentrale worden in Hoofdstuk 10 besproken. In de hoofdstukken 11 en 12 wordt het totaal ontwerp samengevat en worden gevolgen door de implementatie van de getijcentrale beschreven. In de conclusie wordt de economische haalbaarheid van het plan aan de orde gesteld.

## **2 Getij**

### **2.1. Inleiding**

Getij is de afwisseling tussen eb en vloed. De karakteristieken van dit getij op de aarde worden bepaald door het volgende:

1. Aantrekkingskracht van de maan
2. Aantrekkingskracht van de zon
3. Rotatie van de aarde
4. Geometrie van de aarde

Met kennis over de fysische achtergrond van het getij is de methode om hieruit energie op te wekken beter te kiezen. Daarbij zal het hoofdstuk gericht zijn op het verklaren van het getij in de Westerschelde.

Daarvoor zullen allereerst enkele begrippen gedefinieerd worden in paragraaf 2.2. Vervolgens wordt in paragraaf 2.3 uitgelegd hoe het getij op de oceaan ontstaat. Daarna zal in paragraaf 2.4 toegelicht worden hoe het getij op de oceaan verandert, wanneer het een ondiepe zee of een estuarium binnengaat en hoe dit voorspeld wordt. Vervolgens zal in paragraaf 2.5 beschreven worden hoe getij zich in de Westerschelde voortplant en hoe dat is veranderd door de eeuwen heen. Ten slotte wordt in paragraaf 2.6 uitgelegd welk verschil er tussen gemeten waterstanden en het voorspelde getij op de Westerschelde is.

### **2.2. Begrippen**

Gedurende een dag langs de Noordzeekust zal de zee gemiddeld twee keer rijzen tot een hoogwaterstand (HW) en twee keer dalen tot een laagwaterstand (LW). Het verschil tussen de hoogwaterstand en de laagwaterstand is het tijverschil. De tijdsafhankelijke waterstandsvariatie wordt verticaal getij genoemd.

Naast waterstandsvariatie is er ook stroming, de zogenaamde getijstroom. Tijdens hoogwater en laagwater is de stroming gelijk aan nul. De stroming tussen hoogwater en laagwater wordt eb genoemd en tussen laagwater en hoogwater vloed. Deze tijdsafhankelijke verandering van stromingsrichting wordt horizontaal getij genoemd. Voor een estuarium betekent dit dat met vloed het estuarium vol stroomt en met eb weer leeg. Het volume dat tijdens vloed het estuarium instroomt en tijdens eb het estuarium uitstroomt langs een dwarsdoorsnede loodrecht op de gemiddelde stroomrichting, heet het getijvolume.

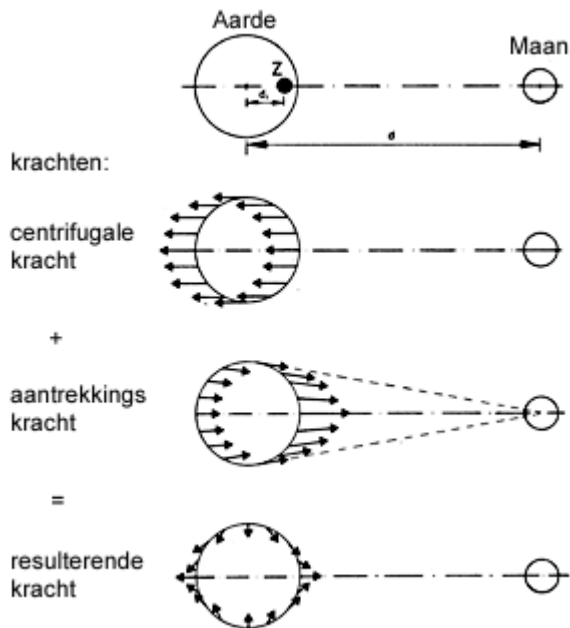
### **2.3. Getij op de oceaan**

Het getij kan worden opgedeeld in verschillende fysische componenten. Door analyse van deze componenten kan het getij verklaard en voorspeld worden.

#### **2.3.1. Evenwichtsgetij**

Newton kwam als eerste met een fysische verklaring voor het getij. Als eerste aanname ging hij uit van een aarde die volledig was bedekt met water.

Dit water wordt in eerste instantie aangetrokken door zwaartekracht. Maar het wordt tevens aangetrokken door gravitatiekrachten tussen aarde en maan en aarde en zon. Door de rotatie van de maan om de aarde, is er tevens een centrifugale kracht in de andere richting. In Figuur 2.1 staat dit weergegeven.



**Figuur 2.1; Krachtenwerking door maan en rotatie aarde [29]**

De resulterende kracht zorgt voor hoge waterstanden in het draaivlak van de aarde en de maan en lage waterstanden in het vlak loodrecht daarop. De grootte van de gravitatiekracht op een bepaalde plek op de aarde langs verticale doorsnede op 1 kg water wordt gegeven door de volgende formule [17].

$$F_{\text{getij}} = \frac{G \cdot M_{\text{ster}} \cdot r}{l^3} \cdot (3 \cos^2(Z) - 1) \tag{1}$$

Waarin:

$F_{\text{getij}}$  = kracht geleverd door een ster op het water [kN]

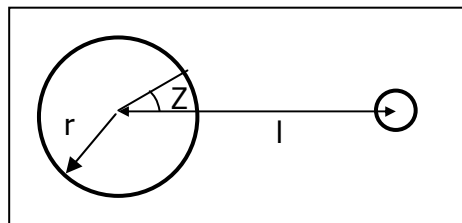
$G$  = gravitatieconstante [-]

$M_{\text{ster}}$  = massa van de ster [kg]

$l$  = afstand tussen ster en aarde [m]

$r$  = straal van aarde [m]

$Z$  = hoek ten opzichte van draaivlak op bepaalde plek aarde [rad]



Doordat de aarde roteert, verschuiven deze plekken en keert een hoogwaterstand gemiddeld twee keer per dag terug. Maar doordat de maan ook om de aarde heen draait, is de maan verschoven, wanneer de aarde zelf 360 graden is gedraaid.

De extra tijd benodigd om op een bepaalde plek op de aarde weer in dezelfde positie ten opzichte van de maan te staan, hangt af van de rotatiesnelheid van de aarde en van de maan om de aarde. De aarde draait, vanuit een ver punt in het heelal bekeken, in 23 uur en 56 minuten om haar as. De maan draait in 27,32 dagen om de aarde.

$$\omega_{maan} \cdot t = \omega_{aarde} \cdot (t - T_{dag})$$

$$t = \frac{T_{dag}}{\left(1 - \frac{\omega_{maan}}{\omega_{aarde}}\right)} = \frac{23,93}{\left(1 - \frac{360 / (24 \cdot 27,32)}{360 / 23,93}\right)} = 24,84 \text{uur}$$

$$t = 24 : 50$$

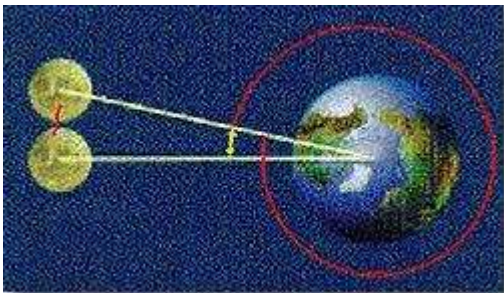
Waarin:

$\omega_{maan}$  = rotatiesnelheid maan om aarde [graden/uur]

$\omega_{aarde}$  = rotatiesnelheid aarde [graden/uur]

$T_{dag}$  = duur van een dag vanuit een ver punt in de hemel (zenit) [uur]

t = tijd [uur]

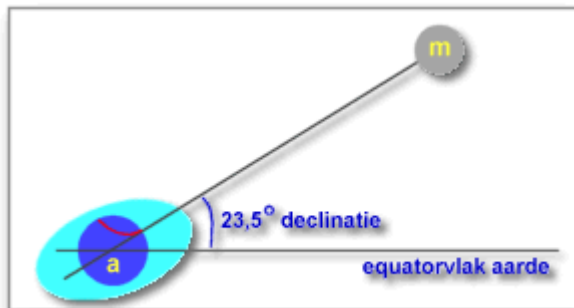


**Figuur 2.2; Rotaties aarde en maan gedurende twee getijcycli [29]**

Bij tweemaal daags getij komt gemiddeld het hoogwater dus elke 12 uur en 25 minuten.

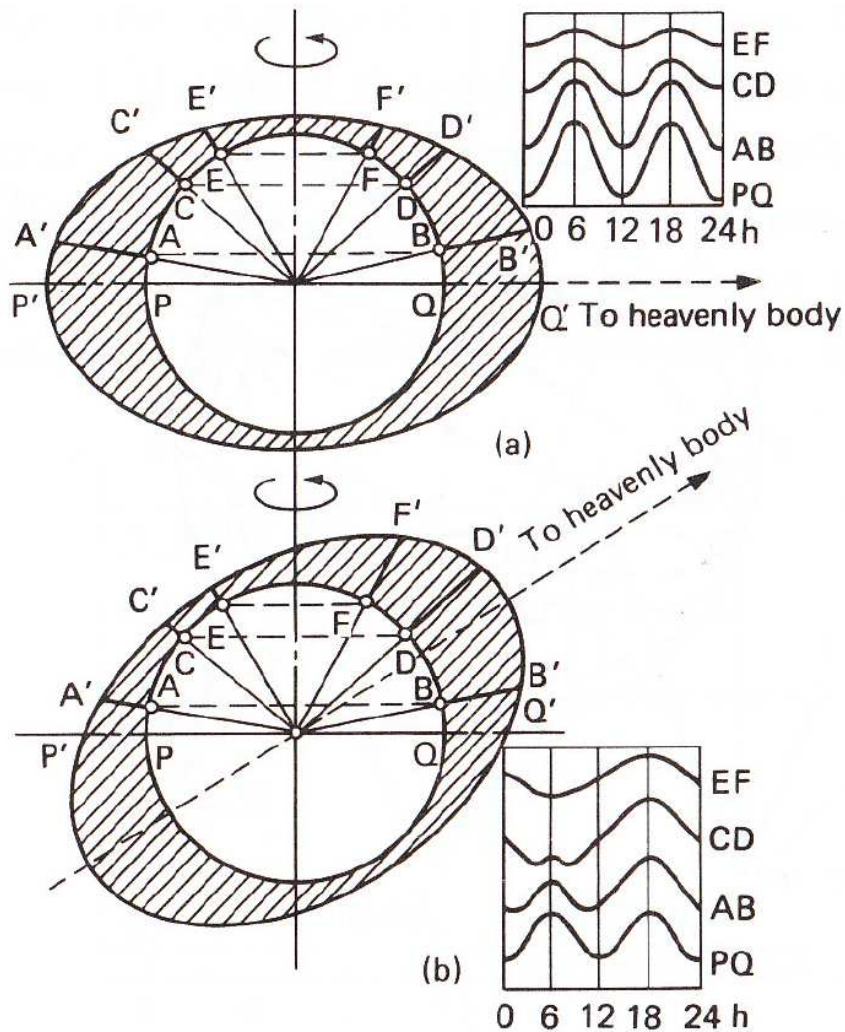
### 2.3.2. Dagelijkse ongelijkheid

De getijden op één dag zijn echter niet even sterk. Dit komt doordat het equatorvlak van de aarde niet loodrecht staat op de draaiingsas van de maan. Dit wordt de dagelijkse ongelijkheid genoemd.



**Figuur 2.3; Declinatie van maan ten opzichte van aarde [29]**

Door deze dagelijkse ongelijkheid kan het getij op sommige locaties eendaags worden of in ieder geval eendaagse componenten hebben. Dit is weergegeven in Figuur 2.4.



**Figuur 2.4; Oorzaak voor ontstaan van eendaagse componenten [6]**

Om het getij te classificeren als tweedaags, eendaags of gemengd wordt de volgende formule voorgesteld door Bernshtein [6]:

$$c_{\text{bernstejn}} = \frac{R_{K1} + R_{O1}}{R_{M2}} \quad (2)$$

Waarin:

- $c_{\text{bernstejn}}$  = constante om getij te classificeren [-]
- $R_{K1}$  = amplitude van eendaagse component [m]
- $R_{O1}$  = amplitude van eendaagse component [m]
- $R_{M2}$  = amplitude van tweedaagse maancomponent [m]

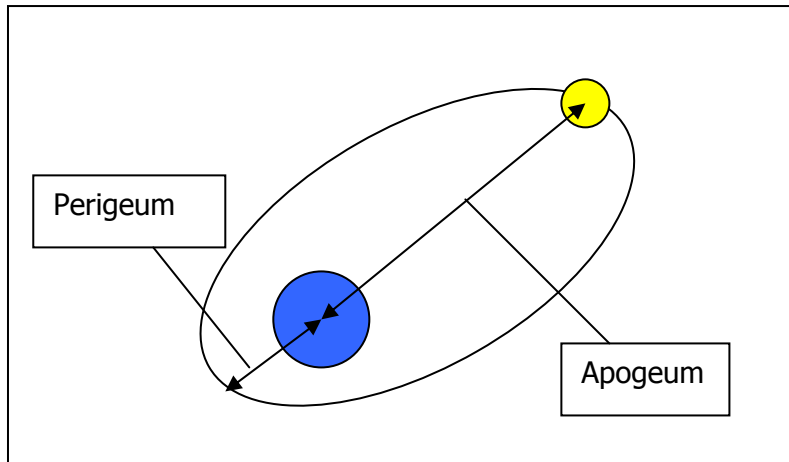
Daarbij zijn waarden onder de 0,5 tweedaags en boven de 4 eendaags. Wanneer waarden tussen 0,5 en 4 worden gevonden is het getij gemengd.

### 2.3.3. Afstand tussen maan en aarde

Tevens draait de maan niet om de aarde in de vorm van een cirkel, maar van een ellips. Op sommige momenten is de maan dichtbij en is de aantrekkingskracht en het tijverschil groter. Wanneer de maan zich in deze ellips het dichtst bij de aarde



bevindt, heet dat perigeum. Wanneer de afstand het grootst is, wordt dat apogeum genoemd.



**Figuur 2.5; Schematische voorstelling van baan van de maan om de aarde**

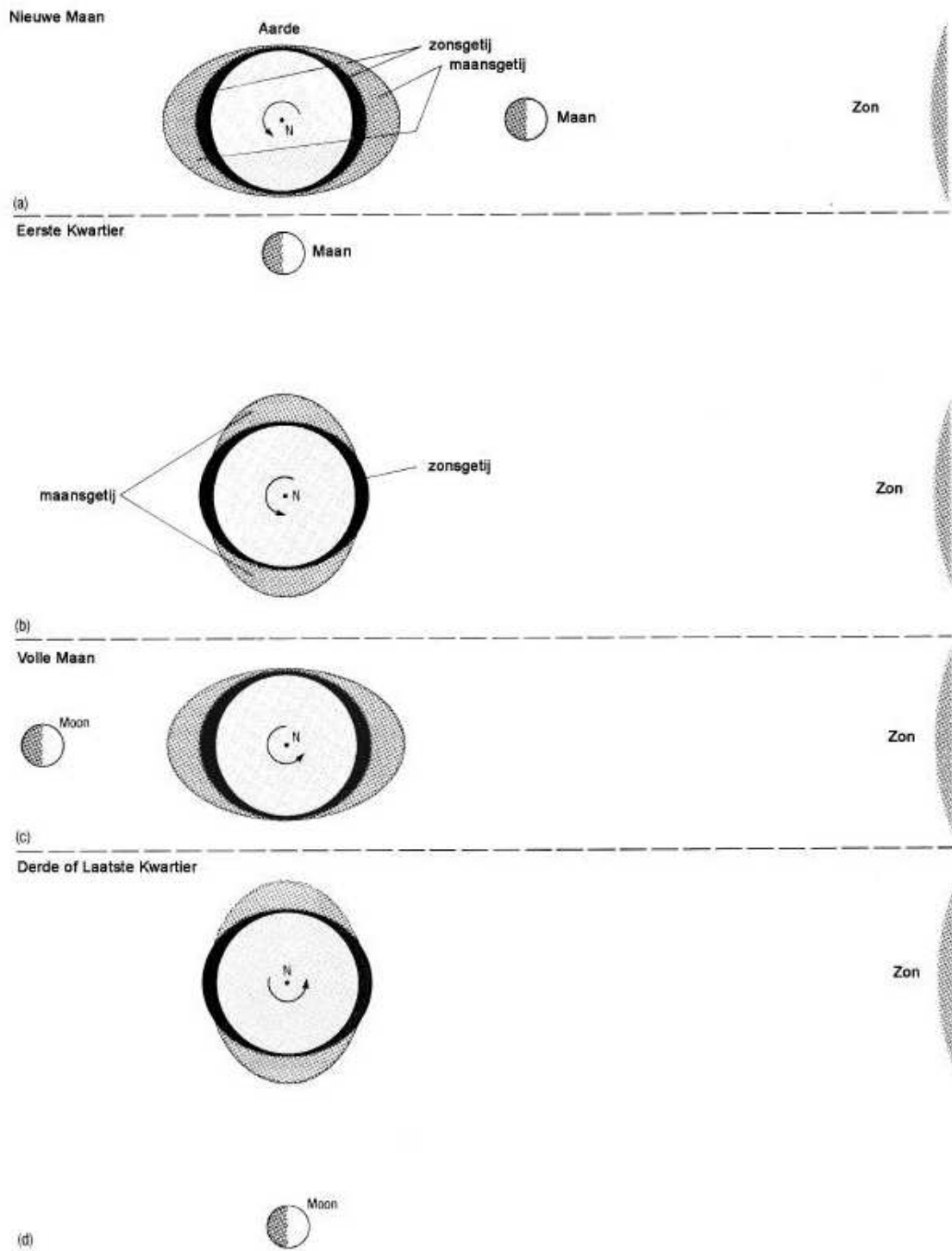
### 2.3.4. Spring- en doottij

De zon trekt op een zelfde manier watermassa's aan als de maan, maar heeft een minder sterke aantrekkingskracht hoewel haar massa groter is. Dit komt doordat de afstand vanaf de aarde tot zon vele malen groter is dan de afstand van de aarde tot de maan. Door gebruik te maken van formule (1) voor de getijkracht kan de relatieve kracht van de zon op het getij worden bepaald.

$$\frac{F_{zon}}{F_{maan}} = \frac{M_{zon}}{M_{maan}} \cdot \frac{l_{maan}^3}{l_{zon}^3} = \frac{1,989 \cdot 10^{30}}{7,35 \cdot 10^{22}} \cdot \frac{384.450^3}{149.598.000^3} = 2,7 \cdot 10^7 \cdot 1,70 \cdot 10^{-8} = 0,46$$

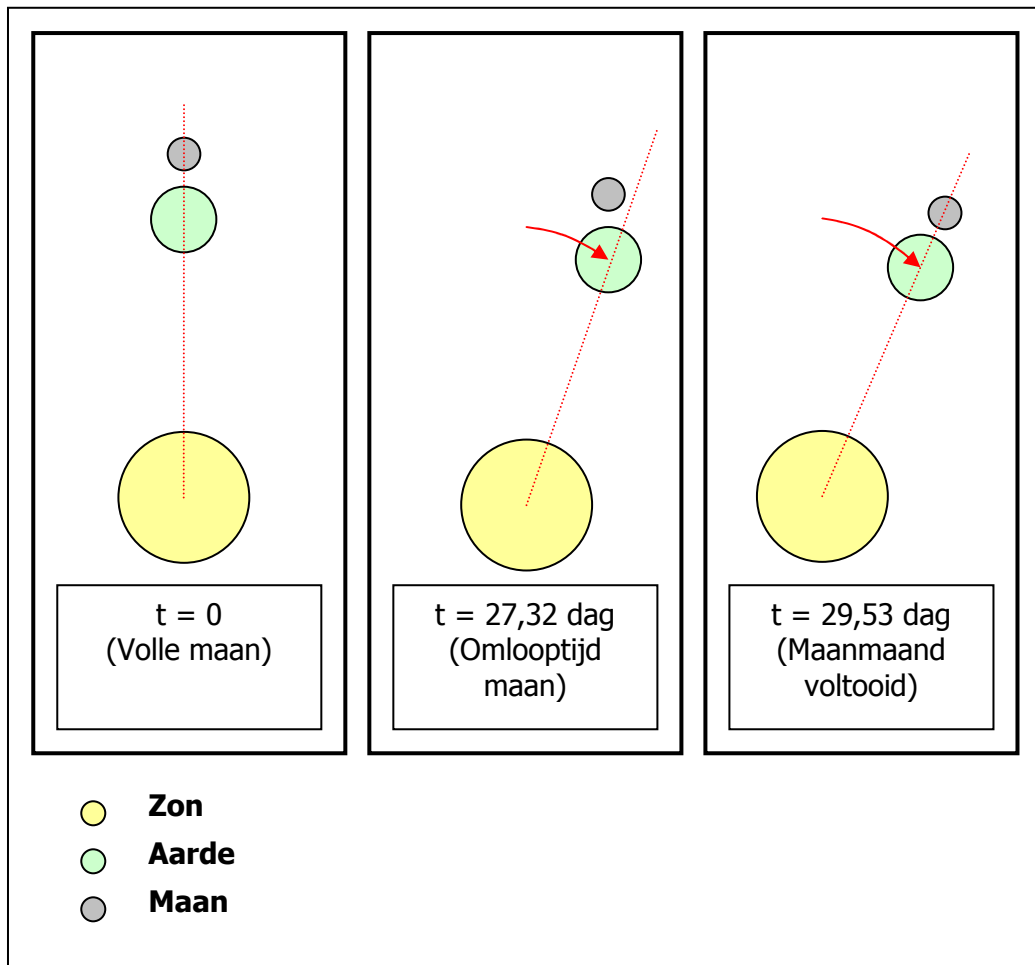
De grootte van getijkracht geleverd door de zon is dus 46 procent van de grootte van de getijkracht van de maan.

Wanneer de zon en de maan in elkaars verlengde staan, dan is de amplitude van het getij het grootst. Het getij dat dan ontstaat, wordt springtij genoemd. De zon en de maan kunnen elkaar ook tegenwerken en dan is er een klein tijverschil. Dit heet dan doottij. Tijdens een maanmaand (29,55 dagen) treedt twee maal springtij op en tweemaal doottij.



**Figuur 2.6; Invloed van maan en zon op getij [13]**

De omlooptijd van de maan is 27,32 dagen en de maanmaand is 29,53 dagen. Het verschil hiertussen is te verklaren wanneer wordt gekeken naar het systeem van de aarde, de zon en de maan. Dit is weergegeven in Figuur 2.7.



**Figuur 2.7; Uitleg verschil omlooptijd maan en maanmaand**

Op basis van de gegevens van rotatiesnelheid van aarde om zon en maan om aarde is de duur van de maanmaand ook uit te rekenen.

$$\omega_{az} \cdot t = \omega_{ma} \cdot (t - T_{ma})$$

$$t = \frac{T_{ma}}{1 - \frac{\omega_{az}}{\omega_{ma}}} = \frac{27,32}{1 - \frac{360/365,26}{360/27,32}} = 29,53$$

Waarin:

- $\omega_{az}$  = rotatiesnelheid aarde om zon [graden/dag]
- $\omega_{ma}$  = rotatiesnelheid maan om aarde [graden/dag]
- $T_{ma}$  = omlooptijd van de maan om de aarde [dag]
- $t$  = tijd [dag]

### 2.3.5. Overige fysische componenten

Dit zijn de belangrijkste oorzaken voor het ontstaan van getij op de oceaan. Door de verandering van de hoek die de aarde maakt met de maan en de zon zijn er ook nog lange duur effecten. De bekendste hiervan is de 18,6 jaar durende cyclus. Alle genoemde effecten staan in Tabel 2.1 samengevat.

Aard van de periodiciteit	Periode
<b>Maan:</b>	
• cyclus van hoek maan met vlak door evenaar	27,21 dagen
• omloop om aarde	27,32 dagen
• variatie afstand aarde -maan	27,55 dagen
• spring- en doortijcyclus door samenwerking respectievelijk tegenwerking van invloed maan en zon	29,53 dagen
• inhaalslag van cyclus van hoek maan met vlak door evenaar op de maanmaand	376 dagen
• inhalen maanmaand door de periode van de omloop van de maan om de aarde	440 dagen
• draaiing ellips maanbaan	8,85 jaar
• 18,61-jaren-cyclus door draaiing maanbaansvlak	18,61 jaar
<b>Aarde:</b>	
• dagelijkse ongelijkheid door aswenteling	23 uur 56 minuten 4,1 seconden
• omloop om zon	365,26 dagen

Tabel 2.1; Periode van getij-componenten

### 2.3.6. Invloed van geometrie aarde

Doordat de aarde niet alleen uit water bestaat maar ook uit continenten, is het niet overal mogelijk om getij op te wekken op de beschreven wijze. Dit is alleen mogelijk op het zuidelijk halfrond tussen 55 en 65 graden Zuiderbreedte. Van daaruit reist het getij via oceanen via zeeën naar estuaria toe. Het tij arriveert daardoor in Nederland ongeveer twee dagen nadat het volle maan is geweest.

## 2.4. Getij in estuaria

### 2.4.1. Voortplanting

Het getij dat van de oceanen komt, verandert wanneer het ondiepe zeeën of estuaria binnen gaat. De periode van het getij blijft gelijk, maar de snelheid en de lengte van de golf nemen af met de diepte.

$$u = \sqrt{g \cdot d} \quad (3)$$

$$L = u \cdot T \quad (4)$$

Waarin:

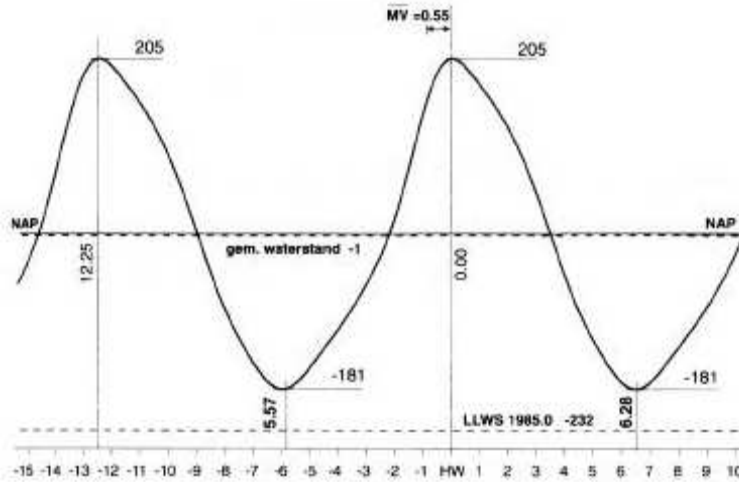
u = golfsnelheid [m/s]

g = zwaartekrachtsversnelling [m/s<sup>2</sup>]

L = golflengte [m]

T = periode van getij [s] (44172)

Door de ondiepte treedt meer wrijving op. Hierdoor komt tijdens vloed het water minder makkelijk een estuarium binnen en gaat het water er tijdens eb ook moeilijker uit. Eb duurt daardoor langer dan vloed. Het getij wordt daardoor asymmetrisch zoals te zien is in Figuur 2.8. Dit wordt ondiepwatergetij genoemd.



**Figuur 2.8; Voorbeeld van asymmetrisch getij [13]**

Een bijzonder geval treedt op wanneer de lengte van het estuarium ongeveer gelijk is aan een kwart van de lengte van een getijgolf. Hierdoor ontstaat een staande golf die het getij reflecteert en het tijverschil kan verviervoudigen.

## 2.4.2. Voorspellingsmethoden

Langs de Nederlandse kust zijn meerdere peilstations waar het getij voorspeld wordt. Dit wordt gedaan met behulp van de harmonische methode, waarbij het getij wordt berekend door meerdere fysische componenten te sommeren. Dit wordt de harmonische methode genoemd.

$$h = h_{gem} + \sum R_i \cdot \cos(\omega_i \cdot t + \varphi_i) \quad (5)$$

Waarin:

$h$  = voorspelde waterstand [NAP + m]

$h_{gem}$  = gemiddelde waterstand [NAP + m]

$R_i$  = amplitude van getijcomponent  $i$  [m]

$\omega_i$  = hoeksnelheid van getijcomponent  $i$  [rad/s]

$t$  = tijdstip [s]

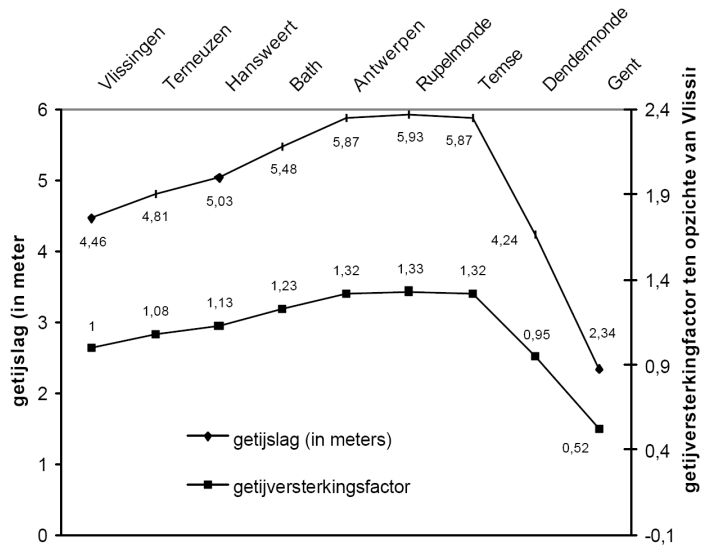
$\varphi_i$  = fase van getijcomponent  $i$  [s]

In oceanen volstaat het gebruik van 5 componenten. Langs de Nederlandse kust worden 94 verschillende harmonische componenten gebruikt om het getij te voorspellen. Dit komt omdat door wrijving het getij in ondiepe zeeën en estuaria asymmetrisch wordt.

## 2.5. Getij in de Westerschelde

### 2.5.1. Reflectie en wrijving

Door reflectie op de zandplaten, de randen van het estuarium en andere profielveranderingen van de Westerschelde neemt het gemiddelde tijverschil richting Antwerpen toe van 3.8 bij Vlissingen tot 5.3 meter bij Rupelmonde. Doordat de golf op verschillende plekken langs het estuarium reflecteert, is er echter niet een eenduidig reflectiepunt aanwezig. Hierdoor is geen duidelijke staande golf te herkennen, maar een samengestelde golf.



**Figuur 2.9; Versterking van getij in Westerschelde [13]**

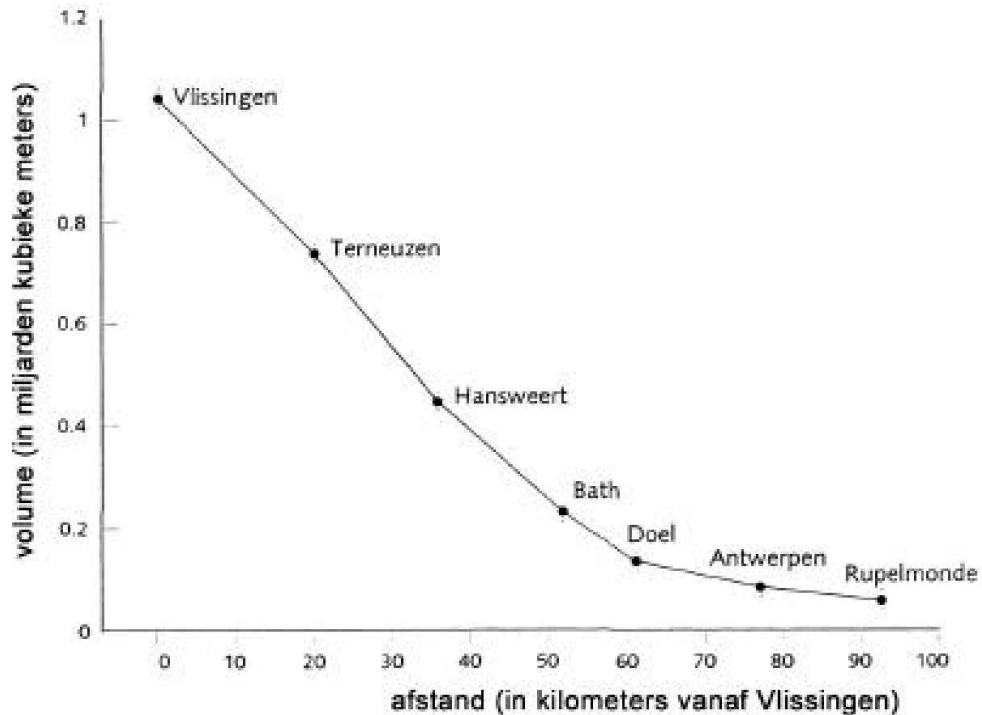
In het estuarium is ook wrijving aanwezig die zorgt voor enige afname van de amplitude. Deze wrijving zorgt in het algemeen voor een kortere vloedduur en een langere ebduur van Vlissingen naar Antwerpen. Alleen bij het peilstation van Hansweert wordt de vloedduur relatief langer en de ebduur relatief korter. Dit is te zien in Tabel 2.2.

Peilstation [26]	Vloedduur	Ebduur
Vlissingen	5:57	6:28
Terneuzen	5:50	6:35
Hansweert	6:01	6:24
Bath	5:47	6:38

**Tabel 2.2; Vloed en ebduur bij peilstations Westerschelde**

### 2.5.2. Getijvolume

Het getijvolume dat bij Vlissingen naar binnengaat, is gemiddeld 1,1 miljard kubieke meter per getij. Bij Hansweert is dit 400 miljoen kubieke meter water, bij Bath 200 miljoen kubieke meter water en bij Antwerpen nog maar 100 miljoen kubieke meter water.



**Figuur 2.10; Getijvolume in Westerschelde [13]**

Het maximale debiet tijdens een gemiddeld eb en vloed is bij de Nederlands-Belgische grens respectievelijk gelijk aan 11.000 en 14.000 m<sup>3</sup>/s. Aangezien de afvoer van de Schelde gemiddeld 110 m<sup>3</sup>/s is, is de invloed van de Schelde op het estuarium verwaarloosbaar is.

### 2.5.3. Dagelijkse ongelijkheid

Het getij van de Westerschelde kan gekwalificeerd worden als tweemaal daags. De gevonden waarden voor D (zie formule (2)) liggen namelijk ruim onder de 0,5.

Locatie <sup>2</sup>	K1	O1	M2	D
Vlissingen	10,56	6,86	174,2	0,100
Hansweert	10,71	6,97	198,9	0,088
Bath	10,77	7,17	212,8	0,084

**Tabel 2.3; c<sub>bernshtein</sub> voor verschillende peilstations [28]**

De waarde voor D neemt af in de richting van Antwerpen doordat de tweedaagse maancomponent in de Westerschelde toeneemt.

### 2.5.4. Springtij en doottij

Een vergelijking kan gemaakt worden tussen de relatieve amplitudes bij doottij en springtij ten opzichte van andere gebieden in de wereld. Bernshtein [6] heeft op verschillende locaties gekeken naar het relatieve verschil tussen spring- en doottij. Deze vergelijking is ook gedaan door RWS voor de waterstandsgegevens bij Vlissingen en Bath en toegevoegd aan de tabel van Bernshtein. Dit is te zien in Tabel 2.4.

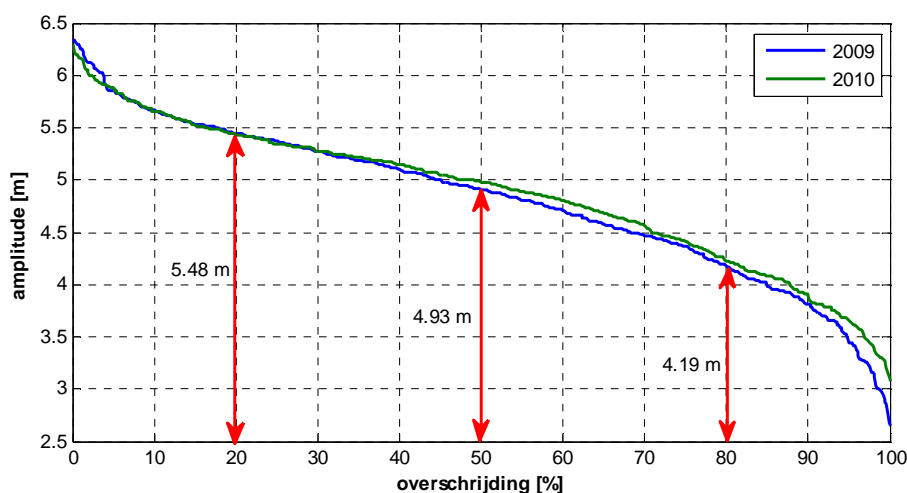
<sup>2</sup> RWS, analyse getij 2003 -2006

Relatieve amplitude	Murmansk	Witte Zee	Franse kust bij Kanaal	Vlissingen [26]	Bath [26]
Springtij	1,29	1,23	1,35	1,15	1,11
Gemiddeld	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Doodtij	0,69	0,75	0,61	0,78	0,83

**Tabel 2.4; Relatieve amplitudes op verschillende locaties in de Wereld**

Opmerkelijk is dat de verschillen tussen spring- en doodtij bij de Westerschelde relatief klein zijn.

De methodiek die Bernshtein gebruikte om het gemiddelde spring- en doodtijverschil te bepalen, is ook voor de relatieve amplitudes bij Bath gebruikt bij getijvoorspellingen van 2009 en 2010. Dit is gedaan om te toetsen of Bernshtein dezelfde methodiek gebruikte als RWS voor de bepaling van gemiddeld springtij en gemiddeld doodtij. Dit is te zien in Figuur 2.11.



**Figuur 2.11; Overschrijdingskans van tijverschillen in 2009 - 2010 bij Bath**

De waarden voor de relatieve amplitudes gevonden bij de getijvoorspellingen van 2009 en 2010 is gelijk aan de resultaten van onderzoek van RWS naar het getij tussen 1971 tot 1990.

### 2.5.5. Verandering getijslag in de tijd

Het getij is in de afgelopen eeuwen door invloed van de mens en de natuur groter geworden. De vergroting van de getijslag heeft de volgende oorzaken:

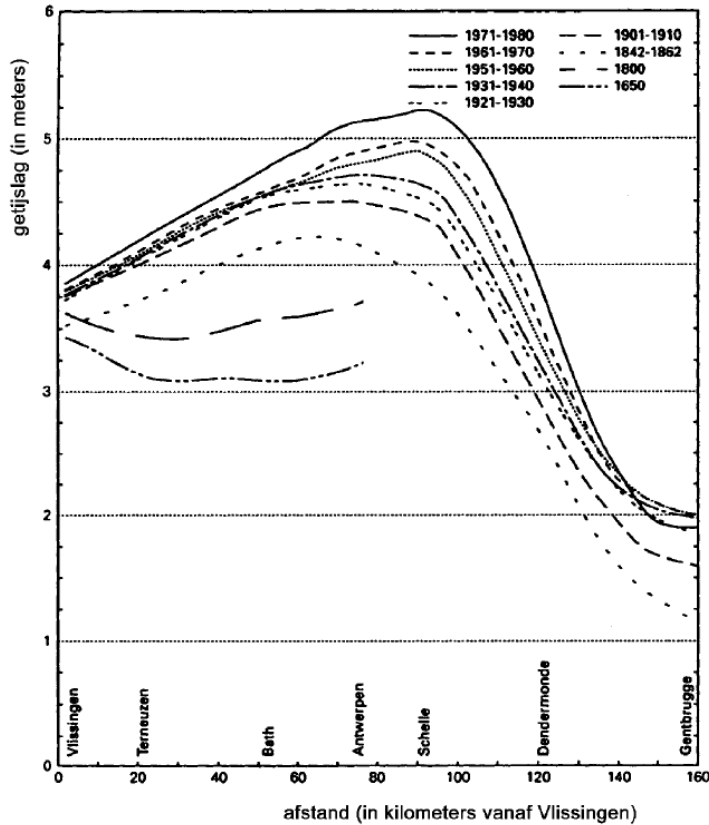
- zeespiegelstijging
- verdieping
- inpoldering

De zeespiegelstijging zorgt voor een vergroting van de getijslag bij de monding. Doordat de gemiddelde waterstand toeneemt, zal de wrijving in het achterliggende gebied afnemen. Daardoor zal de reflectie in het estuarium nog dominanter worden en zal ook de getijslag in het estuarium toenemen.



Verdieping ten behoeve van de scheepvaart en inpoldering zorgen net als zeespiegelstijging voor een afname in de wrijving. Ook daardoor wordt de getijslag groter.

De waterstandsmetingen die al vanaf 1950 zijn gedaan, tonen de toename in het getijverschil. Dit is te zien in Figuur 2.12.

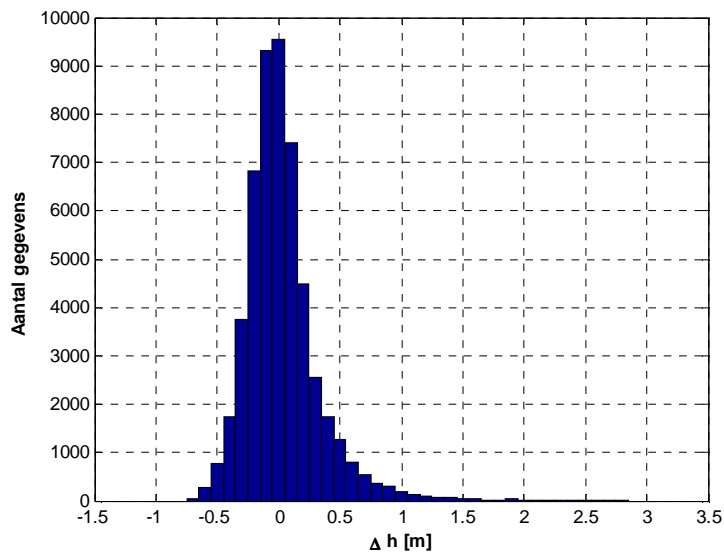


**Figuur 2.12; Toename van het gemiddelde tijverschil [13]**

Door ontpoldering zal een gedeelte van het getijvolume onttrokken worden aan de Westerschelde. Hierdoor neemt het tijverschil af.

## 2.6. Waterstanden in de Westerschelde

Het verschil tussen het voorspelde getij en de gemeten waterstanden, wordt veroorzaakt door enkele niet gebruikte (soms nog onbekende) componenten in de harmonische methode, meetfouten bij de peilstations, maar vooral door windeffecten. Zo zal de waterstand tijdens een Westerstorm beduidend hoger zijn en tijdens een Oosterstorm beduidend lager. In de Figuur 2.13 staat voor het jaar 2007 het verschil tussen gemeten waterstanden en het voorspelde astronomische getij weergegeven (RWS).



**Figuur 2.13; Verschil tussen gemeten waterstanden en getijvoorspellingen per 10 minuten in 2007**

Het gemiddelde verschil is gelijk aan 0,03 meter en de standaard deviatie is gelijk aan 0,30 meter. Tevens is te zien dat door Westerstormen de windopzet meer dan 2 meter kan bedragen.

## **3 Opwekking van energie uit getij**

### **3.1. Inleiding**

Vanaf 787 [21] tot 1960 [10] na Chr. zijn getijmolens gebruikt om energie op te wekken uit het getij. Deze getijmolens zetten een klein deel van de totale aanwezige getij-energie om in bruikbare energie. Zij wekken daarom te weinig energie op voor de huidige behoefte aan elektriciteit.

Met de ontwikkeling van turbines die gebruikt worden voor de winning van energie uit rivieren bleek het mogelijk om een grotere hoeveelheid (maar nog steeds erg klein deel) van de energie uit het getij te halen. Bij de getijcentrale van La Rance zijn specifiek voor de winning van getij-energie Bulb-turbines ontwikkeld die in twee richtingen energie kunnen opwekken.

Bij deze vorm van energiewinning is het nodig om een grote dam te plaatsen. Hier wordt met het verval, ook wel de potentiële energie, elektriciteit geproduceerd.

Doordat het plaatsen van een dergelijke dam een grote impact heeft op de omgeving, komen stroomturbines, die elektriciteit opwekken met kinetische energie steeds meer in de belangstelling. Zij hebben wel een lager rendement en wekken dan ook veel minder energie op.

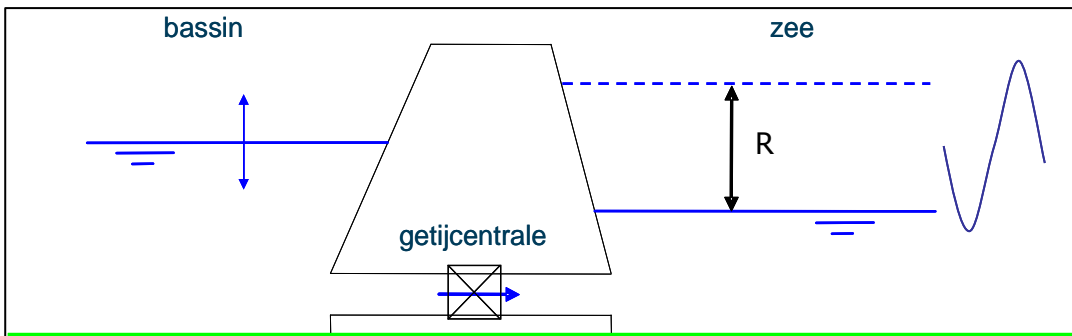
Allereerst zal in paragraaf 3.2 uitgelegd worden hoe getij-energie uit potentiële energie gewonnen kan worden en dan in paragraaf 3.3 uit kinetische energie. Vervolgens wordt in paragraaf 3.4 een vergelijking gemaakt tussen deze twee vormen van getij-energie winning. Ten slotte wordt in paragraaf 3.5 bepaald welke van de twee vormen wordt gebruikt voor het concept van de energiepolder.

### **3.2. Getij-energie uit potentiële energie**

#### **3.2.1. Inleiding**

Bij de opwekking van getij-energie zoals bij de getijcentrale van La Rance is een dam nodig om een bassin te scheiden van de zee. In de dam worden turbines geplaatst. Door water vanuit de zee een bassin binnen te laten stromen of vanuit het bassin naar de zee is energie te winnen. Het verval dat tussen het bassin en de zee aanwezig is tijdens het vullen en legen van het bassin, kan gebruikt worden voor energieopwekking.

Het getij aan de zeezijde bepaalt hoeveel verval mogelijk te creëren is. Het waterpeil in het bassin wordt optimaal gereguleerd ten behoeve van de energiewinning en is afhankelijk van het verticale getij op zee. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 3.1.



**Figuur 3.1; Schematische weergave energiewinning uit water**

### 3.2.2. Energie

Het vermogen van een getijcentrale die energie uit potentiële energie genereert, is te beschrijven met de volgende formule:

$$P = \eta \cdot \rho \cdot g \cdot H \cdot Q \quad (6)$$

Waarin

$P$  = vermogen [W]

$\eta$  = rendement getijcentrale<sup>3</sup> [-]

$\rho$  = dichtheid [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$g$  = zwaartekrachtsversnelling [ $\text{m}/\text{s}^2$ ]

$H$  = verval [m]

$Q$  = debiet [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

Het rendement van deze turbines kan oplopen tot 94 % en is voor veelgebruikte turbines gemiddeld tussen de 85 en 90 %.

De energie die per getijcyclus gewonnen wordt, is te beschrijven met de volgende formule:

$$E_{\text{getij}} = \eta \cdot \rho \cdot g \cdot H \cdot V \quad (7)$$

Waarin

$E_{\text{getij}}$  = energie per getijcyclus [J]

$\eta$  = rendement getijcentrale [-]

$\rho$  = dichtheid [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$g$  = zwaartekrachtsversnelling [ $\text{m}/\text{s}^2$ ]

$H$  = gemiddeld verval tijdens cyclus [m]

$V$  = volume te verplaatsen water per cyclus [ $\text{m}^3$ ]

De energieopbrengst per jaar hangt af van het aantal getijcycli waaruit energie gewonnen kan worden. Door onderhoud en stormen is het echter niet bij elk getij mogelijk om energie op te wekken. Uit ervaring bij La Rance is bekend dat tijdens ongeveer 96% van de tijd getij-energie gewonnen kan worden [10]. Met behulp van de volgende benadering (zie formule (8)) is een eerste schatting te geven van de jaarlijkse energie opbrengst.

<sup>3</sup> Het rendement staat hier voor de verliezen in de turbine, de generator en de stroombuis ( $\eta = \eta_g \eta_t H_n/H$ )

$$E_j = \frac{a \cdot \eta \cdot \rho \cdot g \cdot H_{gem} \cdot V_{gem}}{3.6 \cdot 10^{12}} \quad (8)$$

Waarin:

$E_j$  = Energie die per jaar gewonnen kan worden [GWh/jaar]  
 $a$  = het aantal energieopwekkende getijden in een jaar [-] (0.95 \* 705.5)  
 $\eta$  = rendement getijcentrale [-]  
 $\rho$  = dichtheid water [kg/m<sup>3</sup>]  
 $g$  = zwaartekrachtsversnelling [m<sup>2</sup>/s]  
 $H_{gem}$  = gemiddeld verval [m]  
 $V_{gem}$  = gemiddeld volume water per cyclus [m<sup>3</sup>]

Voor het gemiddelde verval in een jaar wordt door Van Duivendijk [34] een richtlijn gegeven afhankelijk van het type centrale. Dit wordt beschreven in de volgende paragraaf.

Het gemiddelde volume water kan gevonden worden met behulp van de volgende formule:

$$V_{gem} = \Delta h_{gem} \cdot A_{bassin} \quad (9)$$

Waarin:

$V_{gem}$  = gemiddeld volume water per cyclus [m<sup>3</sup>]  
 $\Delta h_{gem}$  = gemiddelde waterstandsvariatie [m]  
 $A_{bassin}$  = oppervlak van bassin [m<sup>2</sup>]

Hiermee is voor een willekeurige locatie de energieopbrengst te bepalen. Voor de bepaling van de meest geschikte locatie voor getij-energie is vooral de verhouding tussen het te installeren vermogen en de energieopbrengst van belang. Het geïnstalleerde vermogen hangt af van het debiet en dit hangt af van de tijd dat energie opgewekt wordt. Voor verschillende typen centrales worden hiervoor verschillende waarden gevonden. Dit zal beschreven worden in de volgende paragraaf. Om het geïnstalleerd vermogen te bepalen wordt formule (6) gebruikt en de volgende schatting voor het debiet:

$$Q = \frac{V_{gem}}{t} = \frac{V_{gem}}{\zeta \cdot T_{getij}} \quad (10)$$

Waarin:

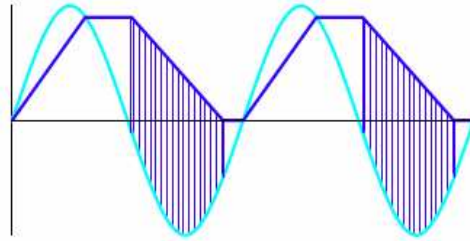
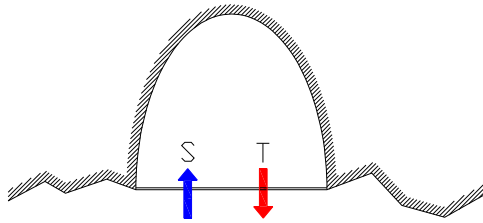
$Q$  = debiet [m<sup>3</sup>/s]  
 $\zeta$  = gedeelte van de tijd dat getijcentrale operationeel is [-]  
 $T_{getij}$  = duur van getij [s]

### 3.2.3. Typen getijcentrales

Er zijn verschillende methoden om het water in het bassin te reguleren voor energieopwekking. Zo zijn er drie methoden met één bassin en twee methoden met twee bassins. Hieronder is elke methode toegelicht. Bij elke methode zijn twee plaatjes gegeven: een bovenaanzicht (links) en het verloop van de waterpeilen (rechts) in twee getijcycli. In het bovenaanzicht geeft de pijl met T de turbine weer en de richting van turbineren en de pijl met S de sluis en de stroomrichting van het water door de sluisen. In de rechter figuur is met lichtblauw het verloop van de waterstand op zee getoond. De donkerblauwe lijn geeft de waterstand in het bassin

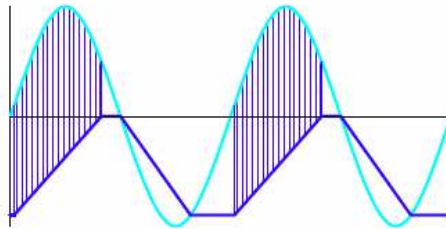
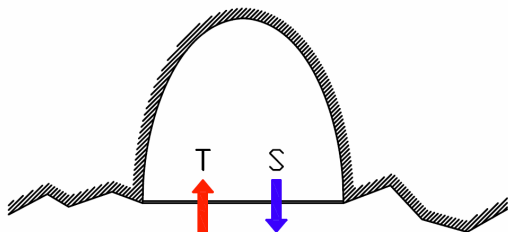
en het gearceerde deel geeft aan gedurende welk deel van de tijd er energie wordt gewonnen.

**Enkel bassin: ebgeneratie**



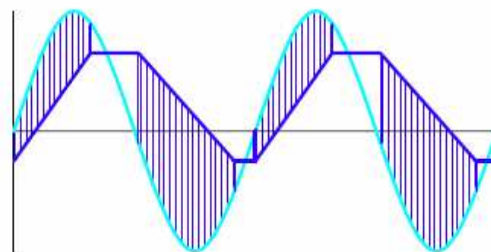
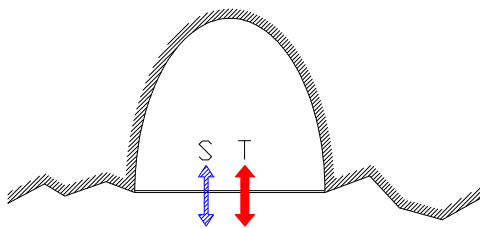
Bij deze methode van energiewinning uit getij wordt tijdens vloed het bassin gevuld door sluizen en tijdens eb geleegd door de turbines waarbij energie wordt opgewekt. (Verval  $\sim$  66% van tijverschil [34],  $\zeta = 50\%$ )

**Enkel bassin: vloedgeneratie**



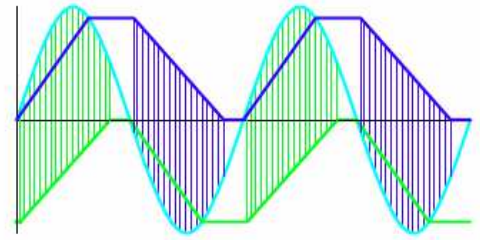
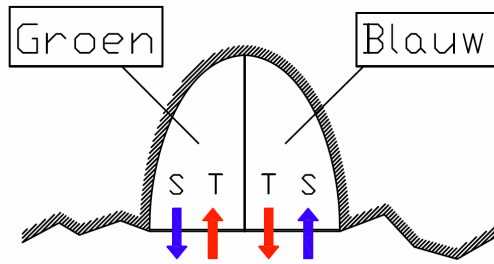
Hierbij wordt juist tijdens eb het peil in het bassin laag gehouden, zodat tijdens vloed water vanuit de zee het bassin in stroomt. Tijdens deze periode wordt energie gewonnen. Doordat het wateroppervlak vaak met het waterpeil lager wordt, is volume te verplaatsen water en daardoor de hoeveelheid energie minder dan bij ebgeneratie.

**Enkel bassin: tweezijdig turbineren (TT)**



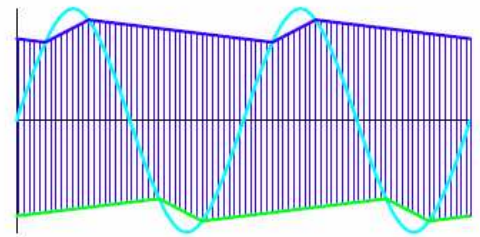
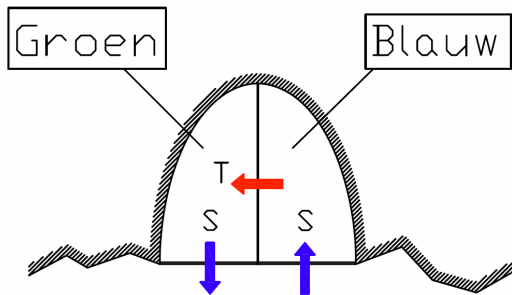
Hierbij wordt zowel tijdens eb als tijdens vloed energie gewonnen. Hiervoor dienen wel duurdere turbines geplaatst te worden, omdat ze in beide richtingen moeten kunnen turbineren. Wanneer getracht wordt tijdens eb en vloed even veel energie op te wekken, zal het gemiddelde peil van het bassin in de buurt van het gemiddelde peil van de zee moeten liggen. Het voordeel is dat er dan geen sluizen nodig zijn. Het is ook mogelijk om meer energie tijdens eb te genereren dan tijdens vloed. In dit geval zijn er wel sluizen nodig. In La Rance staat dit type centrale. De waterpeilen gegeven in de rechter figuur zijn voor het voorbeeld van een TT-centrale met sluizen. (Verval  $\sim$  50% van tijverschil [34],  $\zeta = 35\%$ )

### Dubbel bassin: losse bassins



Vanuit het oogpunt van energievraag is het aantrekkelijk om continu energie te leveren. Door twee bassins te maken, waarbij één bassin tijdens vloed energie genereert en het andere bassin tijdens eb, wordt bijna continu energie geleverd. Op deze wijze ontstaat er een (gescheiden) combinatie van een eb- en vloedcentrale. De bouwkosten van dammen en kunstwerken zijn hoger dan bij een enkel bassin.

### Dubbel bassin: Gecombineerde bassins



Door één bassin te vullen tijdens vloed en één bassin te legen tijdens eb, is het mogelijk om in één bassin continu een hoog peil te houden en in één bassin continu een laag peil. Door tussen de twee bassins turbines te plaatsen is energie op te wekken. Het voordeel van deze optie is dat continu energie geproduceerd wordt over een relatief groot verval. Het nadeel is echter dat het verplaatste volume water tijdens een cyclus kleiner is. Ook is deze optie gevoeliger voor dalingen en stijgingen van het peil door windopzet dan de andere opties. Voor beide opties met twee bassins geldt tevens dat de bassins ongeveer dezelfde grootte zullen moeten hebben. De bouwkosten van dammen en kunstwerken zijn veel hoger dan bij een enkel bassin.

Bij La Rance en veel plannen voor getijcentrales kunnen de turbines ook gebruikt worden als pompen. Hiermee kan de waarde van de elektriciteit verhoogd worden door te pompen wanneer de energie goedkoop is (bijv. s' nachts). Het extra opgepompte volume kan op een later moment - wanneer de elektriciteit een hogere prijs heeft - gebruikt worden voor energiewinning met turbines<sup>4</sup>.

Ten slotte is er ook een mogelijkheid voor een getijcentrale met drie bassins waarbij water tijdens springtij wordt opgeslagen in een derde bassin om te gebruiken tijdens doortij om gedurende de maand bijna continu dezelfde hoeveelheid energie te produceren. Deze optie is uiteraard nog kostbaarder dan een alternatief met twee bassins.

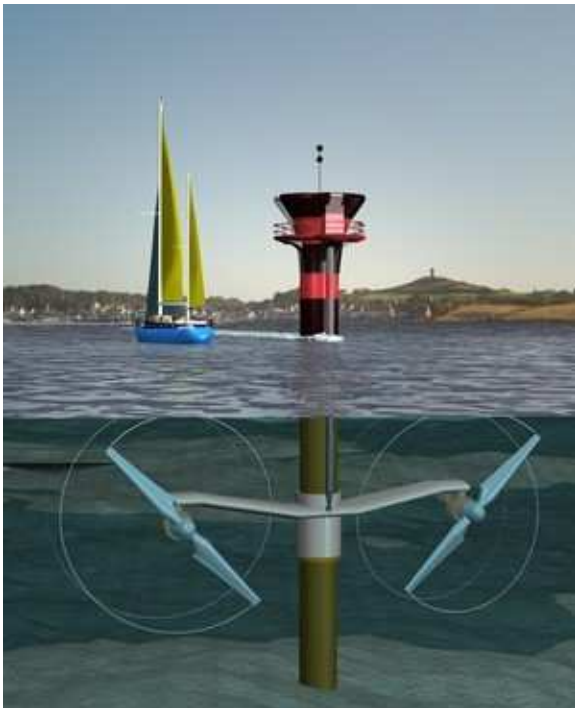
<sup>4</sup> In La Rance worden de pompen daarnaast gebruikt om tijdens doortij een hoger verval te bereiken en daardoor een hoger rendement.

Wanneer er niet van nature twee bassins of drie bassins aanwezig zijn op een geschikte locatie voor getij-energie, blijken deze opties economisch onaantrekkelijk. Daarnaast levert een vloedgenererende centrale vaak voor een zelfde locatie minder energie dan een ebgenererende centrale. De ebgenererende getijcentrale en een getijcentrale waar tweezijdig geturbineerd wordt, zijn de twee meest economisch aantrekkelijke opties.

### 3.3. Getij-energie uit kinetische energie

#### 3.3.1. Inleiding

Stroomturbines gebruiken de stroomsnelheid van het water net als windturbines de stroomsnelheid van de wind. Daarbij kunnen de stroomturbines opgehangen worden in sluizen (zoals Tocado bij de Afsluitdijk) of geplaatst worden op de bodem (zie Figuur 3.2).



**Figuur 3.2; Voorbeeld stroomturbine [20]**

De meest succesvolle stroomturbine is de SeaGen in Strangford Lough in Noord-Ierland [35]. Deze turbine heeft de volgende karakteristieken [30]:

- Geïnstalleerd vermogen van 2 x 600 kW.
- Energieproductie van 3.8 GWh/jaar.
- Waaierdiameter is 16 meter
- Ontwerpsnelheid is 2,4 m/s.
- Snelheid van water bij springtij is 3,7 m/s

Het ontwerp van deze turbine zal dienen als richtlijn voor de bepaling van het vermogen en de energieopbrengst in deze paragraaf.



### 3.3.2. Energie

Het vermogen aan energie dat gewonnen kan worden, is te beschrijven met de volgende formule:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \eta \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (11)$$

Waarin:

P = vermogen [W]

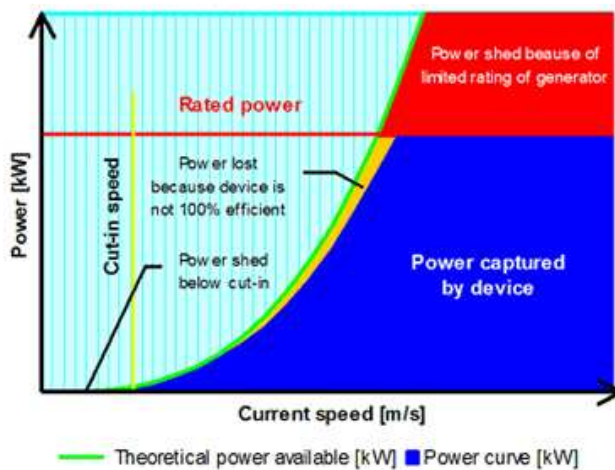
$\eta$  = rendement [-]

$\rho$  = dichtheid [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

A = oppervlak van waaier [ $\text{m}^2$ ]

v = snelheid van water [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

Het vermogen is vooral afhankelijk van de stroomsnelheid. Het geïnstalleerde vermogen bepaalt welk vermogen maximaal genereerd wordt (zie Figuur 3.3).



**Figuur 3.3; Verhouding tussen vermogen en stroomsnelheid [7]**

Dit geïnstalleerde vermogen en de daarbij behorende ontwerpsnelheid wordt bepaald met behulp van een kosten-batenanalyse. Voor het ontwerp van de SeaGen is gekozen voor de volgende verhouding tussen de snelheid bij gemiddeld springtij en ontwerpsnelheid:

$$v_d = \frac{v_{d,seagen}}{v_{spring,seagen}} \cdot v_{spring} = \frac{2.4}{3.7} \cdot v_{spring} = 0,65 \cdot v_{spring} \quad (12)$$

Waarin:

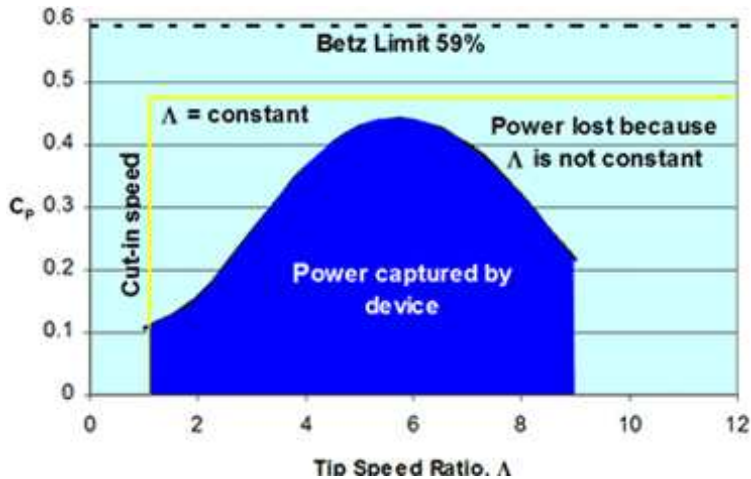
$v_d$  = ontwerpsnelheid [m/s]

$v_{spring}$  = snelheid bij gemiddeld springtij [m/s]

$v_{d,seagen}$  = ontwerpsnelheid van SeaGen [m/s]

$v_{spring,seagen}$  = snelheid bij gemiddeld springtij bij locatie van SeaGen [m/s]

Het rendement van de turbine varieert met de stroomsnelheid. Dit rendement wordt daarbij begrensd door de Betz-limiet van 59 %. Voor de SeaGen is een maximaal rendement van 42% met formule (11) te berekenen. In de onderstaande figuur staat het rendement (hier  $C_p$ ) uitgezet tegenover een ratio voor de aanstroomsnelheid en de snelheid van de bladen ( $\lambda$ ). Daarbij is te zien dat het maximale rendement bij  $\lambda = 5,5$  wordt gevonden en bij de helft van die snelheid ( $\lambda = 2,75$ ) ongeveer een derde van het maximale rendement wordt gevonden.



**Figuur 3.4; Verhouding tussen stroomsnelheid en rendement [7]**

Om de operationele tijd van de SeaGen te berekenen wordt een gemiddelde waarde van 35 % aangenomen voor het rendement. Voor de gemiddelde snelheid wordt de ontwerpsnelheid gekozen. De energie die in een jaar opgewekt wordt door een stroomturbine is gelijk aan:

$$E = \int P dt = \int \frac{1}{2} \cdot \eta \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 dt \approx \frac{1}{2} \cdot 0,35 \cdot 1025 \cdot A \cdot v_d^3 \cdot t_{turb} \quad (13)$$

Waarin:

E = Energie [Wh/jaar]

P = Vermogen [W]

dt = tijdstap [uur]

A = waaieroppervlak [m<sup>2</sup>]

v<sub>d</sub> = ontwerpsnelheid [m/s]

t<sub>turb</sub> = tijd wanneer geturbineerd wordt [uur/jaar]

Voor de SeaGen is te berekenen dat hij ongeveer 3800 uur in een jaar operationeel is. Dit betekent dat deze stroomturbine ongeveer 45 % van de tijd werkt.

### 3.4. Vergelijking

Op verschillende locaties op de wereld kan blijken dat één van de twee alternatieven voor opwekking van energie uit getij het meest geschikt is. Om voor de energiepolder te bepalen welke van de twee methoden het meest geschikt is, wordt allereerst het theoretische verschil in energiewinning bepaald. Daarna worden enkele praktische voorbeelden gegeven.

Een theoretische vergelijking kan gedaan worden tussen het rendement van een stroomturbine en een turbine die energie haalt uit potentiële energie. Daarvoor worden de formules voor het kinetische vermogen (formule (11)) en de formule voor het potentiële vermogen (formule (6)) gelijk aan elkaar gesteld. Dit wordt als volgt gedaan:

De formule voor kinetische energie is:

$$P_{kin} = \frac{1}{2} \cdot \eta \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$$

Door het verval en het debiet uit te drukken in oppervlak en snelheid wordt de formule voor de potentiële energie verkregen.

$$H = \frac{v^2}{2g}, Q = A \cdot v$$

$$P_{pot} = \eta \cdot \rho \cdot g \cdot H \cdot Q$$

Het rendement van de turbines is daardoor vergelijkbaar:

$$\frac{P_{pot}}{P_{kin}} = \frac{\eta_{pot}}{\eta_{kin}} \approx \frac{0.90}{0.35} = 2,6$$

Met potentiële energie wordt dus alleen al door het rendement van de turbines 2,6 keer zo veel energie gewonnen.

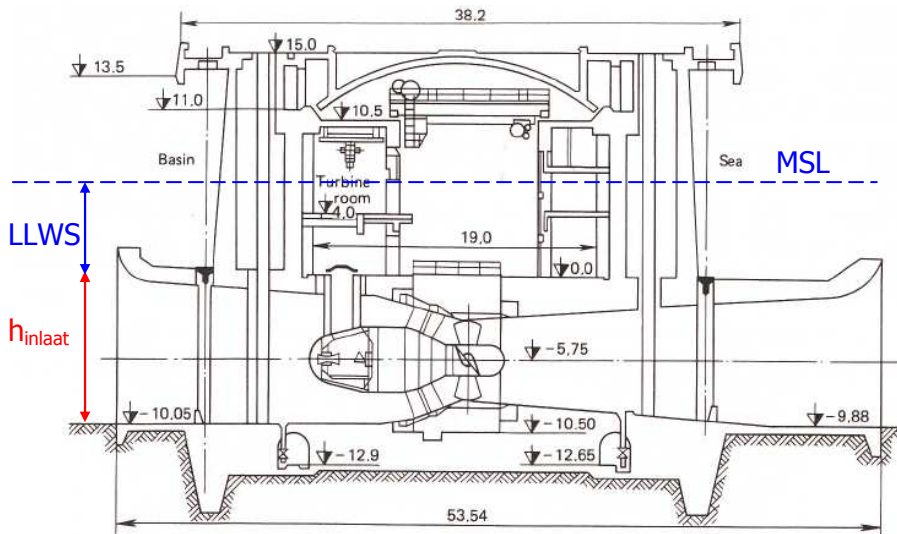
Een vergelijking tussen de twee verschillende vormen van energieopwekking kan ook gedaan worden door te berekenen hoeveel energie er opgewekt zou worden als er een getijcentrale van stroomturbines was gebouwd in La Rance.

De huidige getijcentrale werkt op potentiële energie, met een geïnstalleerd vermogen van 240 MW. Hier wordt 560 GWh energie per jaar gewonnen. De totale breedte van de dam is 750 m. De breedte van het energieopwekkende gedeelte van de centrale is 332.5 meter. De turbines liggen op 10 meter onder de LLWS en de inlaathoogte ligt ongeveer op de LLWS [6].

Het oppervlak van het bassin achter de dam is maximaal 17 km<sup>2</sup> en het gemiddeld springtijverschil is 10.1 meter. Het gemiddelde getijvolume is dan maximaal (10.1 x 17 e6 =) 172 miljoen kubieke meter.

Wanneer in plaats van een centrale werkend op potentiële energie hier een centrale werkend op kinetische energie was geplaatst, zou de energie gehaald moeten worden uit de snelheid van het water. De gemiddelde snelheid wordt berekend door allereerst het gemiddelde getijdebiet te bepalen ( $V/0.5 T_{getij}$ ). Door dit getijdebiet te delen door het doorstroomoppervlak is de gemiddelde snelheid te bepalen. Voor de bepaling van het doorstroomoppervlak wordt de breedte genomen van het energieopwekkende gedeelte van de huidige centrale. Dit is te zien in onderstaande formule.

$$v_{spring} = \frac{V_{spring}}{A_{gem} \cdot \frac{1}{2} \cdot T_{getij}} = \frac{V_{spring}}{B \cdot (h_{inlaat} - LLWS) \cdot \frac{1}{2} \cdot T_{getij}} = \frac{227 \cdot 10^6}{332.5 \cdot (10 - -6.7) \cdot \frac{1}{2} \cdot 44712} = 1.91 m/s$$



**Figuur 3.5; Uitleg bij variabelen  $h_{inlaat}$  en LLWS [6]**

Waarin:

$A_{gem}$  = natte oppervlak van doorlaat [ $m^2$ ]

$T_{getij}$  = duur van getij [s]

$B$  = breedte getijcentrale [m]

$h_{inlaat}$  = hoogte van inlaat van de huidige getijcentrale in La Rance [m]

LLWS = Laag Laag Water Spring [MSL + m]

Voor het bepalen van de ontwerpsnelheid wordt formule (12) gebruikt.

$$v_d = 0,65 \cdot v_{spring} = 0,65 \cdot 1,91 = 1,24 \text{ m/s}$$

De stroomturbines zullen net zo hoog zijn als de inlaathoogte bij de getijcentrale. Deze dienen namelijk ook continu onder water te staan. De diameter van de waaier is dan 10 meter en voor de ruimte tussen de turbines wordt een halve meter gekozen. Dit betekent dat 31 stroomturbines geplaatst kunnen worden in de huidige opening. Het vermogen en de energieopbrengst van de getijcentrale is dan te berekenen (formule (11) en (13)):

$$P_{tot} = n \cdot P = n \cdot \frac{1}{2} \cdot \eta \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 = 33 \cdot \frac{1}{2} \cdot 0,47 \cdot 1025 \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot 10^2 \cdot 1,24^3 = 33 \cdot 0,03 = 0,89 \text{ MW}$$

$$E = P_{tot} \cdot t_{turb} = 0,89 \cdot 3800 = 3400 \text{ MWh/jaar}$$

Met positieve aannames voor het getijvolume is het geïnstalleerde vermogen slechts 0.1% en de energieopbrengst 0.2% van de huidige getijcentrale.

Wanneer de ingang van de getijcentrale smaller wordt gemaakt kan meer energie gewonnen worden. Dit blijft bij zeer hoge watersnelheden ( $\sim 10$  m/s) echter nog steeds vele malen kleiner dan bij de huidige getijcentrale ( $< 15\%$ ). De reden dat zulke lage waarden voor de energieopbrengst worden gevonden volgt uit het relatief kleine wateroppervlak van het achterliggende bassin. Hoewel het tijverschil groot is, is hierdoor het getijvolume relatief klein. Het verval in het bassin en de daaruit volgende snelheden zijn daardoor laag.

Voor de Brouwerssluis zijn een Bulb-turbine en een stroomturbine vergeleken. Hier is berekend dat het plaatsen van een turbine die energie haalt uit kinetische energie 85 % minder vermogen heeft dan een turbine die energie opwekt met potentiële energie [35].

Qua energieopbrengst heeft getij-energie uit potentiële energie dus de voorkeur. Op sommige locaties kan het blijken dat een dergelijke optie technisch of maatschappelijk niet haalbaar is en dan komt getij-energie uit kinetische energie in beeld.

### **3.5. Conclusie**

Energie uit getij kan gewonnen worden uit potentiële energie en kinetische energie. De energieopbrengst uit potentiële energie kan slechts gewonnen worden wanneer een dam wordt gebouwd. De energieopbrengst per jaar is dan wel veel groter. Dit komt onder andere doordat het rendement van de turbine 2,6 keer zo hoog is.

Door de hogere energieopbrengst wordt voor het concept van de energiepolder gekeken naar getij-energiewinning uit potentiële energie. Tevens is de dam die benodigd is voor dit type getijcentrale al aanwezig. Daarbij kan gekeken worden naar een getijcentrale die slechts tijdens eb energie genereert of naar een duurdere getijcentrale die zowel tijdens vloed als eb energie genereert.

## 4 Selectie van alternatieven

### 4.1. Inleiding

Het concept van de energiepolder gaat uit van het gebruiken van de polders als bassins voor wateropslag en van het gebruiken van de huidige primaire kering als dam om turbines in te plaatsen. Langs de Westerschelde zijn enkele verschillende polders geschikt bevonden voor het concept van de energiepolder. Ten eerste omdat in dit estuarium het grootste tijverschil in Nederland te vinden is en ten tweede omdat achter de huidige primaire kering polders met relatief hoge achterliggende dijken zijn.

In dit hoofdstuk worden alle polders vanaf Vlissingen tot en met de Belgische grens bekeken en getoetst op toepasbaarheid van het concept van de energiepolder.

Daarvoor wordt eerst gekeken naar de huidige bebouwing in de polder in paragraaf 4.2. Vervolgens wordt gekeken hoeveel energie gewonnen kan worden in de polder in paragraaf 4.3. Ten slotte wordt in paragraaf 4.4 bekeken welk type getijcentrale economisch gezien het gunstigst is voor deze polder.

### 4.2. Bebouwing

Een eerste selectie wordt gedaan aan de hand van de hoeveelheid bebouwing in de polder. De bebouwing in de verschillende polders is gegeven in Tabel 4.1.

<b>Polder (Ellewoutsdijk → Breskens)</b>	<b>Dorp</b>	<b>Aantal woningen</b>	<b>Overig</b>
Everingepolder	Geen	3	
Zuidpolder	Geen	3	
Baarlandpolder	Baarland		
Polder Hoedekenskerke	Hoedekenskerke		
Noordpolder	Geen	1	
Boonepolder	Geen	0	
Nieuw-Hoondertpolder	Geen	4	
Coster-Zwakepolder	Geen	4	
Heer-Geertspolder	Geen	2	
Willem-Annapolder	Geen	2	Windmolens, Kassen, Zuiveringsinstallatie
Kruiningenpolder	Kruiningen		
Krabbendijkse polder	Waarde		
Emanuelpolder	Geen	3	
Fredericapolder	Geen	3	
Zimmermanpolder	Geen	3	
Reigersbergsche Polder	Rilland, Bath		
Prosperpolder	Prosperdorp		
Hertogin Hedwigepolder	Geen	4	
Kruispolder	Kruisdorp		
Wilhelmuspolder	Geen	1	

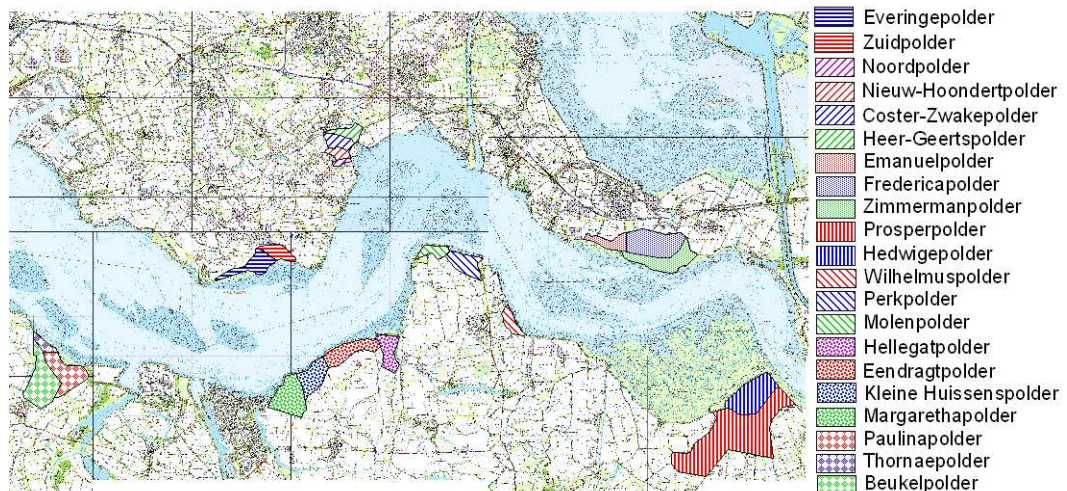
Noorddijk polder	Walsoorden		
Perkpolder	Geen	18	
Molenpolder	Geen	4	
Hooglandpolder/ Nijspolder	Ossenisse		
Hellegatpolder	Geen	0	Camping
Eendragtspolder	Geen	4	
Kleine Huissenspolder	Geen	4	
Margarethapolder	Geen	2	
Paulina polder	Geen	7	
Thoamespolder	Geen	3	
Beukelspolder	Geen	9	
Hoofdplaatpolder	Sasput, Hoofdplaat		
Elisabeth polder	Breskens		
Buizenpolder	Breskens		

**Tabel 4.1; Bebouwing in polders**

De polders met dorpen worden buiten beschouwing gelaten, omdat dat maatschappelijk niet haalbaar is. Er wordt een uitzondering gemaakt voor de Belgische Prosperpolder. De Belgische regering heeft namelijk al besloten dat deze polder ontpolderd zal moeten worden. Maatschappelijk draagvlak zal inmiddels geen probleem meer zijn<sup>5</sup>.

De Willem-Annapolder zal ook buiten beschouwing gelaten worden omdat hier een zuiveringsinstallatie en veel kassen in staan.

In Figuur 4.1 staan de overgebleven polders aangegeven.



**Figuur 4.1; Overzicht van overgebleven polders langs de Westerschelde**

<sup>5</sup> Tijdens de studie is gebleken dat de Belgische regering slechts het schaars bewoonde gedeelte van de Prosperpolder wil ontpolderen (170 ha). Voor deze studie is de energieopbrengst en het vermogen voor de gehele Prosperpolder (1030 ha) bepaald.

### 4.3. Energieopbrengst

Voor de energieopbrengst zijn de Gemiddelde Hoogwaterstand (GHW), het oppervlak van de polder, de gemiddelde hoogteligging van de polder en het gemiddelde tijverschil van belang. Deze kenmerken staan voor de overgebleven polders beschreven in Tabel 4.2.

Polder	GHW	A <sub>polder</sub>	h <sub>polder</sub>	Gemiddeld tijverschil
	[NAP + m]	[km <sup>2</sup> ]	[m+NAP]	[m]
Everingepolder	2,3	1,5	1,20	4,3
Zuidpolder	2,3	1,5	0,90	4,3
Noordpolder	2,4	0,5	0,80	4,5
Boonepolder	2,4	0,5	0,80	4,5
Nieuw-Hoondertpolder	2,4	0,5	0,80	4,5
Coster-Zwakepolder	2,4	0,5	0,80	4,5
Heer-Geertspolder	2,4	0,5	0,80	4,5
Emanuelpolder	2,7	1,5	1,70	4,8
Fredericapolder	2,7	4	1,30	4,8
Zimmermanpolder	2,7	2,5	1,60	4,8
Prosperpolder	2,8	10,3	1,50	5,0
Hertogin Hedwigepolder	2,8	3,3	1,90	5,0
Wilhelmuspolder	2,5	1	0,80	4,6
Perkpolder	2,4	2	1,00	4,5
Molenpolder	2,4	0,5	1,00	4,5
Hellegatpolder	2,3	2	1,70	4,3
Eendragtspolder	2,3	2,5	1,40	4,3
Kleine Huissenspolder	2,2	2	1,30	4,1
Margarethapolder	2,2	3	1,20	4,1
Paulina polder	2,2	3,5	1,60	4,1
Thornaespolder	2,2	0,5	1,70	4,1
Beukelspolder	2,2	3,5	1,40	4,1

**Tabel 4.2; Kenmerken overgebleven polders na selectie bebouwing**

In paragraaf 3.2.2 wordt de volgende richtlijn gegeven voor het gemiddelde volume per cyclus in het jaar (zie formule (9)):

$$V_{gem} = \Delta h_{gem} \cdot A_{bassin}$$

Waarin:

V<sub>gem</sub> = gemiddeld volume water per cyclus [m<sup>3</sup>]

Δh<sub>gem</sub> = waterstandsvariatie [m]

A<sub>bassin</sub> = oppervlak van bassin [m<sup>2</sup>]

De bovengrens voor de waterstandsvariatie wordt bepaald aan de hand van het verschil tussen maaiveldniveau van de polder en gemiddeld hoogwater. De schatting voor het gemiddelde volume per cyclus in een jaar wordt gedaan met formule (14).



$$V_{gem} = (GHW - z_{polder}) \cdot A_{polder} \quad (14)$$

Waarin:

GHW = Gemiddeld Hoogwater [NAP+m]

$z_{polder}$  = Maaiveldniveau polder [NAP+m]

$A_{polder}$  = Oppervlak polder [m<sup>2</sup>]

In eerste instantie wordt uitgegaan van het plaatsen van een ebcentrale. Het verval wordt dan 66 % van het tijverschil (zie paragraaf 3.2.3). De energieopbrengst kan dan berekend worden met formule (8). Er zal dan 50 % van de tijd energie gewonnen worden. Het geïnstalleerd vermogen wordt bepaald met formules (6) en (10).

Voor de geselecteerde polders is de jaarlijkse energiewinning en het geïnstalleerd vermogen te berekenen. Het resultaat hiervan is te zien in Tabel 4.3.

Polder	H	V	Q	P	E
	[m]	[10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> /s]	[MW]	[GWh/jaar]
Prosperpolder	3,3	13,4	599	18	74
Fredericapolder	3,2	5,6	250	7	30
Hertogin Hedwigepolder	3,3	3,0	133	4	17
Zimmermanpolder	3,2	2,8	123	3	15
Perkpolder	3,0	2,8	125	3	14
Margarethapolder	2,7	3,0	134	3	14
Beukespolder	2,7	2,8	125	3	13
Eendragtspolder	2,8	2,3	101	3	11
Zuidpolder	2,8	2,1	94	2	10
Paulina polder	2,7	2,1	94	2	10
Wilhelmuspolder	3,0	1,7	76	2	9
Kleine Huissenspolder	2,7	1,8	81	2	8
Emanuelpolder	3,2	1,5	67	2	8
Everingepolder	2,8	1,7	74	2	8
Hellegatpolder	2,8	1,2	54	1	6
Nieuw-Hoondertpolder	3,0	0,8	36	1	4
Coster-Zwakepolder	3,0	0,8	36	1	4
Noordpolder	3,0	0,8	36	1	4
Heer-Geertspolder	3,0	0,8	36	1	4
Boonepolder	3,0	0,8	36	1	4
Molenpolder	3,0	0,7	31	1	4
Thornaespolder	2,7	0,3	11	0	1

**Tabel 4.3; Potentieel energieopbrengst en vermogen voor polders**

Uit de tabel blijkt dat de Prosperpolder de meeste energie oplevert. De Hertogin Hedwigepolder ligt naast deze polder en kan daardoor gecombineerd worden met de Prosperpolder om nog meer energie op te wekken. De verhouding tussen de energieopbrengst en geïnstalleerd vermogen is voor de verschillende alternatieven ongeveer gelijk.

#### **4.4. Keuze type centrale**

In paragraaf 3.2.3 is gebleken dat de twee meest geschikte typen centrales de ebgenerende centrale en de TT-centrale zijn. Door de hoge ligging van de polder zal de waterstand in het bassin ook hoog zijn. Dit betekent dat tijdens vloed het verval veel lager is dan bij eb. Door dit verschil wordt het minder aantrekkelijk om een TT-centrale te bouwen, omdat deze het beste werkt wanneer het verschil tussen het verval bij eb en bij vloed klein is. Een ebgenerende centrale is daarom de meest geschikte optie.

#### **4.5. Conclusie**

In het vervolg zal gekeken worden naar het plaatsen van een getijcentrale bij de Belgisch-Nederlandse grens. De Prosperpolder en de Hertogin Hedwigepolder zullen daarbij dienen als achterliggend bassin. Deze getijcentrale zal alleen tijdens eb energie opwekken. Tijdens vloed zal de achterliggende polder gevuld worden met behulp van sluizen.

## **5 Hertogin Hedwigepolder en Prosperpolder**

### **5.1. Inleiding**

Nu de selectie van de polders voor het potentieel aan getij-energie is gedaan, kan dieper ingegaan worden op het voorkeursalternatief.

In dit hoofdstuk zullen daarvoor de randvoorwaarden en de functionele eisen voor de Hertogin Hedwige- en Prosperpolder besproken worden.

Daarvoor worden eerst de huidige kenmerken van de Westerschelde en de Hertogin Hedwige- en Prosperpolder beschreven in de Randvoorwaarden (paragraaf 5.2). Vervolgens worden de eisen beschreven voor de implementatie van de getijcentrale in de Functionele eisen (paragraaf 5.3).

### **5.2. Randvoorwaarden**

#### **5.2.1. Inleiding**

Hier worden de belangrijkste kenmerken gegeven voor de Hertogin Hedwige- en Prosperpolder. Daarvoor worden de randvoorwaarden opgesplitst in randvoorwaarden voor de volgende gebieden:

- Westerschelde
- Voorland
- Primaire waterkering
- Achterland/Bassin/Polder
- Achterliggende dijken

De randvoorwaarden zullen behandeld worden voor de verschillende gebieden in de bovenstaande volgorde.

## 5.2.2. Westerschelde

### Getij en waterstanden

Het getij in de Westerschelde bij de Hedwige- en Prosperpolder wordt gekenmerkt door de volgende gegevens.

Getijkarakteristieken	Hedwige- en Prosperpolder
Gemiddeld hoogwater spring	NAP + 3,25 m
Gemiddeld hoogwater	NAP + 2,82 m
Gemiddeld hoogwater dood	NAP + 2,27 m
Gemiddeld laagwater dood	NAP - 1,81 m
Gemiddeld laagwater	NAP - 2,13 m
Gemiddeld laagwater spring [26]	NAP - 2,33 m
Ontwerppeil	NAP + 6,7 m
Ebstroom	11.000 m <sup>3</sup> /s
Vloedstroom	14.000 m <sup>3</sup> /s
Getijvolume[13]	150 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
<small>C<sub>bernshstein</sub></small>	0,08 (=tweemaal daags)

**Tabel 5.1; Getijkarakteristieken bij Hertogin Hedwige- en Prosperpolder**

De bovenstaande getijgegevens zijn van het peilstation in Bath van RWS voor de periode 1971 – 1990. In Tabel 5.2 zijn getijvoorspellingen van 2009 – 2010 voor het peilstation bij Bath en getijgegevens van het peilstation bij de Prosperpolder van de periode 1991 – 2000. In Tabel 5.2 staan de belangrijkste kenmerken weergegeven.

Peilstation	Periode	Amplitude Springtij	Amplitude Gemiddeld tij	Amplitude Doodtij	Methode
Bath[26]	1971-1991	515 cm	483 cm	397 cm	Observatie
Prosperpolder [38]	1991-2000	555 cm	512 cm	456 cm	Observatie
Bath[29]	2009-2010	548 cm	493 cm	419 cm	Voorspelling

**Tabel 5.2; Getijgegevens bij Bath en Prosperpolder**

Doordat de metingen in verschillende jaren, door verschillende instanties en op verschillende locaties zijn gedaan, zijn er verschillen in de getijgegevens in de orde van enkele decimeters.

Deze kleine verschillen in het getij kunnen grote invloed hebben op de energieopbrengst in een jaar. Om een nauwkeurige voorspelling te doen voor de komende 40 jaar, is de nauwkeurigheid van de gegevens daarom te beperkt. Dit komt doordat:

- de relatie tussen de verwachte zeespiegelstijging en het getij onbekend is
- de relatie tussen verdiepingswerkzaamheden ten behoeve van de scheepvaart en het getij onbekend is
- onduidelijk is welke activiteiten (ontpolderen, inpolderen, verdiepen) in de komende jaren te verwachten zijn
- het getij elk jaar varieert. Dit zorgt bij La Rance [10] voor een variatie in jaarlijkse energieopbrengst van 3%.

Vanwege deze onzekerheden wordt geen rekening gehouden met groei van het getij in de tijd, maar uitgegaan van gegevens van het jaar 2008. Dit is uiteraard een conservatieve aanname voor de energiewinning.

Voor het model zal gebruik gemaakt worden van waterstand- en getijgegevens van het peilstation Bath, omdat hier gegevens om de 10 minuten beschikbaar zijn. Wanneer aangenomen wordt dat het tijverschil [13] en de gemiddelde waterstand lineair toenemen richting Antwerpen, geldt de volgende relatie tussen de getijgegevens:

$$h_{\text{getij, prosper}} = 1,02 \cdot h_{\text{getij, bath}} + 0,02 \quad (15)$$

Waarin:

$h_{\text{getij, prosper}}$  = getijgegevens bij Prosperpolder

$h_{\text{getij, bath}}$  = getijgegevens bij Bath

Volgens de bovenstaande formule (15) zullen de getijgegevens voor de Prosperpolder worden verkregen. Het verschil tussen de waterstandsgegevens en getijvoorspellingen bij Bath (de windopzet) wordt opgeteld bij de getijgegevens om de waterstandsgegevens

$$h_{\text{prosper}} = h_{\text{getij, prosper}} + (h_{\text{bath}} - h_{\text{getij, bath}}) \quad (16)$$

Waarin:

$h_{\text{prosper}}$  = waterstandsgegevens bij Prosperpolder

$h_{\text{bath}}$  = waterstandsgegevens bij Bath

## Saliniteit

Water op zee heeft een dichtheid van 1035 kg/m<sup>3</sup> en water in de rivieren 1000 kg/m<sup>3</sup>. Het Schelde-estuarium is gedeeltelijk zoet en gedeeltelijk zout. Bij de Hertogin Hedwige- en Prosperpolder is het water brak. Het water zal daarom een dichtheid hebben tussen de 1035 en 1000 kg/m<sup>3</sup>.

Voor de bepaling van de saliniteit worden gegevens van Rijkswaterstaat [27] gebruikt over de chloride-inhoud van het water. Deze gegevens stammen uit 1979. Hiervoor is gekozen omdat in dit jaar van veel locaties in de Westerschelde meetgegevens over de chloride-inhoud van water beschikbaar zijn.

Om de dichtheid van water bij de Hertogin Hedwige- en Prosperpolder te bepalen zijn de volgende aannames gedaan:

- 50 km uit de kust is de dichtheid van water 1035 kg/m<sup>3</sup>
- Zoet water heeft een verwaarloosbare chloride-inhoud
- Er is een lineaire relatie tussen chloride inhoud en saliniteit.

De dichtheid van het water voor verschillende locaties in de Westerschelde wordt dan bepaald met formule (17).

$$\rho_{ws} = \frac{c_{ws}}{c_{zee}} \cdot (\rho_{zee} - 1000) + 1000 \quad (17)$$

Waarin:

$\rho_{ws}$  = dichtheid water bij meetstation Westerschelde [ $\text{kg/m}^3$ ]

$\rho_{zee}$  = dichtheid water op zee [ $\text{kg/m}^3$ ]

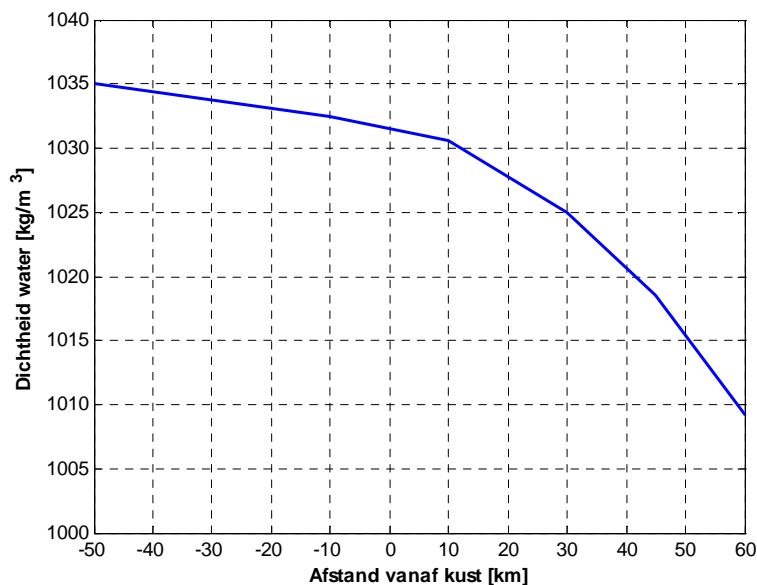
$c_{ws}$  = chloride-inhoud bij meetstation Westerschelde [ $\text{mg/l}$ ]

$c_{zee}$  = chloride-inhoud op zee [ $\text{mg/l}$ ]

In Tabel 5.3 en Figuur 5.1 staan de resultaten weergegeven.

Locatie	Afstand kust [km]	Chloride-inhoud [mg/l]	Dichtheid [ $\text{kg/m}^3$ ]
50 km van kust	-50	19664	1035
10 km van kust	-10	18224	1032
Vlissingen	10	17195	1031
Terneuzen	30	14053	1025
Hansweert	45	10408	1019
Saeftinghe	60	5190	1009

**Tabel 5.3; Dichtheid water in Westerschelde**



**Figuur 5.1; Dichtheid water in Westerschelde**

\* Positieve richting is landinwaarts

\*\* Bij bepaling afstand vanaf kust is vaargeul van Westerschelde gevolgd

De Hertogin Hedwige en Prosperpolder ligt dichtbij het meetstation 60 km landinwaarts. Voor de dichtheid wordt daarom een waarde van  $1010 \text{ kg/m}^3$  aangenomen.

## Zwevende stof

Bij het meetstation Schaar van den Ouden Doel is gemeten dat de gemiddelde concentratie in het oppervlaktewater gelijk is aan  $57 \text{ mg/l}$ . Dit meetstation ligt vlakbij de Nederlands-Belgische grens.

### 5.2.3. Voorland

#### Afmetingen

Het voorland heeft een gemiddelde hoogte NAP + 3,5 meter. Bij de Prosperpolder is een waarde van NAP + 3,1 meter gevonden [3]. Voor de Hedwigepolder is uit een gegeven dwarsprofiel bekend dat de hoogte van het voorland NAP + 3,66 m is. Dit voorland ligt alleen tijdens stormen en extreme springtij onder water.

De breedte van het voorland loodrecht op de primaire dijk is gemiddeld 250 meter. In Figuur 5.2 is een foto getoond van dit voorland.



**Figuur 5.2; Foto van voorland bij Prosperpolder**

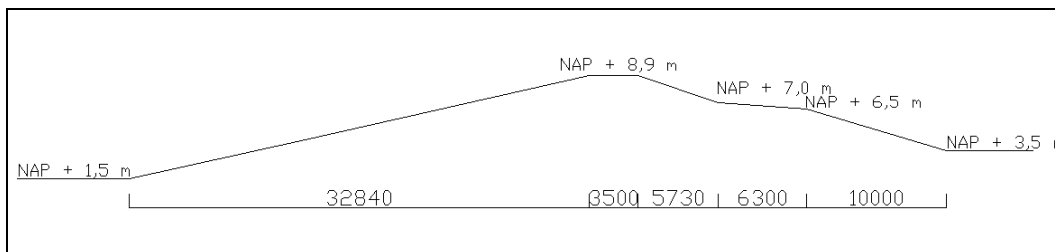
#### Grondsamenstelling

Er is een dunne laag begroeiing. De toplaag is van klei. Daaronder ligt vooral fijn zand.

## 5.2.4. Primaire dijk

### Dijkprofiel

Er is een dijkprofiel voor de Hertogin Hedwigepolder bekend. Aangenomen wordt dat dit gelijk is voor de hele primaire kering. In Figuur 5.3 is het profiel weergegeven.



**Figuur 5.3; Dijkprofiel van primaire kering**

De dijk is met gras bekleed zoals te zien is in Figuur 5.4.



**Figuur 5.4; Landzijde (links) en zeezijde (rechts) van primaire kering Prosperpolder**

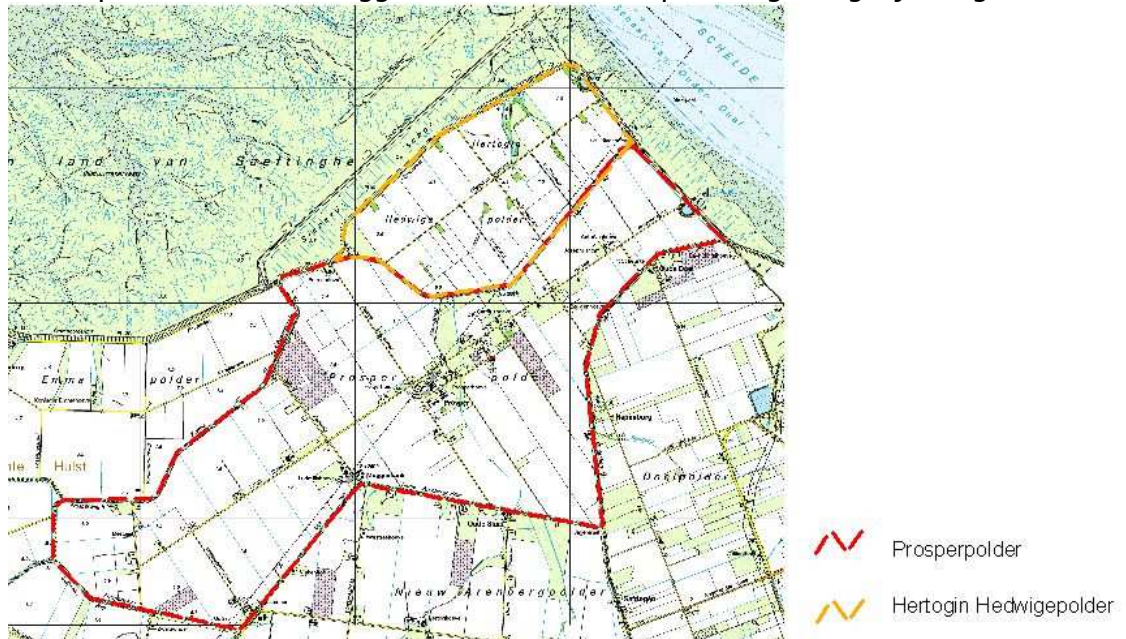
### Bodemsamenstelling

Waarschijnlijk ligt er een toplaag van 1 meter klei op de dijk. Met behulp van een sondering [2], GEO-05/130-S9) is bepaald dat de dijk hierna tot NAP – 2m bestaat uit een laag van zand en kleiig zand. Dan is er een dunne veenlaag (< 1 m) gevolgd door een zandlaag van 14 meter. Ten slotte is er een kleilaag met zandlagen.



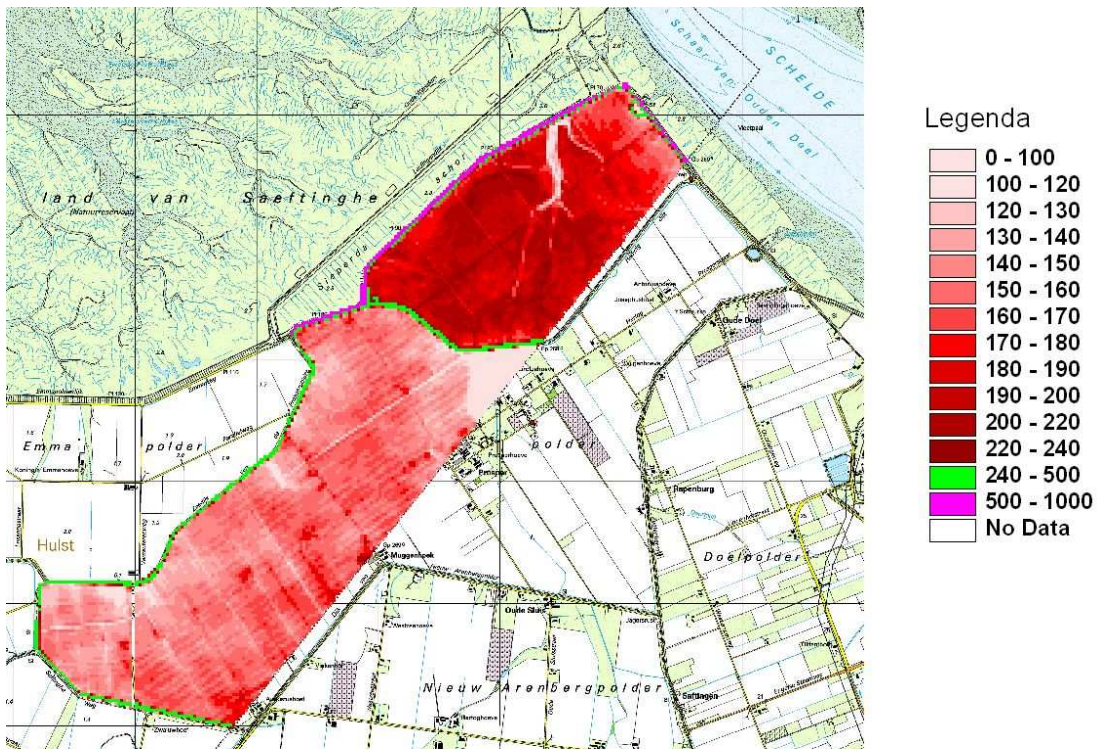
### 5.2.5. Achterland

In Figuur 5.5 zijn de Hertogin Hedwige- en Prosperpolder aangegeven, die in dit ontwerp dienen als achterliggend bassin voor de opwekking van getij-energie.



**Figuur 5.5; Hertogin Hedwige- en Prosperpolder**

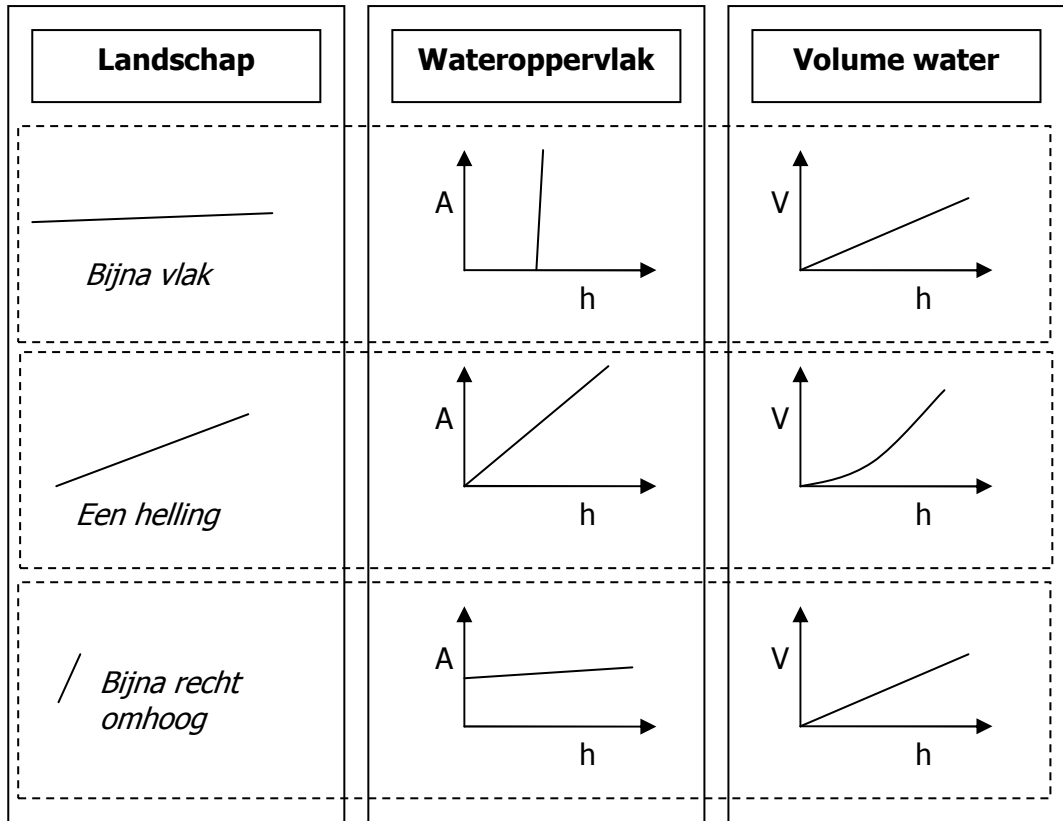
De Prosperpolder heeft een oppervlak van 10,3 km<sup>2</sup> en de Hertogin Hedwigepolder een oppervlak van 3,3 km<sup>2</sup>. Voor de hoogteligging van de twee polders is voor het Nederlandse gedeelte gebruik gemaakt van AHN. Van AHN is een gridbestand beschikbaar met hoogtes gegeven voor elke 25 bij 25 meter. Met behulp van deze gegevens is een hoogteverdeling gevonden voor het Nederlandse gedeelte. Voor het Belgische gedeelte van de polders wordt AGIV gebruikt. Bij AGIV heeft dit grid een resolutie van 100 bij 100. Er is echter geen bestand beschikbaar gesteld, maar het was wel mogelijk om op één locatie een hoogtegegeven op te vragen. Er is daarom besloten een trekking van 25 gegevens voor het Belgische gedeelte te doen. Vervolgens is de verdeling gevonden voor het Nederlandse gedeelte ook voor het Belgische gedeelte toegepast.



**Figuur 5.6; Hertogin Hedwig- en Prosperpolder met hoogtegegevens ingetekend**

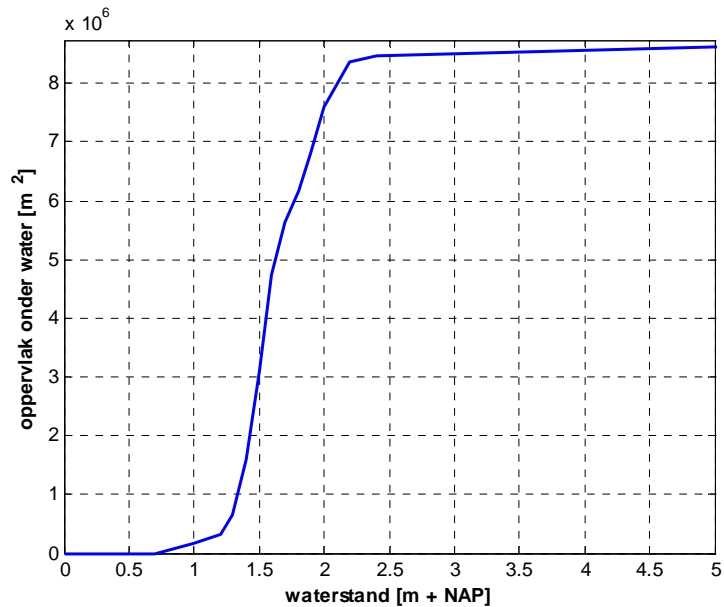
Met deze hoogtegegevens is het mogelijk te zien hoe de polder vol zal lopen, als de primaire kering doorgebroken wordt. Daarvoor worden de hoogtegegevens van polders allereerst ingedeeld in klassen. Daarmee kan het wateroppervlak bepaald worden bij een bepaalde waterstand. Er wordt voor gekozen om dit hoogteprofielen te noemen.

Om inzicht te krijgen in deze hoogteprofielen wordt in Figuur 5.5 weergegeven welke invloed een bepaald type landschap heeft op de vergroting van het wateroppervlak en het volume water dat zich in de polder bevindt.



**Figuur 5.7; Schematische hoogteprofielen**

Voor het Nederlandse gedeelte van de Hertogin Hedwigepolder en de Prosperpolder wordt het volgende hoogteprofiel verkregen.

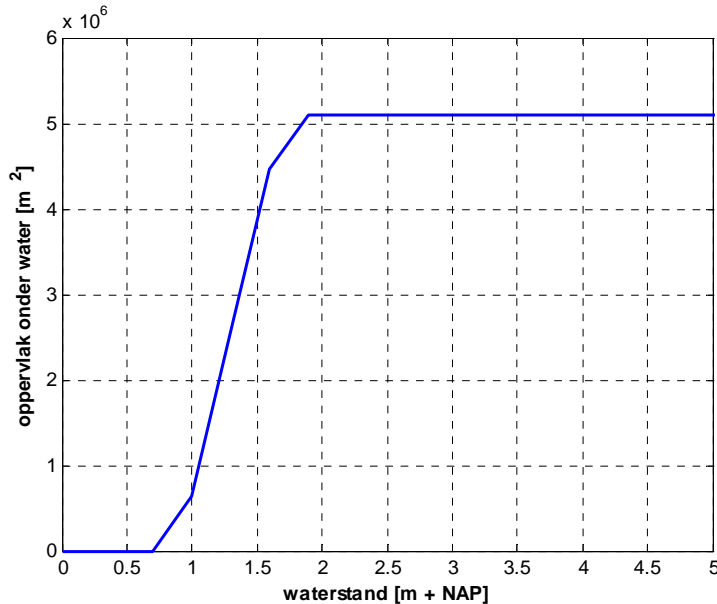


**Figuur 5.8; Hoogteprofiel Nederlands gedeelte Hertogin Hedwigepolder en Prosperpolder**

Hierin is te zien dat bij een waterstand lager dan NAP + 1 m beide polders leeg staan. Tot een waterstand van NAP + 1,7 meter vult de Prosperpolder zich op ( $\sim 10,3 \text{ km}^2$ ).

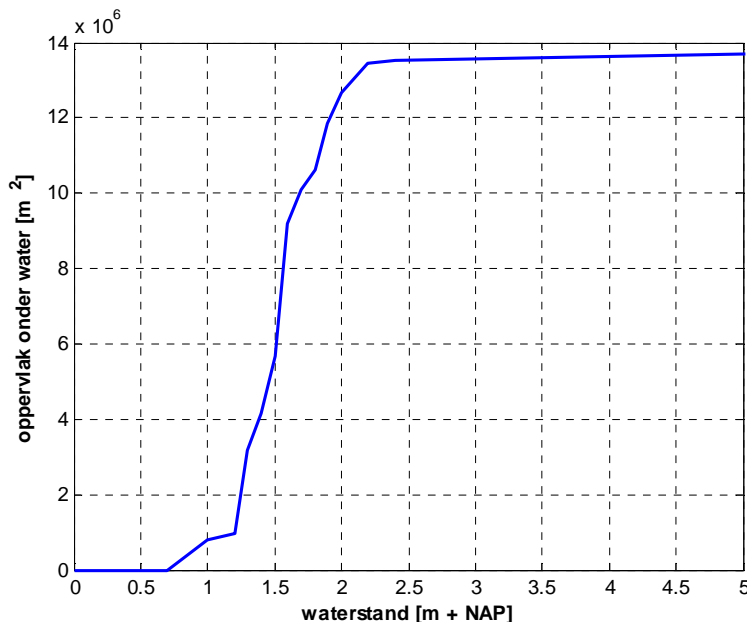
Daarna komt de hoger gelegen Hedwigepolder onder water ( $\sim 3,3 \text{ km}^2$ ) te liggen. Met een waterstand van NAP + 2,2 meter ligt het gehele gebied onder water.

Voor het Belgische gedeelte van de Hertogin Hedwige- en Prosperpolder wordt het volgende hoogteprofiel aangenomen (zie Figuur 5.9). Op basis van een trekking van 25 gegevens.



**Figuur 5.9; Aangenomen hoogteprofiel Belgisch gedeelte Prosperpolder**

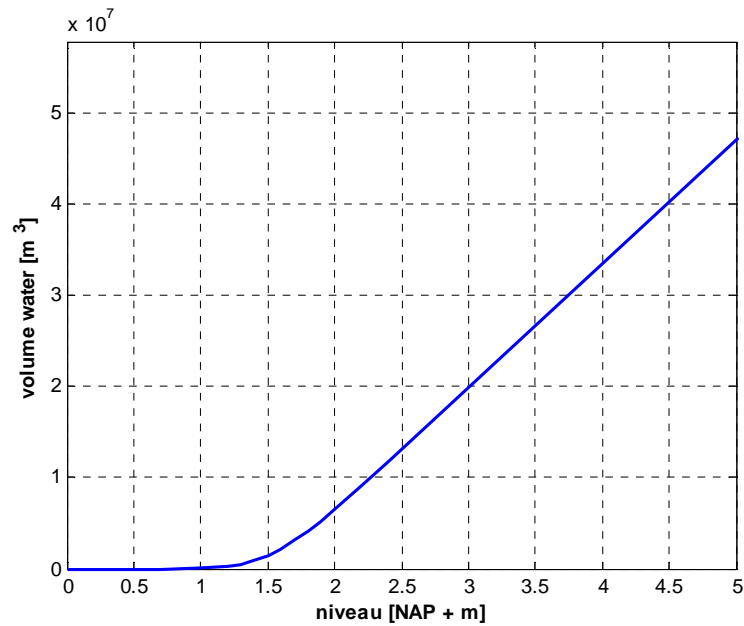
Dit leidt samen tot het volgende hoogteprofiel (Figuur 5.10) voor de beide polders.



**Figuur 5.10; Hoogteprofiel voor Hertogin Hedwige- en Prosperpolder**

Het gemiddelde niveau van de twee polders samen is NAP + 1,6 meter.

Nu het wateroppervlak bij elke waterstand bekend is, kan het volume water dat in de polder zit berekend worden. Dit is te zien in Figuur 5.11.



**Figuur 5.11; Volume water aanwezig in polders bij bepaalde waterstand**

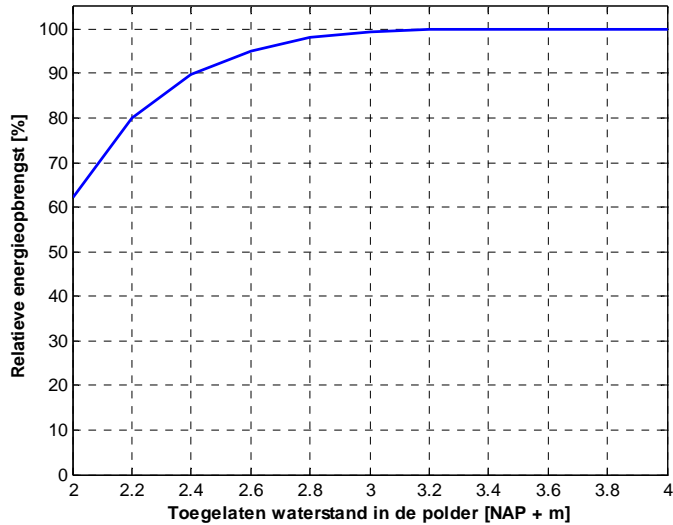
Om de polders te vullen lijkt een locatie aan de Oostzijde van de Prosperpolder bij de Westerschelde aan de Belgische zijde het meest geschikt. Hier ligt het maaiveld namelijk relatief laag (NAP + 1,3 m).

### **Bodemsamenstelling**

Met behulp van een sondering [2], GEO-05/168-S88) is bepaald dat de dijk tot NAP - 2 m bestaat uit een laag van zand en kleiig zand. Dan is er een dunne veenlaag (~ 1 m) gevolgd door een zandlaag van 14 meter. Daaronder bevindt zich een kleilaag met laagjes zand.

### **Hydraulische randvoorwaarden**

Om overstromingsrisico's in omliggende polders te voorkomen mag de waterstand niet boven een bepaald niveau uitkomen. Door een maximum te stellen aan deze waterstand, wordt de energieopbrengst beperkt. Er is echter te zien in Figuur 5.12 dat de energieopbrengst nauwelijks wordt beperkt wanneer voor deze maximale waterstand een waarde van NAP +3,5 meter gekozen wordt.



**Figuur 5.12; Invloed van maximale waterstand in polder op energieopbrengst**

Om overstromingsrisico's klein te houden en anderzijds de energieopbrengsten niet te veel te beperken, wordt voor een maximale toelaatbare waterstand van NAP +3,5 m gekozen.

Om te bepalen of de achterliggende dijken de omliggende gebieden kunnen beschermen tegen overstromingen, dienen ook de eigenschappen van een maatgevende golf bekend te zijn. De significante golfhoogte vanuit de polder tijdens extreme condities, kan bepaald worden met behulp van Bretschneider.

$$\tilde{H} = 0,283 \cdot \tanh\left(0,53 \cdot \tilde{d}^{0.75}\right) \cdot \tanh\left(\frac{0,0125 \cdot \tilde{l}^{0.42}}{\tanh\left(0,53 \cdot \tilde{d}^{0.75}\right)}\right) \quad (18)$$

$$\tilde{T} = 7,54 \cdot \tanh\left(0,833 \cdot \tilde{d}^{0.375}\right) \cdot \tanh\left(\frac{0,077 \cdot \tilde{l}^{0.25}}{\tanh\left(0,833 \cdot \tilde{d}^{0.75}\right)}\right) \quad (19)$$

Waarin:

$$\tilde{H} = \frac{gH_s}{U^2}$$

$$\tilde{T} = \frac{gT_p}{U}$$

$$\tilde{l} = \frac{gl}{U^2}$$

$$\tilde{d} = \frac{gd}{U^2}$$

l = strijklengte [m]

U = windsnelheid op een hoogte van 10 m [m/s]

d = waterdiepte [m]

T<sub>p</sub> = piekperiode golf [s]

Strijklengtes zijn in verschillende richtingen voor de Hertogin Hedwige- en Prosperpolder bepaald. De windsnelheden in verschillende richtingen voor de

Westerschelde zijn overgenomen van een rapport van Rijkswaterstaat [4]. De formules van Bretschneider kunnen dan worden ingevuld. Daarmee wordt Tabel 5.4 verkregen.

<b>Richting</b>	<b>Strijk lengte [km]</b>	<b>Windsnelheid [m/s]</b>	<b>Golfhoogte [m]</b>	<b>T<sub>p</sub> [s]</b>
ZW	6	30	0,77	3,64
W	3	34	0,80	3,49
NW	3	28	0,71	3,23
N	1,5	21	0,51	2,55
NO	6	20	0,61	3,11
O	3	19	0,54	2,75
ZO	3	18	0,52	2,69
Z	1,5	23	0,55	2,65

**Tabel 5.4; Significante golfhoogte en piekperiode voor golven uit polder**

De maatgevende golf heeft dus een significante golfhoogte van 0,80 meter en een periode van 3,5 s.

## **5.2.6. Achterliggende dijken**

### **Historie**

De eerste dijken van de Prosperpolder waren bedoeld om de Louisapolder en Saeftinghepolder<sup>6</sup> te beschermen en zijn in 1803 aangelegd. De Prosperpolder is zelf in 1847 drooggelegd. De dijken die nodig waren voor drooglegging van de Hedwigepolder in 1907, zijn vervangen door de huidige meer stormbestendige dijken [22]. De achterliggende dijken fungeren nu als secundaire waterkeringen.

### **Dijkprofiel**

Er heet een groot tijdsbestek gelegen tussen de aanleg van de verschillende dijken. Tevens waren de richtlijnen ten aanzien van deze dijken minder strikt tijdens de aanleg dan nu het geval is. Daardoor zal het dijkprofiel van deze dijken sterker verschillen dan bij dijken die de laatste vijftig jaar aangelegd zijn. In Figuur 5.13 is een gedeelte van deze achterliggende dijken getoond.

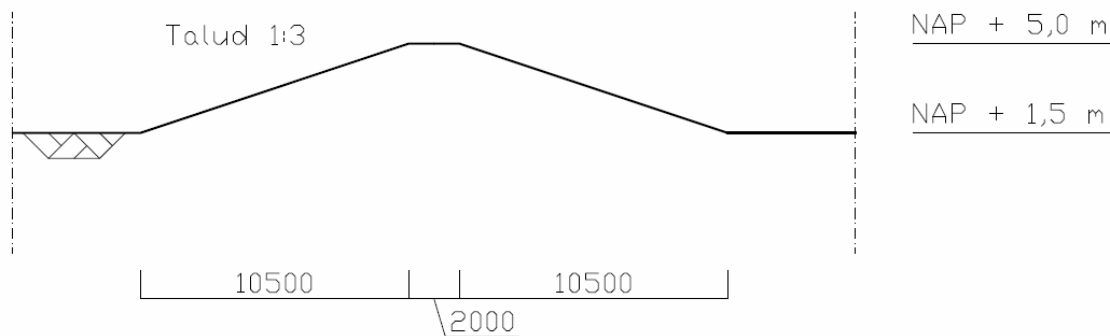
<sup>6</sup> Dit is niet het huidige verdrinken land van Saeftinghe, maar een polder meer landinwaarts





**Figuur 5.13; Achterliggende dijk van Prosperpolder**

Op basis van geografische kaarten is te zien dat de achterliggende dijken een hoogte kunnen bereiken van net boven de NAP + 6 meter. Op een sondering genomen op de kruin van de dijk is een hoogte van NAP + 5.7 meter gemeten. Aangenomen wordt dat de zwakste plekken van de dijk een hoogte hebben van NAP + 5 meter. Met behulp van afstandsmetingen is bepaald dat het talud van de dijken tussen de 1:3 en 1:4 moet liggen. Er wordt uitgegaan van een talud van 1:3. Het dijkprofiel komt er dan als volgt uit te zien.



**Figuur 5.14; Dijkprofiel secundaire waterkering**

### **Bodemsamenstelling**

Met behulp van een sondering [2], GEO-05/168-S88) is bepaald dat de dijk tot NAP - 2 m bestaat uit een laag van zand en kleiig zand. Dan is er een dunne veenlaag (< 1 m) gevolgd door een zandlaag van 14 meter.



## 5.3. Functionele eisen

### 5.3.1. Inleiding

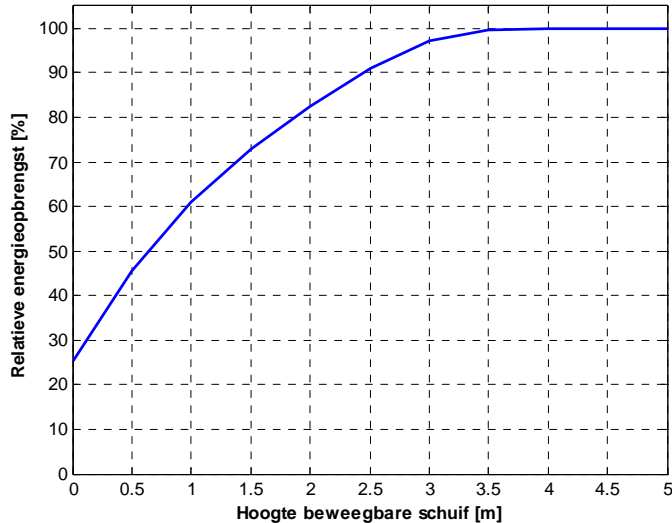
Voor het plaatsen van de getijcentrale worden eisen gesteld aan de energiewinning. Hierbij zal niet alleen gekeken worden naar de energiewinning, maar ook de veiligheid tegen overstromen van de primaire waterkering en van de gebieden naast de Hertogin Hedwige- en Prosperpolder. Tevens dient bereikbaarheid ten behoeve van operatie en onderhoud gegarandeerd te worden.

### 5.3.2. Eisen energiewinning

Voor de opwekking van energie zijn turbines nodig. Om de polder te vullen onder laag verval zijn naast turbines ook sluisen nodig. Het optimale aantal sluisen en turbines wordt bepaald aan de hand van een economische analyse.

De turbines dienen tijdens operatie geheel onder water te liggen. Anders zouden golven mogelijk schade aan kunnen brengen aan de dure elektromechanische apparatuur. Tevens dienen de turbines diep genoeg te liggen om cavitatie te voorkomen.

Voor de sluisen geldt dat bij een ligging van de vloer op NAP de doorlaathoogte niet hoger hoeft te zijn dan 3,5 meter. Bij een grotere doorlaathoogte is de extra energieopbrengst namelijk minder dan 0,1 %. Dit is te zien in de Figuur 5.15.



**Figuur 5.15; Invloed op energieopbrengst van hoogte doorlaatmiddel t.o.v. NAP<sup>7</sup>**

Overige kenmerken van de sluisen en de turbines zullen besproken worden in Hoofdstuk 7 en Hoofdstuk 8.

<sup>7</sup> Figuur gemaakt met model beschreven in Hoofdstuk 9.2. Geldig voor 5 turbines met 9 inlaatwerken.

### 5.3.3. Eisen overstromingsveiligheid

Aan bijzondere waterbouwkundige constructies in de waterkering, zoals sluizen en turbines, worden op grond van de Wet op de Waterkering eisen gesteld ten aanzien van:

- kerende hoogte
- betrouwbaarheid van het afsluitmiddel
- sterkte en stabiliteit

Voor dit gebied wordt de norm voor de veiligheid tegen overstromingen geformuleerd als een overschrijdingskans per jaar van een hoogwaterstand van 1/4000 [1]. Daarbij geldt dat de kerende hoogte ontworpen moet worden op basis van deze norm. De betrouwbaarheid van het afsluitmiddel dient 10 x zo groot te zijn als de norm tijdens situaties waarin overstromingen kunnen voorkomen. De sterkte en stabiliteit van de sluisconstructie dient tijdens kritieke situaties voor de waterveiligheid een kans van 0,01 x norm te garanderen.

Aangezien de getijcentrale onderdeel uit gaat maken van de primaire waterkering (zie paragraaf 6.4), dient de aanleghoogte gelijk te zijn aan de waterstand volgens de norm met enkele correcties. Daarvoor dient de getijcentrale aangelegd te worden tot een hoogte van NAP + 7.3 meter. De betrouwbaarheid van het afsluitmiddel (schuiven in sluizen en turbines) kan verkregen worden door een enkele kering te plaatsen. Toelichting op deze twee keuzes is te vinden in appendix A.

Voor de stabiliteits- en sterkteberekeningen dienen de in Tabel 5.5 gegeven belastingssfactoren te worden verrekend.

Type belasting	Ongunstig werkend	Gunstig werkend
Eigen gewicht	1.35 $F_{rep}$	0.90 $F_{rep}$
Gronddruk	1.20 $F_{rep}$	0.90 $F_{rep}$
Grondwaterdruk	1.20 $F_{rep}$	0.90 $F_{rep}$
Drukverschil door waterstand	1.25 $F_{norm}$	
Drukverschil door windgolven	1.25 $F_{norm}$	

**Tabel 5.5; Veiligheidsfactoren voor belastingen**

Waarin:

$F_{rep}$  = representatieve waarde voor de belasting

$F_{norm}$  = representatieve waarde voor de belasting met een herhalingstijd volgens norm

De secundaire kering dient waterstand van NAP + 3,5 meter en een golfhoogte van 0,80 meter te kunnen keren.

### 5.3.4. Eisen operatie en onderhoud

Voor personeel dient het mogelijk te zijn om over de sluizen heen te rijden met normale personenwagens.

De schuiven van de turbines en sluizen dienen geïnspecteerd en vervangen te kunnen worden. Omdat de getijcentrale niet bereikbaar is per boot, dient de getijcentrale bereikbaar te zijn voor een vrachtwagen.

## 6 Globaal plan en uitvoeringswijze

### 6.1. Inleiding

Met de randvoorwaarden en functionele eisen bekend is het mogelijk om een locatie voor de getijcentrale te selecteren en de bouwmethode te bepalen.

In dit hoofdstuk zal een globaal ontwerp gemaakt worden voor de getijcentrale. Daarvoor wordt in dit hoofdstuk de locatie, de bouwmethode en het veiligheidssysteem besproken. In Hoofdstuk 7 en Hoofdstuk 8 volgen meer gedetailleerde ontwerpen voor turbines en sluisen. In Hoofdstuk 10 wordt met de ontwerpen voor de turbines, de sluisen en het economische optimum voor het aantal turbines en sluisen dieper ingegaan op het gehele ontwerp van de getijcentrale.

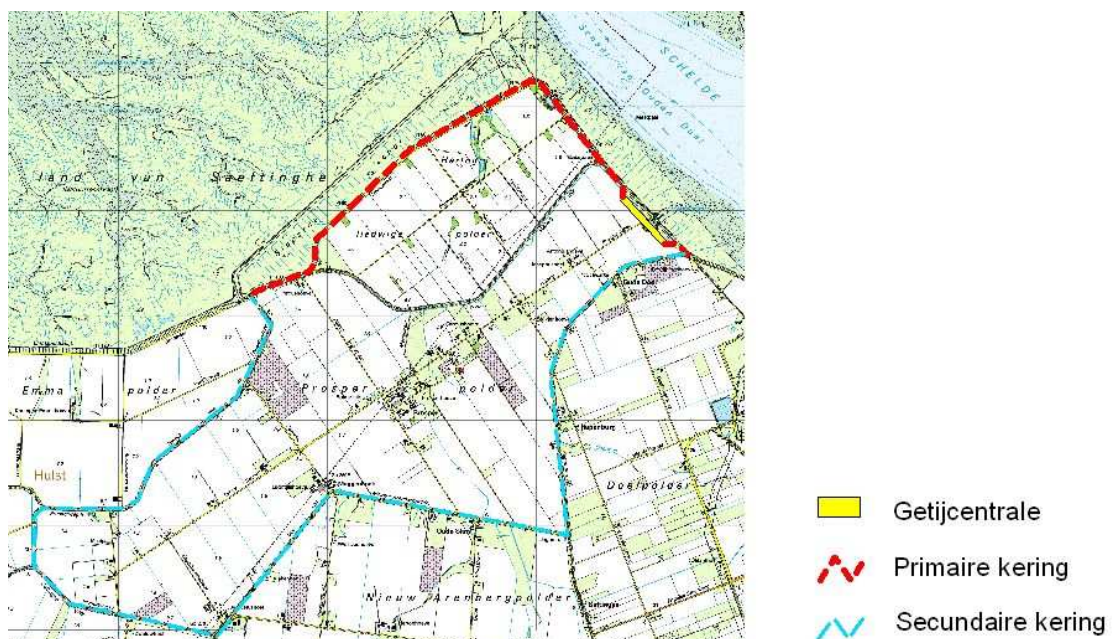
Allereerst wordt in paragraaf 6.2 de locatie van de getijcentrale gekozen. Daarna wordt in paragraaf 6.3 de bouwmethode toegelicht. Ten slotte wordt uitgelegd hoe de nieuwe getijcentrale de omliggende gebieden beschermt tegen overstromingen.

### 6.2. Locatie

De meest geschikte locatie ligt op een plek waar:

- de afstand tot de Westerschelde klein is om de kosten voor de aanstroomkanalen laag te houden
- het niveau van de polder laag is zodat een groot gedeelte van het water in de polder gebruikt kan worden voor energiewinning.

De oostzijde van de Prosperpolder voldoet het beste aan deze criteria. De afstand tot Westerschelde bedraagt daar 250 m. Het niveau in de polder is hier NAP + 1,3 m. In Figuur 6.1 staat deze locatie aangegeven.



**Figuur 6.1; Locatie van getijcentrale**

## **6.3. Bouwmethode**

### **6.3.1. Inleiding**

Bij de getijcentrale van La Rance is gekozen voor het gebruik van kistdammen om een droge bouwput te creëren. Bij de meeste plannen voor getijcentrales wordt nu geopperd om de turbines en de sluizen in te varen als caissons. De keuze voor het type bouwmethode is belangrijk voor de haalbaarheid van het project, omdat het een groot onderdeel vormt van de kosten. De keuze hangt daarbij ook sterk af van de lokale omstandigheden.

Het doel is om de meest geschikte bouwmethode voor de getijcentrale langs de Westerschelde te bepalen. Daarbij wordt gekeken naar de kosten van de verschillende methoden, de uitvoerbaarheid, de betrouwbaarheid en naar de keuze bij andere projecten.

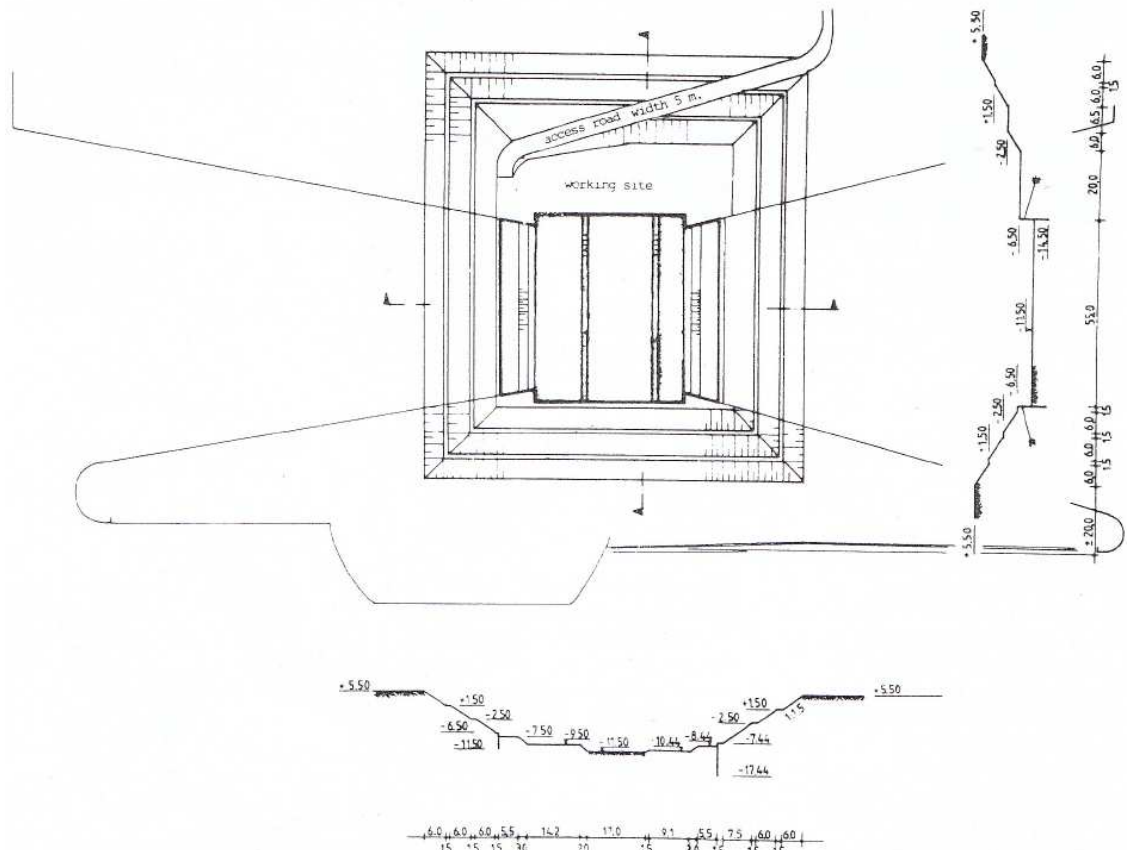
Allereerst wordt gekeken of droge of natte uitvoering meer voor de hand ligt. Dan wordt de bouwvolgorde bekeken. In hoofdstuk 11 wordt dieper ingegaan op de bouwmethode.

### **6.3.2. Droge versus natte uitvoering**

In dit geval wordt met de natte uitvoering van een getijcentrale bedoeld dat caissons op een andere locatie gemaakt worden in een bouwdok. De caissons worden vervolgens naar de locatie gevaren en daar afgezonken. Bij droge uitvoering wordt een droge werkomgeving gecreëerd door de aanleg van kistdammen (zoals bij La Rance) of door de constructie van een bouwput of bouwkuip (zoals bij riviercentrales Alphen aan de Maas en Maurik).

Voor natte uitvoering van de getijcentrale zouden in het voorland diepe kanalen gegraven moeten worden. Door het grote tijverschil en de daarbij behorende stroomsnelheden in de Westerschelde zal het transport niet gemakkelijk zijn.

Droge uitvoering kan echter eenvoudig in de polder achter de dijk gebeuren. Daarvoor hoeven geen kistdammen geplaatst te worden aangezien de huidige primaire waterkering deze locatie droog houdt. Met behulp van een bouwput of bouwkuip kan een droge werkvloer gecreëerd worden. Bij de riviercentrale in Alphen aan de Maas is een combinatie van een bouwput en bouwkuip gebruikt. Dit is te zien in Figuur 6.2.

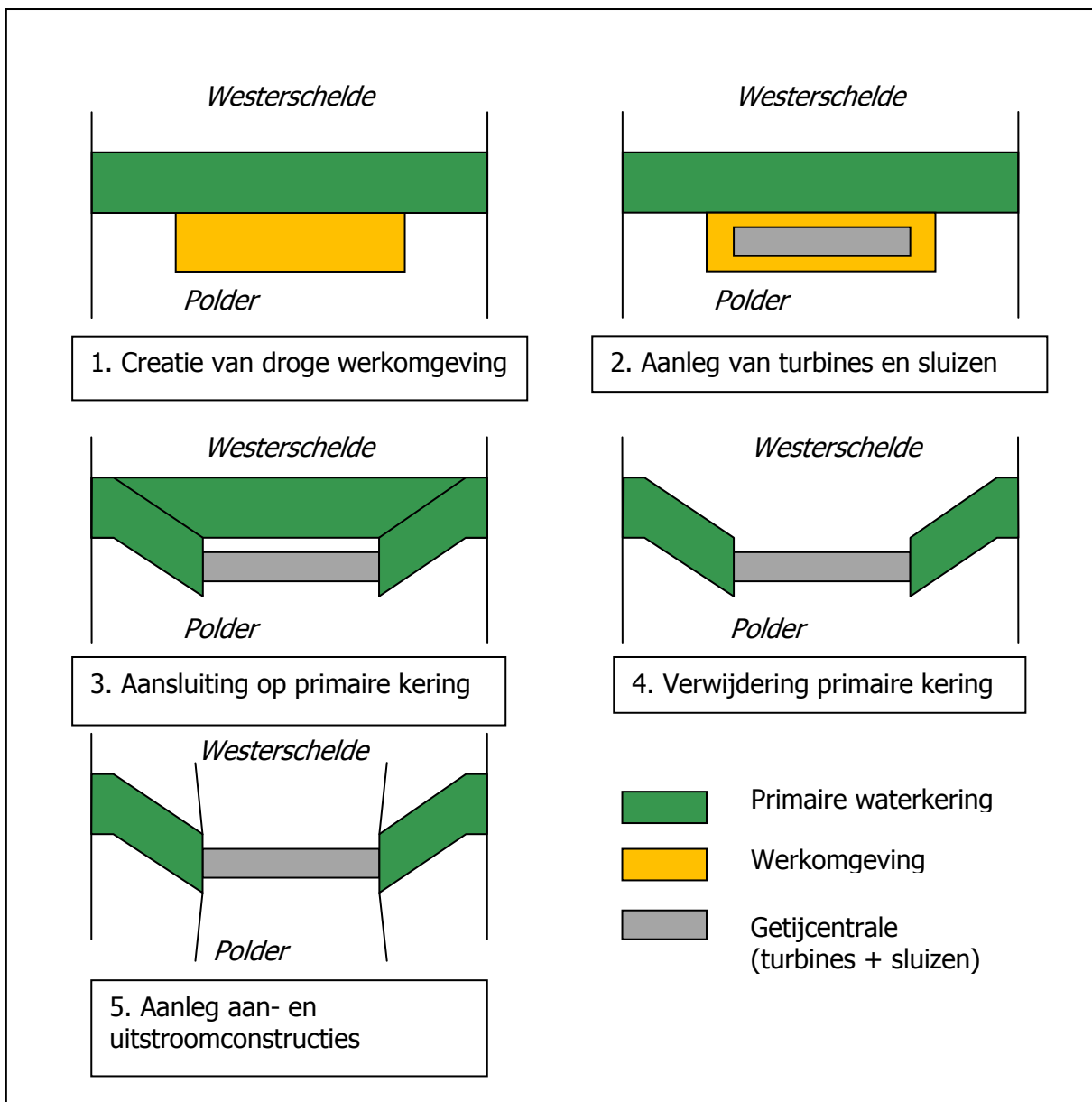


**Figuur 6.2; Bovenaanzicht bouwput riviercentrale Alphen aan de Maas**

Constructie in de droge biedt veel voordelen ten opzichte van constructie in den natte en daarom wordt deze verder uitgewerkt in de volgende paragraaf.

### 6.3.3. Bouwvolgorde

Bij de bouwvolgorde is het van belang dat de primaire waterkering tijdens de uitvoering het achterland en de constructie blijft beschermen. Daarvoor zal een droge werkomgeving gecreëerd worden achter de primaire waterkering. Na het creëren hiervan, zullen de sluizen en turbines in situ geconstrueerd worden. Vervolgens wordt de gehele getijcentrale aangesloten op de primaire waterkering. Daarna kan de huidige primaire waterkering verwijderd worden en de getijcentrale verbonden worden met de Westerschelde. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 6.3.



**Figuur 6.3; Schematisch bovenaanzicht van verschillende fases tijdens de bouw**

Door deze methode blijft het achterliggende gebied gedurende de gehele constructieperiode beschermd tegen overstromingen.

Voor de creatie van de droge werkvloer zijn verschillende opties beschikbaar. Belangrijk daarbij is dat het turbinehuis aangelegd wordt op een diepte van NAP – 11 m (Dit wordt in de volgende hoofdstukken toegelicht). Er kan hier gekozen worden voor een bouwkuip of een bouwput. Hierin wordt dieper ingegaan in paragraaf 11.3. De sluisen worden op een diepte van NAP aangelegd. Door het ondiepe funderingspeil is de bouwput hier de meest geschikte optie.

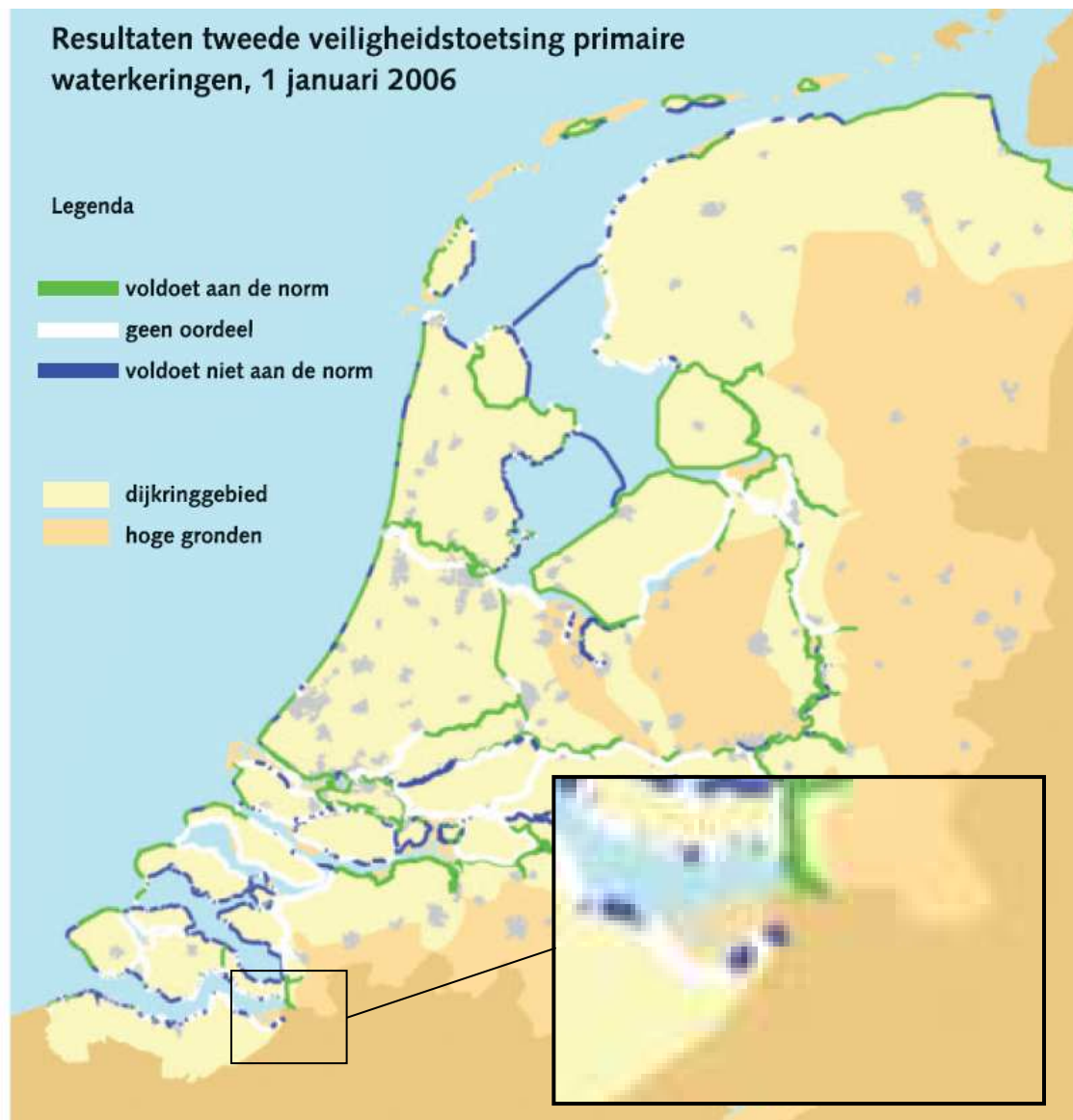
Wanneer de werkvloer gereed is, kunnen de sluisen en turbines worden aangelegd. Voor de turbines zullen enkele prefab-elementen nodig zijn om de stroombuis de juiste vorm te geven. De rest van het beton voor de turbines en sluisen zal in situ worden gestort.

Er zullen twee dijklichamen geplaatst worden die aansluiten op de huidige primaire kering. Daarna kan de primaire kering die nog voor de getijcentrale ligt verwijderd worden. Ten slotte kunnen de aanstroomconstructies aangelegd worden.

#### **6.4. Veiligheidssysteem**

In Figuur 6.1 zijn de primaire en secundaire waterkeringen aangegeven. De primaire kering is nu een waterkering categorie A. Dit betekent dat de primaire kering onderdeel is van een dijkringgebied. Wanneer de getijcentrale operationeel is, wordt de dijk een primaire waterkering categorie B. De dijk beschermt dan niet direct het dijkringgebied, maar zorgt dat er in achterliggende gebieden minder zware stormcondities optreden. De dijken achter deze waterkeringen categorie B hoeven daarom minder hoog aangelegd te worden.

Een gedeelte van de primaire kering voldoet op dit moment echter nog niet aan de gestelde normen. Over het overige gedeelte van de dijken is nog geen oordeel geveld (zie Figuur 6.4). Er zal daarom bekeken moeten worden welke aanpassingen nodig zijn om het dijkringgebied te beschermen in deze nieuwe situatie.



**Figuur 6.4; Resultaten tweede veiligheidstoetsing primaire waterkeringen [25]**

De secundaire waterkering zal geschikt moeten worden gemaakt om het water in de Hertogin Hedwige- en Prosperpolder te houden. De secundaire waterkering wordt daardoor een primaire waterkering categorie A. Daarvoor is gesteld (zie paragraaf 5.2.5) dat deze dijk een waterstand van NAP + 3,5 m met een golfhoogte van 0,80 m kan keren. Uit de randvoorwaarden (zie paragraaf 5.2.6) is bekend dat het dijksprofiel een hoogte heeft van NAP + 5,0m en een talud van 1:3. Met behulp van het computerprogramma PC-overslag is de benodigde aanleghoogte voor een bepaald overslagdebiet bepaald. De resultaten hiervan zijn te zien in Tabel 6.1.

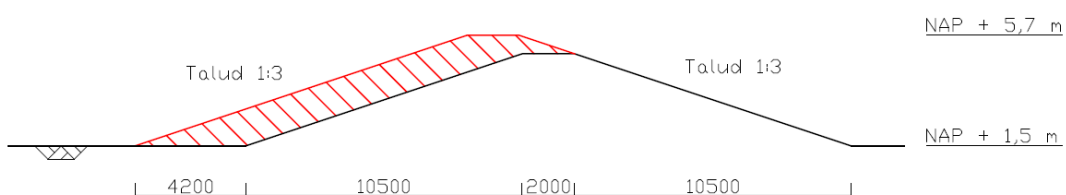


Overslagdebiet [l/s/m]	Aanleghoogte [NAP + m] Talud 1:3	Aanleghoogte [NAP + m] Talud 1:4	Aanleghoogte [NAP + m] Talud 1:5
0.1	5,744	5,172	4,973
1	5,118	4,697	4,554
10	4,491	4,222	4,135

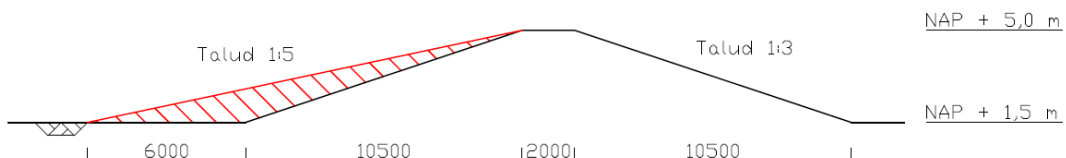
**Tabel 6.1; Overslagdebiet bij bepaalde aanleghoogte**

Voor het ontwerp van de dijk is vereist dat het overslagdebiet gelijk is aan 0,1 l/s/m. Er kan gekozen worden om de dijken op te hogen tot een aanleghoogte van NAP + 5,7 of het talud flauwer maken (1:5). Beide opties zijn weergegeven in Figuur 6.5

*Aanleghoogte vergroten*



*Talud flauwer maken*



 Grond voor verbetering dijk       Huidig dijkprofiel

**Figuur 6.5; Grondmateriaal nodig voor verbetering dijk**

Met behulp van geometrie is de hoeveelheid grondmateriaal per strekkende meter dijk te bepalen:

*Aanleghoogte:*

$$A_{verb} = A_{nieuw} - A_{oud} = \left( 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 3 \cdot 4,2^2 + 2 \cdot 4,2 \right) - \left( 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 10,5 \cdot 3,5 + 2 \cdot 3,5 \right) = 16m^3 / m$$

*Talud:*

$$A_{verb} = A_{nieuw} - A_{oud} = \left( \frac{1}{2} \cdot 16,5 \cdot 3,5 + \frac{1}{2} \cdot 10,5 \cdot 3,5 + 2 \cdot 3,5 \right) - \left( 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 10,5 \cdot 3,5 + 2 \cdot 3,5 \right) = 10,5m^3 / m$$

Waarin:

$A_{verb}$  = dwarsdoorsnede-oppervlak dat nodig is voor verbetering dijk.

$A_{nieuw}$  = dwarsdoorsnede-oppervlak van nieuw dijkprofiel.

$A_{oud}$  = dwarsdoorsnede-oppervlak van oud dijkprofiel.

Het flauwer maken van het talud kost het minste grondmateriaal.

Door het talud flauwer te maken zal de oeverbescherming langer worden. De oeverbescherming is mogelijk wel lichter. Verwacht wordt dat de kosten voor de oeverbescherming bij het flauwer maken van het talud toch hoger zijn. Aangezien de kosten voor de oeverbescherming hoger zijn dan voor het grondverzet, is dit een belangrijk voordeel om de aanleghoogte te vergroten.

Een nadeel van de optie om de aanleghoogte te vergroten is dat de huidige weg aan de bovenkant van de dijk verwijderd zal worden. Tevens zal een nieuwe weg op de nieuwe aanleghoogte geplaatst moeten worden.

Er wordt verwacht dat het kostenvoordeel voor het grondverzet en het niet verleggen van de weg groter is dan de extra kosten voor de oeverbescherming. Daarom wordt er voor gekozen om bij alle dijken het talud flauwer te maken.

## **7 Turbines**

### **7.1. Inleiding**

Een getijcentrale bestaat uit turbines, sluizen en aan- en uitstroomconstructies. Bij een getijcentrale worden de kosten voor het grootste gedeelte bepaald door de kosten voor de turbines met elektromechanische apparatuur. Zij bepalen afhankelijk van de centrale rond de 50 % van de kosten van het totale project. Een goed overwogen ontwerp kan daardoor een aanzienlijke reductie betekenen.

Hier zal het ontwerp van de turbines toegelicht worden. Daar worden de kosten voor de turbines mee bepaald. Omdat het ontwerp van de turbines een sterk werktuigbouwkundig karakter heeft, zullen sommige delen van het ontwerp minder zijn beargumenteerd. Daar waar dit het geval is, zal geadviseerd worden om meer onderzoek te doen.

Allereerst wordt in 7.2 beschreven welke turbines geschikt zijn voor getij-energie en aan welke eisen ze moeten voldoen. Daarna worden in 7.3 de belangrijkste typen turbines voor een getijcentrale genoemd. Nadat een keuze is gemaakt voor het type turbine, worden de afmetingen van de turbine bepaald in 7.5. Vervolgens zullen in paragraaf 7.6 de karakteristieken van deze turbine worden toegelicht. Daarna wordt in paragraaf 7.7 de visvriendelijkheid van de turbine aan de orde gesteld. Ten slotte worden in paragraaf 7.8 de kosten voor de turbines bepaald.

### **7.2. Turbines voor getij-energie**

Tot en met de 20e eeuw werd de energie uit het getij vooral omgezet door molens met een waterrad. Deze getijmolens produceerden weinig energie. Door ontwikkelingen in de riviercentrales werd het mogelijk om ook met een lager verval energie met een hoog rendement te winnen. Hierdoor kwam getij-energie weer in beeld. Voor de getijcentrale in La Rance zijn daarvoor Bulb-turbines ontwikkeld. Deze turbines waren zo goed dat zij later ook zijn toegepast voor laag verval riviercentrales, zoals in de riviercentrales van Nederland. Hoewel in beide gevallen energie wordt gewonnen met een laag verval zijn er belangrijke fundamentele verschillen die invloed hebben op het ontwerp van de turbine [10]. Deze verschillen staan gegeven in Tabel 7.1.

<b>Riviercentrale</b>	<b>Getijcentrale</b>
Het water is zoet	Het water is zout
De waterstand aan één zijde altijd hoger	De zijde met de hoogste waterstand verschilt in de tijd
Bijna 100 % van de tijd energiewinning	50 % - 70 % van de tijd energiewinning <sup>8</sup>
Energieopbrengst is afhankelijk van rivierdebiet	Energieopbrengst is afhankelijk van tijverschil en het oppervlak van het bassin
Verval blijft dagenlang ongeveer gelijk	Verval wijzigt continu tijdens tijcyclus
De continue operatie geeft weinig grote spanningen op energiemechanische apparatuur.	De cyclische operatie zorgt voor grotere spanningen op de energiemechanische apparatuur
Een hoger debiet betekent een lager verval <sup>9</sup>	Een hoger verval betekent een hoger debiet

**Tabel 7.1; Verschillen rivier- en getijcentrale**

Dit leidt tot de volgende verschillen in het ontwerp van de turbine [10]

- Er dient gebruik gemaakt te worden van corrosiewerend materiaal
- Elektromechanische apparatuur dient het continu wijzigende verval om te kunnen zetten in een continue elektriciteitsfrequentie

Tevens kan blijken dat het economisch rendabel is om extra functies aan de turbine toe te voegen, zoals pompen in een bepaalde richting of energie opwekken in de andere richting.

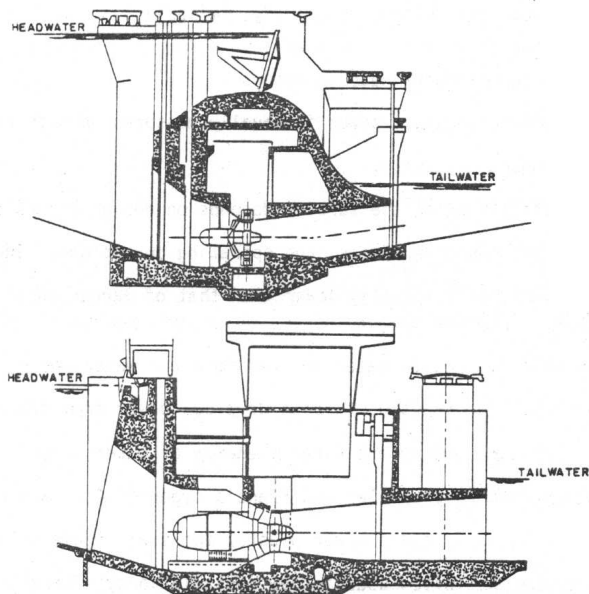
### **7.3. Typen turbines**

Er zijn veel verschillende typen turbines. Zo zijn er alleen al 280 patenten voor verschillende typen turbines tussen 1856 en 1940 aangevraagd voor de winning van getij-energie bij de Severn [6]. In de huidige plannen voor getij-energie worden twee typen turbines genoemd welke beide een horizontale as hebben:

- Straflo (Straight Flow)
- Bulb

<sup>8</sup> Dit geldt voor de meest economisch haalbare opties (zie paragraaf 3.2.3)

<sup>9</sup> Dit geldt voor "Run-of-river" plants



**Figuur 7.1; Straflo-turbine (links) en Bulb-turbine (rechts) [18]**

### **7.3.1. Bulb**

Bij een Bulb-turbine is de generator geplaatst in een in het water gelegen gestroomlijnd stalen omhulsel: de bulb. Deze turbines zijn gebruikt voor de getijcentrale in La Rance. Ze hebben veel verschillende mogelijkheden en hebben een breed bereik aan vervallen.

Zo kunnen de turbines in La Rance energie opwekken, pompen en spuien in beide stroomrichtingen. Daarnaast hebben ze verstelbare loopschoepen en leischoppen, die het debiet dat door de turbine stroomt, kunnen afstellen.

Al deze verschillende extra onderdelen brengen extra kosten met zich mee. Het lijkt daarom verstandig om goed te overwegen of al deze onderdelen zinnig zijn. Dit wordt gedaan in paragraaf 7.4.

### **7.3.2. Straflo**

Bij een Straflo-turbine zit de rotor aan de rand van de rotor van de turbine. Dit lijkt hydraulisch gezien de meest aantrekkelijke optie. Tevens is bij deze optie een turbine-eenheid relatief klein. Hierdoor worden de kosten voor de civiele werken (-20 [6] -40% [36]) en voor de generator (-30 % [6]) kleiner.

Het blijkt bij dit type turbine echter moeilijk om een waterdichte afsluiting te maken tussen de rotor en de stator van de generator. Om dit probleem te voorkomen is bij Annapolis een afsluiting gemaakt werkend op hydrostatische druk. Daarvoor wordt een kleine ruimte in de afsluiting gevuld met water. Het water in de afsluiting wordt automatisch gespoeld. Bij de Straflo-turbine bij Annapolis raakte deze afsluiting verstopt doordat gespoeld werd met zout water dat mangaan materiaal afzette. [9].

In de huidige ontwikkeling van dit type turbine is het niet mogelijk om de bladen te verstellen. Dit heeft de volgende nadelen om ingezet te worden als turbine voor getij-energie:

- Het bereik van vervallen waarin de turbine rendabel energie kan winnen is kleiner
- Om ze in te zetten als pompen is een hoog startvermogen nodig
- Er kan slechts in één stroomrichting energie gewonnen worden met hoog rendement

Omdat bij de Westerschelde slechts in één stroomrichting energie gewonnen wordt en de verschillen tussen gemiddeld doodtij en gemiddeld springtij ten opzichte van andere locaties in de wereld relatief klein zijn, lijkt dit type turbine door haar lage kosten geschikt om in te zetten voor deze getijcentrale. Na de ervaringen van de Straflo-turbine bij Annapolis is dit type turbine echter in geen enkel plan voor getij-energiewinning terug te vinden. Deze negatieve ervaringen zijn blijkbaar door de verschillende ingenieurs beoordeeld als doorslaggevend en daardoor zijn in de vervolgstudies slechts Bulb-turbines gekozen. In deze studie zal dat ook gedaan worden, maar de Straflo-turbine verdient in een vervolgstudie absoluut aandacht door de situatie bij de Westerschelde.

#### **7.4. Onderdelen turbine**

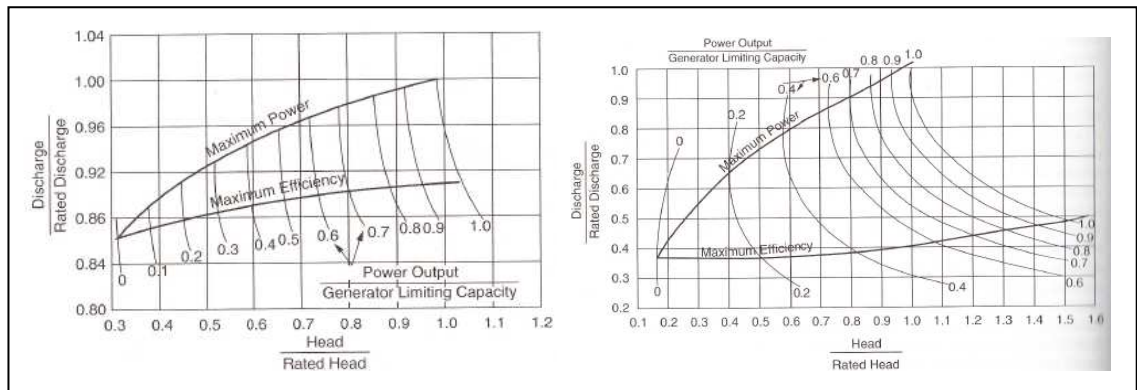
Essentiële onderdelen bij een waterkracht turbine zijn de schroef, de generator en de verbinding daartussen. Bij een Bulb-turbine zijn tevens lei- en loopschoepen aanwezig. De keuze voor het type schroefblad, schoepen, generator en verbinding tussen schroef en generator kan de kosten en de turbine-eigenschappen sterk beïnvloeden.

Zo kan gekozen worden voor verstelbare of vaste lei- en loopschoepen. Schoepen die verstelbaar zijn kosten meer, maar vergroten het bereik aan vervallen. Dit betekent dat ze meer energie per jaar opleveren.

Tevens kan bij een Bulb-turbine gekozen worden voor vaste of verstelbare schroefbladen. Turbines met verstelbare schroefbladen hebben een groter bereik aan vervallen, zijn beter in te zetten als pompen en hebben een hoger rendement bij energiewinning in de andere stroomrichting dan vaste schroefbladen. Daarnaast verbeteren ze de sluis capaciteit, maar zijn ze wel duurder dan vaste schroefbladen.

In

Figuur 7.2 staat het verschil in prestatie gegeven tussen twee turbines beiden met verstelbare loop- en leischoepen maar met verschillende schroefbladen.

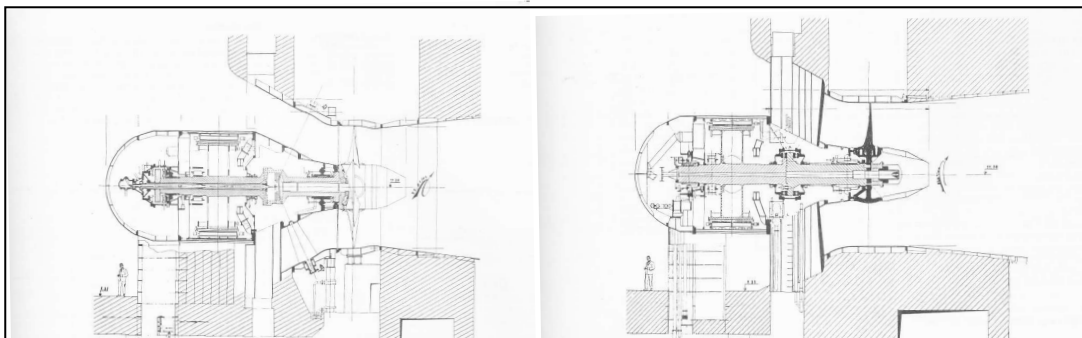


**Figuur 7.2; Prestatiecurven voor vaste (links) en verstelbare (rechts) schroefbladen [10]**

Tabel 7.2 geeft het percentuele kostenverschil tussen turbines waarbij schroefbladen en de schoepen verstelbaar zijn of juist gefixeerd [18]. Daaronder staan afbeeldingen gegeven van een turbine met verstelbare bladen en verstelbare lei- en loopschoepen en een turbine met vaste bladen en vaste loopschoepen.

Kostenelement	Verstelbare bulb-turbine	Niet-verstelbare bulb-turbine
Apparatuur	100	85
Constructie	100	68

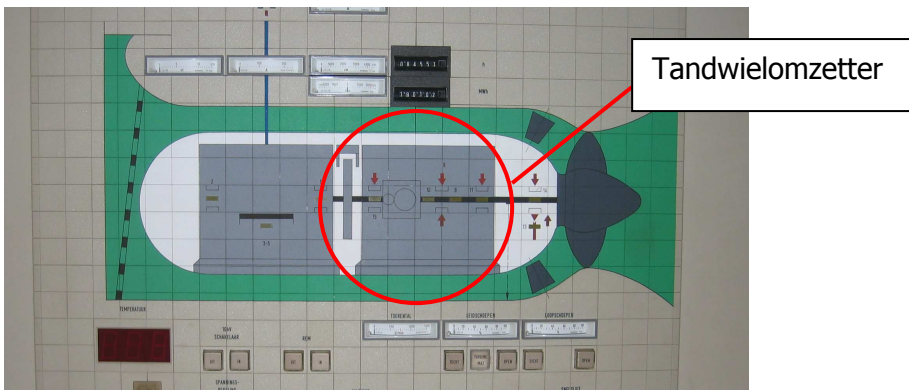
**Tabel 7.2; Verhouding in kosten tussen verstelbare en vaste bulb-turbine**



**Figuur 7.3; Verstelbare (links) en niet-verstelbare turbine (rechts) [18]**

Daarnaast is het mogelijk om het aantal schroefbladen aan te passen. Wanneer een turbine gekozen wordt met drie bladen stroomt er een hoger debiet door dan een soortgelijke turbine met vier bladen.

Doordat er niet met een constant verval geturbineerd wordt, zou het zonder aanpassingen niet mogelijk zijn om elektriciteit op te wekken met een constante frequentie. Er zijn verschillende mogelijkheden om dit probleem op te lossen. In de riviercentrales en de meest recente plannen voor getijcentrales zijn daarom tandwielomzetter (step-up-gears) geïmplementeerd [6]. Deze tandwielomzetter zitten net als de generator in de 'bulb'. Daardoor wordt de bulb langer.



**Figuur 7.4; Foto van schematisatie turbine op meterkast bij Alphen aan de Maas**

Bij het ontwerp van de turbine voor de Westerschelde wordt uitgegaan van een turbine met van de volgende eigenschappen:

- Energiewinning in één richting
- Verstelbare schroefbladen
- Verstelbare lei- en loopschoepen
- Drie schroefbladen
- Tandwielomzetter

Om de optimale set aan eigenschappen te bepalen is een vervolgonderzoek nodig waarbij een kosten-batenanalyse gedaan wordt voor de verschillende onderdelen. Daarbij zal het in eerste instantie interessant zijn om te kijken of de turbines mogelijk gebruikt kunnen worden als pompen.

## 7.5. Afmetingen

### 7.5.1. Diameter

Met de diameter van de turbine wordt hier de diameter van de stroombuis bij de waaier bedoeld. Deze diameter bepaalt ook de overige afmetingen van de stroombuis en de betonconstructie. In deze paragraaf zal de keuze voor een bepaalde diameter worden toegelicht.

In het algemeen geldt dat wanneer het aantal turbines geminimaliseerd wordt de kosten voor een waterkrachtcentrale kleiner worden. Dit betekent dat het economisch aantrekkelijk is om weinig turbines met een grote diameter te plaatsen. Tevens hebben turbines met een grote diameter vaak een hoger rendement dan turbines met een kleine diameter. Wanneer de instroom echter sterk varieert in de tijd is het efficiënter om een gedeelte van de centrale uit te kunnen zetten. Dan wordt het aantrekkelijker om meer turbines te plaatsen met een kleine diameter [23]. Daarnaast zijn er economische schaalvoordelen door het plaatsen van een groot aantal turbines. Zo kost het produceren en plaatsen van de 10<sup>e</sup> turbine netto 33 % minder dan de eerste turbine. De 20<sup>e</sup> turbine is zelfs 50 % goedkoper dan de eerste turbine. Toch blijft het vaak, ondanks dit economische schaalvoordeel, economisch aantrekkelijker om weinig turbines met een grote diameter te plaatsen in plaats van veel turbines met een kleine diameter. In de huidige ontwikkeling van Bulb-turbines is het daarbij maximaal mogelijk om Bulb-turbines met een diameter van 10 meter te produceren [6]. Ten slotte dient vermeld te worden dat om rekening te houden met mogelijk onderhoud van één van de turbines het verstandig is om in ieder geval twee



turbines te plaatsen om de waterkrachtcentrale zo veel mogelijk operationeel te houden.

Het verval waarbij een turbine kan starten hangt af van de kracht die nodig is om te turbine te laten draaien. De kracht die nodig is, wordt bepaald door het gewicht van de waaier en dus de diameter. De precieze relatie tussen startverval en diameter is niet bekend, maar bij de riviercentrale van Maurik ( $D=4$ ) is minimaal een startverval van 1.50 meter nodig. Het startverval heeft vaak een relatie met het gemiddelde verval en het ontwerpverval. In Tabel 7.3 is de diameter van verschillende ontwerpen bij getijcentrales gegeven voor verschillende ontwerpvervallen.

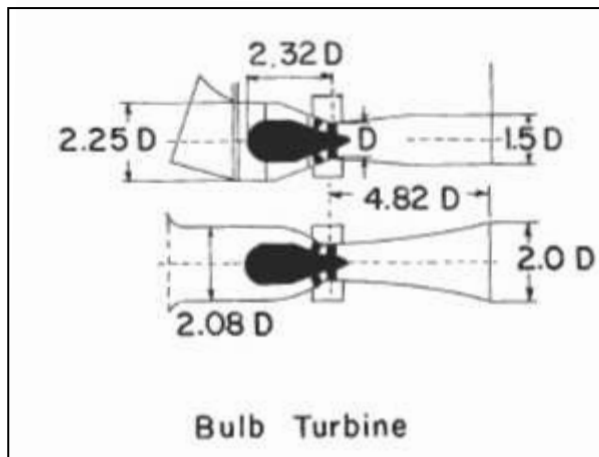
Locatie	Diameter	Ontwerpverval	Startverval
Kislaya Guba	3.3	1.28	-
Maurik	4.0	3.0	1.50
La Rance	5.35	5.65	-
Sihwa	7.5	5.82	2.0
Severn	9.0	10	-

**Tabel 7.3; Verhouding diameter/ontwerpverval voor getijcentrales**

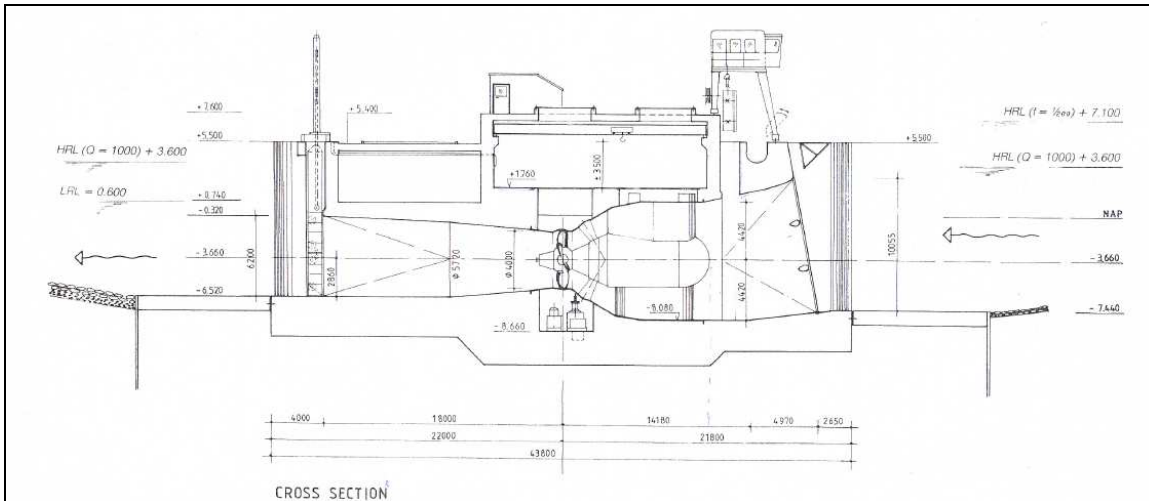
Het gemiddeld verval van de turbines bij de riviercentrales in Nederland ligt tussen de 3 en 4 meter. Voor de getijcentrale in de Prosperpolder zal het gemiddeld verval ook tussen deze waarden liggen. Daarom wordt voor het ontwerp van de turbine uitgegaan van een diameter van 4 meter.

### 7.5.2. Stroombuis

Met behulp van een literatuurstudie zijn gebruikelijke afmetingen voor een Bulb-turbine bepaald [19]. Deze worden hier vergeleken met de afmetingen voor de Bulb-turbines die geplaatst zijn in Nederland [37].



**Figuur 7.5; Globale afmetingen Bulb-turbine [19]**



**Figuur 7.6; Dwarsdoorsnede turbine Alphen aan de Maas [37]**

Afmeting	Kpordze & Warnick	Alphen aan de Maas	Rel. verschil
Inlaathoogte	2,25 D	2,21 D	- 2 %
Uitlaathoogte	1,5 D	1,55 D	+ 3 %
Inlaatbreedte	2,08 D	1,9 D	- 9 %
Uitlaatbreedte	2,0 D	1,9 D	- 5 %
Lengte bulb	2,32 D	2,8 D	+ 22 %
Lengte uitlaat	4,82 D	4,5 D	- 7 %

**Tabel 7.4; Vergelijking afmetingen voor stroombuis Bulb-turbine**

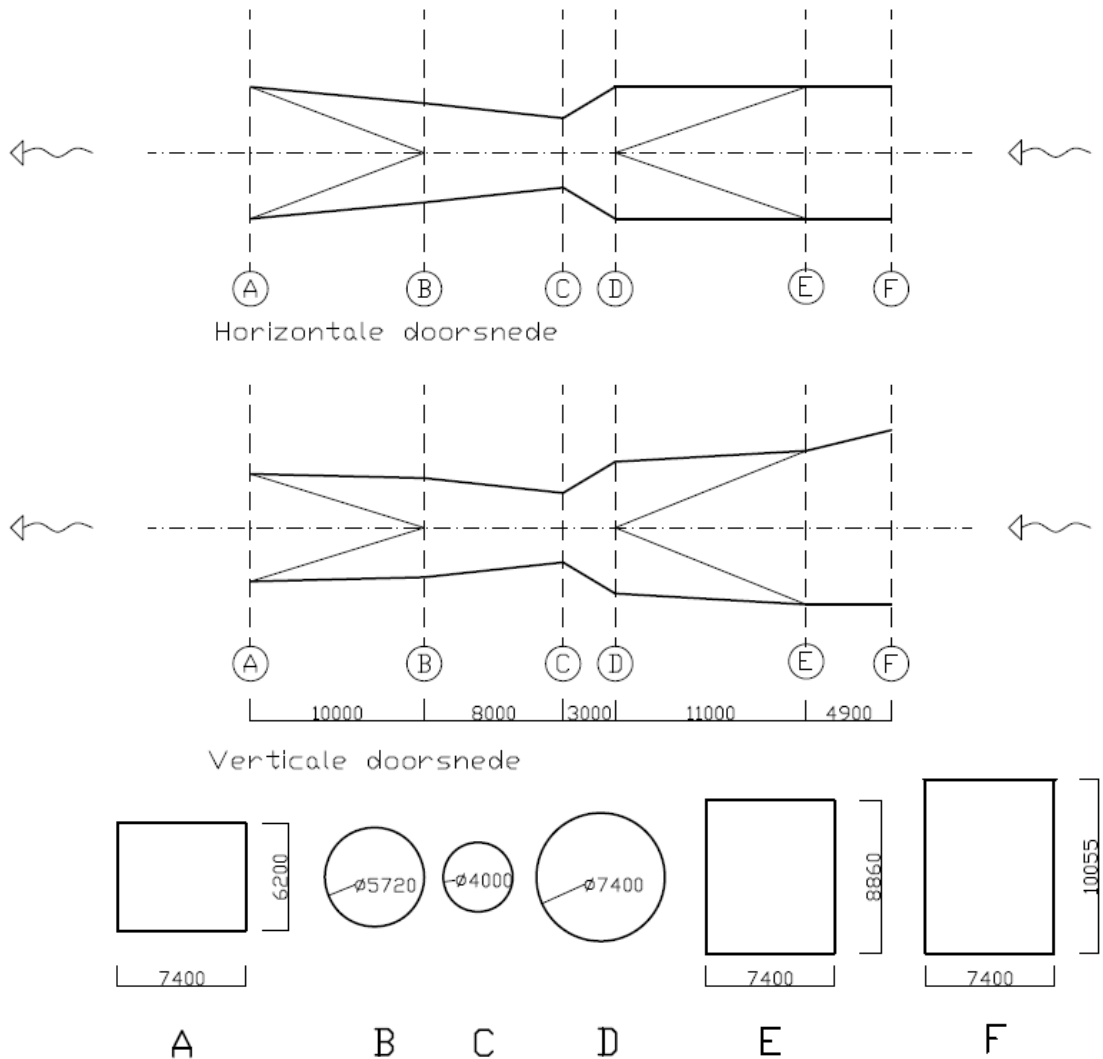
De meeste verschillen in afmetingen zijn klein. Het enige relatief grote verschil is te vinden bij de grotere lengte van de bulb. Dit kan verklaard worden doordat in de Nederlandse centrale in de bulb een tandwielomzetter aanwezig is. De gegevens van Kpordze en Warnick zijn gebaseerd op riviercentrales die gebouwd zijn voor 1983. Voor 1983 werden tandwielomzetter nog niet gebruikt voor turbines.

De diameter van de bulb zelf ligt tussen de 0,8 D en 1,2 D [6]. Bij de riviercentrale in Alphen aan de Maas is dit 0,9 D.

De afmetingen die bij de riviercentrales zijn gevonden worden gebruikt voor het ontwerp van de turbine bij deze getijcentrale. De riviercentrale heeft namelijk dezelfde diameter en houdt rekening met een tandwielschakelaar.

### 7.5.3. Volume stroombuis

Met de gekozen afmetingen is het mogelijk om het volume van de stroombuis van de turbine te schatten. Daarvoor zal de stroombuis geschematiseerd worden als in Figuur 7.7:



**Figuur 7.7; afmetingen stroombuis**

Het volume van de stroombuis wordt van B tot E wordt bepaald door de inhoud van de gemiddelde cilinder te berekenen. Als voorbeeld wordt de formule voor de inhoud tussen B en C gegeven.

$$V_{BC} = \pi \cdot \left( \frac{r_B + r_C}{2} \right)^2 \cdot \Delta L_{BC} = \pi \cdot \left( \frac{2,86 + 2,00}{2} \right)^2 \cdot 8 = 148 m^3$$

Waarin:

$V_{BC}$  = volume stroombuis tussen lijnen B en C [ $m^3$ ]

$r_B$  = straal bij lijn B [m]

$r_C$  = straal bij lijn C [m]

$\Delta L_{BC}$  = afstand tussen lijnen B en C [m]

Het volume van de stroombuis tussen A en B en E en F wordt bepaald door het gemiddelde te nemen van een buis met variabele rechthoekige doorsnede en van een buis met een variabele ronde doorsnede. Als voorbeeld wordt de berekening voor het volume van de inhoud tussen A en B gegeven:

$$V_{AB} = 0,5 \cdot (V_{kubus} + V_{cilinder}) = 0,5 \cdot \left( \left( \frac{B_A + B_B'}{2} \right) \cdot \left( \frac{h_A + h_B'}{2} \right) + \pi \cdot \left( \frac{r_A' + r_B}{2} \right)^2 \right) \cdot \Delta L_{AB}$$

$$B_B' = 2 \cdot r_B$$

$$h_B' = 2 \cdot r_B$$

$$r_A' = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{B_B + h_B}{2} \right)$$

Zo kan het totale volume van de stroombuis worden bepaald. De gekozen parameters en het berekende volume staan gegeven in Tabel 7.5:

Lijn	B [m]	h [m]	r [m]	$\Delta L$ [m]	$V_{kubus}$	$V_{cilinder}$	V [m <sup>3</sup> ]
A	6,80	7,40	6,20	0			
B	5,72	5,72	5,72	10	391	308	349
C	4,00			8		148	148
D	7,40			3		77	77
E	8,84	7,40	8,84	11		570	570
F	8,73	7,40	10,06	4,9	343	297	320
Totaal				36,9			1464

**Tabel 7.5; Bepaling volume stroombuis**

#### 7.5.4. Volume beton

Voor een schatting voor het volume beton nodig voor een getijcentrale stellen Fay en Smachlo [16] het volgende:

$$V_b = n_t \cdot 42 \cdot R \cdot D^2 = 5 \cdot 42 \cdot 9,0 \cdot 4,0^2 = 5 \cdot 3360 = 16800 m^3 \quad (20)$$

Waarin:

$V_b$  = volume beton voor turbines [m<sup>3</sup>]

$n_t$  = aantal turbines [-]

$D$  = diameter turbine [m]

$R$  = gemiddeld tijverskil [m]

$H_s$  = significante golfhoogte [m]

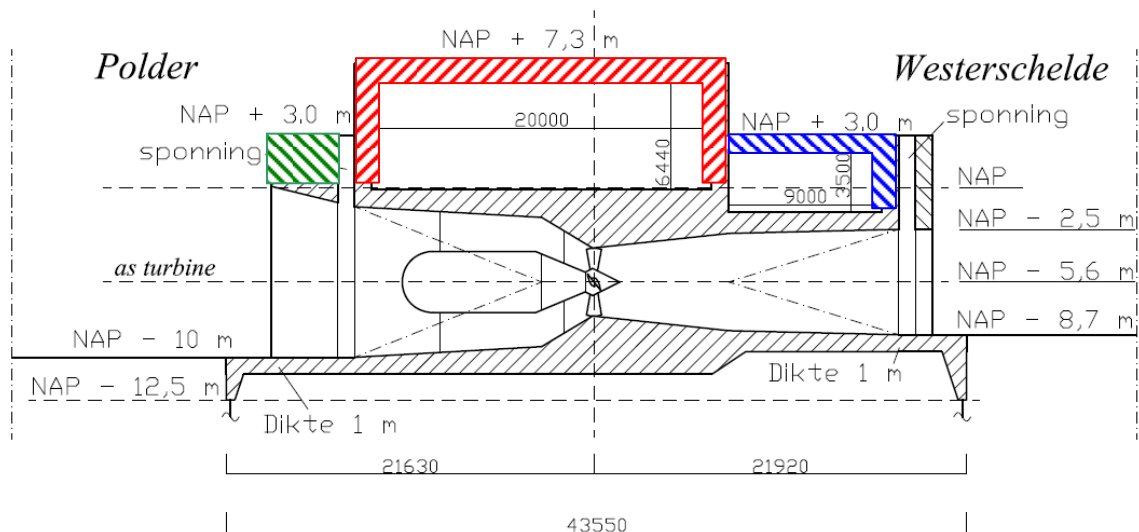
Uit de kostenraming voor Borgharen is te zien dat het totaal aan in situ geplaatst beton gelijk is aan 2222 m<sup>3</sup> per turbine. Er is ook prefab beton gebruikt. Wanneer gerekend wordt met dezelfde kostprijs voor in situ beton is het volume beton 3000 m<sup>3</sup> per turbine. In werkelijkheid zal het volume beton voor de riviercentrale in Borgharen hier tussenin liggen.

Voor de turbine voor de getijcentrale langs de Westerschelde wordt uitgegaan van een volume beton van 3000 m<sup>3</sup> per turbine. Dit ligt tussen de waarde gevonden via formule (20) en de kostenraming van Borgharen.

#### 7.5.5. Afmetingen betonconstructie

Er wordt uitgegaan van het ontwerp van de turbine voor de riviercentrale in Alphen aan de Maas. De breedte van een turbine-eenheid is daar 9 meter.

De wanden van de bovenconstructie hebben ongeveer een dikte van 1 meter. Daarmee is het volume beton van de bovenconstructie te berekenen.



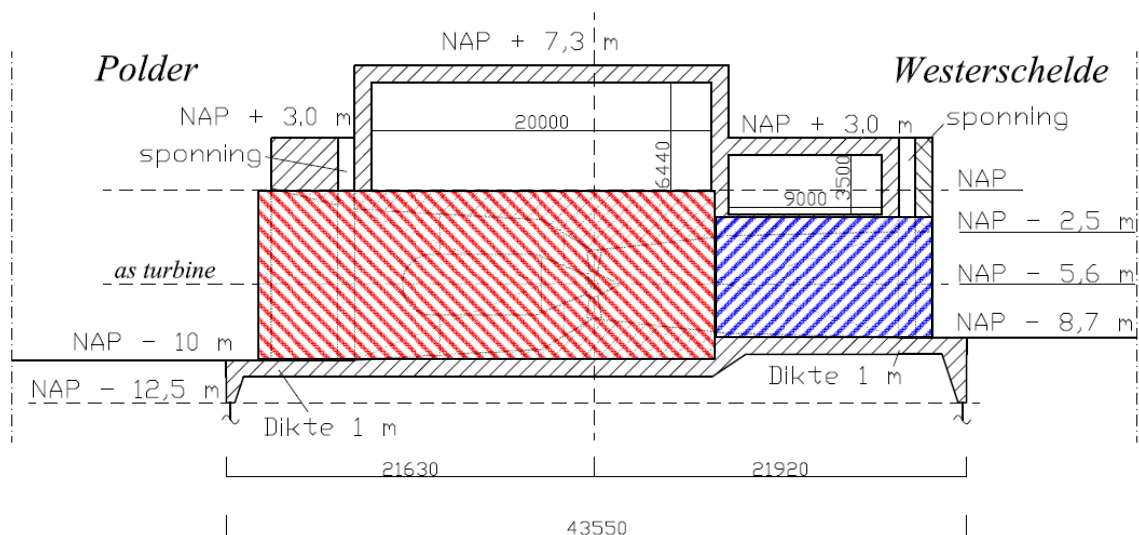
**Figuur 7.8; Onderdelen ten behoeve van berekening volume bovenconstructie**

Naam	Kleur	Lengte	Breedte	Hoogte	Dikte	Volume
Turbinehal 1	Blauw	10 m	9 m	4,5 m	1 m	185 m <sup>3</sup>
Turbinehal 2	Rood	22 m	9 m	8,8 m	1 m	650 m <sup>3</sup>
Bovenkant voor	Groen	4,9 m	9 m	3,4 m	-	150 m <sup>3</sup>
					<b>Totaal</b>	<b>985 m<sup>3</sup></b>

**Tabel 7.6; Waarden voor volume bovenconstructie**

De dikten overgenomen uit tekeningen van de riviercentrale zijn relatief hoog. Het volume beton van het de bovenconstructie is daardoor ook hoger dan men verwacht bij 'normale' constructies.

Het volume waarin de stroombus zich bevindt, is bepaald met Figuur 7.9 en Tabel 7.7:



**Figuur 7.9; Onderdelen ten behoeve van berekening volume bij stroombus**

Naam	Kleur	Lengte	Breedte	Hoogte	Volume
Om stroombuis 1	Rood	26,9 m	9 m	10,1 m	648 m <sup>3</sup>
Om stroombuis 2	Blauw	10 m	9 m	7,2 m	2436 m <sup>3</sup>
Stroombuis					- 1464 m <sup>3</sup>
				<b>Totaal</b>	1620 m <sup>3</sup>

**Tabel 7.7; Waarden voor volume om stroombuis**

Het volume van de vloer is te bepalen door de lengte (43,6) te vermenigvuldigen met de breedte (9) en de dikte. Met een dikte van 1 meter wordt een volume voor de vloer van 392 m<sup>3</sup> gevonden. Het totale volume aan beton is dan te berekenen. Dit komt uit op 2997 m<sup>3</sup> beton per turbine. Dit is ongeveer gelijk aan het volume dat is bepaald in de vorige paragraaf.

De afmetingen van de vloer, de daken en de wanden van de turbine zijn hoger dan verwacht bij 'normale' constructies. Bij deze constructies spelen vaak sterkte-eisen en stijfheidseisen een belangrijke rol. Verwacht wordt dat bij het ontwerp van de turbine vooral stabiliteitseisen van belang zijn. De relatief grote betonafmetingen zijn dan vooral nodig voor het verkrijgen van een groot gewicht.

## 7.6. Karakteristieken turbine

### 7.6.1. Ontwerpverval

Het ontwerpverval<sup>10</sup> bepaalt samen met het ontwerpdebiet het maximale vermogen van de generator. Het ontwerpverval zal groter zijn dan het gemiddelde verval. Het gemiddelde verval is geschat op 3,5 meter en voor het ontwerpverval zal daarom gekozen worden voor een waarde van 4,0 meter. In hoofdstuk 10 wordt het ontwerpverval nauwkeuriger bepaald met een kosten-batenanalyse.

### 7.6.2. Ontwerpdebiet

Voor twee turbines met dezelfde diameter maar een verschillend ontwerpverval is de verhouding tussen het ontwerpdebiet als volgt:

$$\frac{Q}{Q_1} = \sqrt{\frac{H}{H_1}} \quad (21)$$

Waarin:

Q = debiet [m<sup>3</sup>/s]

H = verval [m]

Het ontwerpverval bij de riviercentrale van Alphen aan de Maas is 4,0 meter en het ontwerpdebiet is 100 m<sup>3</sup>/s. Voor deze turbine is met een ontwerpverval van 4,0 m het ontwerpdebiet gelijk.

<sup>10</sup> Bij turbines zijn er verschillende termen om de karakteristieken van de turbine te beschrijven.  $H_{\text{design}}$  en  $Q_{\text{design}}$  zijn het verval en debiet bij maximale efficiëntie van de turbine. Hier wordt echter met het ontwerpverval  $H_{\text{rated}}$  en met ontwerpdebiet  $Q_{\text{rated}}$  bedoeld. Deze laatste twee parameters beschrijven het maximale vermogen van de generator.

### 7.6.3. Geïnstalleerd vermogen

Met het ontwerpdebiet en het ontwerpverval is het geïnstalleerde vermogen uit te rekenen met formule (6).

$$P = \eta \cdot \rho \cdot g \cdot H_d \cdot Q_d = 0.90 \cdot 1015 \cdot 9.81 \cdot 4.0 \cdot 100 = 3,6 \cdot 10^6 W$$

Het geïnstalleerde vermogen is 3,6 MW.

### 7.6.4. Rotatiesnelheid

Een eerste schatting voor de rotatiesnelheid bij een gegeven ontwerpdebiet en diameter kan worden berekend met de volgende formule [19].

$$D = 4.186 \cdot \left( \frac{Q}{n} \right)^{0.309} \tag{22}$$
$$n = \frac{Q}{\left( \frac{D}{4.186} \right)^{1/0.309}} = \frac{100}{\left( \frac{4}{4.186} \right)^{1/0.309}} = 116 rpm$$

Vervolgens kan bepaald worden hoeveel poolparen voor de generator nodig zijn. Het aantal poolparen dient in ieder geval een even paar te zijn en het liefst deelbaar door vier. De bepaling van het aantal poolparen kan gedaan worden met de volgende formule<sup>11</sup>:

$$a_{pool} = \frac{3000}{n} = \frac{3000}{116} = 26 \tag{23}$$

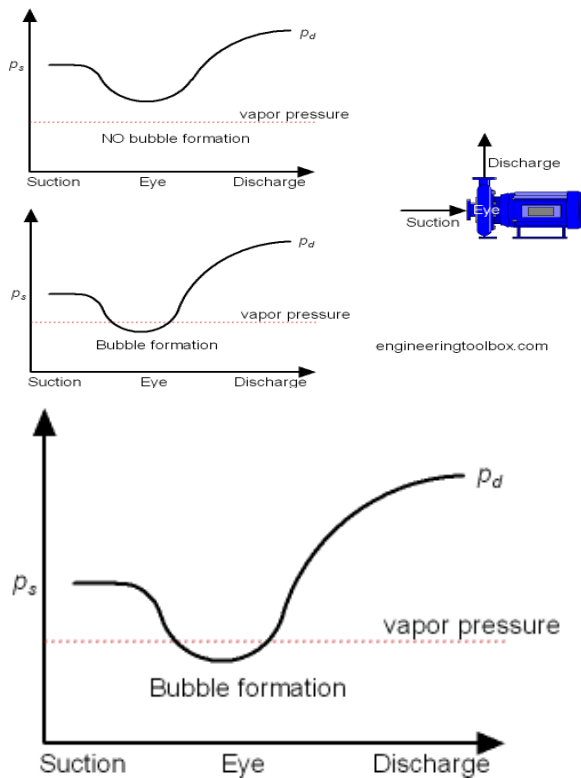
Bij een grote spreiding aan vervallen wordt vaak een lage snelheid aangehouden (Severn 50 rpm [8]). Bij getijcentrales is de spreiding vaak relatief groot. De gevonden snelheid is daarom aan de hoge kant. Welke invloed het plaatsen van extra poolparen heeft op de kosten en de energieopbrengsten is echter onduidelijk. In een vervolgonderzoek zal deze invloed bepaald moeten worden.

### 7.6.5. Cavitatie

Cavitatie kan optreden wanneer de druk in de turbine onder de dampspanning daalt. Net zoals bij het koken van water ontstaan dan dampbellen. In Figuur 7.10 is te zien wat kan gebeuren als lokaal de snelheid van water toeneemt.

---

<sup>11</sup> Deze formule geldt alleen voor in Europa, waar de frequentie van het elektriciteitsnet 50 Hz is.



**Figuur 7.10; Drukverloop zonder (links) en met (rechts) cavitatie [15]**

Om cavitatie te voorkomen dient de maximale hoogte boven de waterspiegel aan het uiteinde ( $H_s$ ) berekend te worden op de volgende wijze:

$$H_{s,\max} = \frac{p_{atm} - p_v}{\rho_w \cdot g} - \sigma \cdot H_n \quad (24)$$

Waarin:

$H_{s,\max}$  = maximale hoogte boven waterspiegel aan uiteinde [m]

$p_{atm}$  = atmosferische druk [Pa]

$p_v$  = dampspanning [Pa]

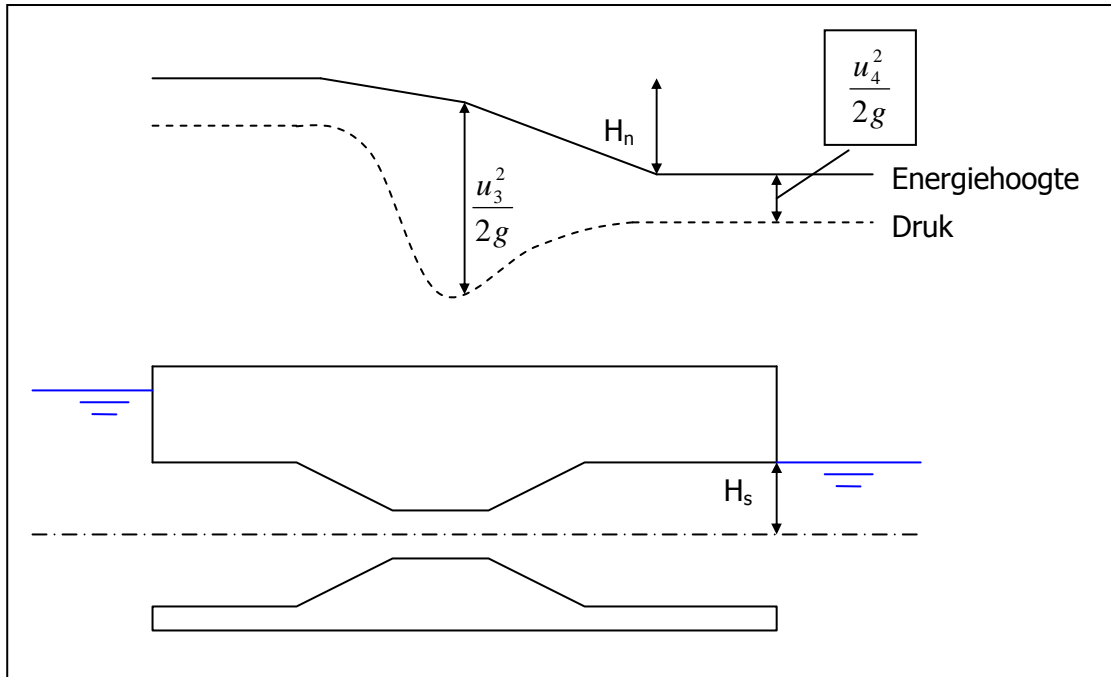
$\rho_w$  = dichtheid water [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$g$  = zwaartekrachtsversnelling [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$\sigma$  = constante van Thoma [-]

$H_n$  = netto verval [m]





**Tabel 7.8; Visuele toelichting op parameters  $H_s$  en  $H_n$**

$u_3$  = snelheid van water in keel [m/s]

$u_4$  = snelheid van water aan uiteinde [m/s]

Het hoogteverschil  $H_s$  is negatief wanneer de as van de versmalling onder de waterspiegel aan het uiteinde ligt.

De dampspanning is afhankelijk van de temperatuur [15]. Dit is te zien in Tabel 7.9.

Temperatuur	Dampspanning
0	0.6
10	1.2
20	2.3
30	4.3
40	7.7
50	12.5
60	20
70	32.1
80	47.5
90	70
100	101.33

**Tabel 7.9; Verhouding dampspanning temperatuur**

Een hogere temperatuur voor het water betekent een hogere dampspanning en dus een grotere kans op cavitatie. Er wordt vanuit gegaan dat het water niet warmer wordt dan 30 graden. Er wordt daarom een dampspanning van 4.3 Pa gekozen.

Om te bepalen of een turbine gevoelig is voor cavitatie wordt de constante van Thoma gebruikt. Deze is met formules (25) en (26) te bepalen [19]:

$$N_s = n \cdot \frac{P^{0.5}}{H^{1.25}} = 116 \cdot \frac{(3,6 \cdot 10^3)^{0.5}}{4,0^{1.25}} = 1223 \text{rpm} \quad (25)$$

$$\sigma = 76 \cdot 10^{-6} \cdot N_s^{1.485} = 76 \cdot 10^{-6} \cdot 1223^{1.485} = 2,92 \quad (26)$$

Waarin:

$N_s$  = de specifieke snelheid [-]

$n$  = rotatiesnelheid [rpm]

$P$  = geïnstalleerd vermogen [kW]

$H$  = ontwerpverval [m]

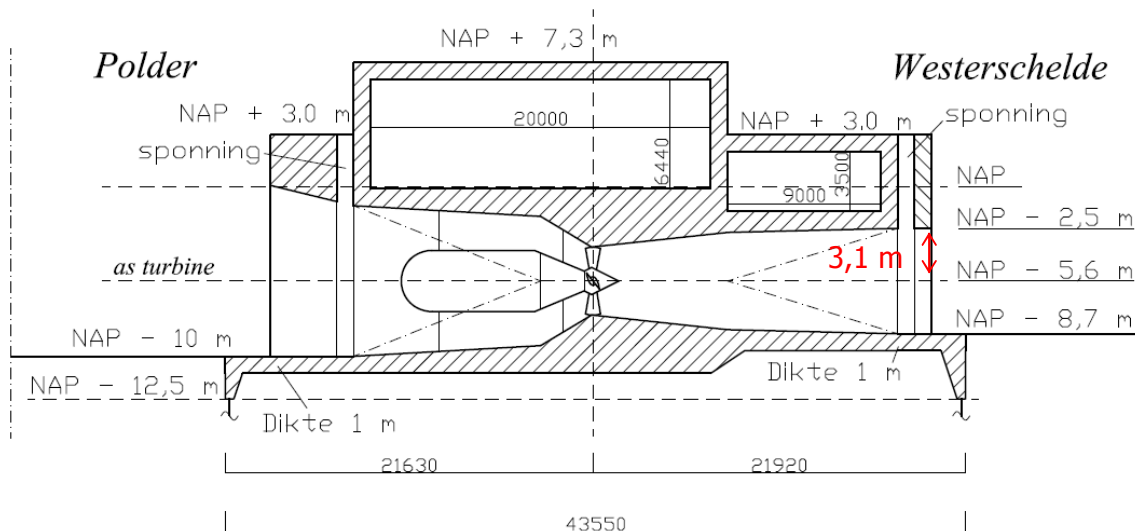
$\sigma$  = constante van Thoma [-]

In de stroombuis gaat een gedeelte van de energie verloren aan wrijvings- en vertragsingsverliezen. Het netto verval is het verval over de turbine met deze verliezen ervan afgetrokken. Dit is ongeveer 2 % van het verval.

Met het ontwerpverval gelijk aan 4.0 meter, is de waarde voor  $H_s$  te bepalen met formule (24):

$$H_{s,\max} = \frac{101,3 \cdot 10^3 - 4,3 \cdot 10^3}{1010 \cdot 9,81} - 2,95 \cdot 4,0 \cdot 0,98 = 9,79 - 11,45 = -1,66 \text{m}$$

Bij dit ontwerp van de turbine is  $H_s$  gelijk aan -3,1 m (zie Figuur 7.11). Met het huidige ontwerp voldoet deze turbine daarom aan de eisen voor cavitatie. Ook is berekend welk ontwerpverval maximaal gekozen kan worden. Dit is gelijk aan 4,5 meter.



**Figuur 7.11; Doorsnede turbine**

### 7.6.6. Debiet tijdens vullen polder

De turbines kunnen ook fungeren als sluizen om de polder met water te kunnen vullen. Wanneer de turbines symmetrisch zouden zijn, is de afvoercoëfficiënt gelijk bij sluizen en turbineren in beide richtingen. De afvoercoëfficiënt is dan als volgt te berekenen:

$$m = \frac{Q_d}{A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_d}} = \frac{100}{\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 4^2 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 4,0}} = 0,89 \quad (27)$$

Waarin:

m = afvoercoëfficiënt [-]

$Q_d$  = ontwerpdebiet [ $m^3/s$ ]

A = oppervlak bij waaier [ $m^2$ ]

g = zwaartekrachtsversnelling [ $m/s^2$ ]

$H_d$  = ontwerpverval [m]

Doordat de turbine asymmetrisch is, wordt verwacht dat de afvoercoëfficiënt in de andere richting (van zee naar polder) lager is dan de berekende waarde. Bernshtein zegt hierover dat de sluiscapaciteit 70 % van de turbineercapaciteit is [6]. De afvoercoëfficiënt zou dan gelijk zijn aan 0,62. Met een hydraulisch model zou meer inzicht verkregen kunnen worden in de stroming door de turbine. Voor het model wordt uitgegaan van 0,62 als waarde voor de afvoercoëfficiënt.

$$Q_{vul} = 0,62 \cdot a_t \cdot A_t \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_{ws} - h_{polder})} \quad (28)$$

Waarin:

m = afvoercoëfficiënt [-]

$Q_{vul}$  = debiet bij vullen polder [ $m^3/s$ ]

$A_t$  = oppervlak bij waaier [ $m^2$ ]

g = zwaartekrachtsversnelling [ $m/s^2$ ]

$h_{ws}$  = waterstand op Westerschelde [NAP + m]

$h_{polder}$  = waterstand in polder [NAP + m]

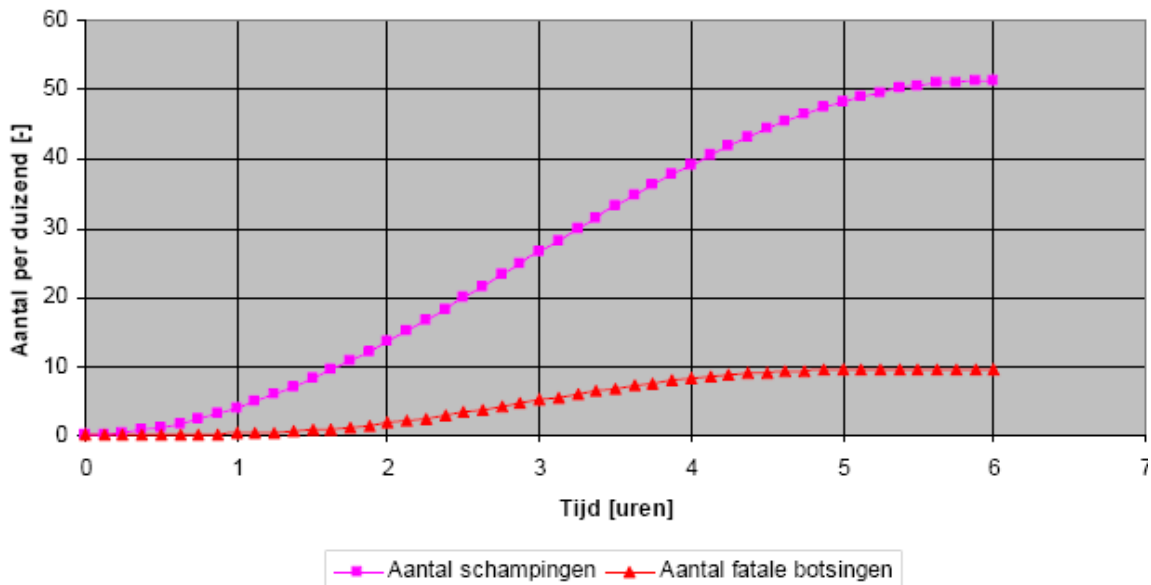
### 7.7. Visvriendelijkheid turbine

Uit ervaringen met waterkrachtcentrales in riviersystemen is bekend dat sterfte van vissen die door de turbines heen zwemmen of worden gezogen kan optreden [33]. Drie processen kunnen ten grondslag liggen aan vissterfte door het passeren van turbines [11]:

- Lokaal hoge drukverschillen
- Turbulentie
- Aanvaring met de rotorbladen.

De kans op aanvaring met rotorbladen bij een Bulb-turbine is berekend door J. Arnold van Nijhuis Pompen. Dit is gedaan voor een halve getijdycclus voor een Bulb-turbine met een diameter van 2,6 meter bij de Grevelingendam. Dit is te zien in Figuur 7.12.

### Vispassage door een 2600 [mm] turbine



**Figuur 7.12; promille van passerende vissen die geraakt worden door turbinebladen [5]**

Ook is bepaald dat bij een grotere diameter voor de turbine de kans op fatale botsingen afneemt. Voor de ontworpen turbine zal de theoretische kans op sterfte van een passerende vis door aanvaring met rotorbladen dus minder dan 1% zijn.

Bij La Rance is de ervaring dat vissterfte gering is, maar dat de visgemeenschap verandert [24]. Bij Annapolis in Canada is de vissterfte relatief hoog [11]. Dit laatste kan verklaard worden doordat hier een Straflo-turbine is toegepast in plaats van een Bulb-turbine. Door de relatief lage rotatiesnelheid bij de Bulb-turbine wordt dit als de minst visonvriendelijke turbine gezien. Dit is een extra reden om voor dit type turbine te kiezen.

Wanneer bewust om wordt gegaan bij het ontwerp van de getijcentrale lijkt vissterfte beperkt te blijven tot relatief kleine aantallen. Voor dit bewust omgaan met vissen, zal allereerst onderzoek verricht moeten worden naar de gevoeligheid van de vissen aanwezig in de Westerschelde voor vissterfte bij het passeren van de turbines. Daarna zal bekeken worden welke aanpassingen nuttig zouden kunnen zijn om vissterfte te beperken. Ten slotte moet beoordeeld worden welke methode het beste past bij de verschillende wensen van de betrokken partijen.

## 7.8. Kosten

Om de kosten te bepalen van een turbine worden twee methoden toegepast. Allereerst wordt een methode toegelicht die is gemaakt aan de hand van een begroting voor een riviercentrale in Borgharen en gegevens van turbineleverancier Alstom. De tweede methode is een grovere methode die is gebaseerd op de kosten van de huidige riviercentrales in Nederland.

## 7.8.1. Methode 1; Begroting Borgharen en Alstom

### Inleiding

De kosten voor de turbine kunnen onderscheiden worden in de kosten voor de elektromechanische apparatuur en voor de civiele werken. Allereerst zullen de kosten voor de elektromechanische apparatuur behandeld worden. Daarna worden de kosten voor de civiele werken toegelicht.

### Elektromechanische apparatuur

In 2003 en 2007 zijn gegevens over kostenkentallen elektromechanische apparatuur ter beschikking gesteld door Alstom. Respectievelijk hebben Gilles [35] en Swane<sup>12</sup> [32] met behulp van regressie formules gegenereerd uit deze gegevens. Deze staan hieronder weergegeven. In Gilles formule is rekening gehouden met schaalvoordelen voor een groot aantal turbines. Swane heeft de resultaten van zijn formule vergeleken met de kosten voor elektromechanische apparatuur bij getijcentrales in China en Korea. De verschillen tussen de waarden waren opmerkelijk klein. De kosten voor manuren zijn in Nederland echter hoger dan China en Korea.

Gilles 2008:

$$K = 10646 \cdot a_t \cdot P_t^{0.70} \cdot H_d^{-0.26} \quad (29)$$

Swane 2007:

$$K = 4,4 \cdot 10^6 + 9,5 \cdot 10^4 \cdot a_t \cdot H_d^{0.18} \cdot D^2 \quad (30)$$

Waarin:

$a_t$  = aantal turbines [-]

$P_t$  = geïnstalleerd vermogen van turbine [kW]

$H_d$  = ontwerpverval [m]

$D$  = diameter turbine [m]

Bekend is dat de turbines met elektromechanische apparatuur voor de riviercentrale van Linne ongeveer 25 miljoen gulden hebben gekost<sup>13</sup>. Met een inflatie percentage van 3,5% en een verhouding tussen gulden en euro van 2,20731 is dat gelijk aan 21,8 miljoen euro voor een prijspeil in 2009. De berekening is getoond in onderstaande formule.

$$K_{2009} = \frac{K_{1990}}{f_{euro/gulden}} \cdot (1 + rv)^{19} = \frac{25 \cdot 10^6}{2,20731} \cdot (1 + 0,035)^{19} = 21,8 \cdot 10^6$$

Waarin:

$K_{2009}$  = Kosten in 2009 [€]

$K_{1990}$  = Kosten in 1990 [€]

$f_{euro/gulden}$  = factor tussen euro en gulden [-]

$rv$  = rentevoet [-]

<sup>12</sup> Van Harn was de eerste die een formule heeft gegenereerd uit de ter beschikking gestelde gegevens van Alstom. Swane heeft een verbetering in deze formule aangebracht ( $H^{0.25} \rightarrow H^{0.18}$ ).

<sup>13</sup> Dit is een getal geschat door Henk Haas – oud werknemer van Royal Haskoning – die mee heeft gewerkt aan de bouw van de riviercentrale in Linne

De riviercentrale in Linne heeft de volgende kenmerken.

- 4 turbines ( $N_t$ )
- Geïnstalleerd vermogen per turbine 4000 kW ( $P_t$ )
- Ontwerpverval 4 meter (H)
- Diameter 4 meter (D)

Hiermee zijn de kosten volgens de formules van Gilles en Swane te bepalen. Dit is weergegeven in Tabel 7.10.

Formule	Kosten [mil. €]	Verskil met Linne [mil. €]	Relatief verschil met Linne [%]
Linne (Werkelijk)	21,8	n.v.t.	n.v.t.
Gilles	9,7	12,1	- 56 %
Swane	11,9	9,9	- 45 %

**Tabel 7.10; Vergelijking tussen kosten Linne en formules Swane en Gilles**

Beide formules lijken niet te gelden voor de riviercentrale van Linne. Gilles formule is niet geldig voor het lage aantal turbines. De formule van Swane is niet geldig door de lage arbeidskosten. De trends die beide formules geven zijn echter wel van belang voor het ontwerp van de getijcentrale. Ze worden daarom beide gecorrigeerd met een vermenigvuldigingsfactor. Er wordt bekeken welke invloed het aantal turbines, het ontwerpverval en ontwerpdebiet hebben op de kosten.

Gilles 2008:

$$K = c_{gilles} \cdot a_t \cdot Q_t^{0.70} \cdot H_d^{0.44}$$

$$(P_t \sim Q_t \cdot H_d)$$

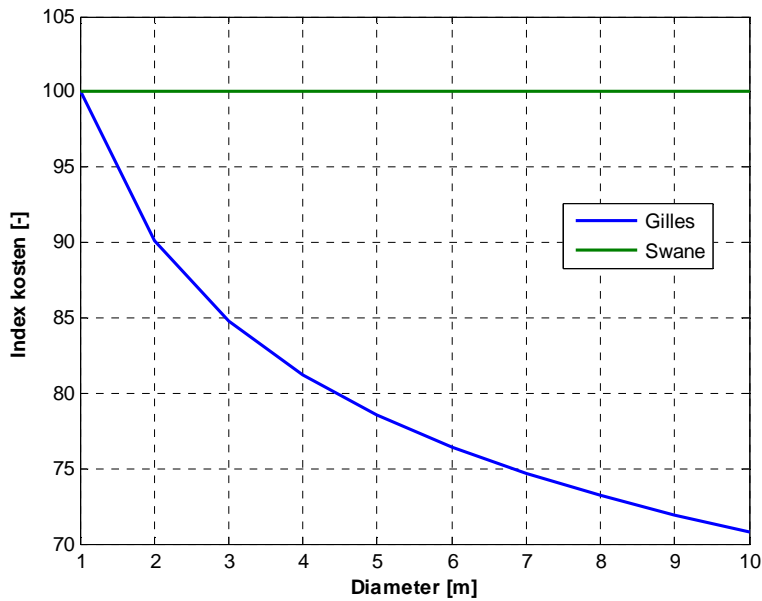
Swane 2007:

$$K = c_{swane} + \frac{c_{swane}}{46,4} \cdot a_t \cdot H_d^{0.18} \cdot Q_t$$

$$(D^2 \sim Q_t)$$

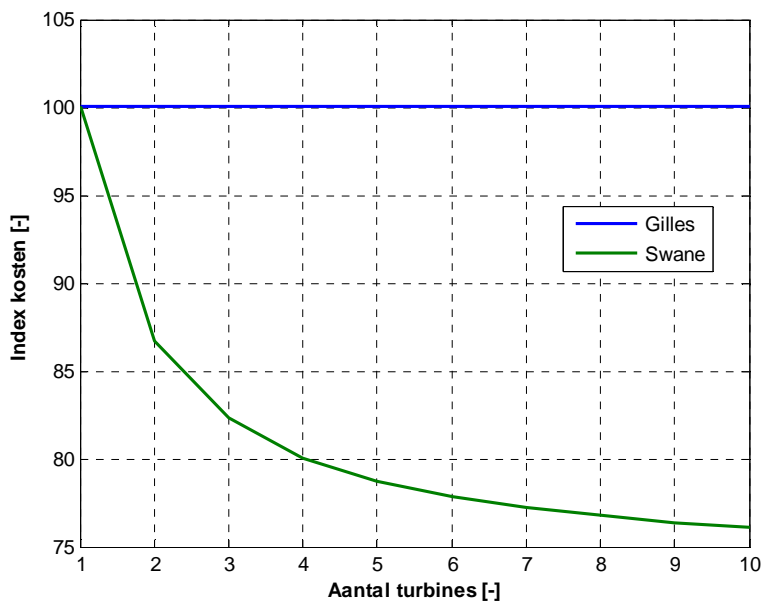
De trend van de formule van Gilles (formule (29)) geeft aan dat het voordeliger is om klein aantal grote turbines te plaatsen. Dit komt overeen met ontwerpkeuzes voor andere rivier- en getijcentrales (zie paragraaf 7.5.1). Bij de formule van Swane (formule (30)) is dit niet terug te vinden. In Figuur 7.13 is te zien dat volgens Gilles een centrale met turbines met een diameter van 10 meter bijna 30 % goedkoper zijn dan een centrale met hetzelfde vermogen met turbines met een diameter van 1 meter<sup>14</sup>.

<sup>14</sup> Dit geldt alleen voor de elektromechanische apparatuur. De civiele kosten worden waarschijnlijk wel relatief hoger met een grotere diameter voor de turbine.



**Figuur 7.13; Invloed diameter voor getij-centrale met hetzelfde totale vermogen**

Bij de formule van Swane is te zien dat de gemiddelde kosten per turbine afnemen bij een groter aantal. Deze formule houdt dus rekening met economische schaalvoordelen. In Figuur 7.14 is te zien dat volgens Swane bij de aanschaf van 10 turbines de gemiddelde prijs per turbine bijna 25 % is gedaald ten opzichte van de aanschaf van 1 turbine.



**Figuur 7.14; Invloed aantal turbines op gemiddeld prijs per turbine**

Om het optimale aantal turbines te bepalen, zal daarom gebruik gemaakt worden van de formule van Swane met een correctie voor Nederlandse arbeidskosten. Dit wordt gedaan door de berekende kosten voor de riviercentrale in Linne met de bekende parameters in te vullen.

$$K = c_{swane} + \frac{c_{swane}}{46,4} \cdot a_t \cdot H_d^{0.18} \cdot D^2 = c_{swane} + \frac{c_{swane}}{46,4} \cdot 4 \cdot 4,0^{0.18} \cdot 4,0^2 = 21,8 \cdot 10^6$$

$$c_{swane} = 7,87 \cdot 10^6$$

$$K = 7,87 \cdot 10^6 + 1,70 \cdot 10^5 \cdot a_t \cdot H_d^{0.18} \cdot D^2$$

Waarin:

K = kosten [€]

$a_t$  = aantal turbines [-]

H = ontwerpverval [m]

D = diameter [m]

## Civiele werken

De kosten voor de civiele werken worden bepaald door de volgende drie onderdelen:

- Constructie
- Bouwmethode
- Overig (Beglazing, Timmerwerk, Liftinstallatie, Schilderwerk, etc.)

De kosten van de constructie worden bepaald door het volume in situ geplaatst beton, de hoeveelheid prefab beton, de hoeveelheid benodigd wapeningstaal en de fundering.

De begroting van Borgharen wordt gebruikt om de kosten hiervoor te schatten. Voor Borgharen waren de begrote directe kosten voor civiele werken gelijk aan 13,0 miljoen euro. Met de volgende formule worden de kosten voor de civiele werken voor de getijcentrale geschat.

$$K_{civiel} = \frac{a_t}{3} \cdot 13,0 \cdot 10^6 = a_t \cdot 4,3 \cdot 10^6$$

## Conclusie

De kosten van de turbines wordt bepaald door de elektromechanische apparatuur en de civiele werken. Met de volgende formule worden de kosten voor de turbines bepaald volgens methode 1.

$$K_t = 7,87 \cdot 10^6 + 4,3 \cdot 10^6 \cdot a_t + 1,70 \cdot 10^5 \cdot a_t \cdot H^{0.18} \cdot D^2$$

Waarin:

$K_t$  = kosten [€]

$a_t$  = aantal turbines [-]

H = ontwerpverval [m]

D = diameter [m]



## 7.8.2. Methode 2; Kosten riviercentrales

De kosten die gemaakt zijn voor de verschillende riviercentrales staan in Tabel 7.11 weergegeven.

	Turbines	Diameter [m]	Ontwerp- verval [m]	Kosten [mil. fl.]	Bouwjaar	Kosten 2009 [mil. euro]
Maurik	4	4	3	58	1988	54,2
Alphen	4	4	4	65	1990	56,7
Linne	4	4	4	71	1989	64,1

**Tabel 7.11; Kosten riviercentrales Nederland [37]**

Om de kosten van het bouwjaar om te rekenen naar de kosten in het jaar 2009 is de volgende formule gebruikt.

$$K_{2009} = K_{\text{bouwjaar}} \cdot \frac{(1 + rv)^{2009 - \text{bouwjaar}}}{f_{\text{gulden/euro}}} = K_{\text{bouwjaar}} \cdot \frac{(1,035)^{2009 - \text{bouwjaar}}}{2,20371}$$

Waarin:

$K_{2009}$  = Kosten in 2009 [€]

$K_{1990}$  = Kosten in 1990 [€]

$f_{\text{euro/gulden}}$  = factor tussen euro en gulden [-]

$rv$  = rentevoet [-]

Het verschil tussen de kosten van de riviercentrale in Maurik en de riviercentrale in Alphen (4 %) kunnen verklaard worden door het verschil in ontwerpverval. Het verschil in kosten volgens Swane (formule (30)) is voor de elektromechanische apparatuur 3% en volgens Gilles (formule (29)) zelfs 12%. Tevens is voor te stellen dat bij een lager verval de kosten voor de civiele werken ook lager uitvallen.

Belangrijk bij de bepaling van de kosten voor de riviercentrales is de bouwmethode. Bij Maurik en Alphen was het mogelijk om de riviercentrale in een bouwkuip te maken. Door de grondcondities bij Linne (grind) was het daar slechts mogelijk om de caissonmethode toe te passen. De kosten voor de civiele werken zijn daardoor hoger. Dit kan mogelijk het grote verschil in kosten tussen de riviercentrale in Linne en de andere twee centrales verklaren.

De kosten voor de riviercentrale in Alphen lijken daarom het meest representatief voor de getijcentrale bij de Hertogin Hedwige- en Prosperpolder. Volgens deze methode zullen de totale kosten voor de turbines (incl. elektromechanische apparatuur, civiele werken, planning, administratie en onvoorzien) bepaald worden met de volgende formule:

$$K = \frac{a_t}{4} \cdot 56,7 \cdot 10^6 \quad (31)$$

# 8 Sluizen

## 8.1. Inleiding

Naast de turbines die nodig zijn om energie te genereren tijdens eb, zijn er sluizen nodig om de polder (samen met de turbines) te vullen tijdens vloed.

In dit hoofdstuk wordt het ontwerp van deze sluizen toegelicht.

Allereerst worden in 8.2 de uitgangspunten voor het maken van het ontwerp genoemd. Vervolgens wordt de geometrie van de sluizen getoond en toegelicht in paragraaf 8.3. Daarna worden de hydraulische eigenschappen van de sluizen bepaald in paragraaf 8.4. Hierna worden resultaten van de stabiliteitanalyse en sterkteanalyse genoemd in paragrafen 8.5 en 8.6. Ten slotte zijn de kosten per inlaatwerk bepaald in paragraaf 8.7.

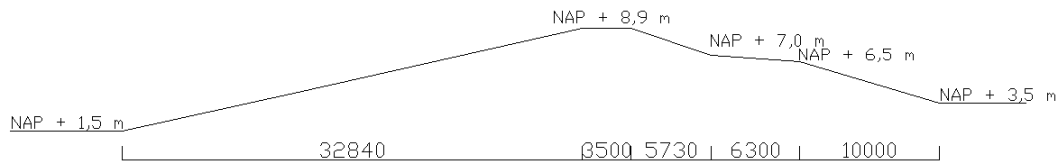
## 8.2. Uitgangspunten ontwerp

Om de sluizen te ontwerpen zijn de volgende uitgangspunten geformuleerd:

- De bodem van de sluis wordt aangelegd op NAP om de kosten voor bemaling tijdens de bouw te minimaliseren en kosten voor de aanleg en onderhoud van aanstroomkanalen laag te houden.
- Een economisch ontwerp is verkregen door het volume beton te minimaliseren.
- De veenlaag van 1 m op een diepte van NAP - 2m wordt verwijderd. Er wordt hier grondverbetering toegepast. Hierdoor is het mogelijk om de constructie op staal te funderen.
- Het sluisencomplex wordt ter plekke 'in den droge' aangelegd. Er is daarom geen ballastmateriaal nodig<sup>15</sup> om de sluis af te laten zinken. De sluizen zijn daardoor niet vergelijkbaar met de sluizen die ontworpen zijn voor andere getijcentrales zoals bij de Mersey.
- De vloeren en wanden worden in situ geconstrueerd en vormen daarom één geheel.
- Het sluisencomplex zal aan één zijde aansluiten op de bestaande dijk. Aan deze zijde zal de wand het huidige dijkprofiel volgen (zie Figuur 8.1 en Figuur 8.8).
- Aan de andere zijde sluit het sluisencomplex aan op de turbines door middel van een verbindingswand (zie Figuur 8.2).

---

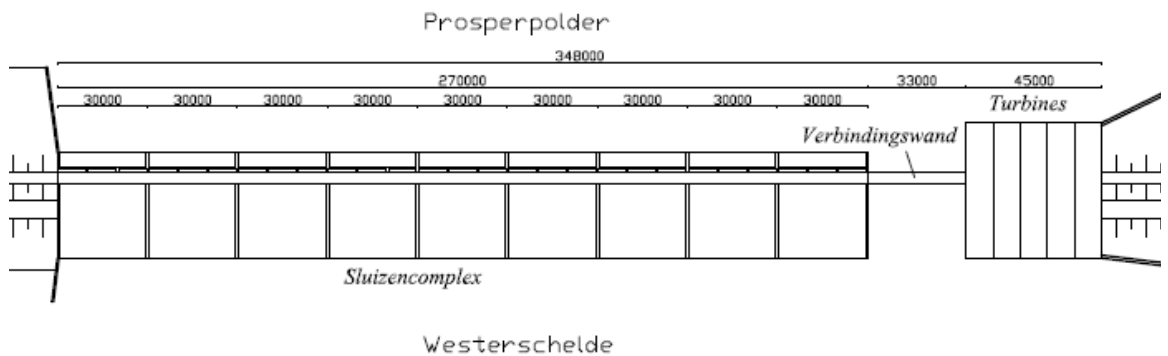
<sup>15</sup> Aangenomen is dat de kostenbesparing die het gebruik van goedkoper ballastmateriaal niet opweegt tegen de extra arbeidskosten en bekisting. Al het gewicht benodigd om opdrijven, afschuiven en kantelen te voorkomen, zal daarom geleverd worden door het beton.



Figuur 8.1; Dijkprofiel

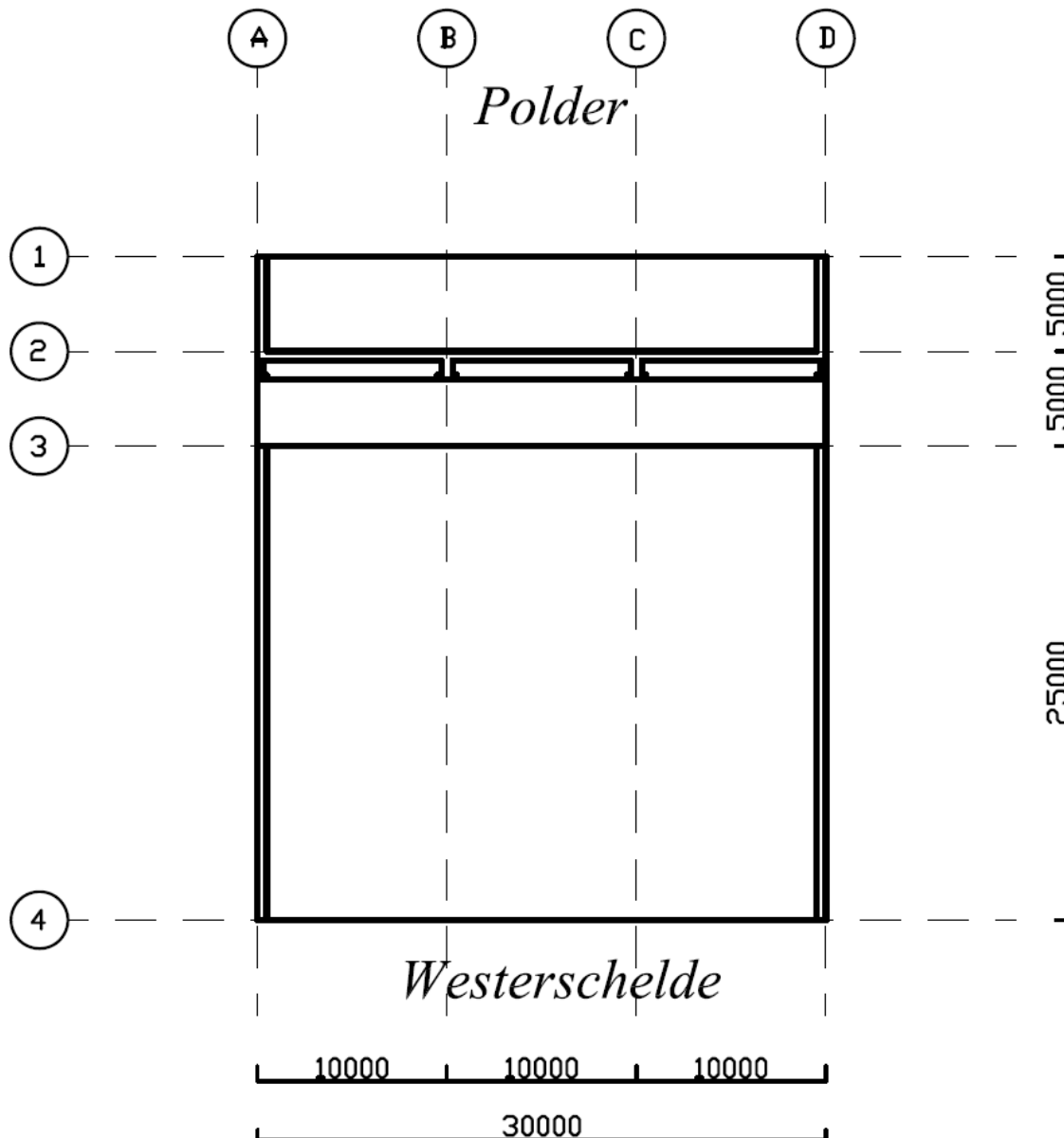
### 8.3. Geometrie

In Figuur 8.2 is het bovenaanzicht van een getijcentrale met 8 inlaatwerken van 30 meter breed weergegeven.

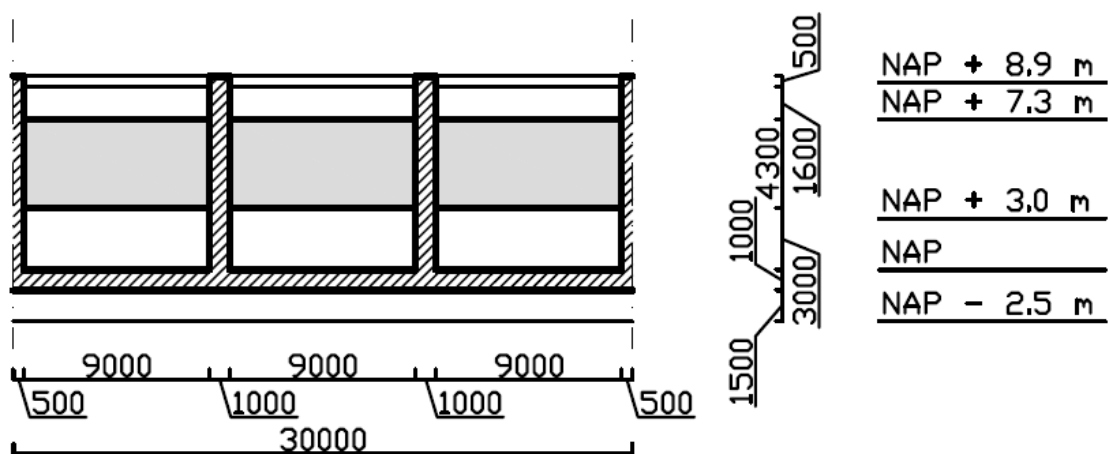


Figuur 8.2; Bovenaanzicht getijcentrale

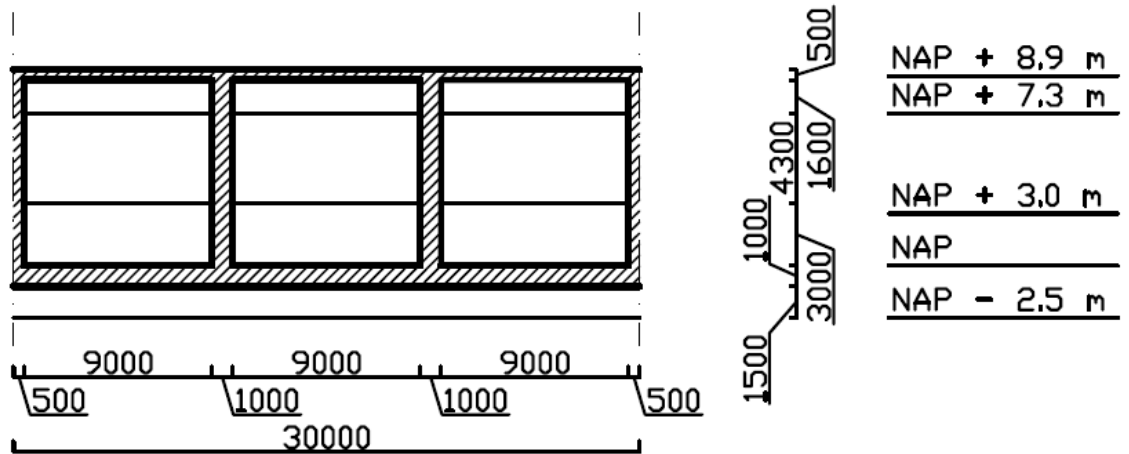
In Figuur 8.3 tot en met Figuur 8.7 worden tekeningen gegeven van één inlaatwerk. In Figuur 8.8 wordt een verticale doorsnede gegeven van de aansluiting van het sluizencomplex op de dijk.



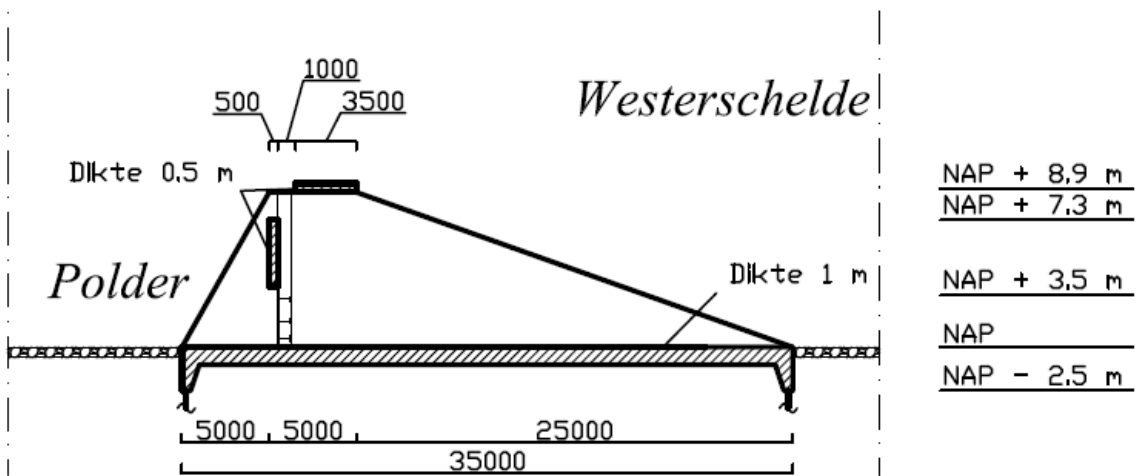
**Figuur 8.3; Bovenaanzicht beschouwd inlaatwerk**



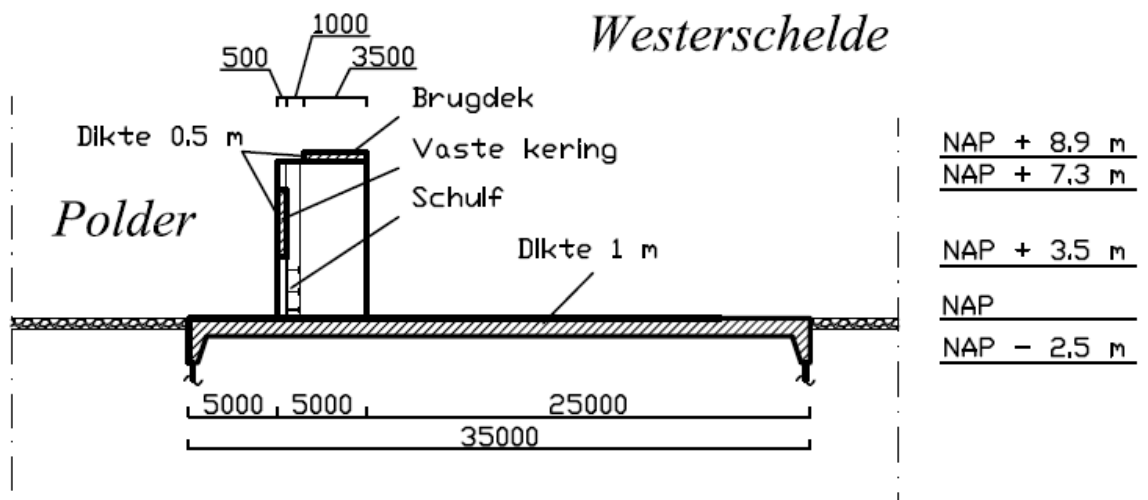
**Figuur 8.4; Doorsnede bij stramienlijn 2**



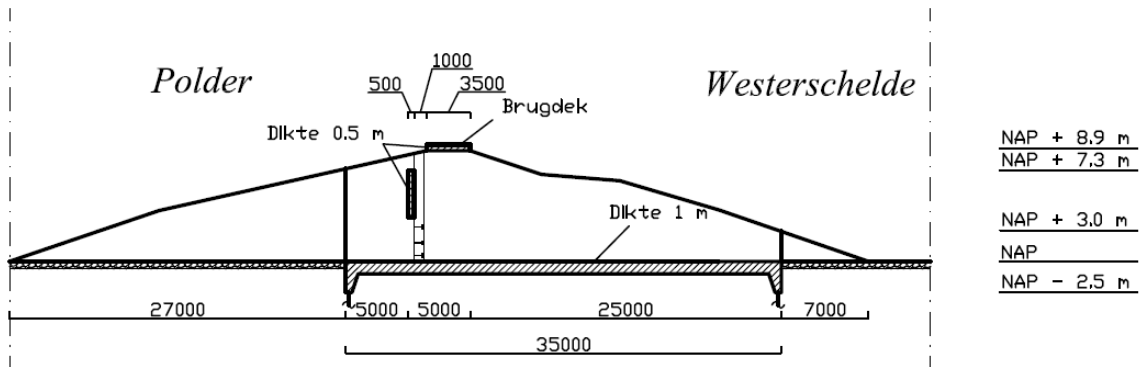
Figuur 8.5; Doorsnede bij stramienlijn 3



Figuur 8.6; Doorsnede bij stramienlijn A en D



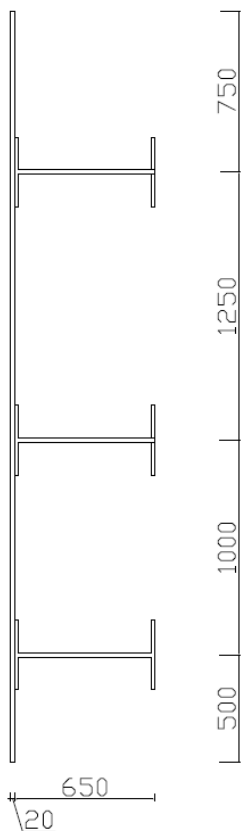
Figuur 8.7; Doorsnede bij stramienlijn B en C



**Figuur 8.8; Doorsnede bij aansluiting op dijk**

In Figuur 8.6 is te zien dat er extra wanden zijn geplaatst om de constructie van de kering en de verkeersbrug te verbinden met de uiteinden van de vloer. Deze extra wanden zijn elke 30 meter geplaatst. Dit is om stijfheid van de constructie als geheel te garanderen.

De breedte van elke doorlaatopening is 9 meter. De kering van de doorlaatopeningen wordt verzorgd door twee onderdelen. Het gedeelte van NAP +3.5 m (zie paragraaf 5.3.2) tot NAP + 7.3 meter (zie paragraaf 5.3.3) is vast, van beton en verbonden met de constructie. Daarnaast komt een schuif met een hoogte van 3,5 meter. Dit is te zien in Figuur 8.7. Een doorsnede van de schuif is te zien in Figuur 8.9.



**Figuur 8.9; Verticale doorsnede schuif**

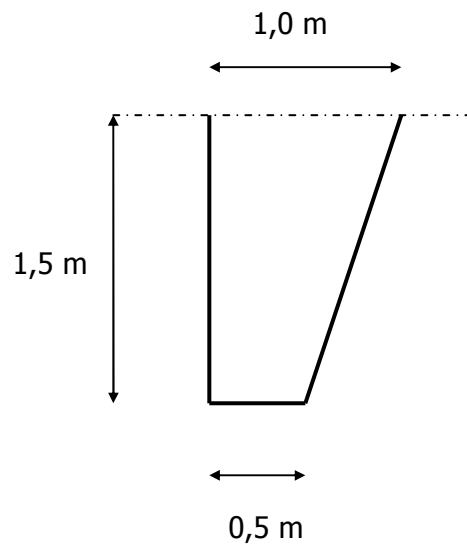
De lengte van de constructie is 35 meter. De dikte van de vloer is 1 meter en levert de belangrijkste bijdrage aan het gewicht van de constructie (70%). De

tussenwanden zijn ook 1 meter dik. De zijwanden, het vaste gedeelte van de kering en de verkeersbrug zijn 0,5 meter dik.

Aan de uiteinden van de vloeren zijn ribben geplaatst om de weerstand tegen horizontale belastingen vanuit zee of de polder te vergroten. De doorsnede afmetingen zijn:

- hoogte van 1,5 meter
- breedte van 0,5 meter aan de onderzijde
- breedte van 1,0 meter aan de bovenzijde

Dit is te zien in Figuur 8.10.

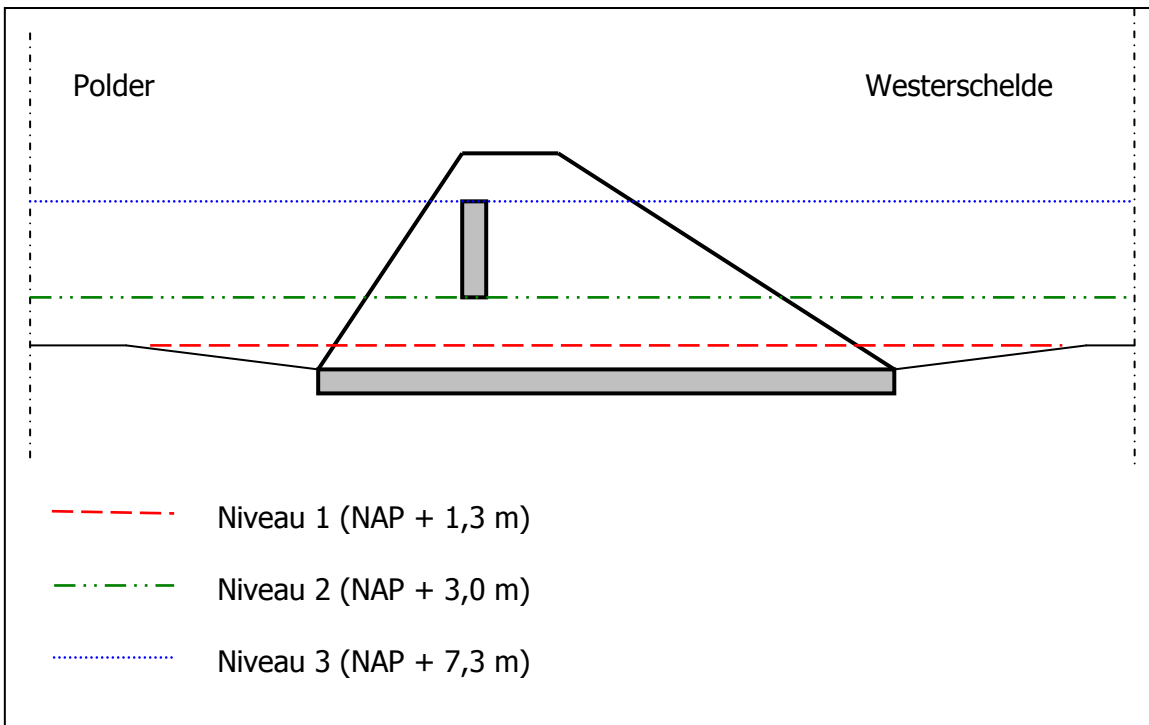


**Figuur 8.10; Afmetingen rib**

Om piping te voorkomen zijn kwelchermen geplaatst. Deze lopen vanuit de ribben tot een diepte van NAP – 10 m. De kwelchermen zijn daardoor 8,5 meter lang.

## 8.4. Hydraulica

De hydraulische vormgeving van de sluis bepaalt hoeveel water door de sluisen heen zal stromen. Voor de doorstroom is de dwarsdoorsnede van de sluisen van belang. Daarbij zijn drie verschillende niveaus aangegeven. Dit is te zien in Figuur 8.11.



**Figuur 8.11; Dwarsdoorsnede sluis met grenzen voor hydraulische eigenschappen**

Wanneer het water van de Westerschelde de sluis vult tot niveau 1, zal de afvoer eerst volkomen en dan onvolkomen zijn. Dit zal binnen een relatief korte tijd gebeuren. Het volume is namelijk maar een fractie van het totaal in te laten volume.

Wanneer het water op de Westerschelde boven niveau 1 komt, zal de afvoer onvolkomen zijn. Daarvoor geldt de volgende formule:

$$Q_{sluis} = m \cdot a_{inlaatwerk} \cdot B_{inlaatwerk} \cdot h_{ws} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_{ws} - h_{po}} \quad (32)$$

$$Q_{sluis} = 1,0 \cdot a_{inlaatwerk} \cdot 27 \cdot h_{ws} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_{ws} - h_{po}}$$

Waarin:

$Q_{sluis}$  = debiet tijdens vullen polder/sluizen [ $m^3/s$ ]

$m$  = afvoercoëfficiënt [-]

$a_{inlaatwerk}$  = aantal inlaatwerken [-]

$B_{inlaatwerk}$  = Breedte stroomoppervlak inlaatwerk [ $m^2$ ]

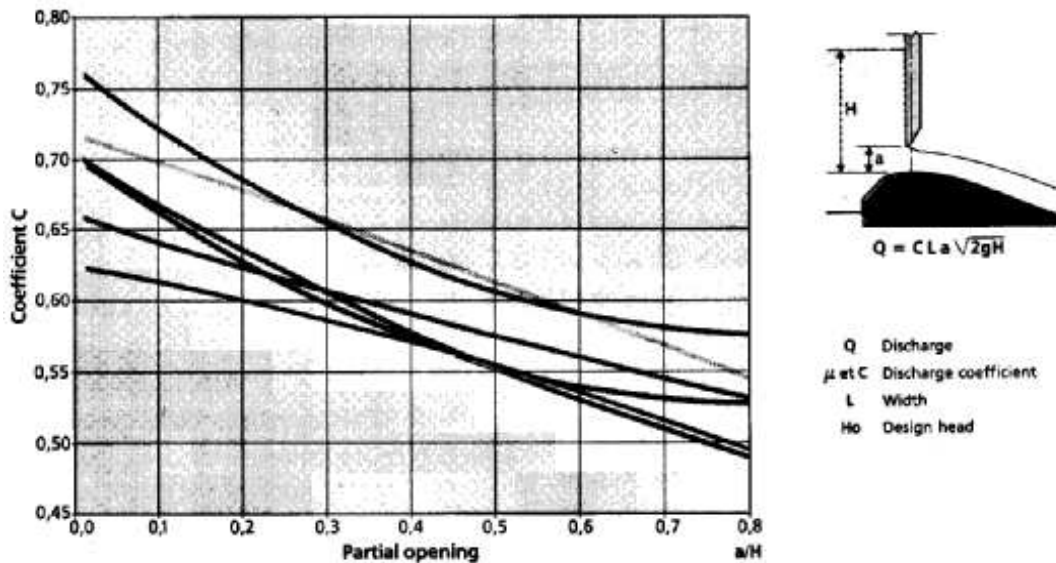
$h_{ws}$  = waterstand op Westerschelde [NAP + m]

$g$  = zwaartekrachtsversnelling [ $m/s^2$ ]

$h_{polder}$  = waterstand in polder [NAP + m]

Dit is geldig tot niveau 2. Dit niveau is bepaald aan de hand van de functionele eisen beschreven in paragraaf 5.3.2. Boven dit niveau hangt de afvoercoëfficiënt af van de detaillering van de schuif en van de waterstand op de Westerschelde. In Figuur 8.12 is te zien dat de variatie voor afvoercoëfficiënten voor ongeveer soortgelijke constructies erg groot is.





**Figuur 8.12; Afvoercoëfficiënten voor overlaten bij La Grande<sup>16</sup> [34]**

Om de afvoercoëfficiënt te bepalen zal een hydraulisch model<sup>17</sup> gemaakt moeten worden. In deze fase wordt geschat dat de afvoercoëfficiënt gelijk is aan 0,6, wanneer de waterstand op de Westerschelde boven de NAP + 3,5 meter komt. De formule voor het debiet komt er dan als volgt uit te zien:

$$Q_{sluis} = 0,6 \cdot a_{inlaatwerk} \cdot B_{inlaatwerk} \cdot 3,5 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_{ws} - h_{polder}} \quad (33)$$

Waarin:

$Q_{sluis}$  = debiet tijdens vullen polder/sluizen [ $m^3/s$ ]

$a_{inlaatwerk}$  = aantal inlaatwerken [-]

$B_{inlaatwerk}$  = Breedte stroomoppervlak inlaatwerken [ $m^2$ ]

$g$  = zwaartekrachtsversnelling [ $m/s^2$ ]

$h_{polder}$  = waterstand in polder [NAP + m]

De waterstand zal gemiddeld één keer in de vierduizend jaar boven niveau 3 komen. Dan gelden de golfoverslagformules en overloopformules beschreven in Appendix A.

Met behulp van de randvoorwaarden is een schatting te maken van het gemiddelde debiet per inlaatwerk. De breedte van het doorstroomoppervlak is 27 meter. Een schatting voor de gemiddelde waterstand aan de Westerschelde-zijde van het inlaatwerk wordt gegeven door het gemiddelde van het maaiveldniveau van de polder<sup>18</sup> en Gemiddeld Hoogwater.

<sup>16</sup> In deze figuur is aan de rechterzijde volkomen overlaat te zien. Dit in tegenstelling tot de ontworpen sluis, waar de afvoer onvolkomen is.

<sup>17</sup> Hiermee wordt een schaalmodel bedoeld, niet een computermodel.

<sup>18</sup> Dit is het maaiveldniveau van de polder bij de getijcentrale. Deze wordt ook gebruikt voor het aanlegniveau van de aanstroomkanalen.

$$h_{gem} = \frac{GHW + z_{polder}}{2} = \frac{2,8 + 1,3}{2} = 2,05m$$

Waarin:

$h_{gem}$  = gemiddeld peil aan Westerschelde-zijde van sluis [NAP + m]

GHW = Gemiddeld Hoogwater

$z_{polder}$  = maaiveldniveau polder [NAP + m]

Het gemiddelde verschil tussen de waterstand op de Westerschelde en de waterstand in de polder zal laag zijn. Er wordt aangenomen dat dit gemiddeld 0,5 meter is. Het gemiddelde debiet per inlaatwerk is dan te bepalen met formule (32):

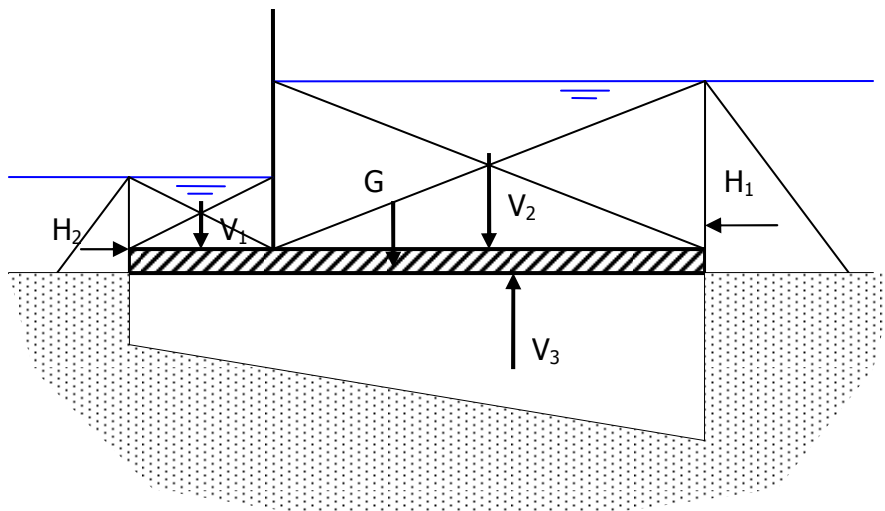
$$Q_{sluis} = m \cdot a_{inlaatwerk} \cdot B_{inlaatwerk} \cdot h_{ws} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} = 1,0 \cdot 1 \cdot 27 \cdot 2,05 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot 0,5} = 173 \frac{m^3}{s}$$

## 8.5. Stabiliteit

De stabiliteit van de constructie is getoetst op vijf faalmechanismen. Daarbij zijn de belastingcombinaties beschreven in Appendix B in beschouwing genomen:

- Opdrijven
- Afschuiven
- Kantelen
- Bezwijken van de ondergrond
- Piping

Opdrijven treedt op wanneer de opwaartse krachten groter zijn dan de neerwaartse krachten (zie Figuur 8.13:  $V_3 > V_1 + V_2 + G$ ).

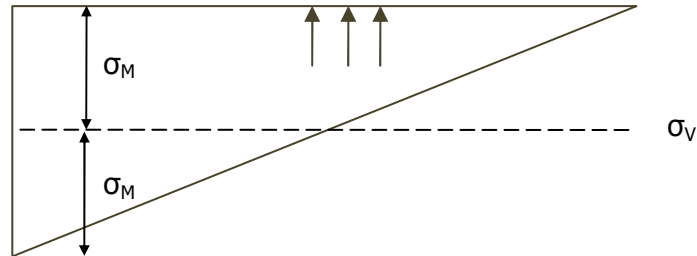


**Figuur 8.13; Krachtenoverzicht van belang bij een stabiliteitsanalyse**

Afschuiven treedt op wanneer de externe resulterende horizontale belasting door het verschil in waterdruk (zie Figuur 8.13:  $H_1 - H_2$ ) niet opgenomen kunnen worden door de grond.

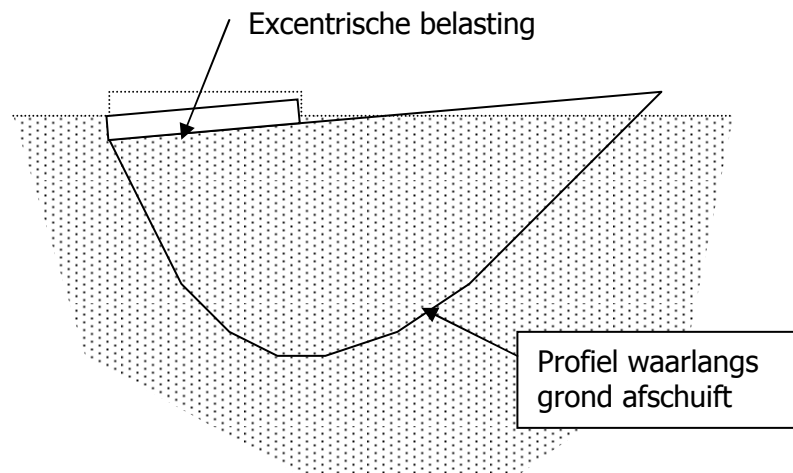
Kantelen van de constructie kan optreden wanneer het moment van de verschillende krachten op de constructie in de ondergrond leidt tot trekkrachten. Aangezien de grond geen trekkrachten kan opnemen, kan dit leiden tot een instabiele situatie.

*Gronddruk onder constructie*



**Figuur 8.14; referentiegeval kantelen**

Bezwijken van de ondergrond treedt op wanneer de spanning die de constructie levert op de grond niet door de grond opgenomen kan worden. De draagcapaciteit van de ondergrond is dan niet voldoende. Wanneer de resulterende horizontale kracht groot is ten opzichte van de resulterende verticale kracht, kan de draagcapaciteit van de ondergrond veel kleiner worden.



**Figuur 8.15; Bezwijken van ondergrond bij excentrische belasting**

Door het verschil in waterpeil aan de zeezijde en polderzijde van de sluis kan aan de onderkant van de constructie stroming ontstaan die grondmateriaal meevoert. Wanneer er veel grondmateriaal wordt meegenomen zal een instabiele situatie ontstaan. Dit verschijnsel wordt piping genoemd.

Voor de verschillende belastingcombinaties (zoals beschreven in appendix B) zijn veiligheidsfactoren bepaald. Deze zijn gegeven in Tabel 8.1.

Faalmechanisme	Veiligheidsfactor
Opdrijven	1,45
Afschuiven	1,46
Kantelen	1,90
Bezwijken van ondergrond	1,19
Piping	<i>voldoet</i>

**Tabel 8.1; Veiligheidsfactoren voor faalmechanismen**

Er wordt gesteld dat wanneer de veiligheidsfactor groter is dan 1, de constructie voldoet tegen dat faalmechanisme. Uit de tabel blijkt dat de constructie aan alle eisen voor stabiliteit voldoet. Uitleg over de berekening van deze veiligheidsfactoren is gegeven in Appendix B.

## 8.6. Sterkte

De constructie is getoetst op sterkte volgens de NEN-normen en de richtlijnen van de TAW. De maatgevende krachten in de betonconstructie zijn bepaald met het 2D eindige elementen programma, genaamd SCIA ESA PT. Voor de verschillende doorsneden is het benodigde wapeningspercentage bepaald. Dit is te zien in Tabel 8.2. De toegepaste methode om deze percentages te berekenen is gegeven in Appendix B.

Onderdeel	Hoogte [m]	Wapeningspercentage [%]	Wapening [kg/m <sup>3</sup> ]
Verkeersbrug	0,5	0,43	34,4
Tussenwand	1,0	0,65	52,0
Zijwand	0,5	0,42	33,6
Vaste kering	0,5	0,88	70,4
Vloer bij aansluiting	1,0	0,57	45,6
Vloer (rest)	1,0	0,20	16,0

**Tabel 8.2; Wapeningspercentage volgens SCIA ESA PT**

De gevonden wapeningspercentages liggen tussen het minimum wapeningspercentage (0,18%) en het maximum wapeningspercentage (1,93%) van beton met sterkteklasse B35. De constructie voldoet daarom aan de sterkte-eisen.

De krachtenwerking in de schuif is berekend met behulp van een handberekening. Dit is te zien in appendix B.11. Daaruit blijkt dat het ontwerp van de schuif voldoet.

## 8.7. Kosten

De bepaling van de kosten heeft een tweeledig doel. Ten eerste dienen de kosten van het project ingeschat te worden en ten tweede dient het optimale inlaatwerken bepaald te worden met behulp van een kosten-batenanalyse. Hiervoor worden de kosten voor één inlaatwerk met een breedte van 30 meter bepaald.

De kosten voor een inlaatwerk worden bepaald door het volgende:

- aantal kubieke meter te storten beton
- afgraven van primaire kering<sup>19</sup>
- het maken van de bouwkuip
- grondverbetering ten behoeve van fundering
- aanstroomkanaal
- verharding van de verkeersbrug
- bodembescherming
- stalen schuif
- mechanische apparatuur voor schuif
- kostenpost 'nader te detailleren'

Om de kosten voor de sluis te bepalen wordt gebruik gemaakt van de eenheidsprijzen die gebruikt zijn voor de bepaling van de kosten voor de begroting van de doorlaatmiddelen in de Brouwersdam [33].

De eenheidsprijzen voor het beton verschillen voor de vloer, de wanden en de verkeersbrug. De eenheidsprijzen staan hieronder weergegeven

- beton voor vloer: 400 €/m<sup>3</sup>
- beton voor wanden: 850 €/m<sup>3</sup>
- beton voor verkeersbrug: 550 €/m<sup>3</sup>

Met behulp van volumes voor de verschillende onderdelen (zie Appendix B) zijn de totale betonkosten voor één inlaatwerk te bepalen. Dit is weergegeven in onderstaande formule:

$$K_{beton} = V_{vloer} \cdot k_{vloer} + V_{wand} \cdot k_{wand} + V_{verkeersbrug} \cdot k_{verkeersbrug}$$
$$K_{beton} = 1050 \cdot 400 + 316 \cdot 850 + 46 \cdot 550 = 713.900$$

---

<sup>19</sup> Naast het afgraven van de primaire kering, dienen ook kosten verrekend te worden voor de aansluiting op de primaire kering. Deze kosten gelden voor het gehele sluiscomplex samen en zijn niet per inlaatwerk. Er is berekend dat deze kosten minder dan 1 % van de totale kosten voor de sluis bedragen. Daarom is besloten om deze kosten onder de kostenpost 'nader te detailleren' te laten vallen.

De eenheidsprijzen voor verwijdering van de primaire kering, de bouwkuip, grondverbetering, verharding, bodembescherming staan hieronder weergegeven:

- verwijdering van primaire kering: 11 €/m<sup>3</sup>
- bouwkuip: 0,8 €/m<sup>3</sup>
- grondverbetering t.b.v. fundering: 10 €/m<sup>3</sup>
- aanstroomkanaal: 1,0 €/m<sup>3</sup>
- verharding: 25 €/m<sup>2</sup>
- bodembescherming: 50 €/m<sup>3</sup>

Met behulp van het dijkprofiel voor de primaire kering (zie Figuur 8.1) kan het volume te verwijderen grondmateriaal bepaald worden. Dit is gelijk aan 238 m<sup>3</sup>/m. Voor één inlaatwerk is dit 7148 m<sup>3</sup>. De kosten per inlaatwerk zijn dan 79.000 €.

De bouwkuip heeft een diepte van 1,3 meter. Het oppervlak is gelijk aan 30 x 35 meter met aan de zijkant een talud van 1:3. Het volume en de kosten zijn dan te bepalen.

$$V_{\text{bouwput}} = V_{\text{vloer}} + V_{\text{zijkanten}} = 1,3 \cdot 30 \cdot 35 + 2 \cdot 30 \cdot 3 \cdot 1,3^2 = 1365 + 304 = 1669 \text{ m}^3$$
$$K = k_{\text{bouwput}} \cdot V_{\text{bouwput}} = 0,8 \cdot 1669 = 1335$$

De kosten voor het ontgraven van de bouwput zijn dus 1.335 €. Doordat sprake is van een ondiepe bouwput zijn de kosten voor ontgraven relatief laag. Tevens wordt verwacht dat door deze geringe diepte de kosten voor bemaling verwaarloosbaar zijn.

Onder de constructie dient 2 meter ontgraven te worden. Dit wordt vervangen door betere grond ten behoeve van de fundering. De kosten worden op eenzelfde manier berekend als voor de bouwput.

$$V_{\text{fundering}} = 2 \cdot 30 \cdot 35 = 2100 \text{ m}^3$$
$$K = k_{\text{bouwput}} \cdot V_{\text{bouwput}} = 10 \cdot 2100 = 21000$$

De kosten voor de grondverbetering zijn 21.000 €.

Het aanstroomkanaal dient voor elk extra inlaatwerk 30 meter verbreed te worden. Het voorland is 250 meter breed, maar het aanstroomkanaal wordt schuin aangelegd. Daarvoor wordt uitgegaan van een lengte van het kanaal van 354m. De hoogte van het voorland ligt op NAP + 3,5 m. Het kanaal moet op NAP + 1.3 m komen te liggen. Het volume en de kosten zijn dan te bepalen.

$$V_{\text{fundering}} = 30 \cdot 354 \cdot (3,5 - 1,3) = 23364 \text{ m}^3$$
$$K = k_{\text{bouwput}} \cdot V_{\text{bouwput}} = 1 \cdot 23364 = 23364$$

De kosten voor het aanstroomkanaal zijn 23.364 €.

Het oppervlak aan verharding is (3,5 \* 30 =) 105 m<sup>2</sup>. De kosten zijn dan 2.625 €.

Bodembeschermingen zijn vaak aan beide zijden net zo lang als de constructie. De hoogte van de bodembescherming is 0,6 meter. Het volume is dan te bepalen.

$$V_{\text{bodembescher min g}} = 30 \cdot 2 \cdot 35 \cdot 0,6 = 1260 \text{ m}^3$$

$$K = k_{\text{bouwput}} \cdot V_{\text{bouwput}} = 30 \cdot 1260 = 37800$$

De kosten voor de bodembescherming bedragen 37.800 €.

De tot nu toe berekende kosten voor de verschillende onderdelen staan in Tabel 8.3 weergegeven.

Onderdeel	Kosten
Beton	713.900 €
Verwijdering primaire kering	79.000 €
Bouwkuip	1.335 €
Grondverbetering	21.000 €
Aanstroomkanaal	23.364 €
Verharding	2.625 €
Bodembescherming	37.800 €

**Tabel 8.3; Tot nu toe berekende kosten voor inlaatwerk**

De schuif wordt zowel bij deze getijcentrale als de inlaatwerken in de Brouwersdam gemaakt van roestvrij staal om corrosie te voorkomen. Er is in de begroting voor de inlaatwerken bij de Brouwersdam geen eenheidsprijs per ton gegeven voor dit type staal. Daarentegen zijn de kosten per schuif weergegeven. De schuif bij de Brouwersdam is echter veel groter ( $B \cdot h \cdot d = 30 \cdot 10 \cdot 3$ ) dan de ontworpen schuif ( $10 \cdot 3 \cdot 0,75$ ). Er is daarom gekozen om de kosten voor de schuif te bepalen als functie van de kosten van het beton. Bij de inlaatwerken van de Brouwersdam is de schuif 11 % en de mechanische apparatuur 3% van de kosten van het beton.

$$K_{\text{schuif}} = 0,14 \cdot K_B = 0,14 \cdot 713900 = 99946$$

De kosten voor de schuif met mechanische apparatuur bedraagt dan 99.946 €.

Omdat het project nog niet in de detailfase is, zijn er nog nader te detailleren kosten. Bij de Brouwersdam wordt hier 30 % voor gerekend. Dit wordt ook gedaan voor dit project. De totale begroting is dan te maken en is getoond in Tabel 8.4.

Onderdeel	Aantal	Eenheid	Prijs/eenheid	Prijs
Vloer	1050	m <sup>3</sup>	€ 400,00	€ 420.000
Wanden	316	m <sup>3</sup>	€ 850,00	€ 268.600
Brug	46	m <sup>3</sup>	€ 550,00	€ 25.300
Kosten beton				<b>€ 713.900</b>
Schuif en mechanische apparatuur			14%	€ 99.946
Bouwkuip	1669	m <sup>3</sup>	€ 0,80	€ 1.335
Grondverbetering	2100	m <sup>3</sup>	€ 10,00	€ 21.000
Aanstroomkanaal	23364	m <sup>3</sup>	€ 1,00	€ 23.364
Verwijderen primaire dijk	7184	m <sup>3</sup>	€ 11,00	€ 79.024
Verharding	105	m <sup>2</sup>	€ 25,00	€ 2.625
Bodembescherming	1260	m <sup>3</sup>	€ 30,00	€ 37.800
				<b>€ 978.994</b>
Nader te detailleren			30%	€ 293.698
				<b>€</b>
	<b>Totaal</b>			<b>1.272.693</b>

**Tabel 8.4; Begroting inlaatwerk**

De kosten per inlaatwerk bedragen dan 1.272.693 euro.



## 9 Modellen

### 9.1. Inleiding

In de vorige hoofdstukken zijn de randvoorwaarden van de Prosperpolder en de eisen voor een getijcentrale bepaald. Daarmee is een ontwerp van turbines en de sluisen benodigd voor een getijcentrale gevonden. Deze informatie dient als invoer voor het model voor de bepaling van de energieopbrengst en voor het model van de kosten-batenverhouding. Ze zullen respectievelijk het hydraulische en het economische model genoemd worden.

In dit hoofdstuk zal de werking van deze modellen uitgelegd worden.

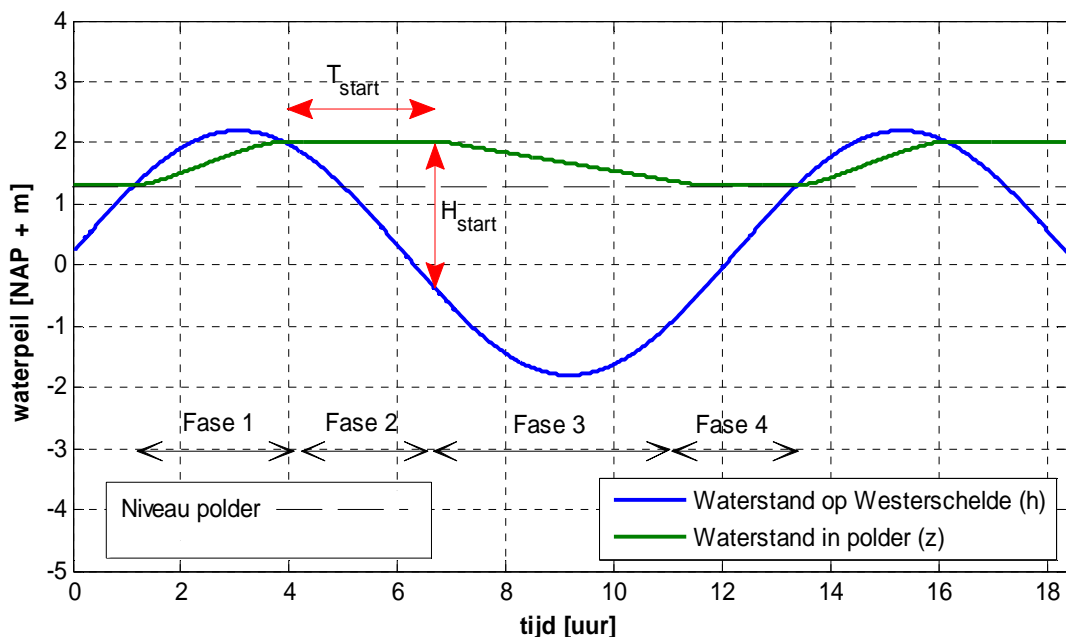
Deze modellen hebben als doel om het economische optimum te vinden van het aantal turbines, het aantal sluisen en het ontwerpverval. De resultaten hiervan zijn te vinden in Hoofdstuk 10. Tevens kunnen met behulp van deze modellen conclusies getrokken worden over de economische haalbaarheid van het plan.

Allereerst zal de werking van het hydraulisch model (paragraaf 9.2) en daarna de werking van het economische model (paragraaf 9.3) worden uitgelegd.

### 9.2. Hydraulisch model

#### 9.2.1. Algemeen

Om te bepalen hoeveel energie opgewekt kan worden, dient gemodelleerd worden welk waterniveau in het bassin optreedt op elk tijdstip tijdens turbineren. Voor een ebcentrale is uitgewerkt welke parameters dit verloop van het peil in de polder beschrijven. Dit is te zien in Figuur 9.1 en uitgelegd in Tabel 9.1.



**Figuur 9.1; Waterstandverloop voor polder en Westerschelde met getijcentrale**

Fase	Operatie	Sluizen	Turbines	Actie aan einde van fase	Overgangsvoorwaarde voor volgende fase
1	Polder vullen/ Sluizen	Open	Open	Schuiven dicht	$h = z$
2	Water in polder vasthouden	Dicht	Dicht	Turbines open	$H > H_{\text{start}}$ of $t_{\text{start}} > t_{\text{start,max}}$
3	Polder legen/ Turbineren	Dicht	Open	Turbines sluiten	$z = z_{\text{min}}$ of $H < H_{\text{stop}}$
4	Wachten	Dicht	Open	Schuiven open	$h = z$

**Tabel 9.1; Acties bij operatie getijcentrale**

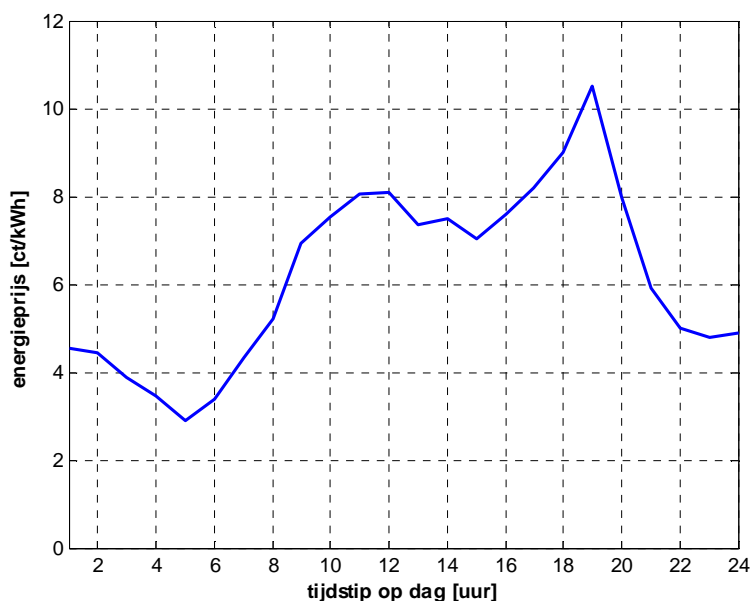
Het aantal sluizen en turbines bepaalt hoe snel de polder zich vult en tot welk niveau de polder gevuld wordt (fase 1). Het startverval bepaalt hoe lang het water in de polder vastgehouden wordt (fase 2). Het aantal turbines bepaalt hoe snel de polder leeg kan worden gemaakt (fase 3).

### 9.2.2. Werkelijke operatie

Voordat de werking van het model wordt toegelicht, zal in deze paragraaf uitgelegd worden hoe een getijcentrale in werkelijkheid zal opereren.

Aangezien elk getij verschilt van het getij daarvoor, maar wel goed voorspeld kan worden, zal voor elke getijcyclus bepaald worden wat de optimale operatie is met de beschikbare turbines en sluizen. Voor elke getijcyclus zal daarvoor een optimaal startverval bepaald worden. Aan de hand daarvan wordt gekozen hoeveel turbines gebruikt worden tijdens operatie.

Daarbij zal niet alleen gekeken worden naar de maximale energieopbrengst, maar ook naar de financiële opbrengst van de energie. Mogelijk wordt operatie een uur uitgesteld omdat in dat uur de energie nog goedkoop is (nacht) en een uur later al duurder (ochtend).



**Figuur 9.2; Variatie van energieprijis op 5 januari 2009**

Na een aantal jaar zal er onderhoud aan de turbines plaatsvinden. Wanneer dit binnen een bestek van een aantal uur gedaan kan worden, hoeft de energiewinning er niet onder te lijden. Voor groter onderhoud is het verstandig om dit tijdens doortijd te doen. Voor het onderhoud aan de turbines in La Rance is dit laatste ook gedaan [10].

Indien er een extreme storm op zee wordt voorspeld met mogelijke dreiging voor overstroming van de gebieden in het achterland, zullen de sluisen en turbines gesloten blijven. Hierdoor zal de polder niet gevuld raken met water. Tevens is de vraag naar energie tijdens deze storm waarschijnlijk laag. Hoewel er veel energie gewonnen kan worden door de hoge waterstanden op de Westerschelde, zal dit financieel gezien weinig opleveren. Door het mogelijke overstromingsgevaar voor het achterland en de lage energieopbrengsten, zal daarom geen energie gewonnen worden<sup>20</sup>.

### 9.2.3. Modellering

Met behulp van de randvoorwaarden van het gebied en de kenmerken van de sluisen en de turbines kan bepaald worden welke invloed het plaatsen van deze constructies heeft op het waterpeil in het achterliggende gebied. Het verval over de getijcentrale bepaalt daarbij de hoeveelheid water die door de getijcentrale stroomt en de richting van de stroming. Het verval over de getijcentrale wordt beschreven met de volgende formule.

$$H = h_{polder} - h_{ws} \quad (34)$$

Waarin:

H = verval [m]

$h_{polder}$  = waterstand in polder [NAP + m]

$h_{ws}$  = waterstand op Westerschelde [NAP + m]

---

<sup>20</sup> Mogelijk kan de polder als wateropslagbassin dienen om overstromingen in Antwerpen te voorkomen. Door het grote getijvolume zal dit effect in de orde van enkele centimeters zijn (zie Hoofdstuk 12). Door het geringe effect op de waterstand, wordt daarom voorlopig verwacht dat het gebied niet wordt ingericht als wateropslagbassin.

Tijdens het vullen van de polder (fase 1) laten zowel de sluizen als turbines water door. De hydraulische eigenschappen van de turbines staan beschreven in paragraaf 7.6.6. De hydraulische eigenschappen van de sluizen staan beschreven in paragraaf 8.4. Het debiet volgt uit een sommatie van de in deze paragraaf genoemde formules (32) en (28):

$$h \leq 3.5$$

$$Q_{vul} = -(1,0 \cdot a_{inlaatwerk} \cdot B_{inlaatwerk} \cdot h_{ws} + 0,62 \cdot a_t \cdot A_t) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_{ws} - h_{polder})} \quad (35)$$

$$h > 3.5$$

$$Q_{vul} = -(0,6 \cdot a_{inlaatwerk} \cdot B_{inlaatwerk} \cdot 3,0 + 0,62 \cdot a_t \cdot A_t) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_{ws} - h_{polder})}$$

Waarin:

$Q_{vul}$  = debiet tijdens vullen polder/sluizen [ $m^3/s$ ]

$a_{inlaatwerk}$  = aantal inlaatwerken [-]

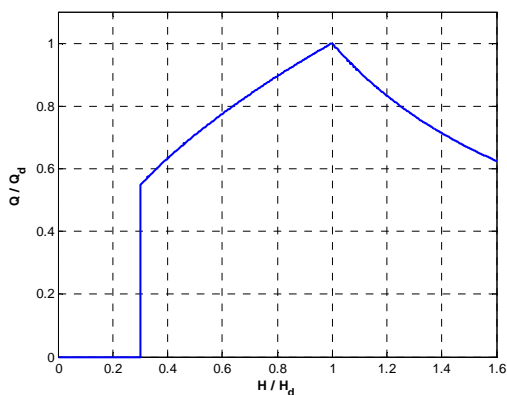
$B_{inlaatwerk}$  = natte breedte van inlaatwerk [ $m^2$ ]

$a_t$  = aantal turbines [-]

$A_t$  = doorstroomoppervlak turbines [ $m^2$ ]

$g$  = zwaartekrachtsversnelling [ $m/s^2$ ]

Het debiet door de getijcentrale tijdens het vasthouden van de waterstand (fase 2) en het wachten (fase 4) is nul. Tijdens het turbineren wordt het debiet gekenmerkt door de eigenschappen van de turbine ( $H_d$ ,  $Q_d$ ).



(36)

**Figuur 9.3; Functie debiet verval bij turbine**

Waarin:

$Q_t$  = debiet tijdens legen polder/turbineren [ $m^3/s$ ]

$n_t$  = aantal turbines [-]

$H_d$  = ontwerpverval [m]

$Q_d$  = ontwerpdebiet van één turbine [ $m^3/s$ ]

$$H \leq 0,3 \cdot H_d$$

$$Q_t = 0$$

$$0,3 \cdot H_d < H < H_d$$

$$Q_t = n_t \cdot Q_d \cdot \sqrt{\frac{H}{H_d}}$$

$$H > H_d$$

$$Q_t = n_t \cdot Q_d \cdot \frac{H_d}{H}$$

Door het vullen en legen van de polder verandert het waterpeil in de polder. Aangenomen wordt dat de waterstand in de polder overal gelijk is. De kombergingsbenadering is dan geldig:

$$Q = -A(h_{polder}) \cdot \frac{dh_{polder}}{dt}$$

Waarin:

$Q$  = debiet [ $m^3/s$ ]

$A(h_{polder})$  = wateroppervlak als functie van waterstand in de polder [ $m^2$ ]

$dh_{polder}/dt$  = waterstandsvariatie in de tijd [ $m/s$ ]

Het vermogen en de energieopbrengst zijn dan als volgt te berekenen:

$$P(t) = \frac{\eta \cdot \rho \cdot g \cdot H \cdot Q_t}{10^6}$$

$$E = \frac{\int P(t) dt}{3.6 \cdot 10^6} \approx \frac{\sum P(t) \cdot \Delta t}{3.6 \cdot 10^6}$$

Waarin:

$\eta$  = rendement [-]

$\rho$  = dichtheid [ $kg/m^3$ ]

$g$  = zwaartekrachtsversnelling [ $m/s^2$ ]

$H$  = verval [ $m$ ]

$Q_t$  = debiet tijdens turbineren [ $m^3/s$ ]

$P(t)$  = vermogen op een bepaald tijdstip [ $MW$ ]

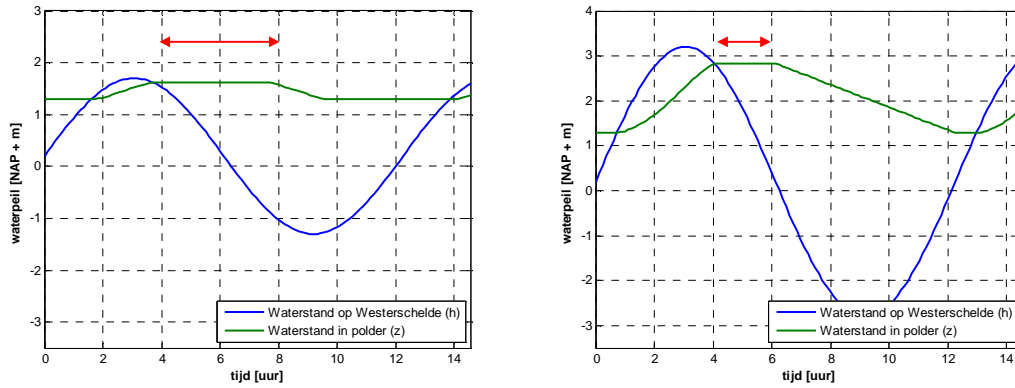
$\Delta t$  = tijdstap [ $s$ ] (10 min.)

$E$  = energieopbrengst [ $GWh$ ]

Het rendement van de turbine is afhankelijk van het verval en het debiet. Het rendement zal in werkelijkheid variëren tussen de 70% en 92%. Voor een wijd bereik aan vervallen wordt daarbij een rendement van meer dan 90% gehaald. In het model wordt aangenomen dat het rendement 90% is.

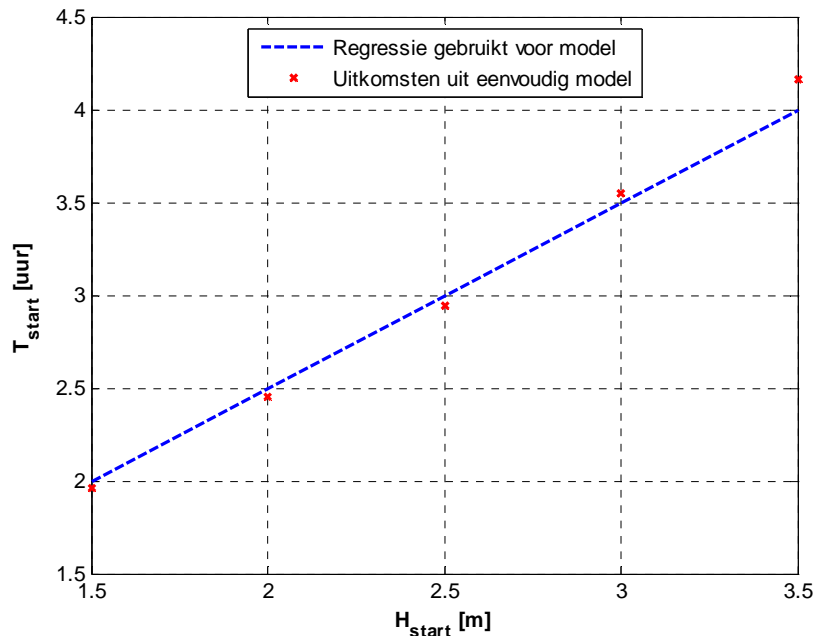
In totaal wordt een periode van één jaar beschouwd. Daarvoor wordt een optimale waarde voor het startverval gevonden die voor elke getijcyclus constant is (Dit is een vereenvoudiging van de werkelijke situatie, zie paragraaf 9.2.2).

Een uitzondering op deze regel wordt gemaakt bij extreme doodtij. Omdat hier door het kleine tijverskil het startverval niet gehaald kan worden, is een maximale periode tussen het sluiten van de sluizen en het openen van de turbines geformuleerd. De periode tussen het sluiten van de sluizen en het starten van de turbines wordt de startperiode genoemd. Wanneer het tijverskil groot is, zal de startperiode bij eenzelfde startverval korter duren dan bij een klein tijverskil.



**Figuur 9.4; Startperiode voor tijverschil van 3 m (links) en van 6 m (rechts)**

Er wordt een startperiode bepaald voor een getij dat door 20 % van alle getijden onderschreden wordt. Dit is gelijk aan het gemiddeld doottij. Met behulp van lineaire regressie is de relatie tussen het startverval en de startperiode bepaald. Dit is te zien in Figuur 9.5.



**Figuur 9.5; Relatie tussen startverval en startperiode bij gemiddeld doottij**

De volgende formule is op basis van deze gegevens gedefinieerd.

$$T_{start,max} = (H_{start} + 0,5) \cdot 3600 \quad (37)$$

Waarin:

$T_{start,max}$  = maximale startperiode [s]

$H_{start}$  = ingevoerd startverval [m]

Er wordt gesteld dat de startperiode niet langer mag duren dan de waarde gevonden door deze analyse. Omdat rekening is gehouden met een gemiddeld doottij wordt in 20 % van de gevallen een lager startverval gevonden dan ingevoerd.

Als eis om overstromingen in het achterliggende gebieden te voorkomen is gesteld dat de waterstand in de polder niet boven de NAP + 3.5 m komen. Wanneer dit volgens het model gebeurt, zal het sluisdebiet gelijk gesteld worden aan nul.

Door transmissieverliezen, onderhoud aan de turbines en stormen, zal de berekende energieopbrengst groter zijn dan de werkelijke energieopbrengst. Voor het onderhoud aan de turbines en optredende stormen wordt een energieverlies van 4 % gerekend [10]. Voor de transmissieverliezen wordt van deze energieopbrengst nog eens 3 % afgetrokken [31].

### 9.3. Economisch model

De investeringskosten voor de centrale worden op twee manieren bepaald:

Methode 1:

$$K_t = 7,87 \cdot 10^6 + 4,3 \cdot 10^6 \cdot a_t + 1,70 \cdot 10^5 \cdot a_t \cdot H_d^{0.18} \cdot D^2$$

Methode 2:

$$K_t = \frac{a_t}{4} \cdot 56,7 \cdot 10^6$$

De investeringskosten van de sluisen worden bepaald met de volgende formule.

$$K_{sluis} = 1,272 \cdot 10^6 \cdot a_{inlaatwerk}$$

Voor methode 1 wordt nog 35 % opgeteld voor planning, administratie, kosten voor netaansluiting, extra voorzieningen en onvoorziene kosten. Dit wordt ook gedaan voor de kosten van de sluisen. Bij methode 2 zijn deze kosten al verrekend. Dit leidt tot de volgende formules voor de totale kosten van de getijcentrale.

Methode 1:

$$K = 1,35 \cdot \left( 7,87 \cdot 10^6 + 4,3 \cdot 10^6 \cdot a_t + 1,70 \cdot 10^5 \cdot a_t \cdot H_d^{0.18} \cdot D^2 + 4,73 \cdot 10^5 \cdot a_{inlaatwerk} \right)$$

Methode 2:

$$K = \frac{a_t}{4} \cdot 56,7 \cdot 10^6 + 1,25 \cdot 4,73 \cdot 10^5 \cdot a_{inlaatwerk}$$

Waarin:

K = totale kosten getijcentrale [€]

$a_t$  = aantal turbines [-]

$a_{inlaatwerk}$  = aantal inlaatwerken [-]

$H_d$  = ontwerpverval [m]

D = diameter [m]

### 9.3.1. Uitgangspunten

Hieronder is een eerste overzicht gegeven van te hanteren waarden voor diverse relevante variabelen in de kosten-baten analyse:

- de gereduceerde rentevoet: wordt aangenomen op 6%. Deze wordt bepaald door de rente op eigen vermogen van 8% minus de inflatie (2%).
- de Netto Contante Waarde wordt bepaald voor de volgende energie prijzen: 6 cent / kWh, 8 cent / kWh, 10 cent / kWh;
- voor de beschouwde periode van analyse, de "levensduur van het project" worden waarden van 20 jaar en 40 jaar gekozen;
- de kosten schattingen zijn exclusief BTW
- de getijcentrale zal in twee jaar gebouwd worden
- de exploitatiekosten bedragen 1% van de investeringskosten

### 9.3.2. Rehabilitatie

Naast de exploitatiekosten zijn er gedurende een periode van 40 jaar ook andere kosten. Eens in de zoveel jaar zal er namelijk een onderdeel vervangen moeten worden. Dit wordt rehabilitatie genoemd.

Hiervoor worden de elektromechanische kosten allereerst onderverdeeld op de wijze beschreven in Tabel 9.2 [31]. Bij methode 2 is er geen onderverdeling tussen kosten voor civiele werken en elektromechanische apparatuur. Hier wordt uitgegaan van een verdeling 55:45 tussen civiele werken en elektromechanische apparatuur.

Onderdeel	Percentage van kosten voor elektromechanische apparatuur
Turbines	24,47 %
Generator	12,02 %
Mechanische apparatuur	3,87 %
Regel apparatuur	55,94 %
Transformator	3,70 %

**Tabel 9.2; Verdeling van kosten voor elektromechanische onderdelen**

Dan kan gebruik worden gemaakt van Tabel 9.3 om de kosten voor rehabilitatie te bepalen [31].

	Rehabilitatie 1		Rehabilitatie 2		Rehabilitatie 3	
	jaar	percentage	jaar	percentage	jaar	percentage
Civiele werken	20	3,00%	40	6,00%	60	6,00%
Generator	25	10,00%	45	40,00%	70	75,00%
Turbines	25	10,00%	45	40,00%	70	75,00%
Transformateur	0	0,00%	40	5,00%	50	100,00%
Bestuur apparatuur	20	20,00%	40	50,00%	60	25,00%
Overige apparatuur	25	10,00%	50	50,00%	75	75,00%

**Tabel 9.3; Rehabilitatie**

Bij civiele werken betekent dit bijvoorbeeld dat in het 20<sup>ste</sup> jaar een extra kostenpost van 3 % van de civiele kosten wordt verrekend. Rehabilitaties die buiten de periode van 40 jaar vallen worden uiteraard niet meeberekend.



### 9.3.3. Berekening

In de economische analyse van de energiepolder wordt een kosten-baten analyse gebruikt. Hierin wordt de netto contante waarde van de investering in de energiepolder bepaald, rekening houdend met het verloop van kosten over tijd en de te verwachten baten. Deze netto contante waarde (NCW) wordt als volgt bepaald:

$$NCW = \sum_{j=1}^T \left( \frac{B_j - I_j}{(1 + rv)^j} \right) \quad (38)$$

Waarin:

T – referentie periode [jaar]

$B_t$  – baten / opbrengsten in jaar t [€]

$I_t$  – investeringen / kosten in jaar t [€]

rv – gereduceerde rentevoet [-]

j = jaartal [-]

In eerste instantie zal de netto contante waarde (NCW) over de economische levensduur worden bepaald bij verschillende energieprijzen (zie 9.3.1). Ook zal bepaald worden bij welke energieprijs na de gekozen levensduur een netto contante waarde gelijk aan nul gevonden wordt. Dit wordt gedaan op de volgende wijze:

$$k = \sum_{j=1}^T \frac{I_j \cdot (1 + rv)^{-j}}{B_j \cdot (1 + rv)^{-j}} \quad (39)$$

Waarin:

k = energieprijs [eurocent/kWh]

T – referentie periode [jaar]

$B_j$  – baten / opbrengsten in jaar j voor 1 cent/kWh[€]

$I_j$  – investeringen / kosten in jaar j [€]

# 10 Optimalisatie

## 10.1. Inleiding

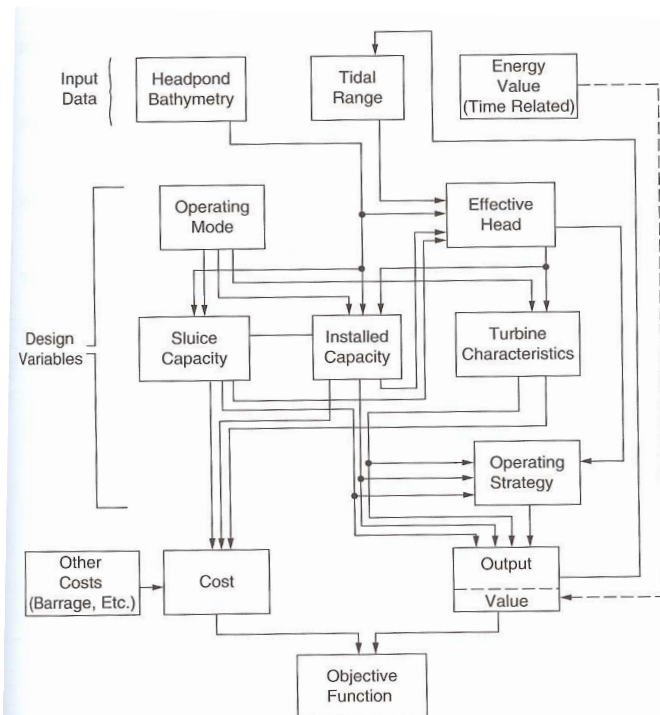
Nu er kennis is over de hydraulische eigenschappen en de kosten van de turbines en de sluizen en een model is gemaakt, kan een optimalisatieslag gedaan worden.

In dit hoofdstuk wordt het optimale aantal turbines, het optimale aantal sluizen, het optimale startverval en het optimale ontwerpverval bepaald.

Daarvoor wordt eerst in paragraaf 10.2 de methode uitgelegd waarmee het optimum voor de verschillende variabelen wordt bepaald. Vervolgens worden de resultaten weergegeven in paragraaf 10.3. Ten slotte worden in paragraaf 10.4 de belangrijkste parameters van de getijcentrale genoemd.

## 10.2. Methode

De verschillende variabelen (aantal turbines, aantal sluizen, ontwerpverval) hebben allen invloed op elkaar. Dit betekent dat het optimale aantal turbines afhankelijk is van het aantal sluizen en het ontwerpverval. Figuur 10.1 geeft een goed beeld over de interactie tussen de verschillende variabelen.

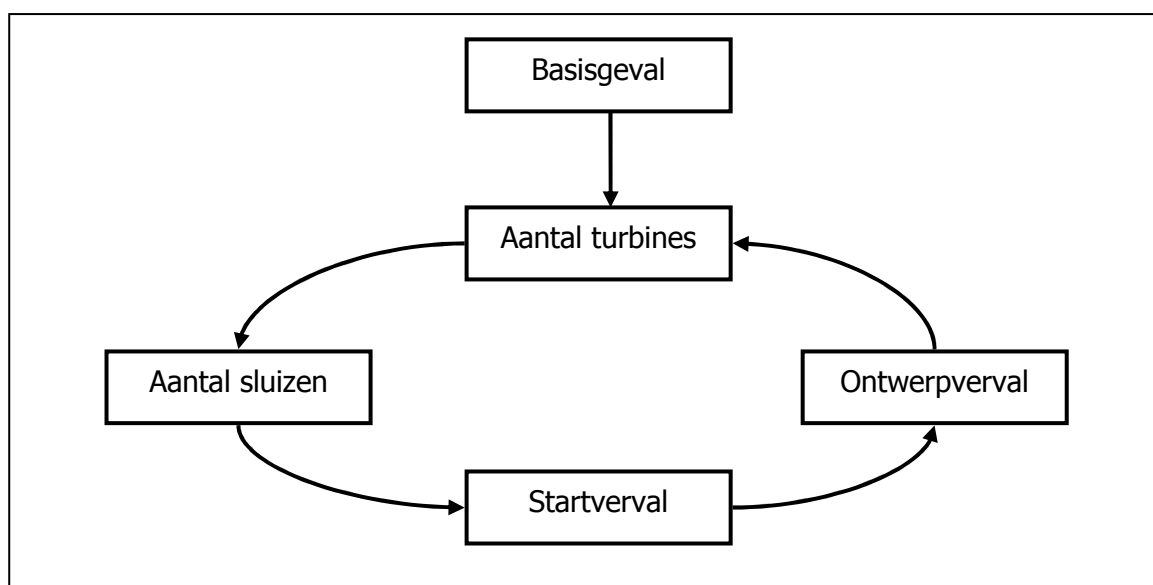


**Figuur 10.1; Relatie tussen verschillende eigenschappen van getijcentrale [10]**

Om de optimale eigenschappen voor een getijcentrale te bepalen, wordt allereerst een basisgeval omschreven dat is gebaseerd op parameters beschreven in de vorige hoofdstukken:

Eigenschap getijcentrale	Methode om basisgeval te bepalen	Waarde
Turbines	$P_{\text{tot}}^{(21)} / P_t^{(22)} = 22 / 3,6$	6
Sluizen	$Q_t^{(23)} = Q_{\text{sluis}}^{(24)} = 732 \text{ m}^3/\text{s}$ $Q_{\text{inlaatwerk}}^{(25)} = 173 \text{ m}^3/\text{s}$ $a_{\text{sluis}} = \frac{Q_{\text{sluis}}}{Q_{\text{inlaatwerk}}}$	4
Startverval	$H_{\text{start}} = 0,66 \cdot R$	3,5 m
Ontwerpverval	Zie paragraaf 7.6.1	4 m

Met behulp van dit basisgeval worden allereerst het aantal turbines geoptimaliseerd met waarden voor de sluizen, het startverval en het ontwerpverval de waarden gegeven door het basisgeval. Daarna wordt met het bepaalde aantal turbines het aantal sluizen geoptimaliseerd met waarden voor het startverval en ontwerpverval volgens het basisgeval. Met de nieuwe parameters wordt dus een optimalisatiecyclus doorlopen. Dit wordt zo vaak gedaan totdat de parameters nauwelijks meer veranderen. Deze aanpak is schematisch weergegeven in Figuur 10.2.



**Figuur 10.2; Methodiek voor bepaling optimum**

<sup>21</sup> Zie paragraaf 4.3; Hier dienen de berekende totale vermogens voor de Prosperpolder (18) en de Hertogin Hedwigepolder (4) bij elkaar op te worden geteld. Voor de berekening van het verval wordt uitgegaan van 66% van het tijverschil. Voor het debiet is formule (10) gebruikt

<sup>22</sup> Zie paragraaf 7.6.3

<sup>23</sup> Zie paragraaf 4.3; Hier dienen de berekende debieten van de Prosperpolder (599) en de Hedwigepolder (133) bij elkaar op te worden geteld.

<sup>24</sup>  $Q_{\text{sluis}}$  is het debiet van alle inlaatwerken samen.  $Q_{\text{inlaatwerk}}$  is het debiet van één inlaatwerk.

<sup>25</sup> Zie paragraaf 8.4.

### 10.3. Resultaten

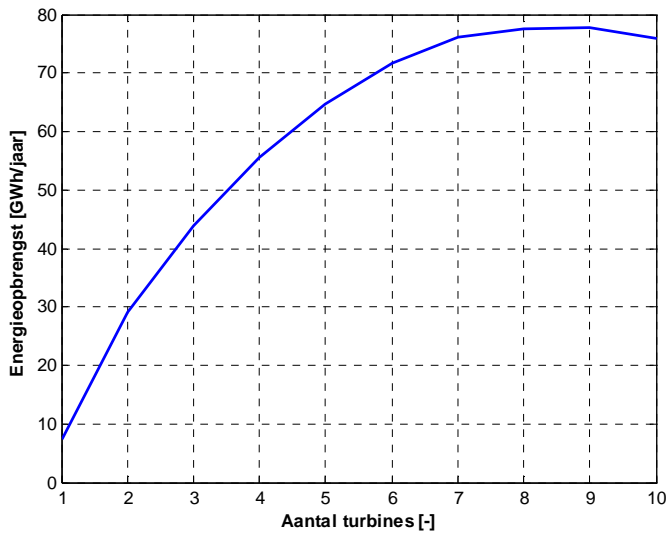
Het resultaat van de eerste twee cycli leidde tot de volgende verbetering van het basisgeval:

Eigenschap getijcentrale	Basisgeval	Waarde na 1 <sup>e</sup> cyclus	Waarde na 2 <sup>e</sup> cyclus	Waarde na 3 <sup>e</sup> cyclus
Turbines	6	4	4	5
Sluizen	4	6	7	9
Startverval	3.5 m	1.5 m	1.5 m	1.5 m
Ontwerpverval	4.0 m	4.5 m <sup>(26)</sup>	4.5 m	4.5 m

**Tabel 10.1; Resultaten van eerste twee optimalisatiecyclussen**

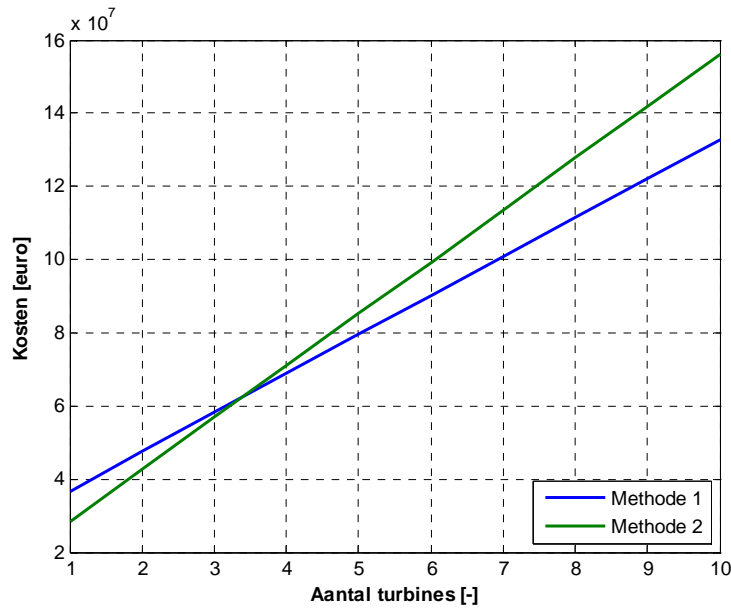
De resultaten zijn getoond van de derde optimalisatie cyclus:

De energieopbrengst, de kosten en de kosten-baten verhouding voor het aantal turbines is te zien in Figuur 10.3, Figuur 10.4 en Figuur 10.5:

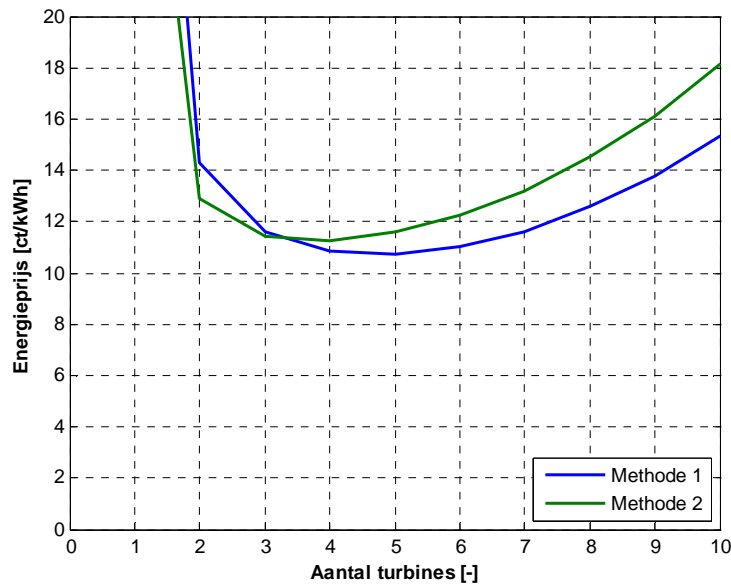


**Figuur 10.3; Aantal turbines vs energieopbrengst**

<sup>26</sup> Het ontwerpverval mag maximaal 4,5 meter zijn om cavitatie te voorkomen



**Figuur 10.4; Aantal turbines vs kosten**

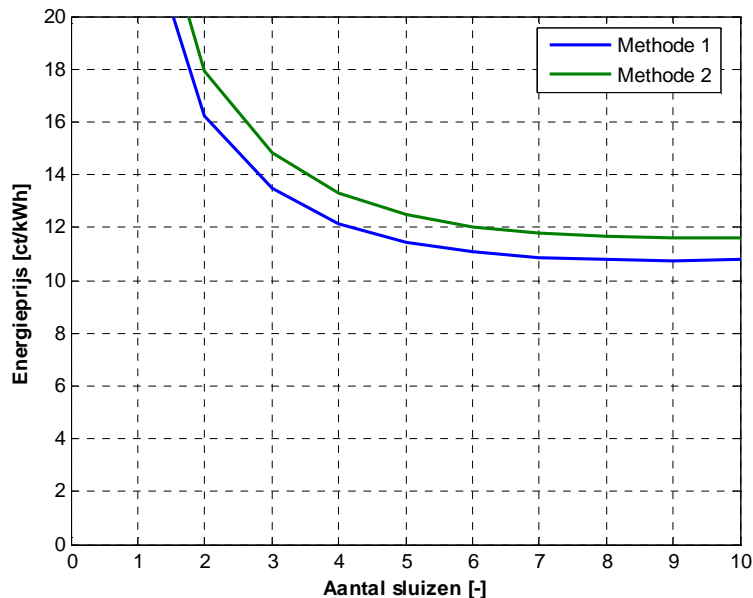


**Figuur 10.5; Aantal turbines vs energieprijs**

Methode 1 en methode 2 zijn verschillende methoden om de kosten voor de getijcentrale uit te rekenen. De uitleg hiervan wordt gegeven in paragraaf 7.7.

Met methode 2 is een aantal van 4 turbines het optimum. Bij methode 1 is dat gelijk aan 5 turbines. Omdat de trend van methode 1 beter is dan methode 2 - omdat hier rekening is gehouden met economische schaalvoordelen - wordt gekozen voor een aantal 5 turbines.

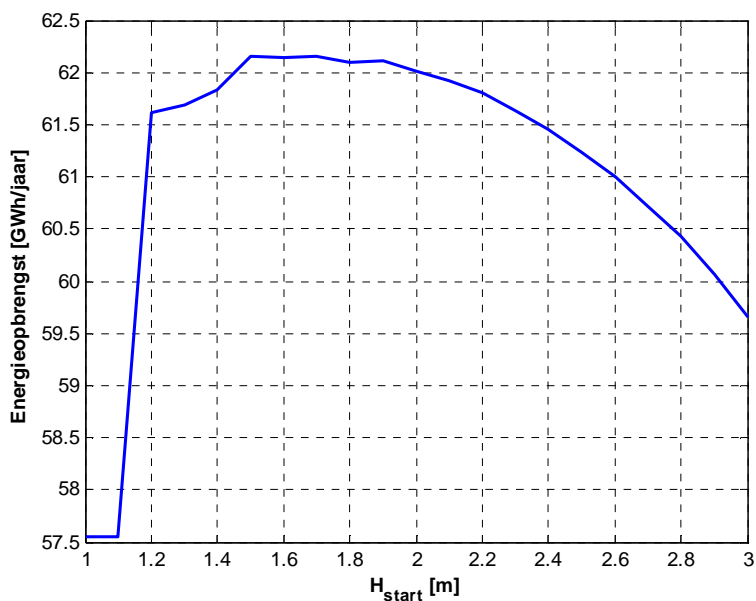
De kosten-baten verhouding voor het aantal sluselementen wordt in Figuur 10.6 getoond.



**Figuur 10.6; Aantal sluisen vs energieprijs**

Het optimale aantal inlaatwerken voor het sluisencomplex is gelijk aan 9.

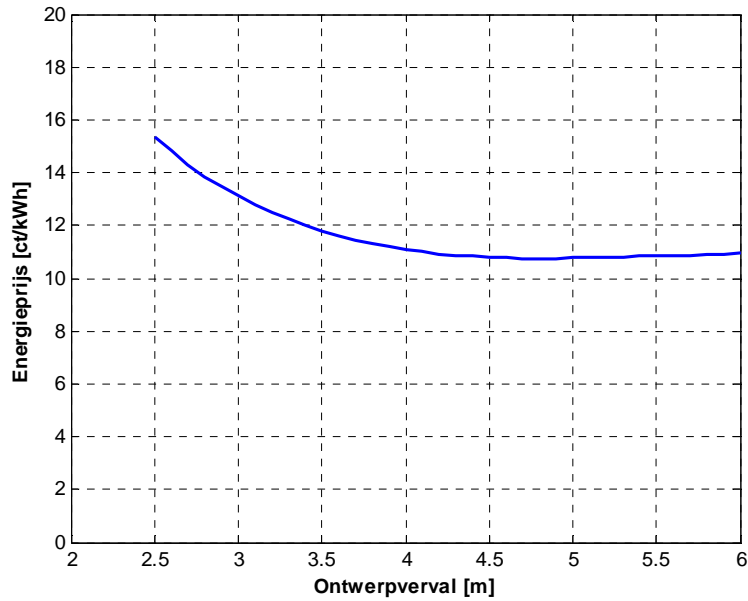
Het optimale (constante) startverval is slechts afhankelijk van de energieopbrengst. In Figuur 10.7 is daarom het startverval uitgezet tegen de energieopbrengst.



**Figuur 10.7; Startverval vs energieopbrengst**

Het optimale startverval is hiermee vastgelegd op 1,5 meter.

Voor de bepaling van het optimale ontwerpverval wordt methode 1 gebruikt omdat het ontwerpverval in deze kostenformule is verwerkt. De kosten-batenverhouding voor het ontwerpverval is getoond in Figuur 10.8.



**Figuur 10.8; Ontwerpverval vs energieprijs**

Het optimale ontwerpverval ligt op 4,8 meter. Vanwege cavitatie en het geringe verschil in energieprijs wordt er hier voor een ontwerpverval van 4,5 meter gekozen.

## 10.4. Eigenschappen getijcentrale

Uit de optimalisatie is naar voren gekomen dat een getijcentrale in de Hertogin Hedwige- en Prosperpolder uit economisch oogpunt het beste de volgende eigenschappen kan hebben.

Eigenschap getijcentrale	Waarde
Turbines	5
Sluizen	9
Ontwerpverval	4,5 m
Geïnstalleerd vermogen	5 x 4,3 = 21,3 MW

De getijcentrale heeft dan een energieopbrengst van 64,3 GWh/jaar. De kosten voor de getijcentrale bedragen tussen 79,2 miljoen euro (methode 1) en 86,3 miljoen euro (methode 2). De netto contante waarde bij energieprijzen van 6, 8 en 10 cent/kWh staat gegeven in Tabel 10.2 en Tabel 10.3.

Energieprijs	Terugverdiëntijd 20 jaar	Terugverdiëntijd 40 jaar
6 cent/kWh	-49,75	-40,39
8 cent/kWh	-37,56	-23,68
10 cent/kWh	-25,37	-6,97

**Tabel 10.2; Netto contante waarde voor kostenmethode 1 [miljoen euro]**

Energieprijs	Terugverdiëntijd 20 jaar	Terugverdiëntijd 40 jaar
6 cent/kWh	-57,83	-49,10
8 cent/kWh	-45,65	-32,39
10 cent/kWh	-33,46	-15,68

**Tabel 10.3; Netto contante waarde voor kostenmethode 2 [miljoen euro]**

De energieprijzen die nodig zijn om uit te komen op een Netto Contante Waarde gelijk aan nul, staan voor verschillende kostenmethoden en verschillende terugverdientijd gegeven in Tabel 10.4.

<b>Terugverdientijd</b>	<b>Kostenmethode 1</b>	<b>Kostenmethode 2</b>
20 jaar	14,2	15,5
40 jaar	10,8	11,9

**Tabel 10.4; Energieprijzen voor kostenmethode 1 en 2 [cent/kWh]**

Een uitwerking van de berekening van deze kostengegevens is gegeven in Appendix D.



# 11 Ontwerp getijcentrale

## 11.1. Inleiding

De belangrijkste eigenschappen voor de getijcentrale zijn bepaald in de voorgaande hoofdstukken.

Hier wordt dieper ingegaan op de bouwmethode en lay-out van de getijcentrale.

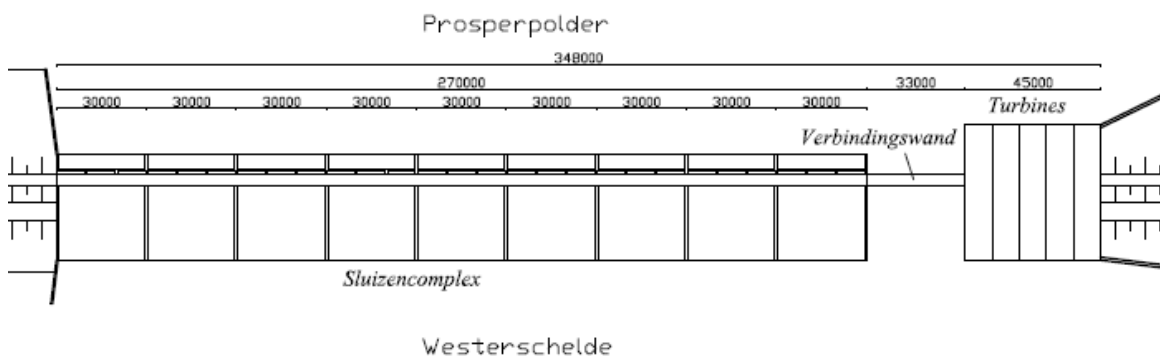
Eerst worden in paragraaf 11.2 de eigenschappen van de getijcentrale genoemd. Vervolgens wordt de bouwmethode en het ontwerp voor de aanstroomconstructies toegelicht in paragrafen 11.3 en 11.4. Ten slotte wordt in paragraaf 11.5 de aansluiting op de primaire kering getoond. Grotere tekeningen dan gebruikt in figuren van de verschillende paragrafen zijn terug te vinden in Appendix E.

## 11.2. Eigenschappen getijcentrale

In hoofdstuk 10 is bepaald dat de getijcentrale uit de volgende onderdelen bestaat:

- aantal turbines: 5
- aantal inlaatwerken: 9

De breedte van één turbine is 9 meter. De totale breedte van de turbines is dan 45 meter. De breedte van één inlaatwerk is 30 meter. Hierdoor is de totale breedte van het sluisencomplex 270 meter. Aangezien er een ruimte tussen de turbines en sluisen is van 33 meter, wordt de totale breedte 348 meter.



**Figuur 11.1; Bovenaanzicht getijcentrale**

## **11.3. Bouwmethode**

### **11.3.1. Inleiding**

In paragraaf 6.3.2 is toegelicht dat de getijcentrale het beste in den droge achter de huidige primaire kering gebouwd kon worden.

Voor de sluisen is een bouwput het meest geschikt doordat de aanlegdiepte op NAP ligt. De kosten voor uitgraven en bemalen zijn dan gering.

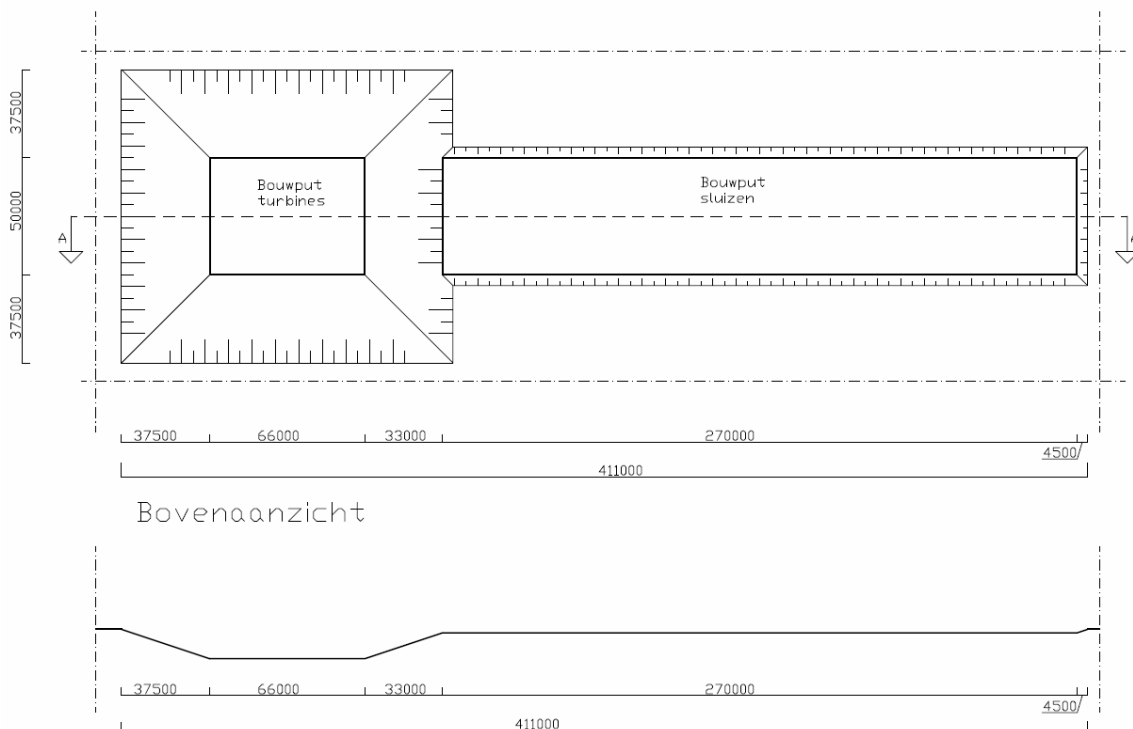
De sluisen worden aangelegd op NAP. Door de geringe af te graven diepte lijkt een bouwput de voordeligste oplossing. Voor de turbines is de aanlegdiepte gelijk aan NAP -11 m. Hiervoor worden vier alternatieven bekeken.

- Alternatief 1; Bouwput voor turbinehuis met turbinehuis en sluisencomplex uiteindelijk los van elkaar
- Alternatief 2; Bouwput voor turbinehuis met turbinehuis en sluisencomplex aaneengesloten
- Alternatief 3; Bouwkuip voor turbinehuis, waterdicht gemaakt door ondoorlatende kleilaag
- Alternatief 4; Bouwkuip voor turbinehuis, waterdicht gemaakt door onderwaterbeton

Deze verschillende alternatieven zullen in de volgende paragrafen worden uitgewerkt.

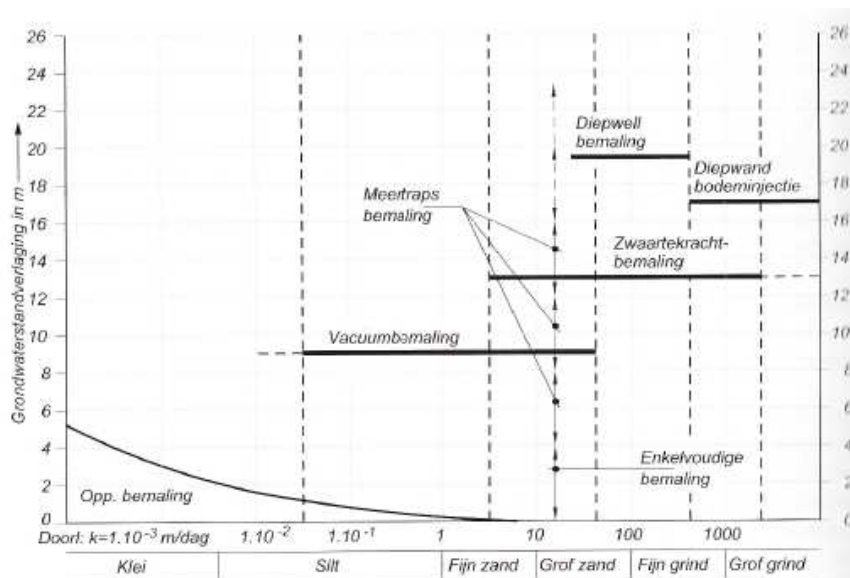
### **11.3.2. Alternatief 1; Bouwput met turbines en sluisen los van elkaar**

Bij dit alternatief worden er twee losse bouwkuipen gemaakt. Eén voor de turbines en één voor de sluisen. Er wordt van uitgegaan dat de bouwputten aan de zijden een talud hebben van 1:3. Met een werkvloerpeil van NAP – 11 m voor de turbines en NAP voor de sluisen betekent dit een minimale afstand van 33 meter tussen de sluisen en de turbines. In Figuur 11.2 is een bovenaanzicht en verticale doorsnede te zien van deze variant.



**Figuur 11.2; Tekening van bouwmethode 1**

Om de werkvloer droog te maken, kan bemaling toegepast worden. Voor de sluizen hoeft maar weinig bemaling te worden toegepast, aangezien de werkvloer op NAP wordt aangelegd. Voor de turbines is meer bemaling nodig. In Figuur 11.3 staat aangegeven welke methoden voor bemaling dan geschikt zijn.



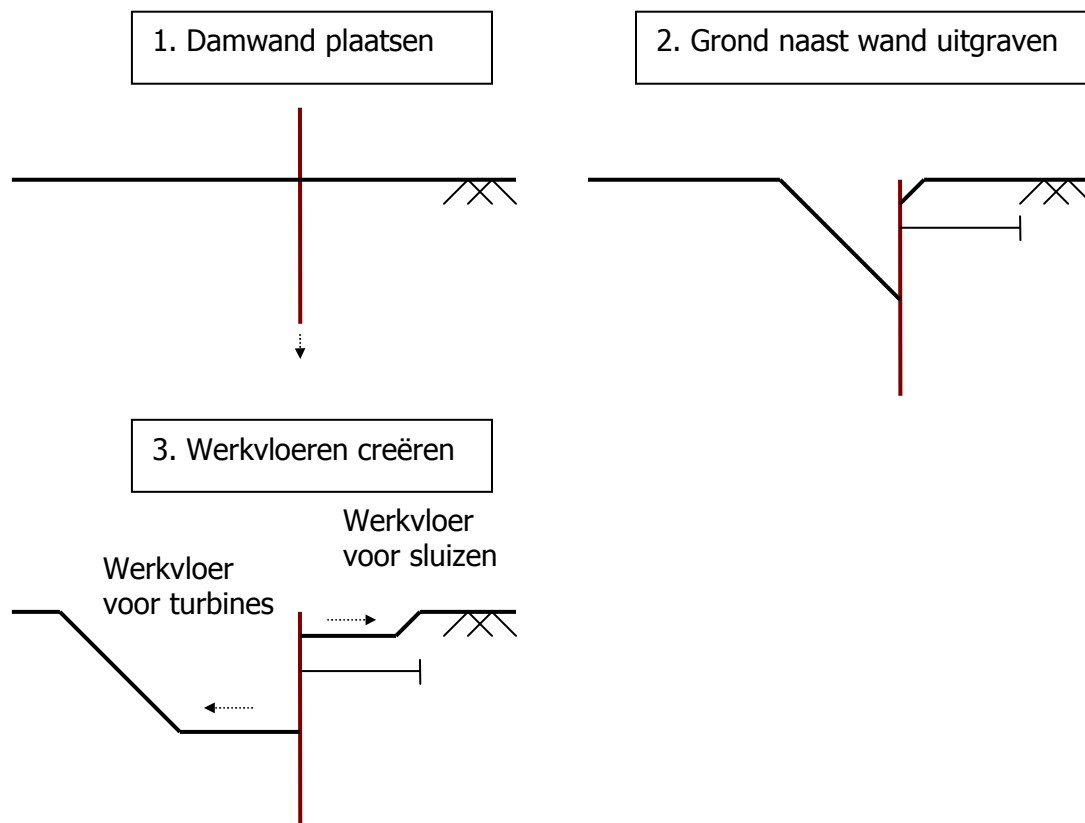
**Figuur 11.3; Methoden voor bemaling voor bepaalde diepte [12]**

Om de sluizen en de turbines aan te sluiten kan hiertussen een grondlichaam geplaatst worden. Het is echter bekend dat op locaties waar grondlichamen aansluiten op beton- of staalconstructies tijdens maatgevende stormen vaak erosie optreedt. Omdat dit grondlichaam maar 36 meter breed is, is de kans op falen van dit grondlichaam tijdens een maatgevende storm daarom groter dan voor andere dijkstukken.

Daarom lijkt het verstandiger om voor deze optie een wand te maken die de twee constructies verbindt.

### 11.3.3. Alternatief 2; Bouwput met aaneengesloten getijcentrale

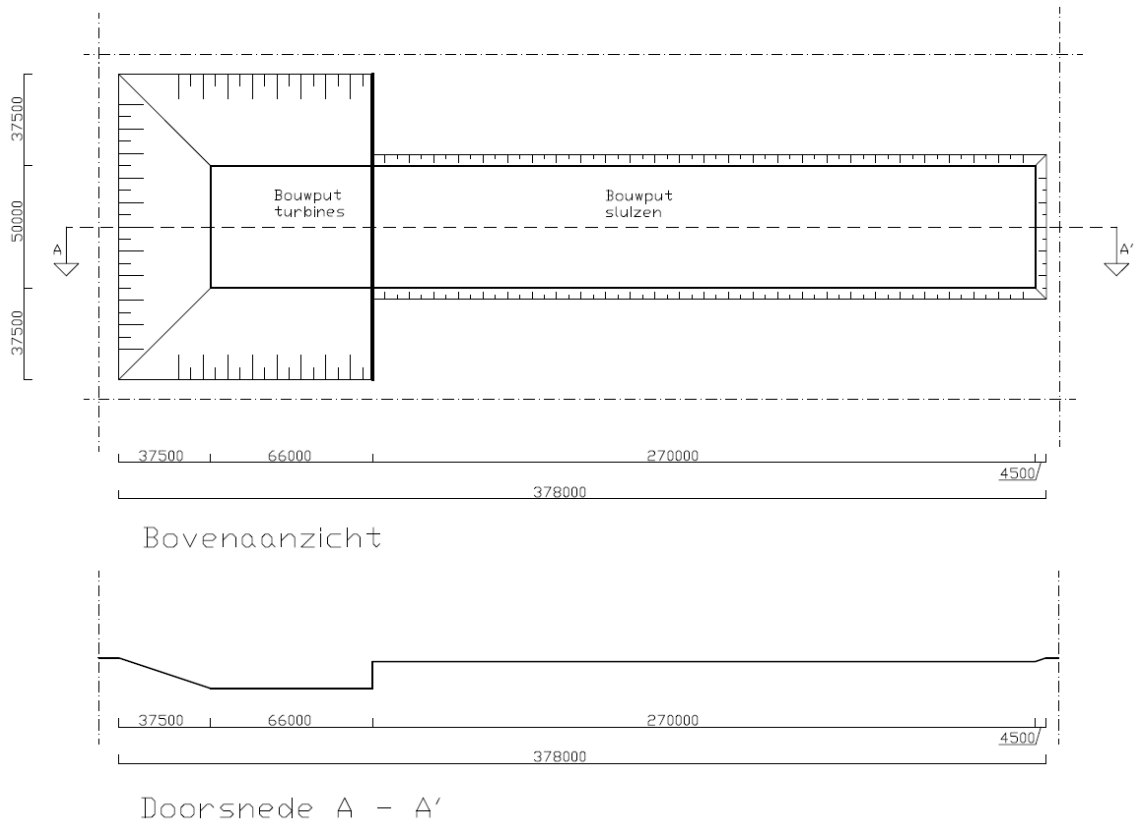
In dit geval wordt er begonnen met de aanleg van een damwand. Daarna wordt aan één zijde de bouwput voor de turbines uitgegraven en aan de andere zijde de bouwput voor de sluisen. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 11.4. Om een hoogte van 10 meter te keren zullen ook ankers moeten worden aangebracht.



**Figuur 11.4; Creatie van bouwputten bij alternatief 2**

De ankers om een hoogte van 10 meter te keren komen onder de fundering van de sluisen.

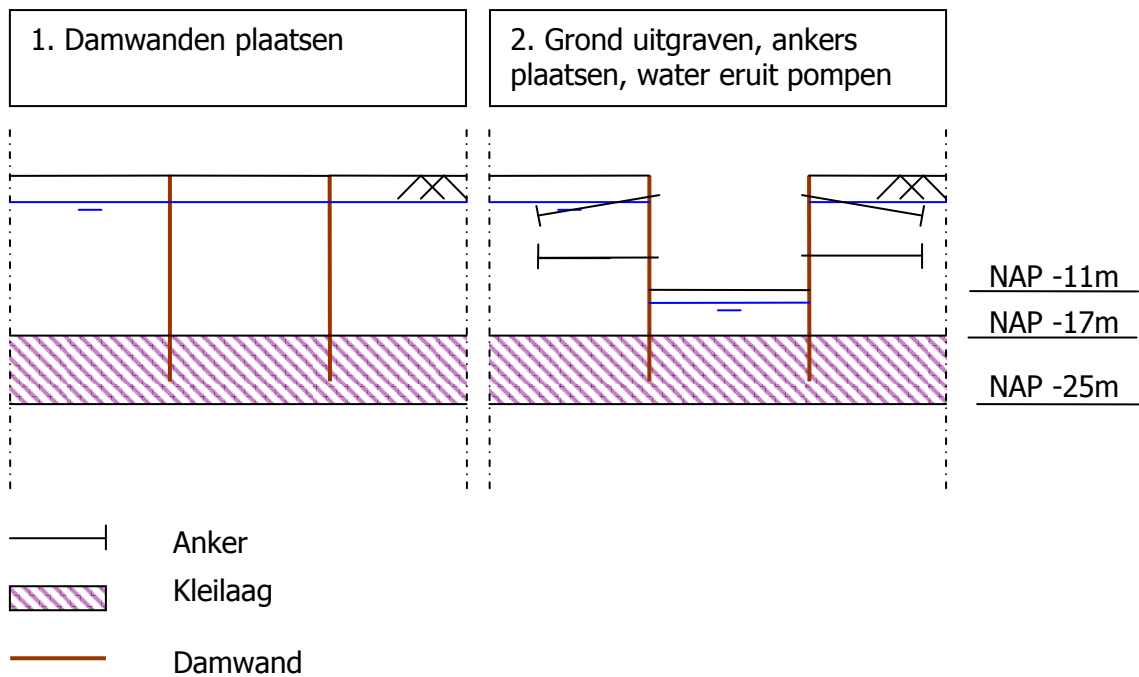
Voor deze optie zal ook bemaling toegepast worden. Dit gebeurt op dezelfde wijze als bij alternatief 1. Het bovenaanzicht en een verticale doorsnede van de uiteindelijke bouwput zijn weergegeven in Figuur 11.5.



**Figuur 11.5; Tekening van bouwmethode 2**

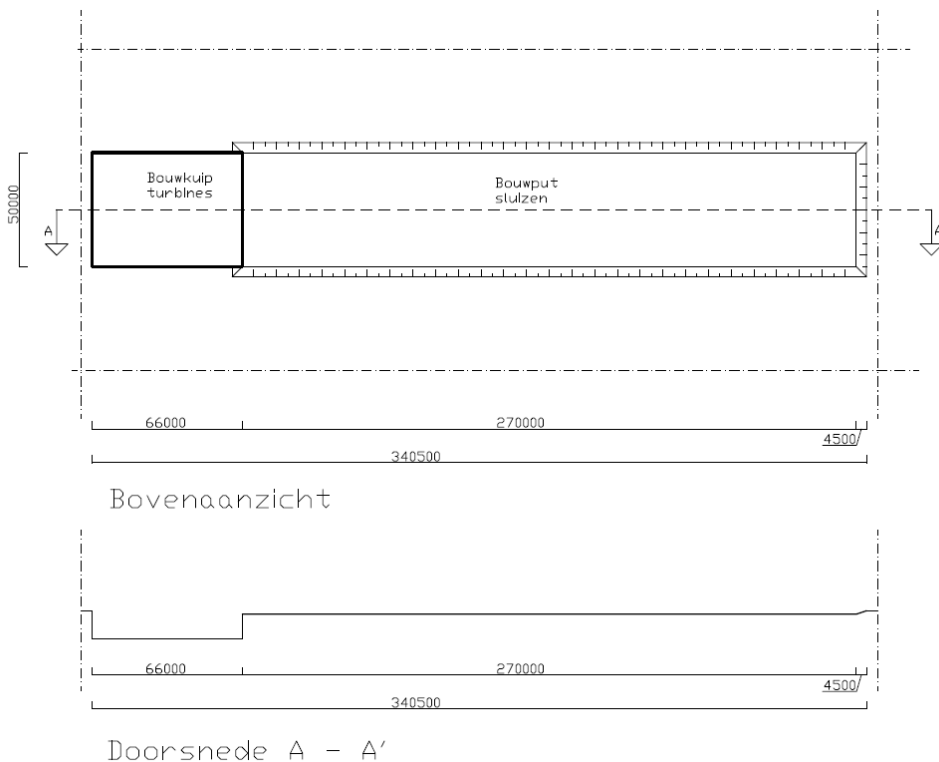
### 11.3.4. Alternatief 3; Bouwkuip met klei als ondoorlatende laag

Voor de locatie van de getijcentrale is bekend dat op een niveau van NAP – 17m zich een ondoorlatende kleilaag bevindt. Wanneer damwanden geslagen worden in de kleilaag kan na uitgraven een waterdichte bouwkuip verkregen worden. Dit staat schematisch weergegeven in Figuur 11.6.



**Figuur 11.6; Creatie van bouwkuip bij alternatief 3**

Het bovenaanzicht en een verticale doorsnede van deze bouwmethode is gegeven in Figuur 11.7.



**Figuur 11.7; Tekening van bouwmethode 3**

Er zal bij dit alternatief niet veel bemaling nodig zijn tijdens de constructie van de turbines. Op basis van gegevens van AGIV [2] is vastgesteld dat de kleilaag begint

op NAP – 17 m en dat de stijghoogte onder deze laag gelijk is aan NAP <sup>27</sup>. Enkele gegevens duiden erop dat de onderkant van de kleilaag ongeveer op NAP – 25 meter ligt<sup>28</sup>. Er kan dan uitgerekend worden of de kleilaag stabiel blijft liggen. De eis daarvoor is dat het gewicht boven de onderkant van de kleilaag groter is dan de waterdruk.

$$P_{boven} = \gamma_z \cdot d_z + \gamma_k \cdot d_k = 19 \cdot 6 + 17 \cdot 8 = 250 \text{ kN} / \text{m}^2$$

$$P_{onder} = \gamma_s \cdot \gamma_w \cdot d = 1,2 \cdot 10 \cdot 25 = 300 \text{ kN} / \text{m}^2$$

De kleilaag zal onder deze condities waarschijnlijk opbarsten en is daardoor niet geschikt. Voordat definitief bepaald kan worden of dit alternatief niet haalbaar is, zullen er meer grondgegevens van de locatie bekend moeten zijn.

### **11.3.5. Alternatief 4; Bouwkuip met onderwaterbetonvloer**

Deze bouwmethode lijkt sterk op bouwmethode 3. In plaats van gebruik te maken van de ondoorlatende kleilaag, wordt een vloer aangelegd van onderwaterbeton. Deze methode wordt slechts gebruikt als er geen geschikte kleilaag op de juiste diepte aanwezig is.

### **11.3.6. Conclusie**

Bij alternatief 3 en alternatief 4 worden stalen damwanden gebruikt om grond te keren. Deze zijn relatief duur, maar de kosten voor de bemaling zijn dan gering.

Alternatief 2 heeft aan één zijde stalen damwanden nodig en veel bemaling. Het voordeel dat de getijcentrale minder breed wordt (en dus minder van de primaire kering verlegd hoeft te worden), weegt daar niet tegen op. Tevens kan de verankering van de damwand problemen opleveren voor de fundering van de sluizen.

Bij alternatief 1 zijn geen stalen damwanden nodig. In plaats daarvan wordt met relatief goedkoop af te graven grondmateriaal een droge werkvloer verkregen. Door de grote diepte van de bouwput zal er ook hier veel bemalen moeten worden.

Wanneer de ruimte aanwezig is om een bouwput te maken, wordt in de praktijk meestal voor gekozen. Alternatief 1 lijkt daarom het meest geschikt.

---

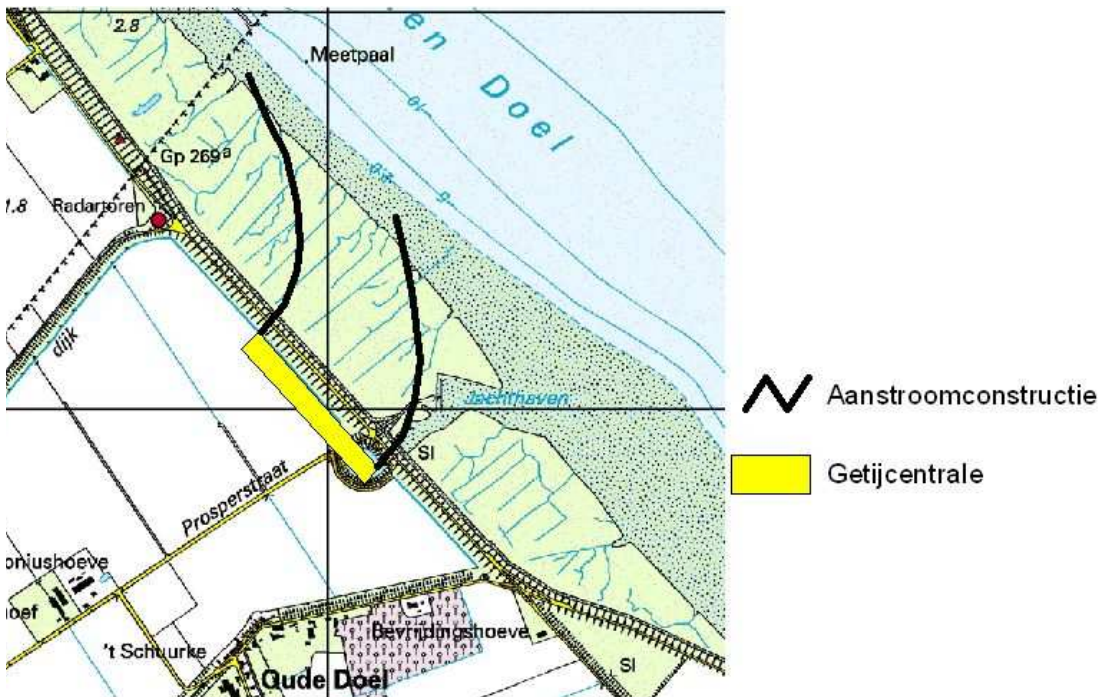
<sup>27</sup> Deze is ongeveer gelijk aan de stijghoogte boven de kleilaag. Dit komt waarschijnlijk doordat dit watervoerende pakket in contact staat met de Westerschelde. Op de sondering is echter te zien dat de kleilaag ook zandlagen bevat. Mogelijk is de kleilaag daardoor in verticale richting permeabel en niet geschikt om de bouwkuip droog te houden.

<sup>28</sup> Op alle sonderingen stopt de kleilaag bij het ondereinde van de meting. Deze metingen zijn vaak 20 – 25 meter diep. De meting van de stijghoogte in de doorlatende laag onder deze kleilaag is gedaan op NAP – 26m.

## 11.4. Aan- en uitstroomconstructies

Nadat de getijcentrale aangesloten is op de primaire kering, kunnen de aanstroomconstructies worden aangelegd. Voor de aanstroom- en de uitstroom is het belangrijk dat de stroom naar de turbines toe recht is. Het rendement van de turbines kan namelijk lager worden door schuine aanstroming. Tevens is het voor de scheepvaart van belang dat er geen stroming, veroorzaakt door de getijcentrale, lateraal op de huidige stroomrichting komt.

Het lijkt daardoor verstandig om de aanstroomconstructie ongeveer als in Figuur 11.8 weergegeven aan te leggen.



**Figuur 11.8; Aanleg aanstroomconstructie**

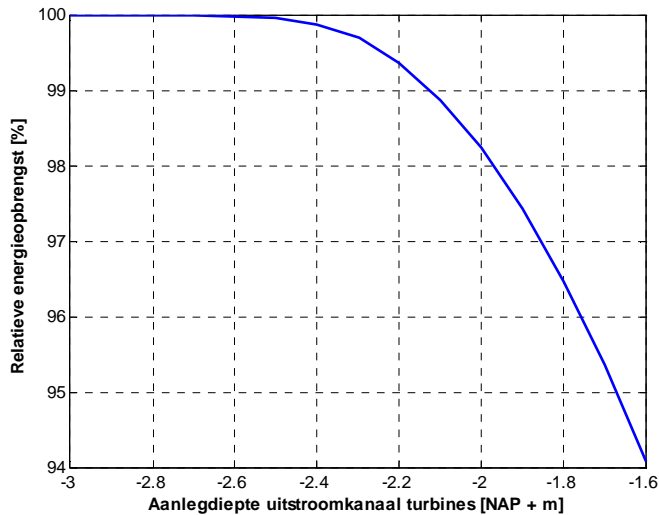
Het aanstroomkanaal van de turbines begint in de polder op een hoogte van NAP + 1,3 m. Onder een talud van 1:7<sup>(29)</sup> wordt het aanstroomkanaal dieper tot NAP – 10 m.

Aan de uitstroomzijde ligt de bodem 1,3 meter hoger. De bodem ligt daardoor op NAP – 8,7 m. Vervolgens stijgt de bodem van het uitstroomkanaal tot NAP – 2,5 m met een talud van 1:7. Er is bepaald dat met een hoogte van het uitstroomkanaal op NAP – 2,5 m de energieopbrengst bijna niet beperkt wordt<sup>30</sup>. Dit is te zien in Figuur 11.9. Een doorsnede van het aan- en uitstroomkanaal is gegeven in Figuur 11.11.

<sup>29</sup> Dit talud is gebruikt voor een uitstroomkanaal bij het ontwerp voor een Pomp Accumulatie Centrale in Nederland.

<sup>30</sup> Het verschil tussen de aanlegkosten voor een diepte van het aanstroomkanaal op NAP – 2,5m en een diepte van bijvoorbeeld NAP – 2,0m zal ten opzichte van alle investeringen voor de getijcentrale klein zijn. De kosten om het kanaal op deze diepte te houden, kunnen sterker verschillen. Door middel van een morfologisch model en een kosten-batenanalyse zal meer inzicht verkregen moeten worden in de beste keuze voor de aanlegdiepte.

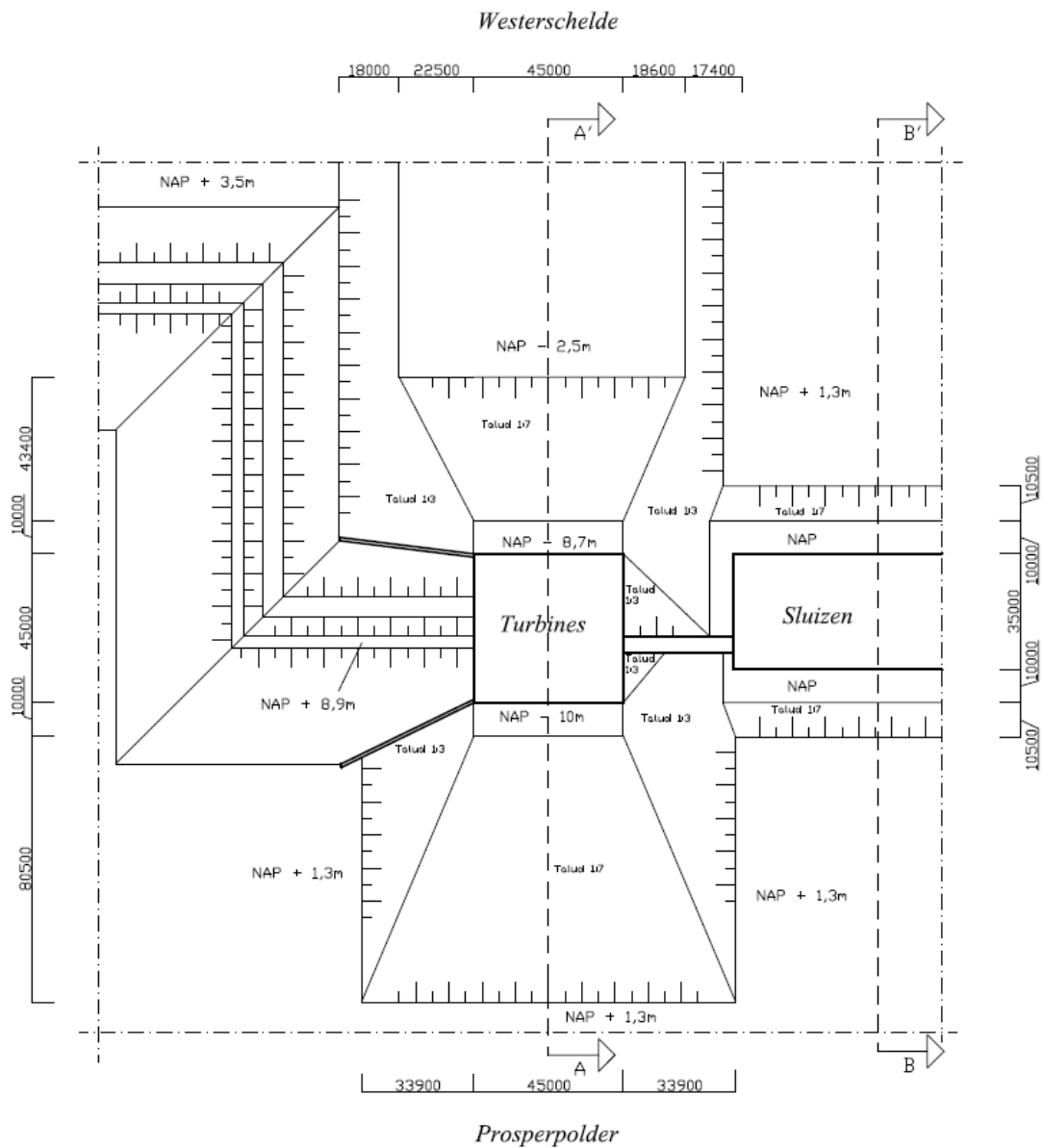




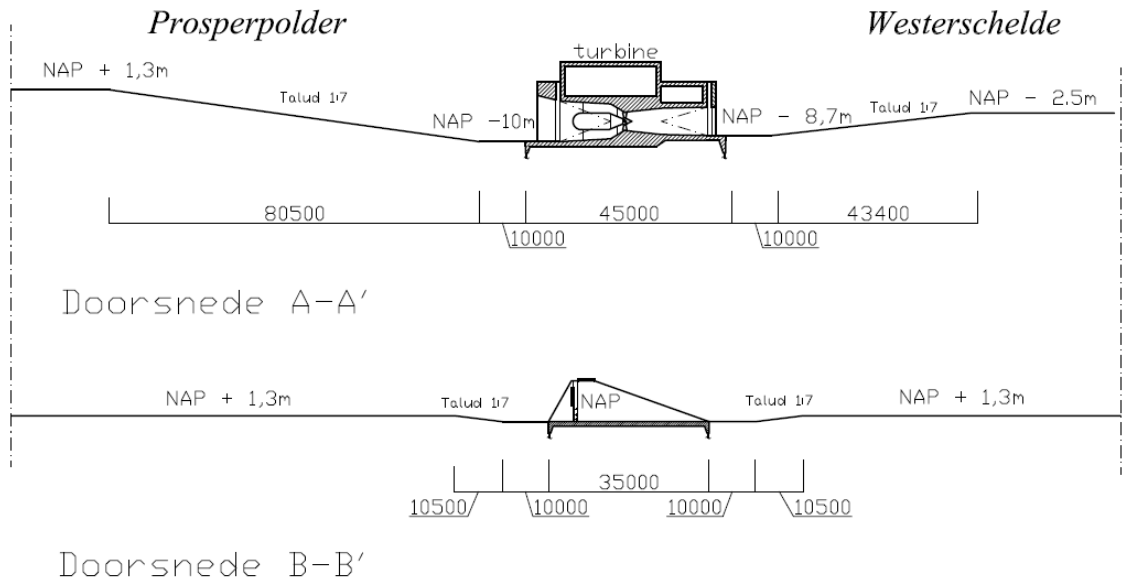
**Figuur 11.9; Invloed van aanlegdiepte uitstroomkanaal op energiewinning**

Het aanstroomkanaal van de sluisen begint bij de Westerschelde op een hoogte van NAP + 1,3 m. Dat blijft de hoogte tot ongeveer 20 meter voor de constructie. Daar daalt de bodem van het aanstroomkanaal met een talud van 1:7 tot het niveau van de vloer van de sluisconstructie (NAP). Wanneer het water de sluis gepasseerd heeft, stijgt de bodem tot een niveau van NAP + 1,3 m met een talud van 1:7.

Door de verschillen in diepte van de aan- en uitstroomconstructies van de turbines en de sluisen is er een overgang nodig tussen de kanalen. Er is hier voor gekozen om de overgang plaats te laten vinden onder een talud van 1:3. De lay-out van de uit- en aanstroomconstructies zijn te zien in Figuur 11.10 en Figuur 11.11.



**Figuur 11.10; Bovenaanzicht aan- en uitstroomconstructies**

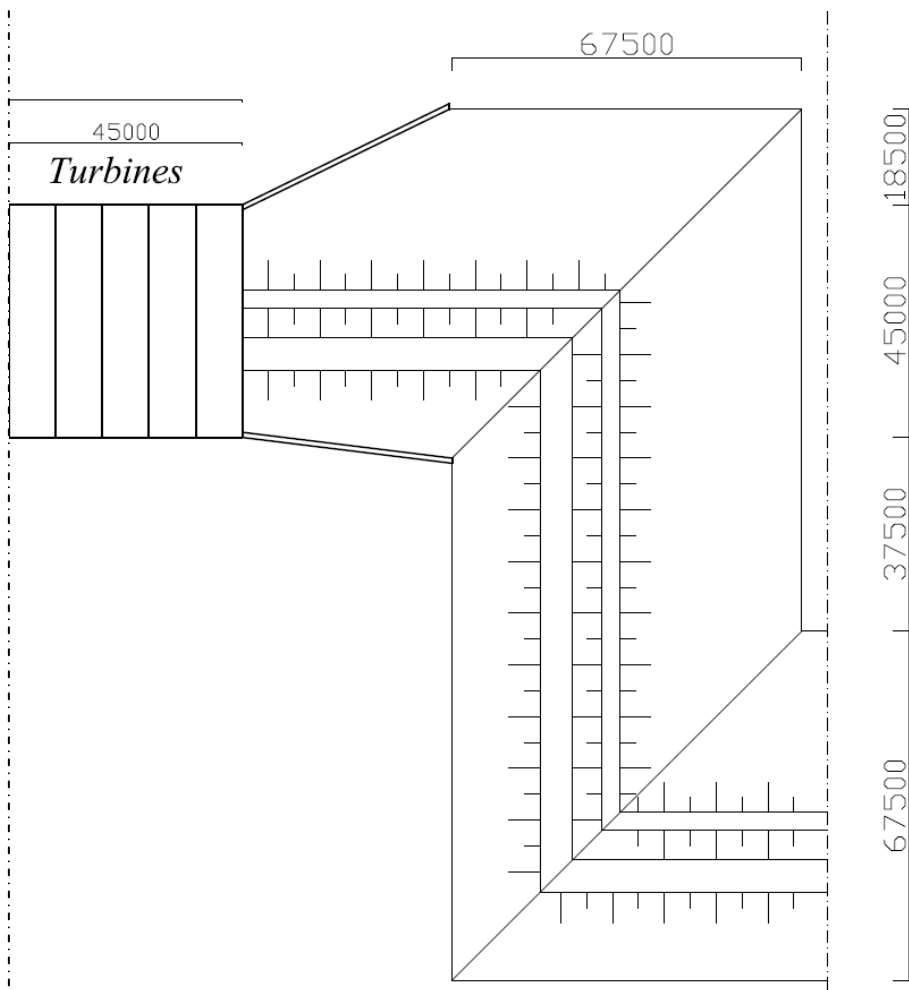


**Figuur 11.11; Doorsneden aanstroomconstructie bij turbines en sluizen**

## 11.5. Aansluiting op primaire kering

De getijcentrale vormt onderdeel van de primaire waterkering. Daarvoor dient de getijcentrale na de bouw aangesloten te worden op deze primaire waterkering.

De getijcentrale wordt achter de primaire waterkering gebouwd. De afstand van de getijcentrale tot de huidige primaire kering is daardoor 37,5 meter (zie Figuur 11.2). Omdat grondmateriaal relatief goedkoop is, is besloten om de getijcentrale met behulp van dijklichamen aan te sluiten op de primaire waterkering. Deze dijklichamen hebben hetzelfde profiel als de huidige primaire waterkering. In Figuur 11.12 is een bovenaanzicht getekend van deze aansluiting op de primaire waterkering.



**Figuur 11.12; Bovenanzicht aansluiting op primaire kering**

## 12 Operatie getijcentrale

### 12.1. Inleiding

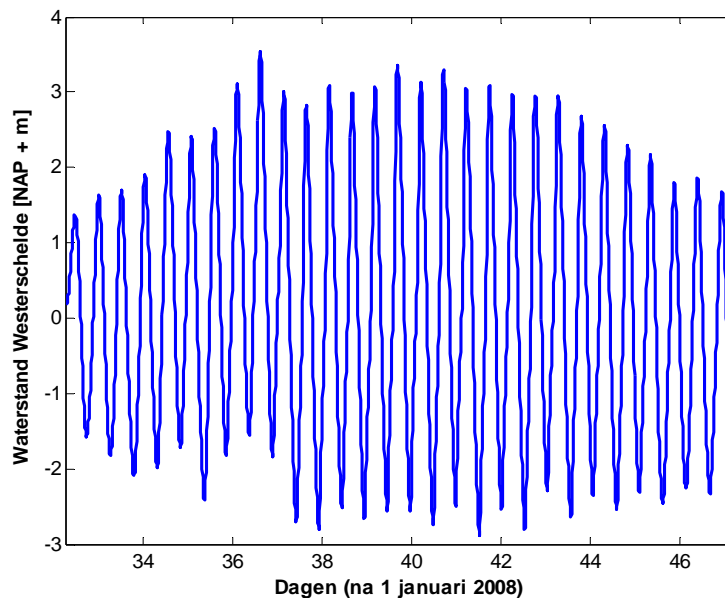
Met behulp van het model en de eigenschappen van de getijcentrale is het mogelijk om te kijken naar de operatie van de getijcentrale.

Hier zal gekeken worden hoe een getijcentrale opereert. Daarbij wordt de aandacht gericht op één spring-doodtijcyclus. Dit is gedaan omdat de grootste verschillen in de energieopbrengst vooral optreden door de verschillen in spring- en doottij.

Allereerst worden de waterstanden die optreden in de Westerschelde en in de polders genoemd in paragraaf 12.2. Vervolgens wordt in paragraaf 12.3 bekeken welk resultaat dit heeft voor de belangrijkste parameters voor energiewinning, het verval en volume. Ten slotte wordt in 12.4 bekeken welke invloed de variatie in getij heeft voor de energieopbrengst.

### 12.2. Waterstanden

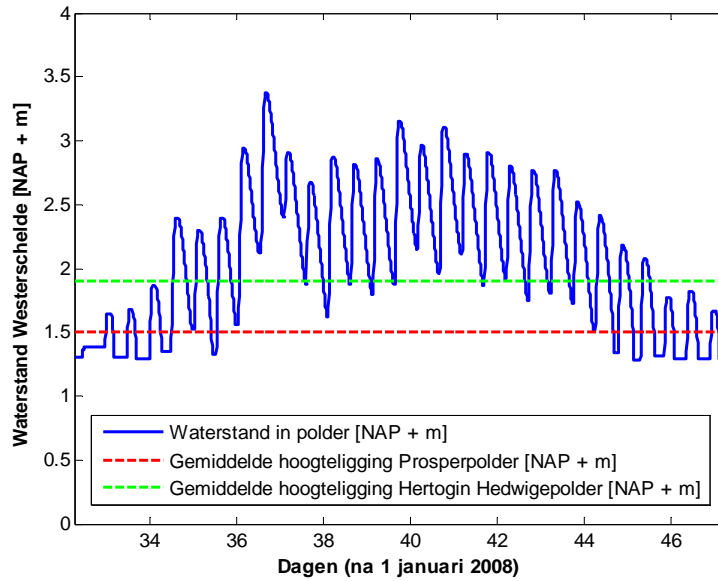
Er is voor deze analyse gekeken naar de waterstanden in de Westerschelde tussen 1 en 16 februari 2008. Deze zijn te zien in Figuur 12.1.



**Figuur 12.1; Waterstanden in Westerschelde tussen 1 februari en 16 februari 2008**

Opmerkelijk is de gemiddelde waterstandsverhoging tussen dag 35 en 37. Deze wordt veroorzaakt door windopzet. Er waren op deze dag in België namelijk windhozen en een sterke wind op zee.

In Figuur 12.2 staat de door het model geproduceerde waterstand in de polder weergegeven.



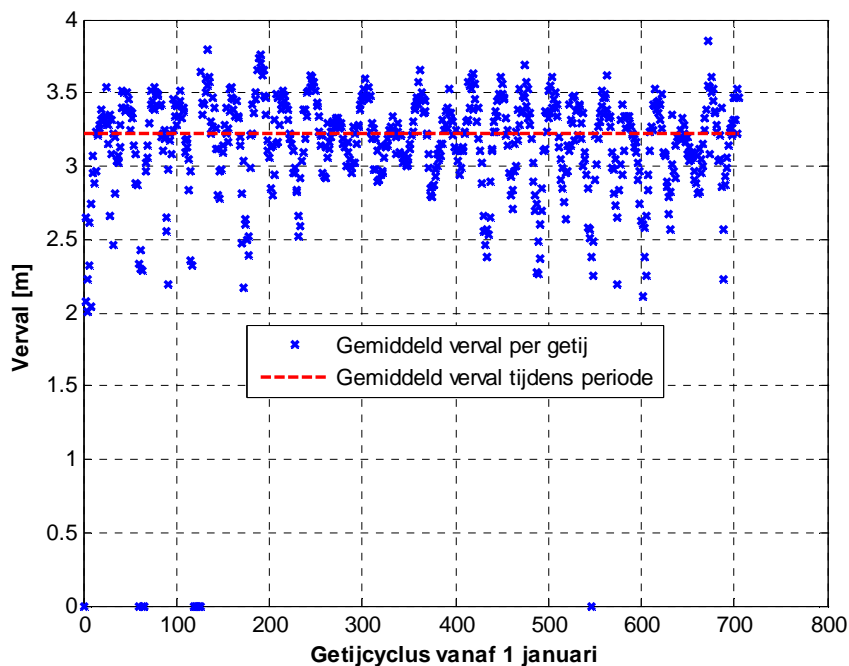
**Figuur 12.2; Waterstand in de polder tussen 1 februari en 16 februari 2008**

Hier valt op te merken dat de Prosperpolder enkele dagen (tussen dag 37 en dag 43) lang gevuld is met water.

### 12.3. Verval en volume

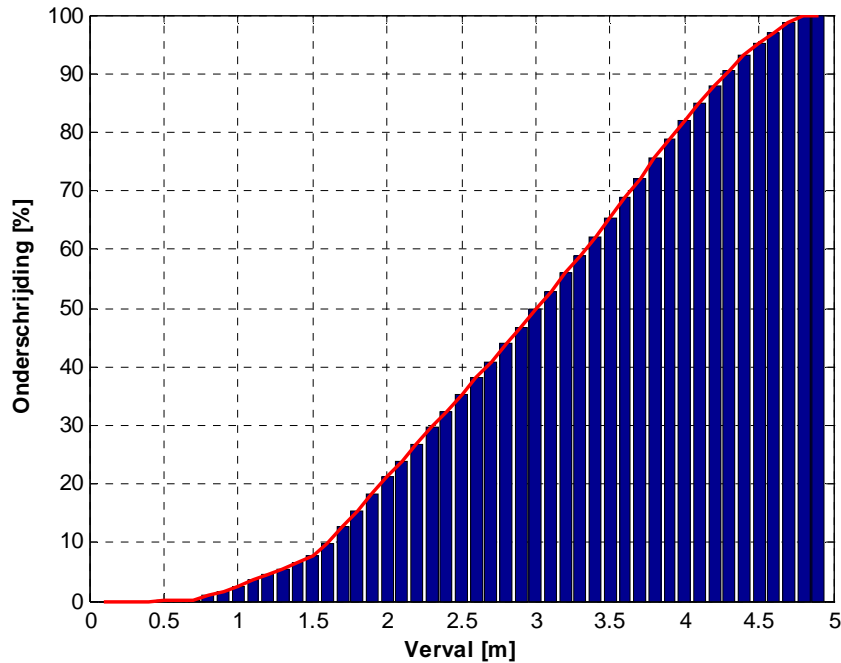
De twee belangrijkste parameters voor de energieopbrengst zijn het verval en het volume. Voor het gehele jaar is bekeken welke invloed het verschil in doodtij en springtij hebben op deze twee parameters.

Het gemiddelde verval tijdens turbineren is gegeven in Figuur 12.3. Dit is gedaan per cyclus en voor de gehele periode.



**Figuur 12.3; Gemiddelde verval gedurende 2008**

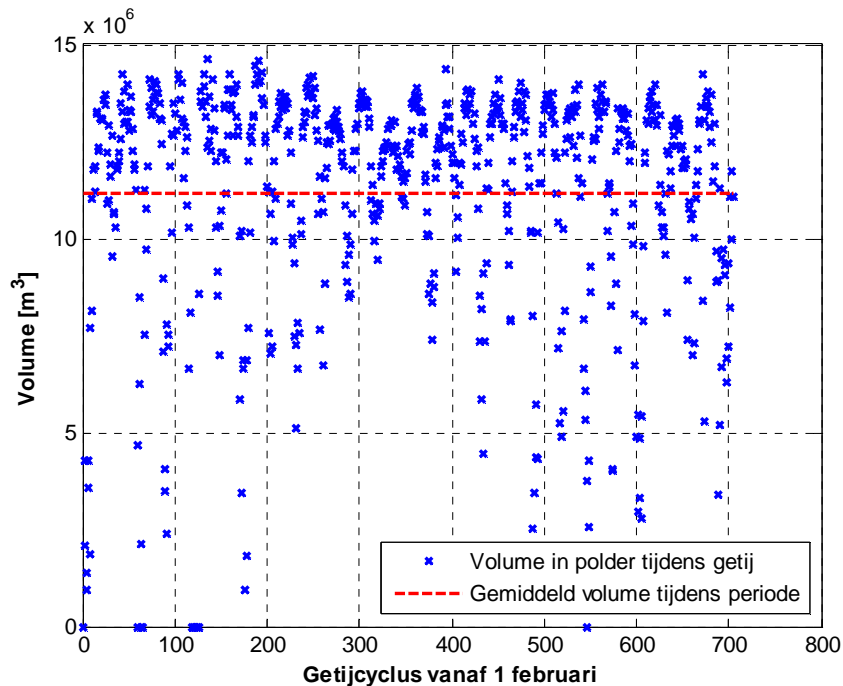
Het gemiddelde verval gedurende elektriciteitsopwekking is 3,22 meter. Tijdens springtij is dit hoger en tijdens doottij lager. In Figuur 12.4 staat weergegeven hoe vaak een bepaald verval overschreden wordt.



**Figuur 12.4; Onderschrijding van verval tussen 1 en 16 februari**

Er is te zien dat het economische optimale ontwerpverval van 4,5 meter slechts 5% van de tijd, dat er energie gewonnen wordt, overschreden wordt.

In Figuur 12.5 staat het volume per getijcyclus weergegeven.



**Figuur 12.5; Volume water in polder tijdens getijden tussen 1 en 16 februari**

Het gemiddelde volume water in de polder is 11,2 miljoen kubieke meter. In paragraaf 5.2.2 is gegeven dat het gemiddelde getijvolume bij de Nederlands-Belgische grens 150 miljoen kubieke meter is. Het volume dat onttrokken wordt ten behoeve van de getijcentrale is gemiddeld 7,5 procent. Bij springtij zal dit percentage hoger zijn en bij doottij lager.

De maximale vermindering van het tijverschil door het onttrekken van water ten behoeve van de getijcentrale is als volgt te berekenen:

$$R_{nieuw} = \frac{V_{ws,nieuw}}{V_{ws,oud}} \cdot R_{oud} = \frac{150 - 11,2}{150} \cdot 5 = 4,63m \quad (40)$$

Waarin:

$R_{nieuw}$  = tijverschil na aanleg getijcentrale [m]

$R_{oud}$  = tijverschil voor aanleg getijcentrale [m]

$V_{ws,nieuw}$  = getijvolume na aanleg getijcentrale [ $m^3$ ]

$V_{ws,oud}$  = getijvolume voor aanleg getijcentrale [ $m^3$ ]

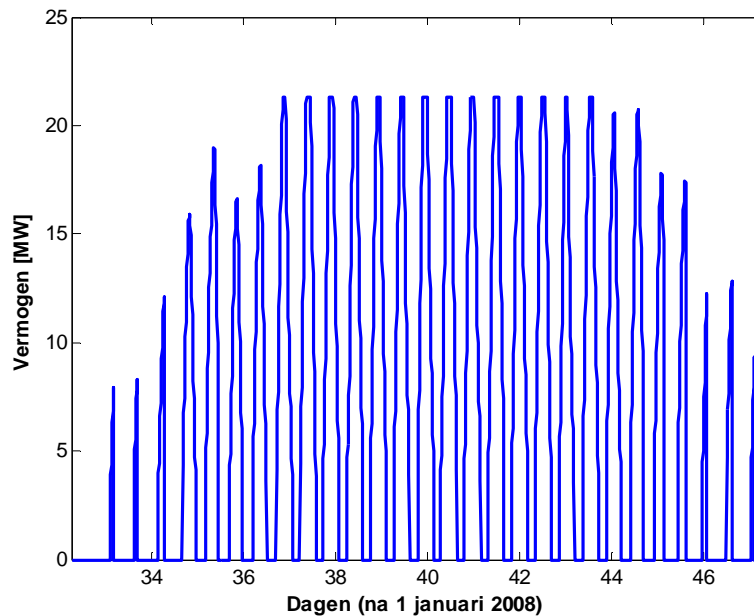
Doordat de verticale doorsnede van de Westerschelde niet rechthoekig is, zal het getijverschil minder afnemen dan is voorspeld in bovenstaande formule. Tevens wordt verwacht dat de afname van de amplitude van het getij vooral bovenstrooms te merken is. Er wordt daarom verwacht dat de afname van het tijverschil weinig invloed heeft op de energieopbrengst.

Doordat in het Westerschelde-estuarium het tijverschil en de geometrie veranderen, is de werkelijke invloed op de Westerschelde lastig te voorspellen. Met een 2D hydraulisch computermodel kan hierin mogelijk meer inzicht verkregen moeten worden.



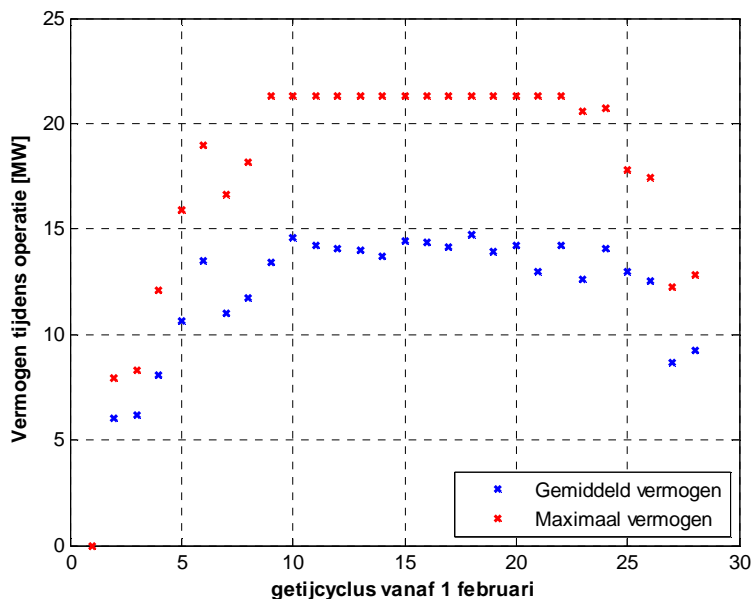
## 12.4. Energieopbrengst

Wanneer de waterstanden uit de Westerschelde en de waterstanden in de Hertogin Hedwige- en Prosperpolder bekend zijn, kan het vermogen en de energieopbrengst bepaald worden. Het vermogen van de getijcentrale gedurende één springdoodtijcyclus staat in Figuur 12.6 weergegeven.

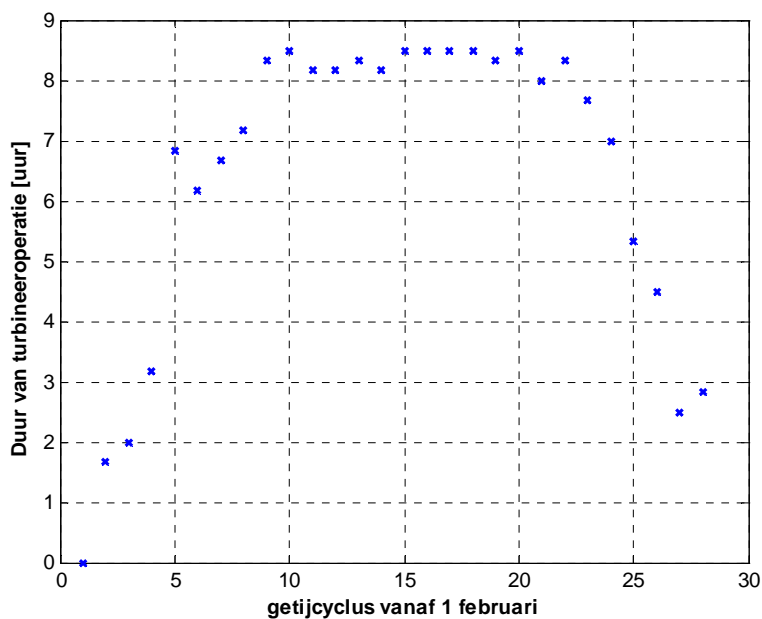


**Figuur 12.6; Opgewekt vermogen tussen 1 februari en 16 februari 2008**

Er is te zien dat zowel de duur als het vermogen tijdens een doodtijcyclus lager is dan tijdens een springtijcyclus. In Figuur 12.7 en Figuur 12.8 zijn respectievelijk het vermogen en de duur van de operatie tegen de getijcyclus uitgezet.

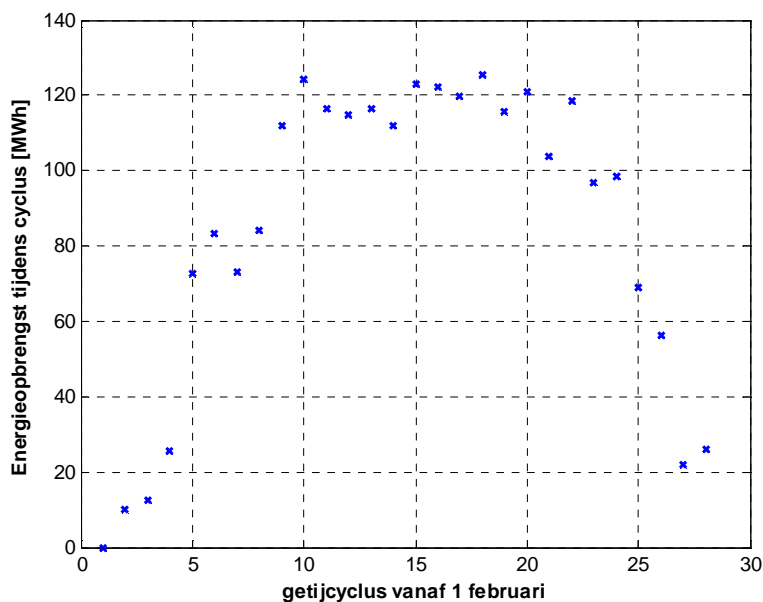


**Figuur 12.7; Vermogen tijdens operatie tijdens getijcycli tussen 1 en 16 februari 2008**



**Figuur 12.8; Duur van operatie tijdens getijcycli tussen 1 februari en 16 februari 2008**

Er is te zien dat tijdens 30% van de getijcycli het geïnstalleerde vermogen gehaald wordt. Het gemiddelde vermogen ligt dan rond de 14 MW. Ook op te merken valt dat tijdens doottij de duur van de operatie veel korter is dan bij gemiddelde tij en springtij. Dit betekent het volgende voor de energieopbrengst per getijcyclus:



**Figuur 12.9; Energieopbrengst tijdens getijcycli tussen 1 februari en 16 februari 2008**

Door zowel de duur van de operatie als het vermogen tijdens de operatie is de energieopbrengst van de doottijcycli veel lager dan tijdens gemiddeld tij en springtij. Bij sommige getijden wordt er zelfs helemaal geen energie gewonnen.

## 13 Conclusies

In dit rapport is onderzoek gedaan naar de technische en economische haalbaarheid van een getijcentrale langs de Westerschelde. Daarbij is met behulp van achtergrondkennis over getij-energie en een analyse van de gebiedskenmerken bepaald dat de Hertogin Hedwige- en Prosperpolder het beste ingezet kunnen worden als bassin voor de winning van getij-energie. In Tabel 13.1 staan de belangrijkste kenmerken gegeven van een getijcentrale op deze locatie.

<b>Kenmerk</b>	<b>Waarde</b>	<b>Eenheid</b>
Gemiddeld tijverschil	5,0	M
Oppervlak bassin	13,3	km <sup>2</sup>
Gemiddelde hoogteligging maaiveld	1,6	NAP + m
Turbine diameter	4	M
Aantal turbines	5	-
Geïnstalleerd vermogen	21,5	MW
Energieopbrengst per jaar	64,3	GWh per jaar
Kosten	86,3	Mil. €

**Tabel 13.1; Kenmerken van getijcentrale bij Hertogin Hedwige- en Prosperpolder**

Voor dit alternatief is gebleken dat de verhouding tussen kosten en baten vergelijkbaar zijn met rivierenergie in Nederland en offshore windenergie. Met economische analyse is namelijk gevonden dat met een energieprijz tussen de 10,8 en 15,5 cent per kWh energie gewonnen kan worden.

De belangrijkste ondervindingen voor een getijcentrale bij de Hertogin Hedwige- en Prosperpolder zijn als volgt samen te vatten:

- Het maaiveld van deze twee polders ligt relatief hoog. De Prosperpolder ligt gemiddeld op NAP + 1,5 m en de Hertogin Hedwigepolder ligt gemiddeld op NAP +1,9 m. Door deze hoge maaiveldligging is het verval tijdens eb relatief groot ten opzichte van het verval tijdens vloed. Er is daarom gekozen voor een getijcentrale die energie opwekt tijdens eb met turbines. Tijdens vloed wordt de polder gevuld met behulp van sluisen.
- Er is voor gekozen om deze getijcentrale te plaatsen aan de Oostzijde van de Prosperpolder. Dit is gedaan omdat de afstand tot de Westerschelde klein is en het niveau in de polder relatief laag. De kosten voor de aanstroomkanalen zijn dan laag en een groot gedeelte van het water in de polder is dan te gebruiken voor energiewinning.
- De turbines zullen in de bouwfase worden aangelegd achter de bestaande primaire waterkering. Tijdens de bouw is de constructie daardoor beschermd tegen overstromingen. Daarna wordt de getijcentrale aangesloten op de primaire waterkering en wordt daardoor zelf onderdeel van deze primaire waterkering.
- De achterliggende dijken zullen geschikt moeten worden gemaakt om water in de Hertogin Hedwige- en Prosperpolder te houden. Daarvoor is voorgesteld om het talud van dijken flauwer te maken, zodat de golfoploop beperkt wordt.

- Er is voor gekozen om Bulb-turbines te plaatsen in deze getijcentrale. Deze behalen een hoog rendement, zijn het minst visonvriendelijk en zijn bij een groot gedeelte van de huidige getijcentrales en laag verval riviercentrales in de wereld toegepast. Deze turbines hebben een diameter van 4 meter bij de smalste doorsnede en hebben een geïnstalleerd vermogen van 4,3 MW.
- Met behulp van een kosten-baten analyse is bepaald dat er 5 turbine-eenheden met een breedte van 9 meter en 9 inlaatwerken met een breedte van 30 meter gebouwd moeten worden voor de levering van de goedkoopste energie. De breedte van de getijcentrale wordt tevens bepaald door de ruimte die nodig is voor de aanstroomconstructie (33 meter). De totale breedte van de getijcentrale wordt daardoor 348 meter
- Het gemiddelde volume water waarmee de polder gevuld wordt, is 11,2 miljoen kubieke meter. Dit is 7,5 % van het gemiddelde getijvolume. Hierdoor zal de getijslag richting Antwerpen minder toenemen. Het effect op de waterstand blijft echter binnen enkele decimeters.

Ten aanzien van de kosten en de opbrengsten kunnen de volgende zaken geconcludeerd worden:

- Er wordt met deze getijcentrale 64,3 GWh aan elektriciteit per jaar geproduceerd. Het grootste gedeelte hiervan zal gewonnen worden bij normaal en springtij.
- De kosten voor de getijcentrale zijn bepaald met twee verschillende methoden. Methode 1 maakt gebruik van een begroting van een geplande riviercentrale in Borgharen en regressie volgens turbineleverancier Alstom. Methode 2 maakte gebruik van gegevens over riviercentrales die gebouwd zijn in Nederland. De kosten volgens deze twee methoden zijn respectievelijk 79,2 miljoen euro en 86,3 miljoen euro.
- Een economisch model is gebruikt om de kostprijs van energie te bepalen. Daarbij is de energieprijs bepaald om geïnvesteerd geld terug te verdienen in 20 en 40 jaar. Dit is gedaan voor de twee methoden voor kostenberekeningen en is te zien in Tabel 13.2.

<b>Terugverdiëntijd</b>	<b>Kostenmethode 1</b>	<b>Kostenmethode 2</b>
20 jaar	14,2	15,5
40 jaar	10,8	11,9

**Tabel 13.2; Energieprijzen voor kostenmethoden en terugverdiëntijd in cent/kWh**

## 14 Aanbevelingen

In dit afstudeerrapport is getracht om de haalbaarheid te onderzoeken van een getijcentrale langs de Westerschelde. De technische haalbaarheid lijkt daarbij aangetoond. Uit een economische analyse blijkt dat de kostprijs van energie vergelijkbaar is met offshore windenergie. Om de haalbaarheidsstudie compleet te maken, zullen de volgende zaken uitgezocht moeten worden:

- Er zal onderzoek naar de invloed van de getijcentrale op de morfologie van het gebied gedaan kunnen worden. Verder onderzoek is dan vooral nodig om te kijken hoeveel onderhoud aan de aanstroomkanalen nodig is. Tevens kan uitgezocht worden om de hoeveel jaar de polder uitgebaggerd dient te worden.
- Doordat de Westerschelde een druk bevaren rivier is, is de invloed van de implementatie van een getijcentrale op de stroming en het tijverschil van belang. Doordat geometrie en getij langs de Westerschelde sterk verschillen, wordt aangeraden om met behulp van een 2D computermodel meer inzicht te krijgen in de invloed van een getijcentrale op de hydraulica.
- Er is gebleken dat de huidige primaire waterkering die de Hertogin Hedwigen- en Prosperpolder beschermen niet voldoen aan de gestelde normen. Er zal bekeken moeten worden of bij de implementatie van een getijcentrale deze dijken nog steeds niet voldoen.
- In deze studie is vooral aandacht besteed aan het civiel-technisch ontwerp. Bij getijcentrales - en energiewaterbouwkunde in het algemeen - dient ook aandacht besteed te worden aan het werktuigbouwkundige en elektrotechnisch ontwerp. Met behulp van deze expertise kan bepaald worden of een Straflo-turbine beter is dan de Bulb-turbine gekozen in dit rapport. Tevens kan bepaald worden of het gebruik van turbines als pompen mogelijk economisch aantrekkelijk is. Ten slotte kan een kosten-baten analyse uitgevoerd worden voor de verschillende onderdelen (zoals het type lei- en loopschoepen) van een Bulb-turbine.
- Voor een complete haalbaarheidsstudie dienen milieueffecten door de getijcentrale bekeken te worden. Daarbij zal allereerst gekeken moeten worden naar voorzieningen om vismigratie mogelijk te maken. Daarvoor zal een analyse gemaakt moeten worden van de verschillende vissoorten en hun methode van migratie. Daarna kan bekeken worden welke invloed de getijcentrale heeft op andere ecologische aspecten.

## 15 Referenties

1. *Wet op Waterkering*. 1995: Nederland.
2. AGIV, *Databank Ondergrond Vlaanderen*. 2009.
3. AGIV, *Digitaal Hoogtemodel Vlaanderen*. 2009.
4. Alkyon, *SWAN golfberekeningen in de Westerschelde voor 6 windklassen*. 1998, Rijkswaterstaat RIKZ.
5. Arnold J., et al., *Vooronderzoek naar de Toepassing van Turbines in de Flakkeese Spuisluis (de Hevel) en elders in het Grevelingenmeer*. 2007, Nijhuis Pompen.
6. Bernshtein, L.B., *Tidal Power Plants*. 2nd ed. 1996, Seoul: Korea Ocean Research and Development Institute. 444.
7. Carbon Trust, *Tidal streams and tidal stream energy device design*. 2009.
8. Clare, R. *Developments in tidal energy*. in *Proceedings on the 3rd conference on tidal power*. 1989. London: Thomas Telford.
9. Clare, R. *Tidal power: trends and developments*. in *Proceedings of the 4th Conference on Tidal Power*. 1992. London: Thomas Telford.
10. Clarke, R.H., *Elements of Tidal-Electric Engineering*. 2007, Hoboken: John Wiley & Sons. 276.
11. Davies, J.K., *A review of information relating to fish passage through turbines: implications to tidal power schemes*. *Journal of Fish Biology*, 1988. **33**(A): p. 111-126.
12. de Gijt, J.G., *Handboek Kademuren, CUR*. 2003.
13. de Kramer, J., *Waterbeweging in de Westerschelde*. 2002, Middelburg.
14. EnergieNed, *Energie in Nederland 2008, Feiten en Cijfers*. 2008: Arnhem.
15. Engineering Toolbox, [http://www.engineeringtoolbox.com/npsh-net-positive-suction-head-d\\_634.html](http://www.engineeringtoolbox.com/npsh-net-positive-suction-head-d_634.html). 2009.
16. Fay, J.A. and M.A. Smachlo, *Capital cost of small-scale tidal power plant*. *Journal of energy*, 1983. **7**(6): p. 536-541.
17. Gibrat, R., *L'Energie des Marées*. 1966, Paris: Presses Universitaires de France.
18. Gladwell, J.S. and C.C. Warnick. *Low-Head Hydro, an examination of an alternative energy source*. in *Low-Head Hydroelectric Technology -- Problems and Opportunities of an Alternative Energy Source*. 1978. Moscow, Idaho: Idaho Water Resources Research Institute.
19. Kporde, C.S.K. and C.C. Warnick, *Experience Curves for Modern Low-Head Hydroelectric Turbines*. 1983, University of Idaho: Moscow.
20. Marine Current Turbines Ltd, [www.marineturbines.com](http://www.marineturbines.com). 2009.
21. McErlean, T. and N. Crothers, *Harnessing the Tides: The Early Medieval Tide Mills at Nendrum Monastery, Strangford Lough*. 2007, UK: The Stationary Office.
22. Mol, C., *De Westerschelde: een resultaat van menselijke ingrepen*. 1995, RIKZ: Middelburg.
23. Mosonyi, E., *Water Power Development*. 2nd ed. Vol. 1. 1963, Budapest: Publishing House of the Hungarian Academy of Sciences.
24. Retiere, C., *Tidal power and the aquatic environment of La Rance*. *Biological Journal of the Linnean Society*, 1994. **51**: p. 25-36.
25. Rijkswaterstaat, *Primaire kering getoetst, Landelijke rapportage toetsing 2006*. 2006.

26. RWS, *waternormalen.nl*. 1990.
27. RWS, *www.waterbase.nl*. 2007.
28. RWS, *Getijcomponenten geldig voor voorspellingen voor 2009 en 2010 voor meetstations Vlissingen, Hansweert en Bath*. 2009.
29. RWS, *www.getij.nl*. 2009.
30. SeaGen, *Factsheet SeaGen*,  
<http://www.seageneration.co.uk/downloads/recent/General%20Documents/Seagen%20Facts%20EXTERNAL%20.pdf>, Editor. 2009.
31. Slangen, P., *Prefeasibility Study on Askjeldalsvatn Power Plant*, in *Hydraulic Engineering*. 2008, Technische Universiteit Delft: Delft.
32. Swane, H., *Tidal Power Plant in Saemangeum*, in *Hydraulic Engineering*. 2007, Technische Universiteit Delft: Delft.
33. Turlings L.G., et al., *Notitie bouwstenen en kansrijke oplossingsrichtingen onderdeel verkenning "Grevelingen water en getij"*. 2009, Rijkswaterstaat, Witteveen&Bos en Bureau Waardenburg.
34. Van Duivendijk, J., *Water Power Engineering, Principles and Characteristics, Lecture Notes CT5304*. 2007, Delft: VSSD.
35. Van Duivendijk, J., J.K. Vrijling, and L.F. Mooyaart, *Getijcentrale in de Brouwersdam; De Proefcentrale Brouwerssluis*. 2008, TU Delft: Delft.
36. van Harn, J., *Feasibility Study on Tidal Power Plant Barrages*, in *Hydraulic Engineering*. 2007, Technische Universiteit Delft: Delft.
37. Vreugdenhil, D., *Waterkracht in Nederland*. OTAR, 1989(5).
38. Waterloopkundig Laboratorium Borgerhout, *Analyse hoog- en laagwaterstanden tussen 1991 en 2000 bij peilstation Prosperpolder*. 2000.

