



Getijcentrale in de Brouwersdam

Variantenstudie

Groenservice Zuid-Holland

8 september 2010

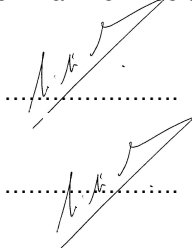
Definitief rapport

9V9366.A0

George Hintzenweg 85
Postbus 8520
3009 AM Rotterdam
+31 (0)10 443 36 66 Telefoon
+31 (0)10 44 3 36 88 Fax
info@rotterdam.royalhaskoning.com E-mail
www.royalhaskoning.com Internet
Arnhem 09122561 KvK

Documenttitel	Getijcentrale in de Brouwersdam
	Variantenstudie
Verkorte documenttitel	Variantenstudie getijcentrale
Status	Definitief rapport
Datum	8 september 2010
Projectnaam	MIRT Verkenning Grevelingen
Projectnummer	9V9366.A0
Opdrachtgever	Groenservice Zuid-Holland
Referentie	9V9366.A0/R0002/LMOY/ILAN/Rott

Auteur(s)	Leslie Mooyaart & Tom Van Den Noortgaete
Collegiale toets	Bert te Slaa
Datum/paraaf	8 sept. 2010
Vrijgegeven door	Bert te Slaa
Datum/paraaf	8 sept. 2010



SAMENVATTING

Recentelijk bleek uit waarnemingen en onderzoek dat de afsluiting van het Brouwershavensche Gat ongewenste gevolgen heeft gehad voor de natuurwaarde van het gebied. Tevens wordt verwacht dat de situatie verder zal verslechteren wanneer geen corrigerende maatregelen worden genomen. Naar aanleiding hiervan is voorgesteld om de doorlaatcapaciteit van de Brouwersdam te vergroten en de getijwerking weer toe te laten in het Grevelingenmeer. Daarbij is voorgesteld om te onderzoeken of een getijcentrale op een maatschappelijk wenselijke wijze hierin kan worden ingepast.

In deze studie zijn vier varianten gedefinieerd die variëren in locatie ten opzichte van de as van de Brouwersdam. Elk van deze varianten kent twee subvarianten met verschil in hydro-elektrische conversietechniek. Voor alle varianten en subvarianten zijn energieprestatie en kosten bepaald. De volledige benaming voor de subvarianten is hieronder getoond:

- (1a) Tweezijdig turbinerende getijcentrale met bulbturbines, aan te leggen in een droge bouwput ter plaatse van de oorspronkelijke caissons.
- (1b) Tweezijdig turbinerende getijcentrale met vrije stroomturbines, aan te leggen in een droge bouwput ter plaatse van de oorspronkelijke.
- (2a) Tweezijdig turbinerende getijcentrale met bulbturbines, aan te leggen in een droge bouwput aan de binnenzijde van de Brouwersdam.
- (2b) Tweezijdig turbinerende getijcentrale met vrije stroomturbines, aan te leggen in een droge bouwput aan de binnenzijde van de Brouwersdam.
- (3a) Tweezijdig turbinerende getijcentrale met bulbturbines, aan te leggen in den natte.
- (3b) Tweezijdig turbinerende getijcentrale met vrije stroomturbines, aan te leggen in den natte.
- (4a) Sifonoplossing met energieopwekking door waterturbines ter plaatse van de oorspronkelijke caissons.
- (4b) Sifonoplossing met energieopwekking door hydropneumatische turbines

Voor elk van de varianten zijn aandachtspunten geformuleerd, die gezien kunnen worden als aanbevelingen voor verder onderzoek. Resultaten hiervan kunnen een significante invloed hebben op de kostenraming, maar er wordt verwacht dat dit binnen de ± 50 % ligt. In de tabel op de volgende pagina zijn waarden gegeven voor de belangrijkste parameters per subvariant.

Variant	Getijslag in Grevelingen-meer	Geïnstalleerd Vermogen	Energie-opbrengst	Opbrengst 1e jaar (energieprijs = 12,2 cent/kWh) ¹	Investerings-kosten (verwachting)	Inv. Kosten -50%	Inv. Kosten +50%
[-]	[m]	[MW]	[GWh/jaar]	[M€]	[M€]	[M€]	[M€]
1a	0,57	60	193	23,5	499	249	748
1b	1,60	8	30	3,6	315	158	473
1b (*)	0,50	2	10	1,2	158	79	237
2a	0,57	60	193	23,5	534	267	801
2b	1,60	8	30	3,6	350	175	526
2b (*)	0,50	2	10	1,2	175	88	263
3a	0,57	60	193	23,5	562	281	843
3b	1,60	8	30	3,6	379	189	568
3b (*)	0,50	2	10	1,2	190	95	285
4a	0,56	54	174	21,2	497	249	746
4b (**)	0,56	37	118	14,4	301	150	451

(*) In overleg met het werkteam kwam naar voren dat een waterstandsvariatie in het Grevelingenmeer van 1,60 meter niet wenselijk is en dat een waterstandsvariatie van 0,50 meter dichterbij komt. Op basis van de resultaten van deze studie is daarvoor gekeken naar een breedte van een doorlaatmiddel van 200 m in plaats van 800 m, zoals bij varianten 1b, 2b, 3b. Energieopbrengsten zijn bepaald met behulp van een hydraulisch model (zie paragraaf 5.5.2). De kosten zijn bepaald door middel van de volgende formule: $K_1/K_2 = \sqrt{L_1/L_2}$. Dit is gedaan omdat een gedeelte van de kosten vast is en een gedeelte afneemt met de breedte.

(**) Deze techniek is slechts in het laboratorium aangetoond. Rendement en kosten van deze techniek zijn daardoor onzekerder dan bij andere varianten.

De kolom met de verwachte investeringskosten zijn het best bruikbaar voor een (maatschappelijke) kosten-batenanalyse. De kolommen met -50% en +50% geven de bandbreedte aan van de investeringskosten. De berekende investeringskosten met een marge van 50 % kunnen tevens gebruikt worden voor een kostenreservering bij de desbetreffende overheden.

Ten aanzien van deze varianten kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De energieopbrengst en het geïnstalleerde vermogen zijn bij variant 1a, 2a en 3a waar bulbturbines worden gebruikt voor de hydro-elektrische conversietechniek, het hoogst. Het geïnstalleerde vermogen is bij deze alternatieven 60 MW en de energieopbrengst 193 GWh/jaar.
- Er is voor de varianten met bulbturbines (1a, 2a, 3a) en met een sifon (4a, 4b) gekeken naar de invloed van verlaging van het middelpil naar NAP – 0,20 m. Uit het hydraulische model kan geconcludeerd worden dat verlaging van het middenpeil nagenoeg geen invloed heeft op de energieopbrengst. Deze conclusie komt overeen met de resultaten van de verkennende studie naar een getijcentrale in de Brouwersdam [TU Delft, 2008].

¹ Deze energieprijs is gebaseerd op de SDE-subsidieregeling geldend voor waterkracht met een verval lager dan 5 meter.

- Er is tevens bestudeerd welke invloed een open verbinding tussen het Volkerak Zoommeer en het Grevelingenmeer heeft op de energieopbrengst. De conclusie is dat bij eenzelfde ontwerp van de getijcentrale de energieopbrengst jaarlijks 1% zal toenemen.
- De alternatieven met vrije stroomturbines (1b, 2b, 3b) zijn weliswaar relatief goedkoop, maar lijken een onlogische keuze wanneer wordt gekeken naar de verhouding tussen kosten en baten.
- De initieel verwachte besparing in kosten voor de uitvoeringswijze door de caissons niet (volledig) te verwijderen door gebruik te maken van sifons (variant 4a en 4b) lijkt gering ten opzichte van het totaalbedrag.
- De kosten bij variant 4b, waarbij de hydro-elektrische conversie wordt verricht door lucht aangedreven turbines, zijn het laagst. Dit komt door de lage kostprijs die aangenomen is voor de lucht turbines. Hoewel de verhouding tussen kosten en baten bij deze variant veelbelovend lijkt, is deze techniek slechts bewezen op laboratoriumschaal. De prestatie en kosten van deze techniek zijn daardoor meer onzeker en verder onderzoek zal aan dienen te tonen of de aannames in deze studie gegrond zijn.

INHOUDSOPGAVE

	Blz.
1 INLEIDING	1
1.1 Aanleiding	1
1.2 Doel	2
1.3 Werkzaamheden en aanpak	2
1.4 Leeswijzer	3
2 FUNCTIONELE EISEN	4
3 ACHTERGROND VOOR KEUZE VARIANTEN	5
3.1 Principe getij-energie	5
3.2 Eigenschappen van de Brouwersdam	5
3.3 Samenvatting verkennende studie Technische Universiteit Delft	6
3.4 Definitie varianten	9
3.5 Hydro-elektrische conversie	10
3.6 Verwijdering caissons	14
3.6.1 Inleiding	14
3.6.2 Verwijdering in een droge bouwput	14
3.6.3 Verwijdering in den natte	14
3.7 Pompfunctie	15
4 UITGANGSPUNTEN EN AANNAMES	16
5 VARIANT 1; CENTRALE TER PLAATSE VAN OORSPRONKELIJKE CAISSONS	18
5.1 Inleiding	18
5.2 Definitie subvarianten	18
5.3 Toelichting op ontwerp	19
5.3.1 Subvariant A	19
5.3.2 Subvariant B	19
5.4 Uitvoeringswijze	20
5.5 Energieprestatie	21
5.5.1 Subvariant A	21
5.5.2 Subvariant B	22
5.6 Aandachtspunten	25
5.6.1 Algemeen	25
5.6.2 Subvariant A	25
5.6.3 Subvariant B	26
6 VARIANT 2; CENTRALE IN DROGE BOUWPUT AAN MEERZIJDE	27
6.1 Inleiding	27
6.2 Definitie subvarianten	27
6.3 Toelichting op ontwerp	27
6.4 Uitvoeringswijze	28
6.5 Energieprestatie	28
6.6 Aandachtspunten	29

7	VARIANT 3; CENTRALE MET NATTE UITVOERINGSWIJZE	30
7.1	Inleiding	30
7.2	Definitie subvarianten	30
7.3	Toelichting op ontwerp	30
7.4	Uitvoeringswijze	31
7.5	Energieprestatie	31
7.6	Aandachtspunten	32
8	VARIANT 4; OORSPRONKELIJKE CAISSONS HANDHAVEN	33
8.1	Inleiding	33
8.2	Definitie subvarianten	33
8.3	Toelichting op ontwerp	34
8.3.1	Algemeen	34
8.3.2	Subvariant A	35
8.3.3	Subvariant B	35
8.4	Uitvoeringswijze	35
8.5	Energieprestatie	36
8.6	Aandachtspunten	36
9	KOSTEN	37
10	CONCLUSIES	41
11	AANBEVELINGEN	44
12	REFERENTIES	47

Bijlagen

1. Dwarsdoorsneden van schetsontwerp
2. Kostenramingen varianten en subvarianten
3. Toelichting op hydraulisch model
4. Berekeningen met betrekking tot de invloed van vrije stroomturbines op de doorlaatcapaciteit

1 INLEIDING

1.1 Aanleiding

Al vóór de Tweede Wereldoorlog waren er plannen bij de Rijkswaterstaat om na de afsluiting van de Zuiderzee ook de kustlijn van Zeeland en Zuid-Holland te verkorten door middel van dammen, al of niet met doorlaatopeningen. Nadat in 1953 een storm tot een grote watersnoodramp in Zuidwest Nederland leidde, is de Deltacommissie aangesteld. Deze stelde een Deltaplan op dat berustte op hetzelfde principe: het verkorten van de kustlijn om kosten voor dijkverbetering te besparen. Dit plan, genaamd het Deltaplan, is inmiddels uitgevoerd - de Brouwersdam is hierin het zevende kunstwerk. Deze Brouwersdam heeft het Brouwershavensche Gat (tussen de eilanden Goeree-Overflakkee en Schouwen-Duiveland) afgesloten. Hierbij ontstond het Grevelingenmeer. De afsluiting is voltooid 1971.

Als uitvloeisel van de discussie over de negatieve effecten op de lokale ecologie door het scheiden van de Grevelingen en de Noordzee is in de jaren 1970 besloten om de Brouwerssluis (een stroomsluis) aan te leggen. Deze is tussen 1974 en 1978 aangelegd in het zuidelijke gedeelte van de Brouwersdam. Deze stroomsluis is in 1978 in gebruik genomen en zorgt sindsdien voor beperkte uitwisseling van water tussen het Grevelingenmeer en de Noordzee.

Recentelijk is uit waarnemingen en onderzoek gebleken dat de afsluiting van het Brouwershavensche Gat toch ongewenste gevolgen heeft gehad voor de natuurwaarde van het gebied. Tevens wordt verwacht dat de situatie verder zal verslechteren wanneer geen corrigerende maatregelen worden genomen. Naar aanleiding hiervan is voorgesteld om de doorlaatcapaciteit van de Brouwersdam te vergroten en de getijwerking weer toe te laten in het Grevelingenmeer. Daarbij is voorgesteld om te onderzoeken of een getijcentrale op een maatschappelijk wenselijke wijze hierin kan worden ingepast.

Het energiebedrijf Delta NV heeft in het voorjaar van 2008 de Technische Universiteit Delft een verkennende studie voor een getijcentrale laten uitvoeren. Ongeveer gelijktijdig is door Rijkswaterstaat in samenwerking met raadgevend ingenieursbureau Witteveen+Bos een verkennende studie uitgevoerd naar mogelijkheden om de natuurwaarde en de economische waarde van het Grevelingenmeer te verbeteren. Het rapport van deze studie was voor het Ministerie van Verkeer en Waterstaat aanleiding om een MIRT² Verkenning uit te laten voeren.

Deze MIRT Verkenning is opgedeeld in drie sporen (Water & Natuur, TR-ontwikkeling³, Duurzame Energie). De resultaten van de eerste drie sporen zullen als input gebruikt worden om een Plan MER te maken. In het spoor Duurzame Energie wordt gekeken naar de mogelijkheden voor getij-energie. Voor dit spoor zijn verschillende werkpakketten geformuleerd (Techniek, Morfologie, Ecologie, Economie, Organisatie & Participatie). Eind april 2010 is door Groenservice Zuid-Holland aan Royal Haskoning opdracht verleend om onder begeleiding van het team van de MIRT Verkenning de werkzaamheden voor het werkpakket Techniek binnen het spoor Duurzame Energie uit te voeren.

² Meerjarenprogramma Infrastructuur, Ruimte en Transport

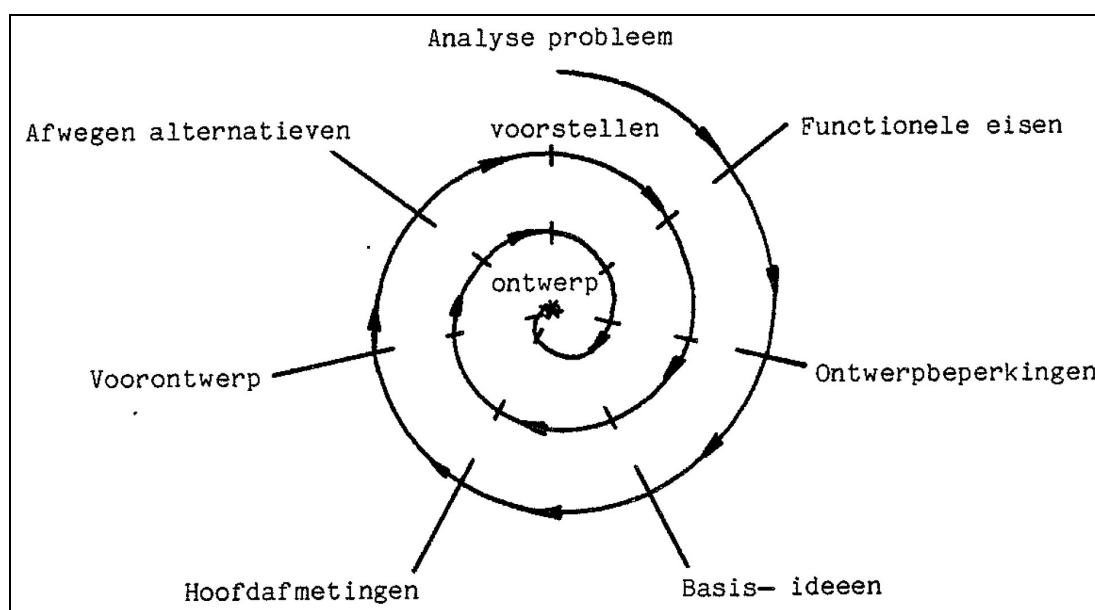
³ TR = Toerisme & Recreatie

1.2 Doel

Het doel van deze studie is een aantal varianten voor een getijcentrale te onderzoeken, waarbij verschillende ontwerp- en uitvoeringsaspecten worden belicht. Dit rapport beoogt niet een keuze te maken tussen de verschillende varianten.

1.3 Werkzaamheden en aanpak

Bij bijna ieder ontwerpproces wordt gewerkt van grof naar fijn (zie figuur 1.1). Daarbij zullen bepaalde stappen gedurende het proces herhaald worden, maar telkens op een steeds hoger detailniveau. Dit rapport toont de resultaten van de eerste stappen van een ontwerpproces.



Figuur 1.1 Ontwerpproces bij waterbouwkundige werken [TU Delft, 1984]

Het project is begonnen met een startoverleg met het werkteam⁴ om mogelijkheden te onderkennen en varianten te definiëren. In dat startoverleg zijn een aantal mogelijkheden onderkend voor:

- Locatie van de energiegenerende machines ten opzichte van de as van de bestaande Brouwersdam;
- Type van de energiegenerende machines.

Na het startoverleg zijn de verschillende varianten uitgewerkt. Dit is gedaan door allereerst de hoofdafmetingen te bepalen. Vervolgens zijn schetsmatige dwarsdoorsneden per variant gemaakt voor de drie fases (tijdelijke werken, bouw getijcentrale, getijcentrale in operatie). Op basis van de hoofdafmetingen en de uitvoeringswijze zijn per variant schattingen gemaakt voor kosten en opbrengsten.

Na een tweede overleg met de adviescommissie zijn enkele wijzingen voorgesteld voor een betere vergelijking en deze zijn in dit rapport geïmplementeerd.

⁴ Het werkteam bestaat drs. M. Bruijs, dr. ir. Z. Wang, ir. D. Van der Wiel, ir. J. Van Duivendijk, dr. ir. J. Van Berkel en de schrijvers van dit rapport (ir. T. Van Den Noortgaete, ir. G. te Slaa, ir. L. Mooyaart).

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 zijn de functionele eisen waaraan de oplossingen dienen te voldoen beschreven. In hoofdstuk 3 wordt de achtergrond voor de keuze van de varianten toegelicht. De uitgangspunten en aannames die zijn gebruikt bij het uitvoeren van de studie worden behandeld in hoofdstuk 4. In de hoofdstukken 5 t/m 8 worden de varianten toegelicht. De kosten van de verschillende varianten en subvarianten zijn beschreven in hoofdstuk 9. In hoofdstuk 10 worden conclusies getrokken uit de in de studie gevonden resultaten. De aanbevelingen voor verder onderzoek zijn getoond in hoofdstuk 11.

2 FUNCTIONELE EISEN

Aan de varianten worden enkele functionele eisen gesteld. Deze zijn in dit stadium van het project nog globaal en zijn hieronder opgesomd;

- De waterkwaliteit in het Grevelingenmeer dient voldoende verbeterd te worden;
- De Brouwerdam moet voldoende veiligheid tegen overstroming bieden om het achterland te beschermen;
- Er dient getij-energie opgewekt te worden;
- De toe te passen techniek voor hydro-elektrische conversie is bewezen in een laboratoriumopstelling. Mocht de hydro-elektrische conversie techniek op dit moment slechts bewezen zijn in het laboratorium, dan dient voor realisatie van de getijcentrale een pilotproef te worden uitgevoerd.

3 ACHTERGROND VOOR KEUZE VARIANTEN

3.1 Principe getij-energie

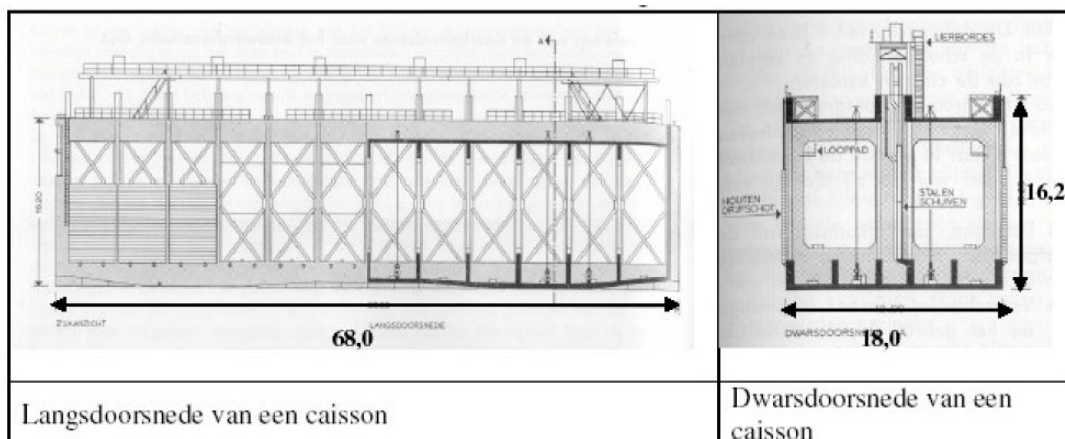
De principes van het genereren van elektrische energie uit waterstandsverschillen veroorzaakt door de getijwerking zijn in wezen eenvoudig. Op daartoe geschikte plaatsen langs de kust of in een estuarium, bij voorkeur met grote getijverschillen, wordt een dam met openingen aangelegd. Doordat minder water het afgesloten gebied kan in- of uitstromen zullen aan beide zijde van de dam waterstandsverschillen ontstaan. Hierdoor zal water door de openingen stromen. Door in de openingen turbines gekoppeld aan generatoren te plaatsen kan elektrische energie worden opgewekt. Turbines kunnen ook buiten de opening geplaatst worden, waarbij de aandrijving op een andere manier plaatsvindt. Voor een vollediger begrip en achtergrondinformatie wordt verwezen naar de volgende literatuur:

- Van Duivendijk, J., Water Power Engineering, Principles and Characteristics, Lecture Notes CT5304. 2007, Delft: VSSD;
- Carbon Trust, Technical overview of wave and tidal stream energy. 2009;
- Bernshtein, L.B., Tidal Power Plants. 2nd ed. 1996, Seoul: Korea Ocean;
- Clarke, R.H., Elements of Tidal-Electric Engineering. 2007, Hoboken: John Wiley & Sons. 276;
- Gibrat, R., L'Energie des Marées. 1966, Paris: Presses Universitaires de France.

3.2 Eigenschappen van de Brouwersdam

Sinds de aanleg in 1974 zijn er in en langs de Brouwersdam werken uitgevoerd t.b.v. de waterhuishouding (doorlaatsluis) en de recreatie (jachthavens, Port Zélande). Dit impliceert dat er alleen plaats is voor een getijcentrale bij de oorspronkelijke sluitgaten.

In de verkennende fase voor de MIRT Verkenning is het noordelijke sluitgat aangewezen als meest geschikte locatie voor een getijcentrale. Dit gedeelte van de Brouwersdam is gesloten met behulp van doorlaatcaissons. In totaal zijn er 12 doorlaatcaissons geplaatst met de afmetingen ($B = 18$ m, $L = 68$ m, $H = 16,2$ m, zie Figuur 3.1). Deze zijn vervaardigd in een bouwdok op de locatie waar zich op dit moment de werkhaven Bommenede bevindt. Na vervaardiging zijn de caissons naar het noordelijk sluitgat gevaren en vervolgens op een 35 meter brede drempel geplaatst. Deze drempel heeft een hoogte van 2,75 meter en bestaat uit een filterconstructie die bestaat uit verschillende lagen stortsteen. Onder en naast de drempel bevindt zich een uitgebreide bodemverdediging (NAP – 12,75 m). Gemeten vanaf de as van de drempel is de bodemverdediging 130 meter breed aan zowel de meer- als de zeezijde. Nabij de landhoofden is de breedte 160 meter. De bodemverdediging bestaat uit een 24 centimeter dikke mastiek mat waarop een bestorting van 200 kg/m^2 ligt. Hij is berekend op vervallen over de drempel tot 2,5 á 3 meter [TU Delft, 2008] [DMW-DW, 1968] [DMW-DW, 1970].



Figuur 3.1 Doorlaatcaisson Brouwersdam [TU Delft, 2008]

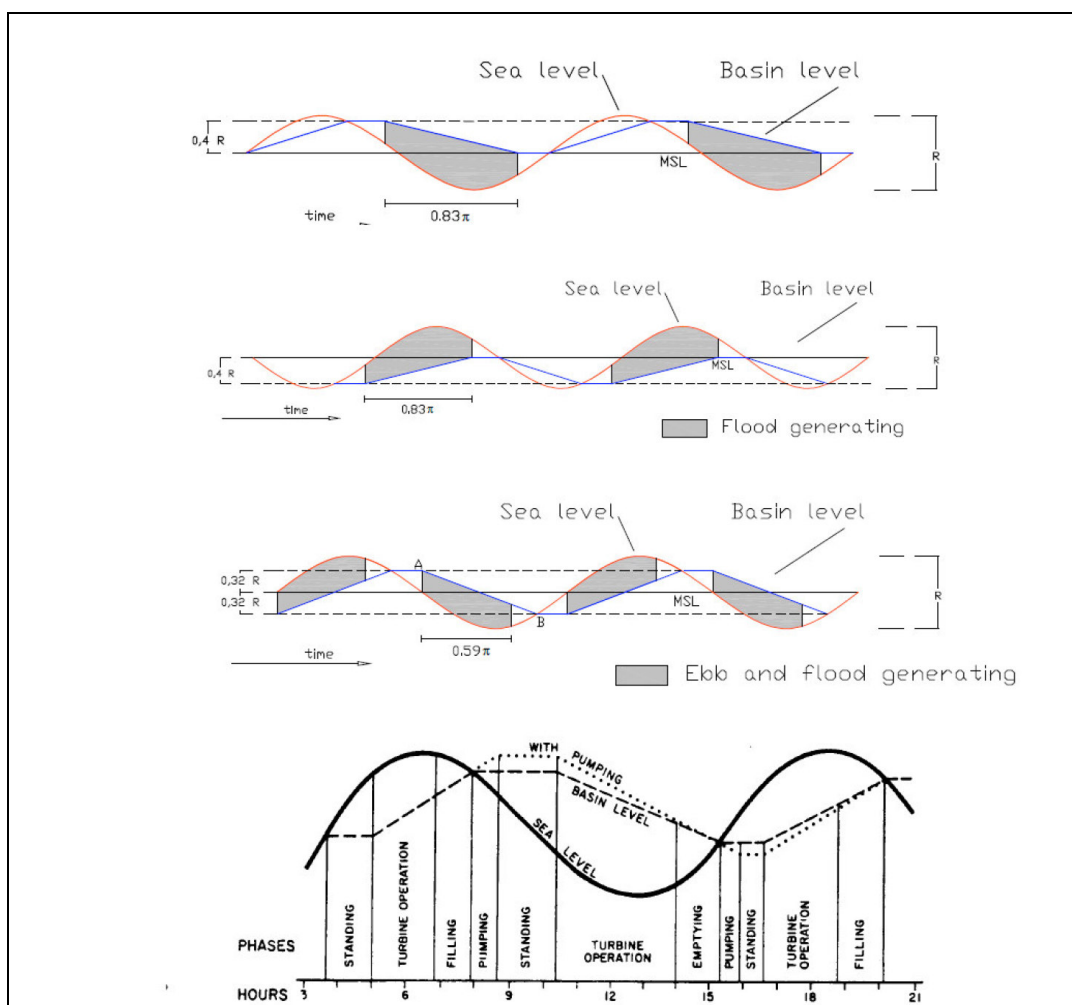
3.3 Samenvatting verkennende studie Technische Universiteit Delft

In 2008 is er een start gemaakt met de mogelijkheden voor de ontwikkeling van het gebied rondom de Grevelingen. Daarbij werd voorgesteld om een getijcentrale te plaatsen om de waterkwaliteit te verbeteren. Op basis daarvan heeft het energiebedrijf Delta NV de TU Delft opdracht verleend om een verkennende studie naar een getijcentrale uit te voeren.

In deze studie zijn in eerste instantie een groot aantal alternatieven voor het ontwerp geformuleerd. Hierbij zijn zowel het type centrale (turbinerend, d.w.z. energie-opwekkend, tijdens de eb, tijdens de vloed of tweezijdig (TT)) als het aantal en de locatie van de turbines gevarieerd.

Het principe van eb-, vloed- en TT-centrales is in Figuur 2.3 aangegeven. Dit leidde op basis van de randvoorwaarden⁵ tot elf varianten. Het bleek al spoedig dat een tweezijdig opererende centrale de voorkeur verdient omdat men in dat geval niet alleen een grotere energieopbrengst per getij heeft dan bij een eb- of vloedcentrale maar ook de sluizen voor het in- en uitlaten van water niet meer nodig heeft. De bestudeerde alternatieven met hun kenmerken zijn vastgelegd in Tabel 2.1 [Van Duivendijk, 2010].

⁵ De randvoorwaarden zijn: het getij op zee, de beschikbare ruimte in de Brouwersdam in langsrichting, het oppervlak van het Grevelingenmeer en de mogelijke peilvariëaties van het Grevelingenmeer (gegeven de bestaande infrastructuur in en om het meer).



Figuur 3.2 Principe van opwekking getij-energie [Van Duivendijk, 2010]

De kenmerken van een alternatief worden voor een groot gedeelte bepaald door de hoeveelheid water die per getij door de centrale moet stromen. Die hoeveelheid water is op zijn beurt een direct gevolg van de maximale peilvariatie die men toelaatbaar acht op het Grevelingenmeer. Als bijvoorbeeld het peil op het Grevelingenmeer 70 cm mag variëren kan gekozen worden voor Alternatief 4. De waterstandsvariatie bij dit alternatief (zie kolom 6) op het Grevelingenmeer bepaalt het door de centrale per getij door te laten volume water. Het watervolume bepaalt de vereiste gemiddelde doorvoer door de centrale per seconde. Uitgaande van een gekozen turbinediameter (in dit geval 3,5 m) komt men dan tot een gemiddelde doorvoer per turbine en daarmee tot het aantal turbines [Van Duivendijk, 2010].

Tabel 3.1 Kengetallen voor verschillende alternatieven [Van Duivendijk, 2010]

Alter-natief	type cen-trale	Door-voer-debiet turbine	aantal turbi-nes	door-voer-debiet	water-stands-variatie	gem. verval	energie op-brengst per jaar
		Q_t	N_t	Q_{tot}	Δh_{max}	H_{gem}	E
		[m ³ /s]	-	[m ³ /s]	[m]	[m]	[GWh]
1a	eb	48	106	5.100	1,0 – 1,1	1,1-1,2	173
1b	vloed	48	106	5.100	1,1 – 1,2	1,2-1,3	206
2a	eb	48	106	5.100	1,0 – 1,1	1,1-1,2	173
2b	vloed	48	106	5.100	1,1 – 1,2	1,2-1,3	206
3a	eb	48	106+52	7.600	1,5	1,4-1,5	313
3b	vloed	48	106+52	7.600	1,5	1,6-1,7	239
4	TT	43	106	2 x 4560	0,7	0,9-1,0	220
5	TT	43	70	2 x 3010	0,4	1,0-1,1	143
6	TT	43	2 x 40	2 x 3440	0,5	0,9-1,0	166
7	TT	43	106+70	2 x 7570	1,0 – 1,1	1,1-1,2	336
8	TT	43	106 + 2 x 40	2 x 8000	1,1	1,1-1,2	349

3.4 Definitie varianten

Er zijn twee concepten die leiden tot een ander uitgangspunt voor het ontwerp. Allereerst kan er voor gekozen worden om de oorspronkelijke caissons voor zover mogelijk te handhaven. Door dr. ir. Van Berkel is voorgesteld om in dit geval een sifonconstructie te gebruiken om water over de caissons te leiden.

Wanneer er voor gekozen wordt om de oorspronkelijke caissons te verwijderen komen er voor de locatie ten opzichte van de as van de Brouwersdam drie mogelijkheden in aanmerking. Deze geven elk aanleiding tot een andere uitvoeringsmethode. Die locaties zijn:

- Ter plaatse van de oorspronkelijke caissons;
- Juist achter de huidige dam (in een droge bouwput - vergelijkbaar met de studie van Witteveen en Bos [Notitie 5,2008]);
- Aan de Grevelingenzijde in een natte bouwput.

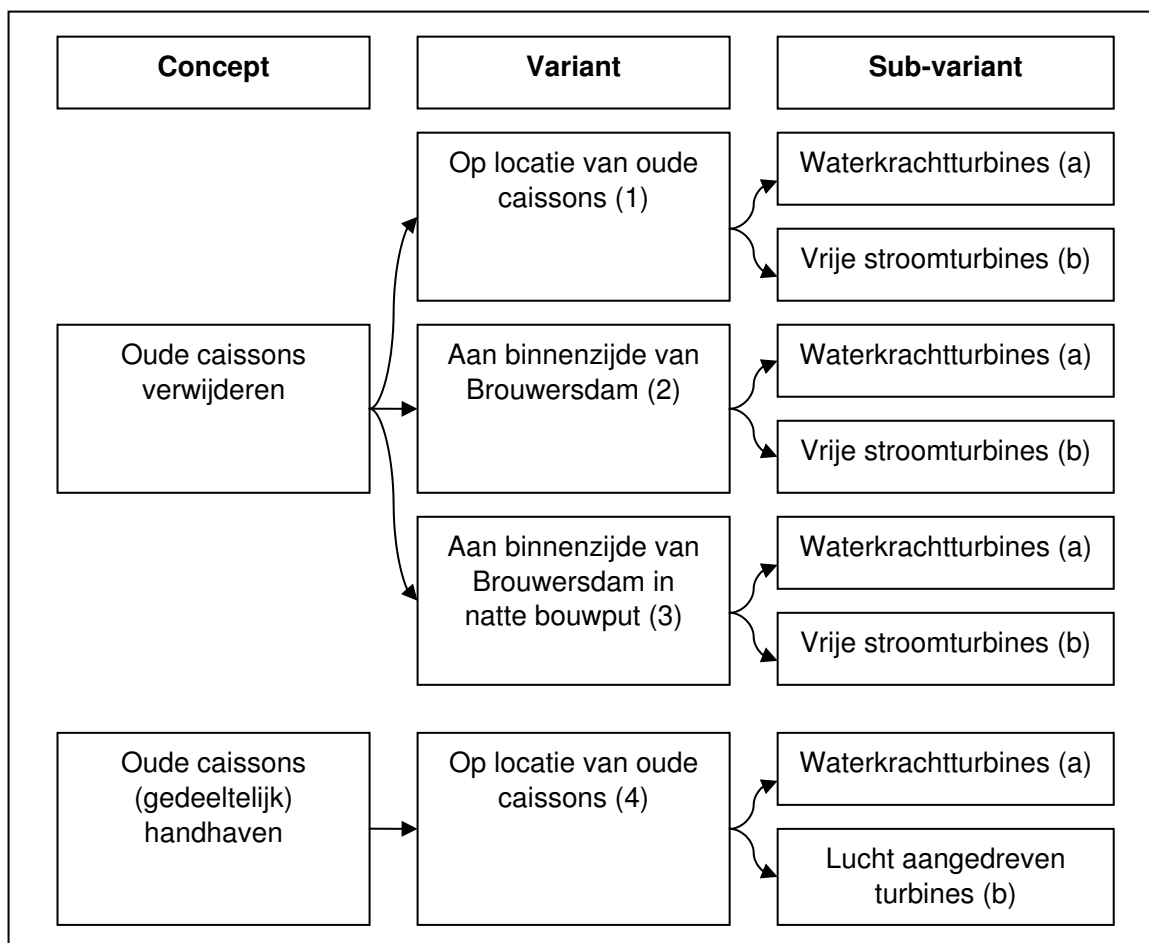
Voor de energiegenererende machines zijn de volgende mogelijkheden onderzocht:

- Tweezijdig werkende bulbturbines;
- Turbines opgenomen in een sifonconstructie;
- Luchturbine aangedreven door stroming in een sifon;
- Vrije stroomturbines.

Een en ander geeft aanleiding tot het formuleren van de volgende varianten en sub-varianten:

- (1a) Tweezijdig turbinerende getijcentrale met bulbturbines, aan te leggen in een droge bouwput ter plaatse van de oorspronkelijke caissons.
- (1b) Tweezijdig turbinerende getijcentrale met vrije stroomturbines, aan te leggen in een droge bouwput ter plaatse van de oorspronkelijke caissons.
- (2a) Tweezijdig turbinerende getijcentrale met bulbturbines, aan te leggen in een droge bouwput aan de binnenzijde van de Brouwersdam.
- (2b) Tweezijdig turbinerende getijcentrale met vrije stroomturbines, aan te leggen in een droge bouwput aan de binnenzijde van de Brouwersdam.
- (3a) Tweezijdig turbinerende getijcentrale met bulbturbines, aan te leggen in den natte.
- (3b) Tweezijdig turbinerende getijcentrale met vrije stroomturbines, aan te leggen in den natte.
- (4a) Sifonoplossing met energieopwekking door waterturbines ter plaatse van de oorspronkelijke caissons.
- (4b) Sifonoplossing met energieopwekking door hydropneumatische turbines

Dit is visueel toegelicht in Figuur 3.3.



Figuur 3.3 Toelichting op keuze varianten

Toelichting op de verschillende hydro-elektrische conversietechnieken zal worden gegeven in de volgende paragraaf.

3.5 Hydro-elektrische conversie

Hydro-elektrische energieconversie is een algemene term die duidt op het winnen van elektrische energie uit stromend water. Deze energiewinning kan op twee verschillende manieren gebeuren:

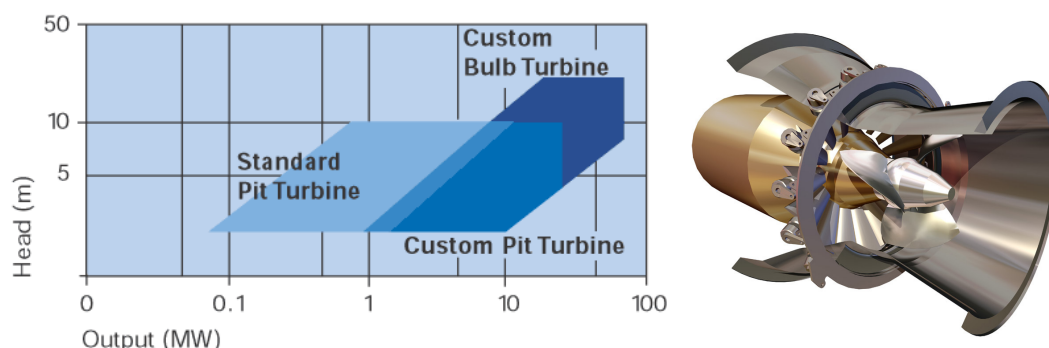
- Energiewinning op basis van het waterstandsverschil (conversie van potentiële energie);
- Energiewinning door stromingen (zonder noemenswaardig waterstandsverschil aan beide zijden van het opwekmiddel) - (conversie van kinetische energie).

Er zijn diverse machines ontwikkeld voor beide vormen van hydro-elektrische energieomzetting. Machines die ingezet worden bij waterstandsverschillen kunnen zeer hoge rendementen (tot ca 90%) en grote vermogens halen. Deze machines kunnen vermogens leveren die variëren van enkele kilowatts (kW) tot vele honderden megawatts (MW).

Bulb turbines (bolturbines)

Bij dit type machine bevindt de generator zich op dezelfde horizontale as als die van de turbine. De rotor is direct gekoppeld aan de generator die in een bolvormige omhulling aan de instroomzijde van de rotor is geplaatst. De generator bevindt zich dus eveneens in de waterstroom.

Het grote voordeel van deze opstelling is de compacte opbouw. Bovendien zijn de hydraulische eigenschappen optimaal: bij de stroming rondom de bol blijven de stromingslijnen nagenoeg recht. Het rendement van de bolturbine is daarom ook 1% hoger dan de overige Kaplan types (totaal rendement tot 93%). Een belangrijk nadeel is de moeilijke toegankelijkheid van de generator voor onderhoud. De bulb turbine is het best inzetbaar voor iets hogere vermogens, 1 – 100 MW, en valhoogtes van 0.9 tot 15 m. De rotordiameter bedraagt meestal 2 tot 6 m.



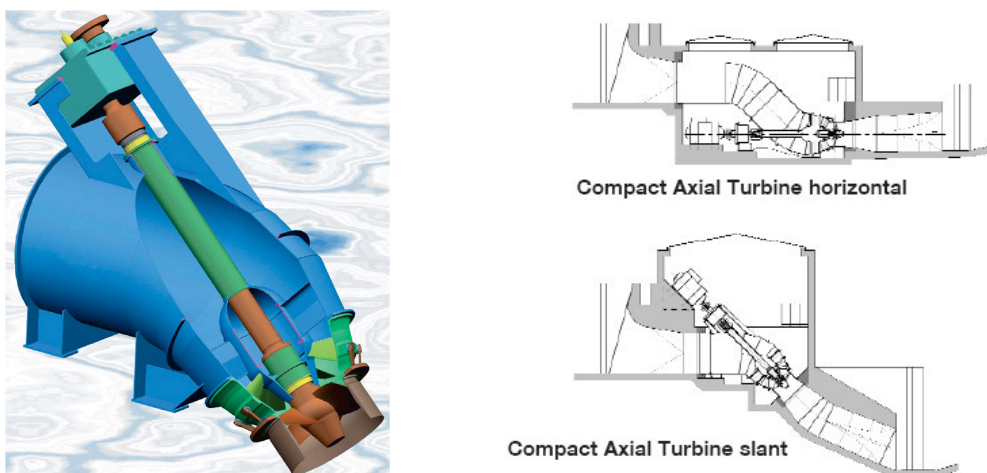
Figuur 2.2: Voorstelling van de bolturbine. Links: werkingsgebied van de bolturbine.

Rechts: schematische voorstelling van de bolturbine [Alstom, 2010].

Tube turbines (buisturbines)

Bij dit type turbine bevindt de generator zich buiten de waterstroom. De turbine en generator zijn onderling verbonden d.m.v. een aandrijfstang. Een voordeel van deze opstelling is de gemakkelijke bereikbaarheid van de generator en de eenvoudige waterdichte afsluiting.

Uiteraard vereist deze schikking de aanleg van een lange behuizing. Bovendien is een aparte koppeling van de generator en turbine nodig. De buisturbine kent veel variaties. De generator kan zowel boven- als benedenstrooms geplaatst worden en de aandrijfstang kan zowel horizontaal als hellend worden aangebracht. Naar gelang de opstelling worden specifieke benamingen gegeven aan deze machines (bijvoorbeeld: de S-type turbine t.g.v. een S-vormige buis). Tegenwoordig zijn verschillende gestandaardiseerde buisturbines te verkrijgen met capaciteiten van 0.1 tot 7 MW en valhoogtes tot 18 m. De rotordiameter is beperkt tot 5 m. Het rendement van de machine bedraagt ongeveer 92%. Daardoor wordt het een totaalrendement (inclusief generator en hydraulische verliezen) ongeveer 75 tot 80%.



Figuur 2.3: Voorstelling van de buisturbine. Links: virtuele voorstelling van de turbine. Rechts: opstel mogelijkheden van de buisturbine [Andritz, 2010].

Visvriendelijke turbines

Over het algemeen worden de bulbturbines en tubeturbines als visonvriendelijk bestempeld. Er is daarom tegenwoordig veel aandacht om de vismortaliteit te beperken. Visvriendelijke machines winnen daarom marktaandeel. Verschillende uitvoeringen zijn inmiddels uit de testfase en commercieel verkrijgbaar. Enkele bekende voorbeelden zijn de waterraderen, vijzelmotoren en de VLH turbines (Very Low Head).

Deze type machines zijn echter niet inzetbaar bij condities waar het verval varieert. Er zijn bijvoorbeeld types, zoals een vijzelmotor of een waterrad, waarbij de hoogte van de machine wordt bepaald door het verval. Indien het verval belangrijk wijzigt, is de inzet van dergelijke machines heel lastig of zelfs onmogelijk. Wereldwijd is men bezig om voor kleinschalige toepassing alternatieven te ontwikkelen die minder belastend zijn voor het milieu. Enkele daarvan zijn voldoende doorontwikkeld en verkrijgbaar. Het rendement van deze type machines is echter beduidend lager. Op dit moment lijkt de toepassing van visvriendelijke turbines daarom niet van toepassing voor opwekking van getij-energie in de Brouwersdam⁶.

Orthogonale turbines

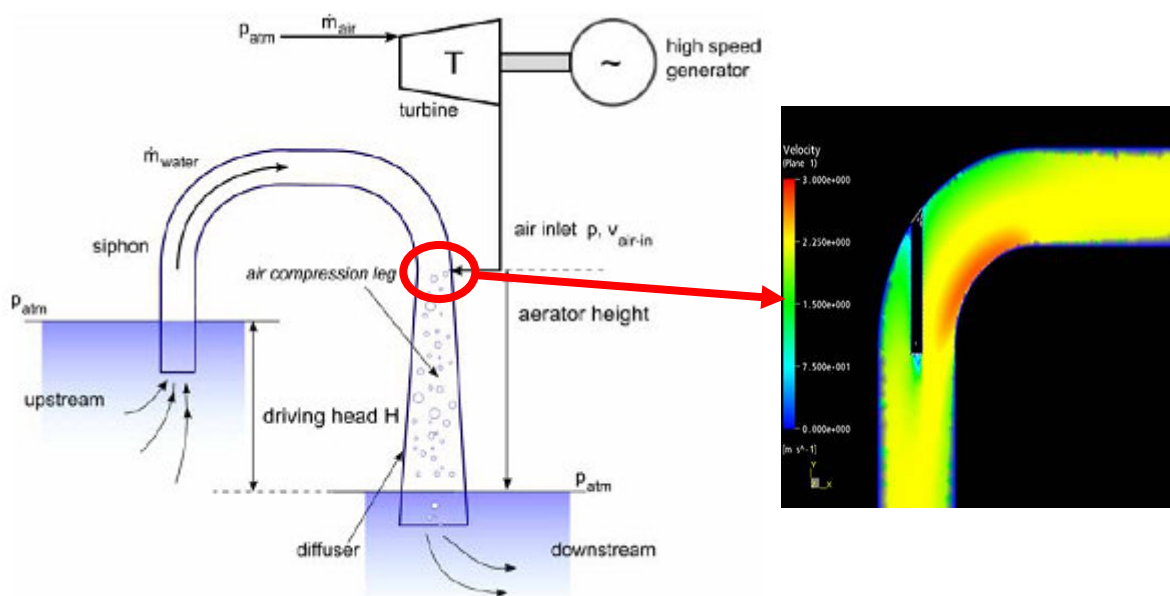
Al enkele jaren wordt er in Rusland onderzoek gedaan naar de toepassing van een orthogonale turbine. Recentelijk is een pilotversie van deze turbine toegevoegd aan de getijcentrale in Kislaya Guba. De kosten voor fabricage van deze turbine zouden beduidend lager zijn. De prestatie van deze turbines is echter minder. Vanwege de grote diepte die nodig is van deze turbines, lijkt dit type minder geschikt voor bij de Brouwersdam. Tevens zijn deze turbines niet geschikt om te pompen. [Hydropower & Dams, 2009]

Lucht aangedreven turbines

Het is ook mogelijk om energie te winnen met behulp van lucht aangedreven turbines. Bij deze techniek wordt het waterdrukverschil eerst omgezet in een luchtdrukverschil. Dit is vervolgens te benutten voor energieopwekking in een luchtturbine, welke beter kan omgaan met lage vervallen en mogelijk visvriendelijker is dan andere technieken. Het principe werkt als volgt.

⁶ Mogelijk zijn visvriendelijke turbines wel te gebruiken nabij vispassages.

Door een buis in te voeren in de sifon zal lucht onttrokken worden uit de buis. In de waterstroom ontstaan dan bellen die met het water worden meegevoerd. De onttrokken lucht uit de buis leidt tot een luchtstroom, welke een turbine aandrijft. Dit is toegelicht in Figuur 3.4.



Figuur 3.4: Principe van hydropneumatische aandrijving [Lancaster University, 2005].

Vrije stroom turbines

Energiewinning door getijstrooming kan gewonnen worden door vrije stroomturbines. Deze hebben per definitie een lager omzettingrendement hetgeen te wijten is aan de theoretische Betz-limiet⁷. Daar tegenover staat wel dat de civiele kosten vaak beperkt zijn aangezien geen complexe in- en uitstromingsconstructies vereist zijn. Bij een getijstrooming variëren de stromingsgrootte en de stromingsrichting gedurende de getijcyclus. Om optimale energiewinning te verzekeren, zullen turbines ingezet worden om tweezijdig te turbineren.

Magneto Hydrodynamics

Ten slotte is het mogelijk om op basis van het principe van MHD (Magneto Hydrodynamics) elektriciteit op te wekken. Het concept is gebaseerd op de directe interactie tussen magnetisch, elektrisch en vloeistof stroomveld. Het principe is uitvoerig bestudeerd voor de elektriciteitsopwekking bij gasen met een hoge temperatuur, maar nog beperkt voor getij-energie. Aangezien de ontwikkeling van deze vorm van elektriciteitsopwekking zich in een zeer prille fase bevindt, zal deze in dit rapport niet verder worden behandeld.

⁷ De Betz-limiet volgt uit de wet van behoud van massa en de wet van behoud van energie. Daaruit blijkt dat maximaal 59,3% van de beschikbare energie aan de bovenstroomse zijde van de turbine kan worden gewonnen.

3.6 Verwijdering caissons

3.6.1 Inleiding

Om de vroegere sluiting van het noordelijke gedeelte van de Brouwersdam te bewerkstelligen is gebruik gemaakt van caissons. Deze caissons zijn vervaardigd in een bouwdok bij Bommenede (aan de noordoever van Schouwen-Duiveland) en daarna naar het sluitgat gevaren. Ze zijn vervolgens geplaatst op een bodembescherming en een drempel die daarop geplaatst is. Deze caissons zijn niet geschikt voor de inbouw van energiegenererende machines [TU Delft, 2008]. Ze zullen dus moeten worden verwijderd of het water zal er via sifons overheen geleid moeten worden.

Op welke wijze wordt omgegaan met deze caissons zal hierna worden toegelicht

3.6.2 Verwijdering in een droge bouwput

Verwijdering van de oorspronkelijke caissons in den droge is aan de orde bij variant (1). Omdat een en ander in den droge gebeurt wordt hierbij geen enkel echt probleem voorzien.

3.6.3 Verwijdering in den natte

Verwijdering in den natte is aan de orde bij varianten (2) en (3). Bij variant (2) is dat het geval omdat de oorspronkelijke caissons buiten de droge bouwput vallen. Na verwijdering van de tijdelijke afdichting (damwanden of soortgelijke constructies) is er geen mogelijkheid meer om de caissons droog af te breken (tenzij men van te voren al een veel grotere bouwput heeft gemaakt). Bij variant (3) wordt in het geheel geen droge bouwput voorzien.

Het is dus zaak de oorspronkelijke caissons zoveel mogelijk vrij te maken (graven en baggeren aan beide zijden, evenals het verwijderen van de caisson vulling).

Over de beste methode van verwijdering is contact geweest met de firma Smit te Rotterdam. Drie mogelijkheden zijn overwogen:

- Het weer drijfbaar maken;
- Het lichten met behulp van zware drijvende bokken;
- Afbraak met behulp van explosieven.

Op grond van de thans voorhanden zijnde gegevens wordt het weer opdrijven van de oorspronkelijke caissons met behulp van externe drijflichamen het meest kansrijk geacht. Een engineeringstudie waarbij wordt onderzocht welke sterkte de bodembodem heeft is daarvoor noodzakelijk.

3.7 Pompfunctie

Met specifieke voorzieningen is er een mogelijkheid om de getijcentrale in te zetten als pomp bij bepaalde technieken voor hydro-elektrische conversie. Daardoor zou op het moment van het gelijktijdig optreden van een hoge rivierafvoer en een storm op zee water omgeleid kunnen worden naar het Grevelingenmeer en vandaar naar de Noordzee. Daartoe moet het water uiteraard wel eerst in het Grevelingenmeer gebracht worden. De overweging tussen kosten en opbrengsten van deze optie is geen onderdeel van deze studie. In dit rapport zal per variant aangegeven worden of de getijcentrale gebruikt kan worden als pomp en of dit relatief veel of relatief weinig meerkosten met zich meebrengt.

Daarnaast geldt dat de pompproductiviteit ook aangewend zou kunnen worden om (per saldo) meer energie op te wekken.

[Van Duivendijk, 2010] gaat uitvoeriger in op de overwegingen om een bulbturbine te gebruiken als pomp. Belangrijkste conclusie voor dit rapport is dat de meerkosten van het toevoegen van een pompproductiviteit ten opzichte van de totale investeringskosten relatief klein zijn.

Een tube turbine is op een soortgelijke wijze als de bulbturbine te gebruiken als pomp. Vrije stroomturbines kunnen niet pompen. Lucht aangedreven turbines zouden in theorie kunnen pompen, maar onzeker is hoe de installatie geconfigureerd zou worden, welke meerkosten de pompproductiviteit met zich meebrengt en welke prestatie de pomp en turbine hebben. Daarom wordt er in deze studie van uitgegaan dat de turbines niet kunnen pompen.

4 UITGANGSPUNTEN EN AANNAMES

Voor uitwerking van de varianten is uitgegaan van de volgende uitgangspunten en aannames;

- Voor de uitwerking is uitgegaan van een tweezijdig turbinerende getijcentrale die is geplaatst in het noordelijke gedeelte van de Brouwersdam (voor toelichting zie paragraaf 3.3);
- De beschikbare breedte in het noordelijke gedeelte van de Brouwersdam wordt maximaal benut. Deze breedte bedraagt 812,5 meter;
- De extreme waterstanden die gebruikt zijn voor het schetsontwerp, zijn hieronder weergegeven;

Waterstand	Waarde
Huidige toetswaterstand [HR 2006]	NAP + 5,00 m
Ontwerpwaterstand (100 jaar)	NAP + 6,20 m
Laagwaterstand	NAP – 1,50 m
Hoogwaterstand Grevelingenmeer ⁸	NAP + 1 m
Laagwaterstand Grevelingenmeer	NAP – 1 m
Middenwaterstand Grevelingenmeer	NAP

- De huidige toetswaterstand is gebaseerd op de huidige hydraulische randvoorwaarden. Voor de bepaling van de ontwerpwaterstand is de huidige toetswaterstand vermeerderd met een verwachting voor de hoogwaterstijging over 100 jaar. Daarbij is het scenario van de commissie Veerman aangehouden. De hoog- en laagwaterstanden op het Grevelingenmeer zijn conservatief geschat;
- Omdat het bij dit waterkrachtproject gaat om grootschalige ontwikkeling (definitie UNIDO), zullen turbines gebouwd worden die specifiek bedoeld zijn voor een getijcentrale in de Brouwersdam. Dit betekent dat de afmetingen (bijv. diameter) niet afhankelijk zijn van standaard turbines die beschikbaar zijn op de markt;
- Er wordt vanuit gegaan dat de drempel en de bodembescherming die gebruikt zijn voor sluiting van het noordelijke gedeelte van de Brouwersdam, in goede staat verkeren en eventueel nuttig gebruikt kunnen worden bij de bouw of de operationele fase van een getijcentrale;
- Er wordt voorgesteld om de kruinhoogte van de zeewerende constructie aan te leggen op de ontwerpwaterstand aan te leggen. De constructie hoeft dan minder zwaar uitgevoerd te worden dan bij een hogere kruinhoogte, omdat de golfbelasting minder is. In overleg zal bepaald moeten worden op welke hoogte het verkeer zal reizen;
- Een bulbturbine kan afgesloten worden met voldoende betrouwbaarheid. De stand van de bladen van de leischoppen en die van de bladen van de turbine (loopschoepen) is regelbaar en kunnen beiden worden ingezet als afsluitmiddel;
- Na voltooiing van de getijcentrale, dient de verkeerscapaciteit van de provinciale weg (N57) gelijk te zijn aan de huidige capaciteit. Noodzaak en locatie van de huidige parallelwegen dienen opnieuw overwogen te worden, evenals die van de toeristische spoorweg over de dam;
- De havendammen die zich aan de noordzijde van de Brouwersdam bevinden, vormen geen obstakel voor aansluitconstructies;

⁸ De maximale en minimale waterstand lagen gedurende deze studie nog niet vast. Er is daarom een grove aanname gedaan voor de maximale en minimale waterstand ten behoeve van de uitgevoerde berekeningen.

- Voor sifonachtige oplossingen dient rekening gehouden te worden met een maximale onderdruk van 4 meter waterkolom (in verband met visvriendelijkheid);
- Er bevinden zich in het noordelijke gedeelte van de Brouwersdam geen grote kabels of leidingen die verwijderd of vervangen dienen te worden;
- Aannames betreffende de capaciteiten, rendementen en debieten van de diverse energiegenererende apparaten zijn vermeld in bijlage 3.

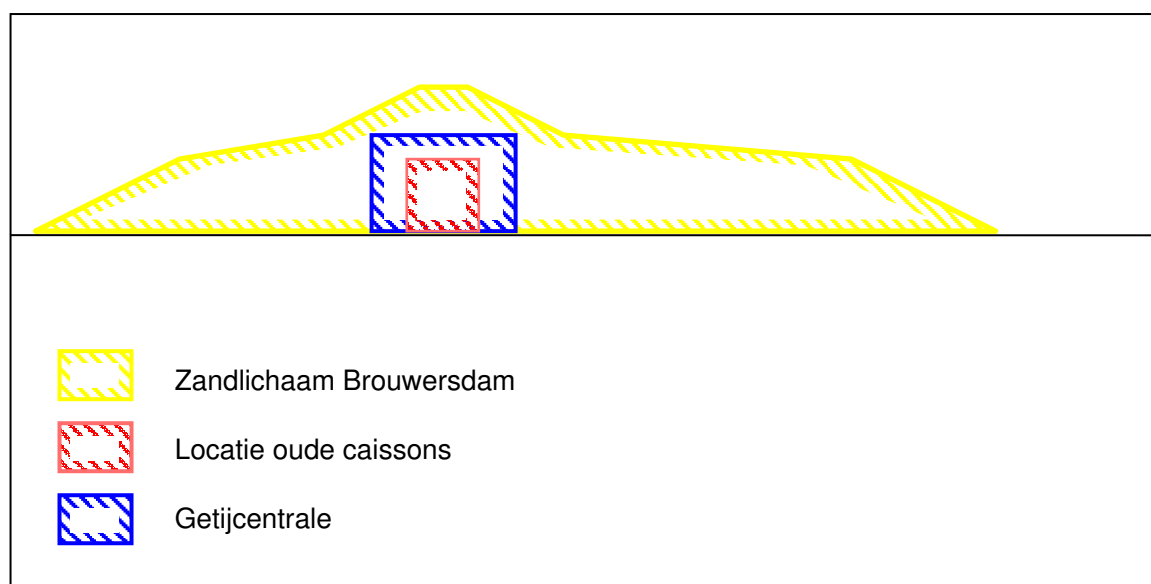
5 VARIANT 1; CENTRALE TER PLAATSE VAN OORSPRONKELIJKE CAISSONS

5.1 Inleiding

Voor de uitvoeringswijze is gekeken naar een optie waar het moeizame verwijderen van de oorspronkelijke caissons in de natte kan worden vermeden. Daardoor wordt de kruinhoogte van de Brouwersdam wel gereduceerd tijdens de bouwfase.

In dit hoofdstuk zal deze variant toegelicht worden.

In paragraaf 5.2 worden de subvarianten gedefinieerd. Een toelichting op het schetsontwerp wordt gegeven in paragraaf 5.3. In paragraaf 5.4 is de uitvoeringswijze van deze variant toegelicht. De energieprestatie van deze variant is getoond in paragraaf 5.5. In paragraaf 5.6 worden de aandachtspunten voor deze variant behandeld.



Figuur 5.1 Conceptuele doorsnede variant 1

5.2 Definitie subvarianten

Bij subvariant A zorgen bulbturbines voor de hydro-elektrische conversie. Het ontwerp van de turbine-eenheden is gebaseerd op het schetsontwerp gemaakt in de verkennende studie van de Technische Universiteit Delft [TU Delft, 2008]

Bij subvariant B wordt de hydro-elektrische conversie verricht door vrije stroomturbines. Het ontwerp van de getijcentrale bestaat uit een doorlaatmiddel met daarin een aantal vrije stroomturbines geplaatst. Het ontwerp van het doorlaatmiddel is overgenomen van het ontwerp van Witteveen+Bos [Notitie 5, 2008]. Bij deze subvariant is het niet mogelijk om de turbines te gebruiken als pomp.

5.3 Toelichting op ontwerp

5.3.1 Subvariant A

Bij een bulbturbine hangen de hoofdafmetingen voornamelijk af van de gekozen turbinediameter (bij de waaier). Hier is er gekozen voor een turbinediameter van 3,5 meter. Deze waarde is overgenomen uit de verkennende studie van de TU Delft [TU Delft, 2008]. Deze keuze is gebaseerd op een beschikbare referentie in Rusland⁹. Daar staat namelijk een getijcentrale met een vergelijkbaar tijverskil aan de zeezijde en een vergelijkbaar verval tijdens de operatie. Tevens zou een significant grotere diameter er toe leiden dat de constructie zo diep aangelegd dient te worden dat drempel en bodembescherming niet her te gebruiken zijn.

Een nadere bestudering van de geotechnische aspecten van de daar voorgestelde geometrie van de centrale heeft aan het licht gebracht dat aanvullende voorzieningen nodig zijn om turbinebehuizing geotechnisch stabiel te maken. Dit zou betrekkelijk eenvoudig bereikt kunnen worden door additionele bovenbelasting aan te brengen. Er wordt in dit rapport voorgesteld om dit te doen door zand te omsluiten door betonnen wanden.

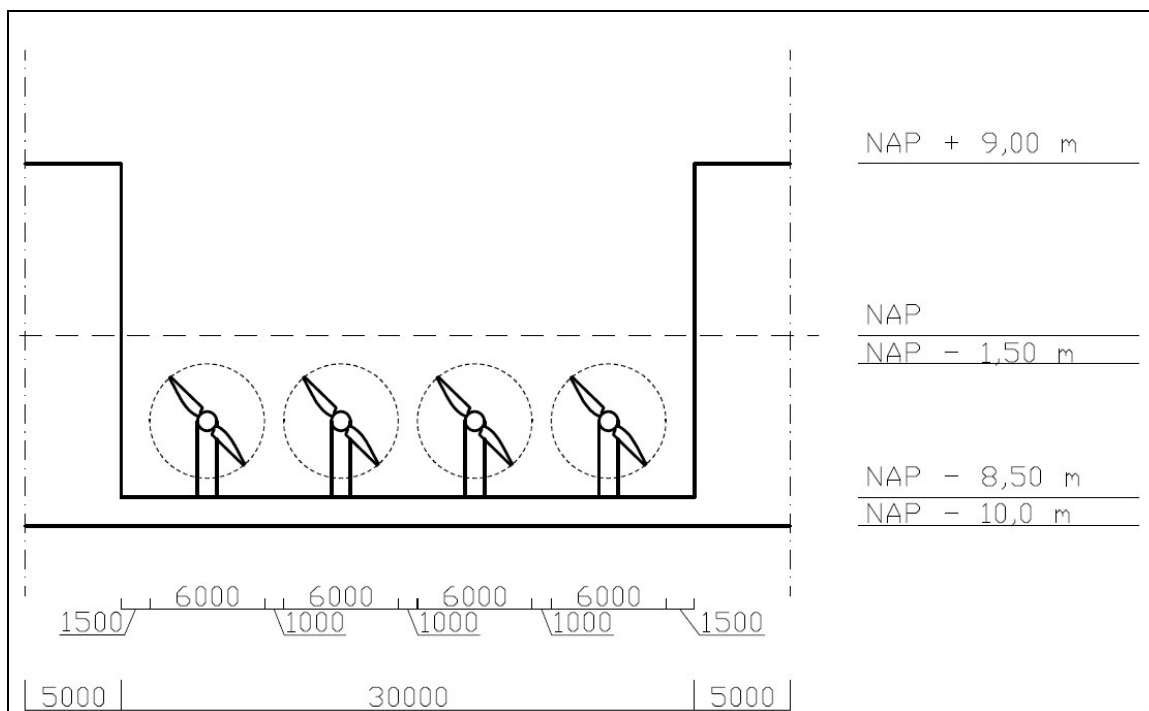
5.3.2 Subvariant B

Het doorlaatmiddel ontworpen door Witteveen+Bos bestaat uit 5 elementen met elk een breedte van 40 meter. De totale breedte van dit doorlaatmiddel is dus 200 meter. Uitgangspunt voor deze studie is dat de totaal beschikbare breedte van de dam wordt gebruikt (hoofdstuk 3). Daarom is in deze studie ervoor gekozen om het doorlaatmiddel uit 20 elementen te laten bestaan. De totale breedte van het doorlaatmiddel wordt daardoor 800 meter. De belangrijkste afmetingen van het doorlaatelement zijn in Tabel 5.1 genoemd. In Figuur 5.2 is de dwarsdoorsnede van een doorlaatelement getekend.

Tabel 5.1 Afmetingen doorlaatmiddelen vrije stroomturbines

Eigenschap	Afmeting doorlaatsluis WiBo [Notitie 5, 2008]	Afmeting vrije stroomturbines
Aantal doorlaatmiddelen	5	20
Breedte doorlaatmiddel	30 m	30 m
Totale 'natte' breedte	150 m	600 m
Totale breedte	200 m	800 m
Drempelhoogte	NAP – 8,5 m	NAP – 8,5 m
Kruinhoogte	NAP + 9 m	NAP + 6,2 m

⁹ Kislaya Guba; Het tijverskil is daar 2,3 meter en de diameter van de turbine is 3,3 meter.



Figuur 5.2 Dwarsdoorsnede doorlaatelement met vrije stroomturbines

Het aantal en de afmetingen van de turbines zijn gebaseerd op de afmetingen van het doorlaatmiddel. Tussen de onderlinge turbines is een minimale afstand van één meter nodig. Daarnaast is er tussen een wand of een vloer en de turbinebladen ook een afstand van 1 meter nodig [Deltares, 2009].

Voorts is vereist dat gedurende de operatie de turbines zich geheel onder water bevinden. Daarvoor is uitgegaan van een laagwaterstand van NAP – 1,5 meter (zie hoofdstuk 3). De ruimte die zich tussen de drempel en deze waterstand bevindt, bedraagt 7 meter. Rekening houdend met de ruimte die nodig is tussen vloer en turbinebladen, kan een diameter van 6 meter worden toegepast. Het is dan mogelijk om per doorlaatelement 4 turbines te plaatsen en in totaal 80.

5.4 Uitvoeringswijze

Bij deze uitvoering wordt een droge bouwput gegraven ter plaatse van de oorspronkelijke caissons. Dit biedt de mogelijkheid om de caissons 'in den droge' te verwijderen. Nadat de caissons verwijderd zijn, kan de getijcentrale worden gebouwd. Wanneer de getijcentrale kan functioneren als zeewering kan de Brouwersdam in meer- en zeewaartse richting ontgraven worden.

De globale bouwvolgorde is hieronder ter verduidelijking weergegeven:

- Omleggen weg naar de huidige parallelweg;
- Verwijderen verharding op Brouwersdam (gedeeltelijk);
- Aanleg bouwput:
 - Aanleggen damwanden (of andere maatregelen ter beperking van de infiltratie);
 - Ontgraven bouwput, onder gelijktijdige aanleg van bronbemaling;
- Verwijderen caissons 'in den droge';
- Bouwen getijcentrale;
- Verwijderen damwanden;

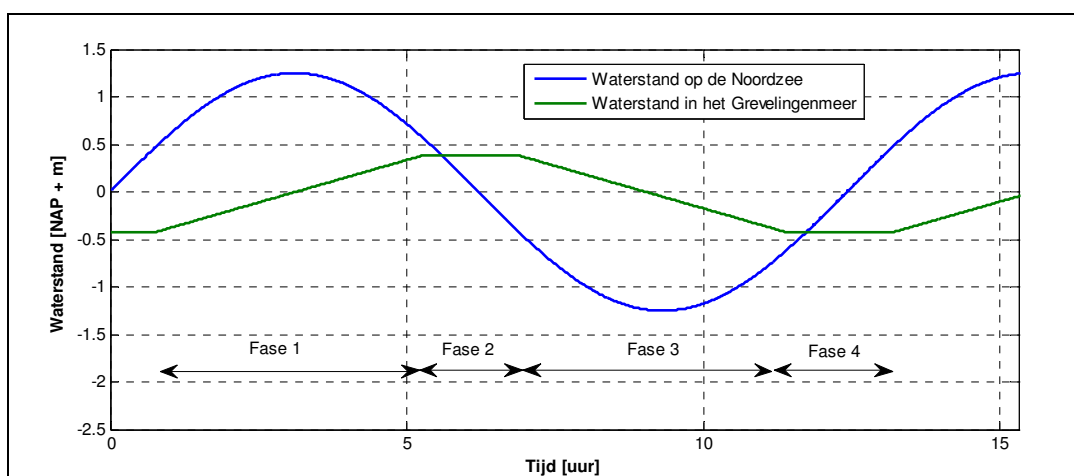
- Aansluiten op huidige infrastructuur;
- Verwijderen resterende verharding op Brouwersdam;
- Ontgraven dam.

De bouwput zal bemalen dienen te worden om droog te kunnen werken. Vanwege de zandige ondergrond, zal een grote installatie voor de bemaling nodig zijn. Voor de bouwput die is gebruikt voor de aanleg van de Brouwerssluis diende per hectare een volume van 250 m³/u onttrokken te worden. Hoewel er duidelijke verschillen zijn tussen deze bouwput en de bouwput voor de getijcentrale geeft deze waarde wel een eerste indicatie voor het te onttrekken debiet.

5.5 Energieprestatie

5.5.1 Subvariant A

De energieprestatie van subvariant A wordt bepaald door het verschil in het waterniveau van het Grevelingenmeer en de Noordzee. Daarnaast speelt het rendement van de getijcentrale en de tijd dat de getijcentrale energie opwekt een rol. Om de energieprestatie te bepalen is gebruik gemaakt van een hydraulisch model, dat is toegelicht in bijlage 3. Het doel van het hydraulisch model is om op basis van de kenmerken van de getijcentrale de waterstand in het Grevelingenmeer te voorspellen (zie Figuur 5.3 en Tabel 5.2). Op basis daarvan kan de energieopbrengst bepaald worden.



Figuur 5.3 Waterstandsverloop in Grevelingenmeer en Noordzee met getijcentrale

Tabel 5.2 Acties bij operatie getijcentrale

Fase	Operatie	Turbines	Actie aan einde van fase	Overgangsvoorwaarde voor volgende fase
1	Bekken vullen	Open	Turbines sluiten	$z = z_{\max}$ of $H > H_{\text{stop}}$
2	Water in bekken vasthouden	Dicht	Turbines open	$H > H_{\text{start}}$
3	Bekken legen	Open	Turbines sluiten	$z = z_{\min}$ of $H < H_{\text{stop}}$
4	Wachten	Open	Turbines open	$H < H_{\text{start}}$

Gedurende fases 1 en 3 wordt er energie gewonnen. Het vermogen gedurende deze fases kan beschreven worden met de onderstaande formule:

$$P = \eta \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot H$$

Door het vermogen te integreren over de tijd kan de energieopbrengst worden bepaald.

$$E = \int P dt$$

De uitkomsten van het hydraulisch model voor deze variant zijn getoond in Tabel 5.3.

Tabel 5.3 Energieprestatie variant 1

Parameter	Waarde
Gemiddelde waterstandsvariatie in Grevelingenmeer	0,57 m
Gemiddeld verval gedurende operatie	0,91 m
Geïnstalleerd vermogen	60 MW
Energieopbrengst	193 GWh/jaar

Bij deze uitkomsten wordt uitgegaan van het Grevelingenmeer als bassin. Er wordt over nagedacht om het Volkerak Zoommeer te verbinden met het Grevelingenmeer. Aangezien de breedte van de Brouwersdam een beperking is voor de getijcentrale zal het ontwerp niet veranderen. Uit het hydraulisch model blijkt dat met eenzelfde ontwerp van de getijcentrale de energieopbrengst slechts beperkt toeneemt (ca. 1%)¹⁰. De waterstandsvariatie neemt af tot ongeveer 40 centimeter. De stijging in de energieopbrengst wordt verklaard door een stijging in het gemiddelde verval.

Bij de berekening van de energieopbrengst is uitgegaan van een middenpeil van NAP. Wanneer het middenpeil zou worden verlaagd naar NAP – 0,20 m zal de energieopbrengst bijna niet veranderen, blijkt uit dit hydraulische model. Deze conclusie komt overeen met de resultaten van de verkennende studie van een getijcentrale in de Brouwersdam [TU Delft, 2008]. Vanwege het grillige karakter van het waterstandsverloop op de Noordzee wordt aangeraden om in het vervolg vooral te discussiëren over het maximum en minimum peil bij implementatie van de getijcentrale. Daarbij kan worden aangehouden dat een grotere vrijheid een grotere energieopbrengst met zich meebrengt.

Ten aanzien van dit hydraulisch model zijn er nog twee opmerkingen te maken. Ten eerste wordt gebruik gemaakt van waterstandsgegevens van het peilstation van het Brouwershavensche Gat 08 van 2009 welke elke 10 minuten bepaald worden¹¹. Ten tweede is er in het hydraulisch model uitgegaan van komberging, wat betekent dat er over het Grevelingenmeer geen verhang optreedt. Of dit werkelijk verwaarloosbaar is voor een getijcentrale zal onderzocht dienen te worden.

5.5.2 Subvariant B

Hier wordt ingegaan op winning van getijdenenergie via kinetische energie van een waterstroom. Het energiedebiet aangeboden aan een oppervlakte A loodrecht op de stromingsrichting bedraagt (massadebiet vermenigvuldigd met kinetische energie):

¹⁰ Deze resultaten zijn ook geldig voor de varianten met bulbturbines (1a, 2a, 3a) en met een sifon (4a, 4b)

¹¹ Dit in tegenstelling tot subvariant B waarbij het getij geschematiseerd wordt door een sinusoïde.

$$P = (\rho \cdot A \cdot v) \cdot (1/2 \cdot v^2) = 1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (\text{in W}) \quad (10.1)$$

In deze formule is ρ de dichtheid van water (kg/m^3) en v de stromingssnelheid (m/s). Het is duidelijk dat de snelheid van de getijstroom een doorslaggevende factor is: een verdubbeling van de snelheid betekent een achttvoud van het aangeboden vermogen. Voor een optimale inzet van stromingsturbines dient de oppervlakte A (m^2), beschreven door de rotorbladen, bij een gegeven snelheid en randvoorwaarden zo groot mogelijk te zijn.

Uiteraard kan niet het volledig aangeboden vermogen worden omgezet in elektrische of andere vormen van energie. De hoeveelheid vermogen dat effectief op de as van de turbine wordt overgedragen wordt uitgedrukt door de vermogenscoëfficiënt C_p . De theoretische, absolute bovengrens van C_p bedraagt 59,3% en wordt de Betz-limiet genoemd. In praktijk dienen echter de bijkomende verliezen nog in rekening gebracht worden (o.a. generatorrendement, eventueel overbrengingsrendement). Deze verliezen worden in rekening gebracht door de factor η . Het totaalrendement η_t is product van beide factoren C_p en η .

Bemerk nog dat – naast de Betz-limiet – slechts een eindig deel van de totale energie gewonnen kan worden zonder een significante verstoring van de algemene stroming van de site. Praktisch onderzoek heeft immers aangetoond dat een te grote verstoring van de stroming na de turbine op termijn gevolgen voor omgeving (fauna, flora, topografie) en dus ook economische gevolgen met zich mee kan dragen. Dit betekent dat niet het hele stroomoppervlak gebruikt kan worden voor de plaatsing van turbines. Deze impact wordt uitgedrukt door de Significant Impact Factor (SIF). De SIF is uniek voor elke locatie en definieert welke fractie van de totale aangeboden energie naar asvermogen omgezet kan worden zonder een significante verstoring. Deze SIF varieert tussen 10% en 50% en legt hiermee meteen, naast de theoretische Betz-limiet, een tweede, praktische limiet. [Deltares, 2009], [Carbon Trust, 2009] Bij de huidige vormgeving wordt niet het gehele stroomoppervlak gebruikt en is de SIF-factor dus laag genoeg. Formule 10.1 wordt dan geschreven als volgt:

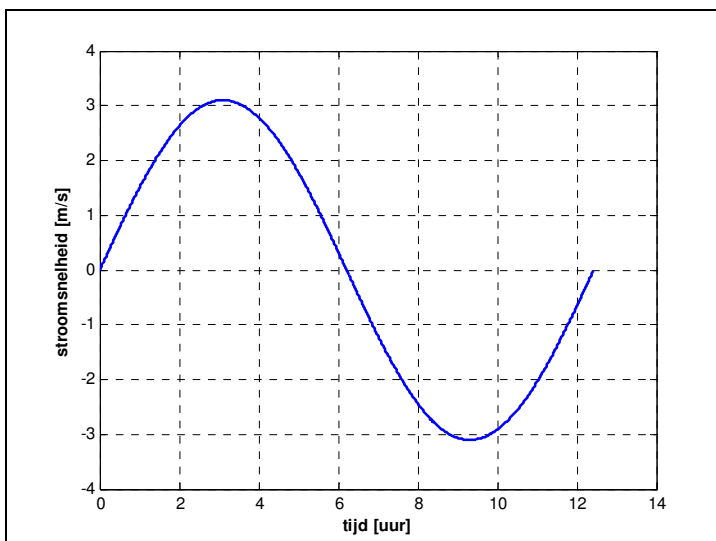
$$P = 1/2 \cdot \eta \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (\text{in W}) \quad (10.2)$$

Bij getijstrooming varieert de stroming en de stromingsrichting gedurende de getijcyclus. Turbines die toegepast worden voor getijstrooming kunnen daarom beide kanten op turbineren. Deze turbines hebben een 'cut-in speed' van 1 m/s en onder deze snelheid wordt er dus geen energie gewonnen.

Om het verloop van de stroming te bepalen is bijlage 9 van [Notitie 5, 2008] gebruikt. Wanneer de formules uit deze bijlage toegepast worden, kan berekend worden dat de waterstandsvariatie in het Grevelingenmeer bij een gemiddeld tij 1,6 meter bedraagt¹².

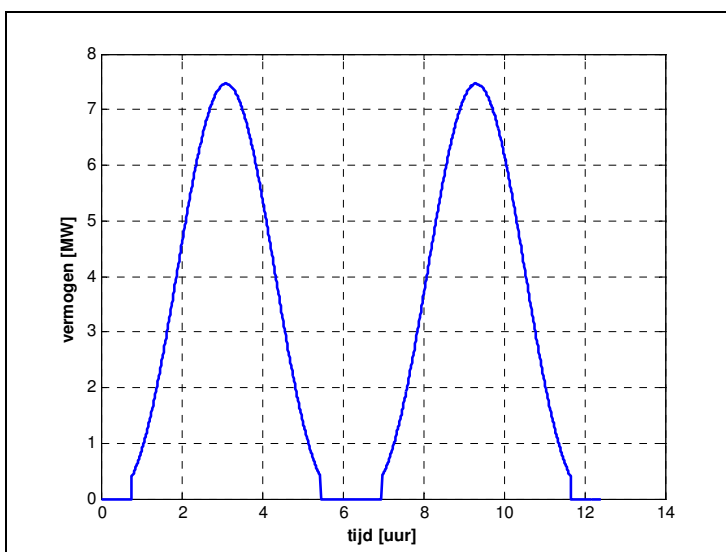
De maximale stroomsnelheid die volgens deze berekening optreedt, is 2,64 m/s (¹³). Voor het verloop van de stroomsnelheid wordt uitgegaan van een sinusoïde, zoals te zien is in Figuur 5.4.

¹² Tijdens het tweede overleg met het werkteam is naar voren gekomen dat een waterstandsvariatie van 1,6 meter als niet wenselijk wordt gezien. Bij het MIRT Verkenning team wordt meer gedacht aan een waterstandsvariatie in het Grevelingenmeer tussen de 30 en 70 centimeter.



Figuur 5.4 Verloop van stroomsnelheid

Het vermogen tijdens deze gemiddelde tijdcyclus is te zien in Figuur 5.5. Het maximale vermogen is 7,5 MW.



Figuur 5.5 Vermogen gedurende tijdcyclus

De energieopbrengst tijdens deze gemiddelde tijdcyclus is dan 39 MWh. De jaarlijkse energieopbrengst is dan 27,5 GWh ($=705 \times 0,039$)¹⁴.

$$^{13} \hat{u} = \frac{\hat{Q}}{A_s} = \frac{A_k \cdot \omega \cdot \zeta_k}{A_s} = \frac{117 \cdot 10^6 \cdot 1,41 \cdot 10^{-4} \cdot 0,82}{5100}$$

Q = debiet [m³/s], A_s = natte oppervlak doorlaatmiddel [m²], A_k = oppervlak Grevelingenmeer [m²], ω = golffrequentie [rad/s], ζ_k = tijamplitude in Grevelingenmeer [m].

¹⁴ Bij een doorlaatsluis van 200 meter breedte, waarbij een waterstandsvariatie van 0,50 meter realiseerbaar is, zal de jaarlijkse energieopbrengst circa 9,5 GWh zijn.

5.6 Aandachtspunten

Voor deze variant zijn enkele aandachtspunten geformuleerd die een significante rol hebben op de kostenraming en op de energieopbrengst en daarom in het vervolg als eerste onderzocht dienen te worden. Omdat enkele aandachtspunten voor meerdere varianten geldig zijn, is er voor gekozen om de aandachtspunten te nummeren en per hoofdstuk naar de aandachtspunten te verwijzen. Hieronder zijn de aandachtspunten voor variant 1 getoond. Daarbij is aangegeven of ze geldig zijn voor subvariant A of subvariant B of voor beide.

5.6.1 Algemeen

- Bemaling wordt bij deze variant toegepast om werkzaamheden droog uit te kunnen voeren. Door de zandige ondergrond zal deze bemaling relatief grootschalig en continu zijn. Een eerste indicatie voor het te onttrekken debiet is gebaseerd op de bemalingsinstallatie bij de bouwput voor de Brouwersluis en bedraagt 4000 m³/u. De vormgeving van de bouwput, waar bij een relatief groot gedeelte van het oppervlak de waterstand 10 meter verlaagd dient te worden, is negatief ten opzichte van de situatie bij de Brouwerssluis. De aanwezigheid van een ondoorlatende mastiek mat onder de bodembescherming onder de originele caissons heeft echter een positieve invloed het te onttrekken volume. Vanwege de aanwezigheid van deze mat zal wel een dubbel bemalingssysteem aangebracht dienen te worden om zowel boven als onder de mastiek mat te verlagen. Mocht blijken dat bemaling een niet toelaatbare grondwaterpeilverlaging in de regio met zich meebrengt, dan kan gekozen worden voor een oplossing met een bouwkuip met damwanden en een injectiebodem. (1)
- Bij deze variant wordt een groot gedeelte van het damlichaam verwijderd tijdens de constructiefase en daardoor wordt de kruin verlaagd van NAP + 11,0 naar het toetspeil van NAP + 5,0m. Er wordt voorgesteld om bovenop de kruin een parapet van 2,5 meter hoogte (tot een niveau van NAP + 7,5m) te plaatsen. Deze kan golfoverslag tijdens stormen beperken. Tevens wordt voorgesteld om een damwand te plaatsen om de geotechnische stabiliteit van het damlichaam te verzekeren. Er dient uitgezocht te worden of dit voorstel voldoet aan de door de Waterwet gestelde eisen voor de veiligheid tegen overstromingen. (2)
- De mastiek mat die aanwezig is onder de aanwezige bodembescherming kan de constructie mogelijk tegen onderloopsheid beschermen. Er zal onderzocht dienen te worden of dit het geval is. Anders zullen kwelschermen onder de constructie aangebracht dienen te worden om onderloopsheid te voorkomen. (3)

5.6.2 Subvariant A

- De afmetingen en de prestatie van de turbines bij subvariant A zijn gebaseerd op kentallen van riviercentrales en enkele gegevens van een pilot getijcentrale in Rusland (Kislaya Guba). Welke invloed het veranderen van de afmetingen (met name diameter en breedte) heeft op de prestatie zal verder onderzocht dienen te worden. (4)
- Er is geconstateerd dat het ontwerp voorgesteld door de TU Delft geotechnisch niet stabiel is bij extreme waterstanden. De sterkte-eigenschappen van het ontwerp zijn nog niet onderzocht. Wanneer blijkt dat deze niet voldoen, zal het ontwerp wijzigen. (5)
- Voor deze subvariant zal gekeken dienen te worden naar mogelijke vismigrerende maatregelen. Deze zijn in deze studie nog niet in de kosten meegenomen. (6)

5.6.3 Subvariant B

- Doordat bij subvariant B turbines in de doorlaatmiddelen worden geplaatst, zal er energie onttrokken worden. Als gevolg daarvan zal de afvoercapaciteit van de doorlaatmiddelen afnemen ten opzichte van een situatie waarin geen turbines geplaatst worden. Er is berekend dat dit effect er bij dit ontwerp voor zorgt dat de afvoercapaciteit 5% afneemt (zie bijlage 4). (7)
- Op dit moment is voor de afvoercoëfficiënt uitgegaan van een waarde van 0,6 bij subvariant B. Wanneer een ontwerp wordt gemaakt met een hogere afvoercoëfficiënt is een kleinere natte doorsnede nodig. Daardoor wordt tevens de stroomsnelheid hoger. In theorie geeft een twee maal zo hoge afvoercoëfficiënt een twee maal hogere stroomsnelheid. Het vermogen en de energieopbrengst zal bij een twee maal zo hoge stroomsnelheid acht maal zo hoog worden, wat volgt uit formule 10.2. Voor deze variant zal daarom aandacht besteedt dienen te worden aan het hydraulisch ontwerp van het doorlaatmiddel. (8)

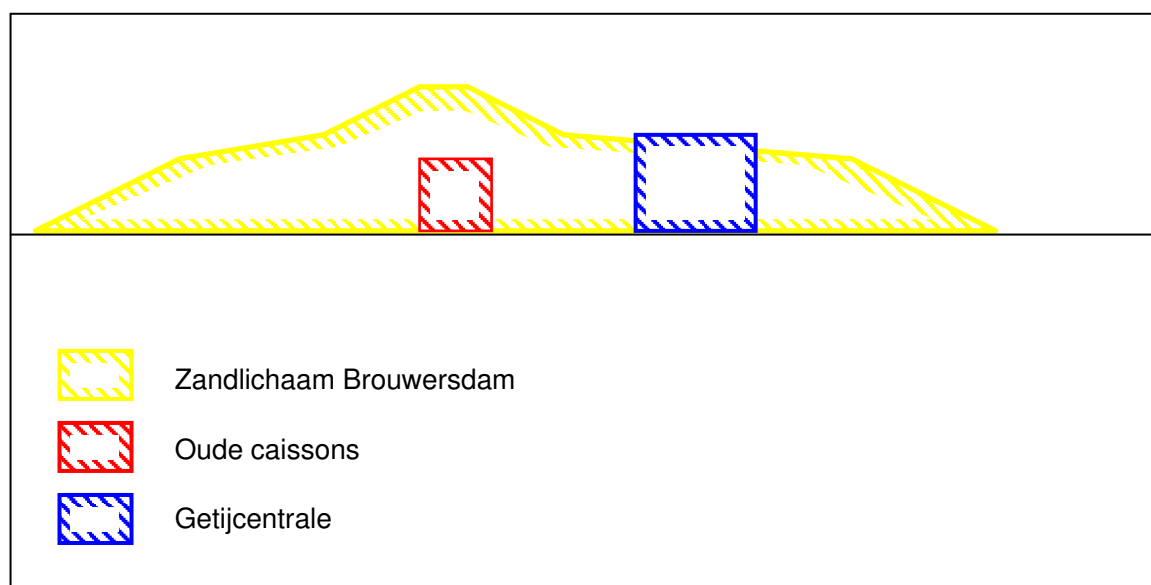
6 VARIANT 2; CENTRALE IN DROGE BOUWPUT AAN MEERZIJDE

6.1 Inleiding

De uitvoeringswijze is bij deze variant gebaseerd op de verkennende studies die zijn uitgevoerd door de Technische Universiteit Delft [TU Delft, 2008] en Witteveen+Bos [Notitie 5, 2008]. Daarbij is gekozen voor een droge bouwput welke de kruinhoogte van de Brouwersdam niet verlaagt.

In dit hoofdstuk zal deze variant toegelicht worden.

In paragraaf 6.2 worden de subvarianten gedefinieerd. Een toelichting op het schetsontwerp wordt gegeven in paragraaf 6.3. In paragraaf 6.4 is de uitvoeringswijze van deze variant toegelicht. De energieprestatie van deze variant is getoond in paragraaf 6.5. In paragraaf 6.6 worden de aandachtspunten voor deze variant behandeld.



Figuur 6.1 Conceptuele doorsnede variant 2

6.2 Definitie subvarianten

Bij subvariant A worden 106 bulbturbines met een diameter van 3,5 meter geplaatst. Bij subvariant B worden 80 vrije stroomturbines met een diameter van 7 meter geplaatst. Voor toelichting wordt verwezen naar paragraaf 5.3.

6.3 Toelichting op ontwerp

Bij subvariant A is wederom het schetsontwerp overgenomen van de verkennende studie van de TU Delft [TU Delft, 2008]. Voor subvariant B is net als bij variant 1 gebruik gemaakt van het ontwerp van het doorlaatmiddel van Witteveen+Bos [Notitie 5, 2008].

6.4 Uitvoeringswijze

Bij deze variant wordt wederom een droge bouwput gemaakt, maar deze keer aan de binnenzijde van de Brouwersdam. Op deze wijze kan tijdens constructie de kruinhoogte van de Brouwersdam behouden blijven. Nadeel van deze variant is dat de drempel van de oorspronkelijke caissons niet hergebruikt kan worden voor de getijcentrale. Tevens zal aan de meerzijde een nieuwe bodembescherming aangebracht dienen te worden. Ten slotte zullen de caissons 'in den natte' verwijderd dienen te worden.

De bouwvolgorde die hoort bij deze variant is hieronder weergegeven:

- Aanleg grondlichaam t.b.v. tijdelijke weg;
- Aanleg tijdelijke weg;
- Verwijderen verharding op Brouwersdam (gedeeltelijk);
- Aanleg bouwput:
 - Aanleggen damwanden (of andere maatregelen ter beperking van de infiltratie);
 - Ontgraven bouwput, onder gelijktijdige aanleg van bronbemaling;
- Aanleg drempel;
- Bouwen getijcentrale;
- Aanleggen wegen boven de centrale;
- Verwijderen damwanden of andere anti-infiltratiemiddelen;
- Aansluiten op huidige infrastructuur;
 - Aansluiten kering op getijcentrale;
 - Aansluiten bekleding op getijcentrale;
- Verwijderen resterende verharding op Brouwersdam;
- Ontgraven dam;
- Verwijderen caissons 'in den natte';
- Plaatsing van extra bodembescherming aan meerzijde.

6.5 Energieprestatie

De energieprestatie van deze variant komt overeen met variant 1. In Tabel 6.1 zijn de belangrijkste kenmerken van de energieprestatie getoond.

Tabel 6.1 Energieprestatie variant 2

Parameter	Subvariant A	Subvariant B
Gemiddelde waterstandsvariatie in Grevelingenmeer	0,57 m	1,60 m
Gemiddeld verval gedurende operatie	0,91 m	-
Maximale snelheid tijdens gemiddeld getij	-	2,64 m/s
Geïnstalleerd vermogen	60 MW	7,5 MW
Energieopbrengst	193 GWh/jaar	28 GWh/jaar

6.6 Aandachtspunten

Hieronder zijn de aandachtspunten voor deze variant getoond:

- Aandachtspunten met betrekking tot bemaling (1) en onderloopsheidschermen (3) en met betrekking tot subvariant A (4, 5, 6) en subvariant B (7,8) zijn gelijk aan variant 1. Voor toelichting, zie paragraaf 5.6;
- Er zijn verschillende faalmechanismen die er toe kunnen leiden dat een dijklichaam faalt. Enkele faalmechanismen hebben betrekking op de grondmechanische eigenschappen van de dijk. Onderzoek zal aan moeten tonen of de grondmechanische stabiliteit en sterkte bij hoogwaterstanden op zee voldoende is om te voldoen aan wettelijke eisen tijdens de bouwfase. (9)

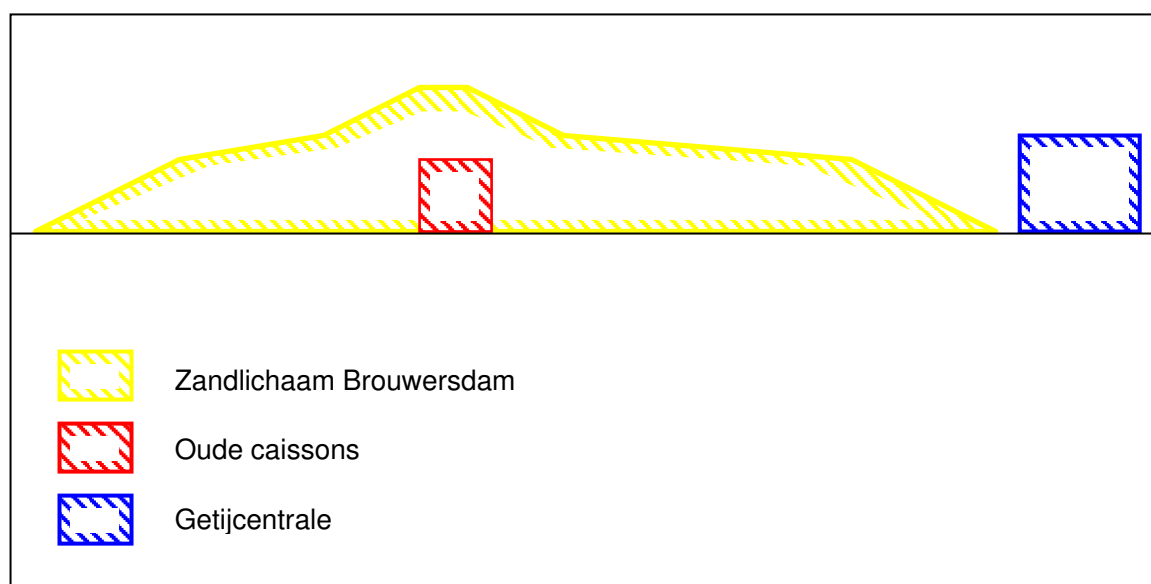
7 VARIANT 3; CENTRALE MET NATTE UITVOERINGSWIJZE

7.1 Inleiding

Voor de uitvoeringswijze is bij deze gekeken naar een principeel andere optie. Daarbij worden de turbine-elementen voor de getijcentrale op een andere locatie vervaardigd, in ieder geval in ruwbouw, en daarna naar de Brouwersdam gevaren en afgezonken. Het voordeel daarvan is dat veel werkzaamheden niet bij de Brouwersdam plaatsvinden en dat het verkeer over de huidige dam zo weinig mogelijk wordt gehinderd.

In dit hoofdstuk zal deze variant toegelicht worden.

In paragraaf 7.2 worden de subvarianten gedefinieerd. Een toelichting op het schetsontwerp wordt gegeven in paragraaf 7.3. In paragraaf 7.4 is de uitvoeringswijze van deze variant toegelicht. De energieprestatie van deze variant is getoond in paragraaf 7.5. In paragraaf 7.6 worden de aandachtspunten voor deze variant behandeld.



Figuur 7.1 Conceptuele doorsnede variant 3

7.2 Definitie subvarianten

Bij subvariant A worden 106 bulbturbines met een diameter van 3,5 meter geplaatst. Bij subvariant B worden 80 vrije stroomturbines met een diameter van 7 meter geplaatst.

7.3 Toelichting op ontwerp

Bij subvariant A is wederom het schetsontwerp overgenomen van de verkennende studie van de TU Delft [TU Delft, 2008]. Voor subvariant B is net als bij variant 1 gebruik gemaakt van het ontwerp van het doorlaatmiddel van Witteveen+Bos [Notitie 5, 2008].

Bij deze variant zal de getijcentrale aan de binnenzijde van de Brouwersdam komen te liggen vanwege de uitvoeringswijze.

Daardoor zijn ten opzichte van de andere varianten relatief grote aansluitconstructies voor wegen en waterkering nodig. Tevens kunnen de bodembescherming en de drempel bij deze variant niet hergebruikt worden, omdat de getijcentrale te ver van deze constructies ligt.

7.4 Uitvoeringswijze

De turbines voor de getijcentrale zullen bij deze variant vervaardigd worden in een bouwdok op de locatie van de huidige Werkhaven Bommenede. Op deze locatie zijn in 1971 caissons gebouwd t.b.v. de sluiting van het noordelijke sluitgat. De elementen worden na fabricage drijvend naar de Brouwersdam gesleept. Aangezien de ruimte in de werkhaven zich slechts leent voor de productie van de helft van de turbine-eenheden, zal het bouwdok tweemaal (mogelijk driemaal) gebruikt dienen te worden.

De volgende bouwvolgorde wordt voorgesteld voor deze variant:

- Bouwdok prepareren (2x):
 - Dijklichaam aanleggen;
 - Droogpompen bouwdok;
 - Bouwen getijcentrale;
 - Aanleggen weg op getijcentrale;
- Ontgraven t.p.v. uiteindelijke locatie getijcentrale;
- Plaatsen drempel 'in den natte';
- Invaren + plaatsen getijcentrale (2x);
- Aansluiten op huidige infrastructuur:
 - Aansluiten kering op getijcentrale;
 - Aansluiten bekleding op getijcentrale;
 - Aansluiten weg;
- Verwijderen verharding;
- Ontgraven dam;
- Verwijderen caissons 'in den natte'.

7.5 Energieprestatie

De energieprestatie van deze variant komt overeen met varianten 1 en 2. In Tabel 7.1 zijn de belangrijkste kenmerken van de energieprestatie getoond.

Tabel 7.1 Energieprestatie variant 3

Parameter	Subvariant A	Subvariant B
Gemiddelde waterstandsvariatie in Grevelingenmeer	0,57 m	1,60 m
Gemiddeld verval gedurende operatie	0,91 m	-
Maximale snelheid tijdens gemiddeld getij	-	2,64 m/s
Geïnstalleerd vermogen	60 MW	7,5 MW
Energieopbrengst	193 GWh/jaar	28 GWh/jaar

7.6 Aandachtspunten

Hieronder zijn de aandachtspunten voor deze variant getoond:

- Aandachtspunten met betrekking tot subvariant A (4,5,6) en subvariant B (7,8) zijn ook geldig voor deze variant. Voor toelichting, zie paragraaf 5.6;
- Het ontwerp en de kostenraming zijn gebaseerd op de hoofdafmetingen van de werkhaven Bommenede. Welke maatregelen nodig zijn om het bouwdok wederom geschikt te maken voor het vervaardigen van caissons, verdient in een mogelijk vervolg meer aandacht; (10)
- Aangezien de getijcentrale op een nieuwe locatie wordt gebouwd, zal de uitvoering op sommige onderdelen vereenvoudigen. Zo hoeft bij het plaatsen van onderloopsheidschermen geen rekening gehouden te worden met de bodembescherming en een drempel. Doordat er meer ruimte in de diepte beschikbaar is, zou een grotere inlaathoogte voor de turbine hier mogelijk zijn; (11)
- De grondsamenstelling en de bodemligging aan de meerzijde zal bepalend zijn voor werkzaamheden die nodig zijn ten behoeve van de fundering van de constructie (zoals bijvoorbeeld verdichting, dan wel het treffen van voorzieningen om zettingen na installatie van de turbines te kunnen opvangen of compenseren). (12)

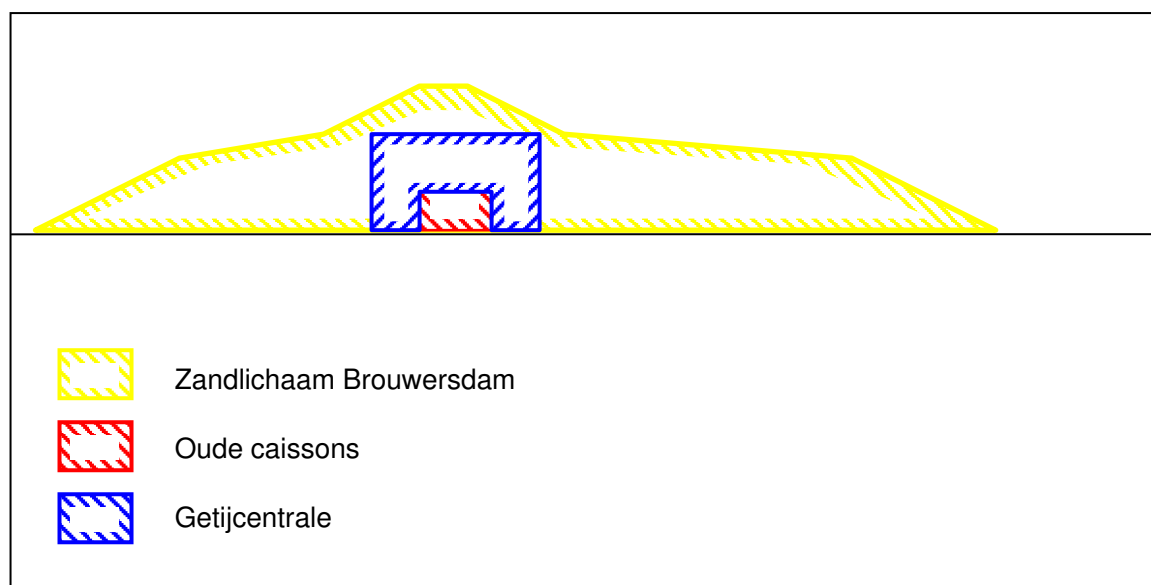
8 VARIANT 4; OORSPRONKELIJKE CAISSONS HANDHAVEN

8.1 Inleiding

Deze variant vloeit voort uit het idee dat verwijdering van de oorspronkelijke caissons, hetzij in den natte, hetzij in den droge, een moeizaam proces is of zou zijn. Dat leidde tot de vraag of van de nood geen deugd gemaakt kon worden door water via sifons en door turbines van de ene kant van de dam naar de andere kant te leiden. Het waterstandsverschil zorgt dam voor de aandrijvende kracht. De waterstroom dient daarbij op gang gebracht te worden door uit de sifon eerst lucht te verwijderen (vacuüm zuigen).

In dit hoofdstuk zal deze variant toegelicht worden.

In paragraaf 8.2 wordt de variant gedefinieerd. Een toelichting op het schetsontwerp wordt gegeven in paragraaf 8.3. In paragraaf 8.4 is de uitvoeringswijze van deze variant toegelicht. De energieprestatie van deze variant is getoond in paragraaf 8.5. In paragraaf 8.6 worden de aandachtspunten voor deze variant behandeld.



Figuur 8.1 Conceptuele doorsnede variant 4

8.2 Definitie subvarianten

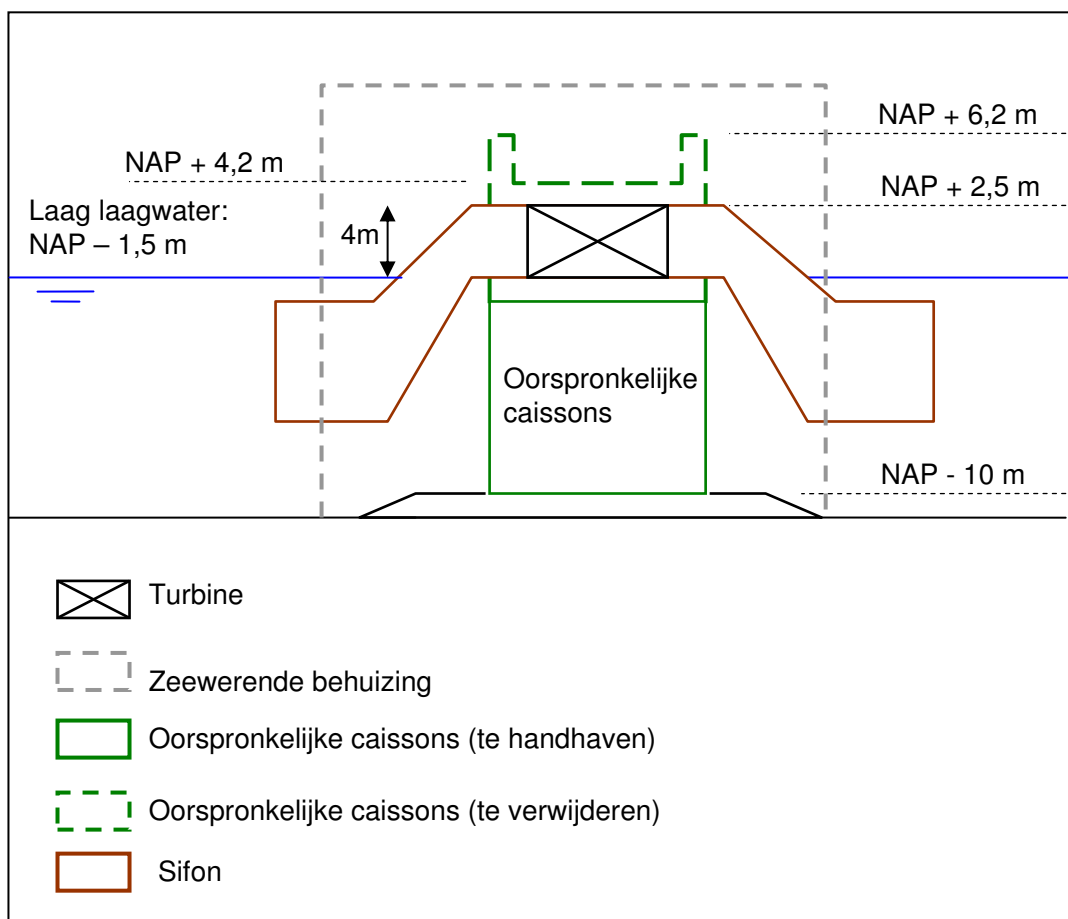
Bij subvariant A is de turbine is gekozen voor een waterkrachtturbine. Daarbij lijkt de toepassing van een tube turbine (waarbij de generator zich buiten de buis bevindt) het meest logisch.

Er is bij subvariant B gekozen voor een turbine die aangedreven wordt door luchtstroom, geplaatst buiten de sifon zelf.

8.3 Toelichting op ontwerp

8.3.1 Algemeen

Bij deze variant wordt een sifon gebruikt om (gedeeltelijk) over de caissons te gaan, die gebruikt zijn voor de sluiting van de Brouwersdam in 1971. Bovenin de sifon zal een turbine geplaatst worden (zie Figuur 8.2). Hier is voor gekozen om de hydraulische verliezen in beide richtingen gelijk te laten zijn.



Figuur 8.2 Schetsmatige doorsnede van sifon en locatie turbine

Bij de sifonvariant lijkt in eerste instantie een beperkte ingreep ter hoogte van de dam/oorspronkelijke caissons noodzakelijk. Echter bestudering van de vereiste afmetingen en aanlegniveau's van de diverse onderdelen, bijvoorbeeld de eis van een maximale toelaatbare onderdruk van 4m waterkolom, hebben aan het licht gebracht dat toch een aanzienlijk deel van de oorspronkelijke caissons dient te worden afgebroken, en dat toch voldoende diep ontgraven dient te worden aan de uiteinden van de sifon om tot een werkbare oplossing te komen.

De hevels zouden hierbij het water in beide richtingen over de dam kunnen transporteren en hierbij d.m.v. van een dubbelwerkende turbine elektriciteitsproductie verzorgen. Een belangrijke randvoorwaarde is het statische gewicht van de sifons, funderingen, turbines en waterkolommen die de dam zal moeten dragen.

8.3.2 Subvariant A

Een turbinegroep in sifonopstelling is een configuratie waarbij de turbine zich boven het opwaartse waterpeil bevindt. Het water wordt d.m.v. hevelwerking getransporteerd van de hoge druk zijde (stroomopwaartse peil) naar de lage druk zijde (stroomafwaartse peil). Het drukverschil over de hevel zorgt voor de aandrijving van een turbine ten behoeve van energieproductie.

8.3.3 Subvariant B

Luchtaangedreven turbines verschillen van waterkrachtturbines t.g.v. de lagere dichtheid van het medium. Hierdoor is de uitvoering kleiner en lichter en dus goedkoper. Luchtturbines zijn vergelijkbaar met gasturbines die bijvoorbeeld gebruikt worden bij aardgasexpansie of met een conventionele verbrandingsmotor met turbolading. Het verschil is vooral gelegen in de veel lagere temperatuur van de omgevingslucht.

Een dergelijk systeem heeft enkele voordelen t.o.v. sifonopstelling met turbine in waterstroom:

- De pneumatische turbine is klein, licht en eenvoudiger. Bovendien loopt deze turbine op hoge snelheid waardoor de generator eventueel direct aangedreven kan worden, zonder de noodzaak van een versnellingskast;
- De turbine kan onafhankelijk van de sifon geïnstalleerd worden;
- Een groot gedeelte van de centrale is low-tech wat de investeringskosten aanzienlijk drukt;
- De turbine kan worden ingezet bij lagere vervallen.

De nadelen van een dergelijk systeem zijn:

- Gezien een tweede medium wordt gebruikt, treden extra verliezen op. Het totale rendement over de machine is daardoor 55% in plaats van 80% bij waterkrachtturbines;
- Er zijn geen projecten gevonden waar deze techniek wordt gebruikt;
- De turbines kunnen niet gebruikt worden als pompen.

8.4 Uitvoeringswijze

Bij deze uitvoeringswijze zal wederom een droge bouwput nodig zijn om de sifonconstructie te vervaardigen. Qua uitvoeringswijze zijn er veel overeenkomsten met variant 1. Het verschil is dat bij variant 1 de caissons geheel verwijderd worden en dat bij deze variant de caissons slechts gedeeltelijk verwijderd worden.

De globale bouwvolgorde is hieronder opgesomd:

- Omleggen weg langs huidige parallelweg;
- Verwijderen verharding op Brouwersdam (gedeeltelijk);
- Aanleg bouwput:
 - Aanleggen damwanden;
 - Ontgraven bouwput;
 - Droogpompen bouwput;
- Verwijderen bovenzijde caissons;
- Aanleggen sifon centrale;
- Verwijderen damwanden;
- Aansluiten op huidige infrastructuur;

- Verwijderen resterende verharding op Brouwersdam;
- Ontgraven dam.

Opvallend is dat de bouwput voor de sifon van bijna gelijke grootte is als bij variant 1. Dit komt doordat er ruimte nodig is voor plaatsing van de sifons.

8.5 Energieprestatie

De hoofdafmetingen van de sifonconstructie zijn bijna gelijk aan de stroombuis van de bulbturbine bij de andere varianten. Er zijn echter twee uitzonderingen. Er bevinden zich vier extra bochten in de stroombuis en de stroombuis is langer. Dit brengt extra hydraulische verliezen met zich mee. Er wordt ingeschat dat deze hydraulische verliezen het totale rendement met ongeveer 10 % verlagen.

Deze 10% rendementsverlaging heeft invloed op het gemiddelde vermogen tijdens operatie, maar ook op het verval waarbij de machine kan starten en moet stoppen. Wanneer rekening wordt gehouden met deze effecten, worden de volgende resultaten (zie Tabel 8.1) verkregen voor subvariant A (rendement over turbine: 72%) en subvariant B (rendement over turbine: 50%).

Tabel 8.1 Energieprestatie variant 4

Parameter	Subvariant A	Subvariant B
Gemiddelde waterstandsvariatie in Grevelingenmeer	0,56 m	0,56 m
Gemiddeld verval gedurende operatie	0,92 m	0,92
Geïnstalleerd vermogen	54 MW	37 MW
Energieopbrengst	173 GWh/jaar	118 GWh/jaar

8.6 Aandachtspunten

Hieronder zijn de aandachtspunten voor deze variant getoond:

- Aandachtspunten met betrekking tot bemaling (1), veiligheid tegen overstromingen (2), onderloopsheidschermen (3), subvariant A (4,5,6) en subvariant B (7,8) zijn ook geldig voor deze variant. Voor toelichting, zie paragraaf 5.6;
- Door het relatief lage verval spelen de hydraulische verliezen die optreden door de sifonconstructie een significante rol. Het ontwerp van de sifonconstructie zal daarom erop gericht dienen te zijn om de hydraulische verliezen te minimaliseren; (13)
- De kosten voor de zeewerende turbinebehuizing zijn gelijk gesteld aan de andere varianten (zie hoofdstuk 9), aangezien deze constructie dezelfde zeewerende eigenschappen dient te hebben als de andere varianten. De kosten voor de sifonconstructie vallen dan ook onder deze post. Mogelijk kunnen de civiele kosten lager uitvallen door de aanwezigheid van de (helft van de) oorspronkelijke caissons. Dit zal in een volgende fase onderzocht moeten worden; (14)
- Bij subvariant A is het mogelijk optreden van cavitatie een aandachtspunt; (15)
- Bij subvariant B is de techniek bewezen op laboratoriumschaal. In de praktijk zijn er nog geen projecten waarbij energie op deze wijze wordt opgewekt. (16)

KOSTEN

De kosten zijn geraamd volgens de SSK-systematiek (Standaard Systematiek Kostenramingen). Bij deze methode wordt voor het bekende deel van de kosten van een ontwerp geraamd door 'hoeveelheid' te vermenigvuldigen met 'eenheidsprijs'. Aan dit bekende deel van de kosten worden kostenposten toegevoegd voor engineering, winst&risico, uitvoeringskosten en onvoorziene kosten. Toelichting op deze begrippen wordt gegeven in Tabel 9.1. Daarmee wordt de verwachting voor de prijs van het project bepaald. Voor het vrij te maken budget dient de verwachte prijs vermeerderd te worden met een onzekerheidsmarge. Bij deze studie is deze onzekerheidsmarge 50%.

Tabel 9.1 Toelichting begrippen SSK-raming

Begrip	Toelichting
Directe bouwkosten	Kosten die direct en specifiek voor de productie van de in het project onderscheiden objecten gemaakt worden. Ze zijn de optelsom van man- en materieeluren, materiaalkosten, huren en leveranties, onderaannemers en dergelijke. Directe bouwkosten zijn direct gekoppeld aan de hoeveelheden van de uit te voeren werkzaamheden.
Voorziene kosten	De kosten die ten tijde van het opstellen van de kostenraming voorzien zijn op grond van de voorliggende specificaties en het ontwerp (tezamen vormend de scope).
Onvoorziene kosten	Dekking van kosten die in de toekomst mogelijk ontstaan als gevolg van gebeurtenissen. Geïnterpreteerde bijzondere gebeurtenissen zijn te kwantificeren door middel van 'kans x gevolg'. Niet geïnterpreteerde gebeurtenissen worden meestal gekwantificeerd met een percentage van de voorziene kosten.
Nader te detailleren	Toeslag op de bekende kosten voor wel voorziene maar niet expliciet uitgewerkte onderdelen van het ontwerp of de aangenomen uitvoeringsmethode.
Object onvoorzien	Onvoorziene kosten die aan de vastgestelde objecten in de kostenraming worden gekoppeld.
Indirecte bouwkosten	De optelsom van eenmalige kosten, tijdgebonden kosten (ook wel 'uitvoeringskosten' genoemd), algemene kosten bouwbedrijf, bijdragen en winst en risico. De indirecte bouwkosten hebben geen directe relatie met hoeveelheden.
Bouwkosten	De kosten die zijn gemoeid met de fysieke realisatie van de in het project onderscheiden objecten (bouwwerken).
Vastgoedkosten	Alle kosten die nodig zijn voor de verwerving van vastgoed voorzover deze betrekking hebben op het verwerven van eigendom van en/of het beheersrecht over het terrein met eventueel hierop aanwezige bouwwerken. Hiertoe behoort ook de nadeelcompensatie. Enkele voorbeelden zijn: inventarisatiekosten, taxatiekosten, vooropnamekosten opstallen, aankoop opstallen, afkoop inkomstenderving, kabels en leidingen, aangebrachte schade, overdrachtskosten en sloopkosten. De vastgoedkosten kunnen desgewenst worden onderscheiden in directe vastgoedkosten en indirecte vastgoedkosten.
Engineeringskosten	De kosten voor werkzaamheden op het terrein van de techniek en daarmee verband houdende vakgebieden omtrent organisatie, milieutechnische, juridische en economische aspecten. Tot deze post kunnen zowel de eigen apparaatskosten van de opdrachtgever behoren als de kosten verbonden aan het uitbesteden van werkzaamheden aan derden. De engineeringkosten kunnen desgewenst worden onderscheiden in directe engineeringkosten en indirecte engineeringkosten.

Begrip	Toelichting
Overige bijkomende kosten	Alle kosten die niet vallen onder de bouwkosten, vastgoedkosten of de engineeringskosten, maar die wel tot de raming behoren. Voorbeelden zijn: vergunningen, heffingen, leges, precario, kosten buitendienststellingen, financieringskosten, vervangend vervoer, rente, loon- en/of prijsstijgingen, grondonderzoek, het maken van bestemmingsplannen, geluidsonderzoek etc.
Basisraming	Som van bouwkosten, vastgoedkosten, engineeringskosten en overige bijkomende kosten.
Projectonvoorzien	Toeslag op de basisraming ter dekking van toekomstonzekerheden (<u>binnen de scope van het project</u>) die niet zijn toe te wijzen aan een specifiek object, deelproject of een kostencategorie.
Investeringskosten (in- of exclusief BTW)	De som van de basisraming en projectonvoorzien, desgewenst te verhogen met het bedrag voor BTW.
Bandbreedte	De mate van spreiding rond het eindbedrag van de raming, als gevolg van projectonzekerheden. De bandbreedte wordt uitgedrukt als variatiecoëfficiënt (een percentage van de gemiddelde waarde van de investeringskosten), als standaardafwijking (het bedrag in euro's) of als twee waarden, behorend bij een aangegeven betrouwbaarheidsinterval. De bandbreedte kan volgen uit een risicoanalyse, maar is ook in te schatten als bedrag "-"/bedrag "+". De grootte van de bandbreedte hangt onder meer af van de projectfase, het proces en het bedrijf.

In deze studie zijn per variant tussen de 15 en 20 onderdelen geïdentificeerd die een significante invloed hebben op de kostenraming. Een groot gedeelte van die onderdelen is bepaald aan de hand van de bouwvolgorde. Met de schetsontwerpen (zie bijlage 1) is de hoeveelheid en de eenheidsprijs bepaald. Daarmee is voor een groot gedeelte van de onderdelen de prijs berekend.

Voor de elektromechanische apparatuur zijn de volgende uitgangspunten aangehouden voor de directe kosten:

- Bulbturbines (aantal 106, diameter 3,5) is 135 miljoen euro aangehouden [TU Delft, 2008];
- Vrije stroomturbines; 2500 euro/kW en kosten voor schuiven (aantal 20): 6 M€ [Notitie 5, 2008];
- Voor waterkrachturbines in sifon is dezelfde prijs als bulbturbines aangehouden;
- Voor lucht aangedreven turbines is in overleg een kostprijs van 500 euro/kW aangehouden.

De kosten voor de zeewerende constructie rondom de turbine zijn bepaald aan de hand van benodigde volumes beton en zand. Daarbij is uitgegaan van het ontwerp (en de volumes beton) van de TU Delft. Uit een analyse naar de geotechnische stabiliteit kwam echter naar voren dat het gewicht van deze constructie onvoldoende was. Extra gewicht is vervolgens verkregen door het toevoegen van beton en ballastmateriaal in de verhouding 1:9 (let op aandachtspunt 5). Tevens is rekening gehouden met extra beton dat nodig is voor de provinciale weg en de spoorweg. Op basis van deze volumes beton en zand zijn met behulp van eenheidsprijzen kosten voor de constructie rondom de turbine bepaald.

De kosten voor deze civiele werken (inclusief sifons) zijn voor de varianten 4a en 4b gelijk gesteld aan de andere varianten, aangezien bij alle varianten de constructies een soortgelijke stroombuis bevatten en dezelfde extreme hydraulische belastingen aan moeten kunnen.

In Tabel 9.2 en Tabel 9.3 zijn de kosten (exclusief BTW) voor de verschillende varianten weergegeven. In deze tabellen zijn de directe bouwkosten vertaald naar investeringskosten (voor toelichting van deze begrippen, zie Tabel 9.1). Dit heeft als gevolg dat sommige onderdelen dezelfde directe bouwkosten hebben maar andere investeringskosten. Dit verschil zal relatief klein zijn.

Tabel 9.2 Investeringskosten varianten 1a, 2a, 3a en 4a

Omschrijving	Variant 1a	Variant 1b	Variant 2a	Variant 2b
	Bulbturbines t.p.v. oorspronkelijke caissons	Vrije stroomturbines t.p.v. oorspronkelijke caissons	Bulbturbines aan binnenzijde Brouwersdam in droge bouwput	Vrije stroomturbines aan binnenzijde Brouwersdam in droge bouwput
(a) Aanleg tijdelijke voorzieningen				
Grondlichaam met tijdelijke bescherming en verharding			4,6	4,7
Werkzaamheden bij natte bouwput				
Werkzaamheden bij bouwdok				
Installeren tijdelijke damwand (inclusief aanschaf)	0,5	0,5	0,5	0,5
Ontgraven bouwput	11,7	12,0	10,8	11,1
Bemalen bouwput (2 jaar)	8,6	8,8	7,7	7,8
PM – injectiebodem	48,7	50,1	48,6	49,7
<i>Sub-totaal aanleg tijdelijke voorzieningen (excl. PM injectie bodem)</i>	<i>20,8</i>	<i>21,3</i>	<i>23,6</i>	<i>24,1</i>
(b) Bouw getijcentrale				
Civiele werken	152,2	156,4	170,6	174,6
Turbines en andere apparatuur	235	44,3	234,3	43,9
Sifons				
<i>Sub-totaal aanleg getijcentrale</i>	<i>387,2</i>	<i>200,7</i>	<i>404,9</i>	<i>218,5</i>
(c) Verwijdering tijdelijke voorzieningen en oude dam				
Verwijdering tijdelijke damwand	0,4	0,4	0,4	0,4
Verwijderen tijdelijke dam			1,2	1,3
Verwijderen (restanten van) Brouwersdam	86,2	88,6	86,3	88,2
Verwijderen caissons in den droge	4,1	4,2		
Verwijderen caissons in den natte			17,4	17,8
<i>Sub-totaal verwijdering tijdelijke voorzieningen en oude dam</i>	<i>90,7</i>	<i>93,2</i>	<i>105,3</i>	<i>107,7</i>
(d) Totaal	499	315	534	350

Tabel 9.3 Investeringskosten varianten 1b, 2b, 3b en 4b

Omschrijving	Variant 3a	Variant 3b	Variant 4a	Variant 4b
	Bulbturbines aan binnenzijde Brouwersdam in natte bouwput	Vrije stroomturbines aan binnenzijde Brouwersdam in natte bouwput	Sifon over oorspronkelijke caissons met waterkracht-turbines	Sifon over oorspronkelijke caissons met lucht aangedreven turbines
(a) Aanleg tijdelijke voorzieningen				
Grondlichaam met tijdelijke bescherming en verharding				
Werkzaamheden bij natte bouwput	41,9	42,8		
Werkzaamheden bij bouwdok	4,4	4,5		
Installeren tijdelijke damwand (inclusief aanschaf)			0,5	0,5
Ontgraven bouwput			12,2	12,6
Bemalen bouwput (2 jaar)			8,6	8,8
PM – injectiebodem			48,7	50,3
<i>Sub-totaal aanleg tijdelijke voorzieningen (excl. PM injectie bodem)</i>	<i>46,3</i>	<i>47,3</i>	<i>21,3</i>	<i>21,9</i>
(b) Bouw getijcentrale				
Civiele werken	167,8	171,2	152,2	154
Turbines en andere apparatuur	233,8	43,7	235	33,2
Sifons			0	0
<i>Sub-totaal aanleg getijcentrale</i>	<i>401,6</i>	<i>214,9</i>	<i>387,2</i>	<i>187,2</i>
(c) Verwijdering tijdelijke voorzieningen en oude dam				
Verwijdering tijdelijke damwand			0,4	0,4
Verwijderen tijdelijke dam				
Verwijderen (restanten van) Brouwersdam	97,0	98,9	86,2	88,8
Verwijderen caissons in den droge			2,1	2,2
Verwijderen caissons in den natte	17,3	17,7		
<i>Sub-totaal verwijdering tijdelijke voorzieningen en oude dam</i>	<i>114,3</i>	<i>116,6</i>	<i>88,7</i>	<i>91,4</i>
(d) Totaal	562	379	497	301

Voor toelichting op de herkomst van de getallen van de kostenraming wordt verwezen naar bijlage 2.

10 CONCLUSIES

Er zijn vier varianten gedefinieerd die variëren in locatie ten opzichte van de as van de Brouwersdam. Elk van deze varianten kent twee subvarianten met verschil in hydro-elektrische conversietechniek. Voor alle varianten en subvarianten zijn energieprestatie en kosten bepaald. De volledige benaming voor de subvarianten is hieronder getoond:

- (1a) Tweezijdig turbinerende getijcentrale met bulbturbines, aan te leggen in een droge bouwput ter plaatse van de oorspronkelijke.
- (1b) Tweezijdig turbinerende getijcentrale met vrije stroomturbines, aan te leggen in een droge bouwput ter plaatse van de oorspronkelijke.
- (2a) Tweezijdig turbinerende getijcentrale met bulbturbines, aan te leggen in een droge bouwput aan de binnenzijde van de Brouwersdam.
- (2b) Tweezijdig turbinerende getijcentrale met vrije stroomturbines, aan te leggen in een droge bouwput aan de binnenzijde van de Brouwersdam.
- (3a) Tweezijdig turbinerende getijcentrale met bulbturbines, aan te leggen in den natte.
- (3b) Tweezijdig turbinerende getijcentrale met vrije stroomturbines, aan te leggen in den natte.
- (4a) Sifonoplossing met energieopwekking door waterturbines ter plaatse van de oorspronkelijke.
- (4b) Sifonoplossing met energieopwekking door hydropneumatische turbines

Voor elk van de varianten zijn aandachtspunten geformuleerd, die gezien kunnen worden als aanbevelingen voor verder onderzoek (zie volgende hoofdstuk). Resultaten kunnen een significante invloed hebben op de kostenraming, maar er wordt verwacht dat dit binnen de ± 50 % ligt.

In Tabel 10.1 zijn de belangrijkste kengetallen van de varianten getoond.

Tabel 10.1 Kengetallen van varianten

Variant	Getijslag in Grevelingenmeer	Geïnstalleerd Vermogen	Energie-opbrengst	Opbrengst 1e jaar (energieprijs = 12,2 cent/kWh) ¹⁵	Investeringskosten (verwachting)	Inv. Kosten -50%	Inv. Kosten +50%
[-]	[m]	[MW]	[GWh/jaar]	[M€]	[M€]	[M€]	[M€]
1a	0,57	60	193	23,5	499	249	748
1b	1,60	8	30	3,6	315	158	473
1b (*)	0,50	2	10	1,2	158	79	237
2a	0,57	60	193	23,5	534	267	801
2b	1,60	8	30	3,6	350	175	526
2b (*)	0,50	2	10	1,2	175	88	263
3a	0,57	60	193	23,5	562	281	843
3b	1,60	8	30	3,6	379	189	568
3b (*)	0,50	2	10	1,2	190	95	285
4a	0,56	54	174	21,2	497	249	746
4b (**)	0,56	37	118	14,4	301	150	451

(*) In overleg met het werkteam kwam naar voren dat een waterstandsvariatie in het Grevelingenmeer van 1,60 meter niet wenselijk is en dat een waterstandsvariatie van 0,50 meter dichterbij de buurt komt. Op basis van de resultaten van deze studie is daarvoor gekeken naar een breedte van een doorlaatmiddel van 200 m in plaats van 800 m, zoals bij varianten 1b, 2b, 3b. Energieopbrengsten zijn bepaald met behulp van een hydraulisch model (zie paragraaf 5.5.2). De kosten zijn bepaald door middel van de volgende formule: $K_1/K_2 = \sqrt{L_1/L_2}$. Dit is gedaan omdat een gedeelte van de kosten vast is en een gedeelte afneemt met de lengte.

(**) Deze techniek is slechts in het laboratorium aangetoond. Rendement en kosten van deze techniek zijn daardoor onzekerder dan bij andere varianten.

De kolom met de verwachte investeringskosten zijn het best bruikbaar voor een (maatschappelijke) kosten baten analyse. De kolommen met -50% en +50% geven de bandbreedte aan van de investeringskosten. De berekende investeringskosten met een marge van 50 % kunnen tevens gebruikt worden voor een kostenreservering bij de desbetreffende overheden.

Ten aanzien van deze varianten kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De energieopbrengst en het geïnstalleerde vermogen zijn bij variant 1a, 2a en 3a waar bulbturbines worden gebruikt voor de hydro-elektrische conversietechniek, het hoogst. Het geïnstalleerde vermogen is bij deze alternatieven 60 MW en de energieopbrengst 193 GWh/jaar.
- Er is voor de varianten met bulbturbines (1a, 2a, 3a) en met een sifon (4a, 4b) gekeken naar de invloed van verlaging van het middelpil naar NAP – 0,20 m. Uit het hydraulische model kan geconcludeerd worden dat verlaging van het middenpeil nagenoeg geen invloed heeft op de energieopbrengst. Deze conclusie komt overeen met de resultaten van de verkennende studie naar een getijcentrale in de Brouwersdam [TU Delft, 2008].

¹⁵ Deze energieprij is gebaseerd op de SDE-subsidieregeling geldend voor waterkracht met een verval lager dan 5 meter.

- Er is tevens bestudeerd welke invloed een open verbinding tussen het Volkerak Zoommeer en het Grevelingenmeer heeft op de energieopbrengst. De conclusie is dat bij eenzelfde ontwerp van de getijcentrale de energieopbrengst jaarlijks 1% zal toenemen.
- De alternatieven met vrije stroomturbines (1b, 2b, 3b) zijn weliswaar relatief goedkoop, maar lijken een onlogische keuze wanneer wordt gekeken naar de verhouding tussen kosten en baten.
- De initieel verwachte besparing in kosten voor de uitvoeringswijze door de caissons niet (volledig) te verwijderen door gebruik te maken van sifons (variant 4a en 4b) lijkt gering ten opzichte van het totaalbedrag.
- De kosten bij variant 4b, waarbij de hydro-elektrische conversie wordt verricht door lucht aangedreven turbines, zijn het laagst. Dit komt door de lage kostprijs die aangenomen is voor de lucht turbines. Hoewel de verhouding tussen kosten en baten bij deze variant veelbelovend lijkt, is deze techniek slechts bewezen op laboratoriumschaal. De prestatie en kosten van deze techniek zijn daardoor meer onzeker en verder onderzoek zal aan dienen te tonen of de aannames in deze studie gegrond zijn.

11 AANBEVELINGEN

Per (sub)variant zijn aandachtspunten geformuleerd. Zoals beschreven in de conclusies kunnen deze gezien worden als aanbevelingen voor verder onderzoek. Hieronder worden deze aandachtspunten getoond. Boven elke aanbeveling wordt aangegeven voor welke (sub)varianten zij gelden.

Variant 1, 2, 4

- Bemaling wordt bij deze varianten toegepast om werkzaamheden droog uit te kunnen voeren. Door de zandige ondergrond zal deze bemaling relatief grootschalig en continu zijn. Een eerste indicatie voor het te onttrekken debiet is gebaseerd op de bemalingsinstallatie bij de bouwput voor de Brouwersluis en bedraagt 4000 m³/u. De vormgeving van de bouwput, waar bij een relatief groot gedeelte van het oppervlak de waterstand 10 meter verlaagd dient te worden, is negatief ten opzichte van de situatie bij de Brouwersluis. De aanwezigheid van een ondoorlatende mastiek mat onder de bodembescherming onder de originele caissons heeft echter een positieve invloed het te onttrekken volume. Vanwege de aanwezigheid van deze mat zal wel een dubbel bemalingssysteem aangebracht dienen te worden om zowel boven als onder de mastiek mat te verlagen. Mocht blijken dat bemaling een niet toelaatbare grondwaterpeilverlaging in de regio met zich meebrengt, dan kan gekozen worden voor een oplossing met een bouwkuip met damwanden en een injectiebodem. (1)

Variant 1, 4

- Bij deze varianten wordt een groot gedeelte van het damlichaam verwijderd tijdens de constructiefase en daardoor wordt de kruin verlaagd van NAP + 11,0 naar het toetspeil van NAP + 5,0m. Er wordt voorgesteld om bovenop de kruin een parapet van 2,5 meter hoogte (tot een niveau van NAP + 7,5m) te plaatsen. Deze kan golfoverslag tijdens stormen beperken. Tevens wordt voorgesteld om een damwand te plaatsen om de geotechnische stabiliteit van het damlichaam te verzekeren. Er dient uitgezocht te worden of dit voorstel voldoet aan de door de Waterwet gestelde eisen voor de veiligheid tegen overstromingen (2)

Variant 1, 2, 4

- De mastiek mat die aanwezig is onder de aanwezige bodembescherming kan de constructie mogelijk tegen onderloopsheid beschermen. Er zal onderzocht dienen te worden of dit het geval is. Anders zullen kwelschermen onder de constructie aangebracht dienen te worden om onderloopsheid te voorkomen. (3)

Subvariant 1a, 2a, 3a, 4a

- De afmetingen en de prestatie van de waterkrachtturbines bij subvariant A zijn gebaseerd op kentallen van riviercentrales en enkele gegevens van een pilot getijcentrale in Rusland (Kislaya Guba). Welke invloed het veranderen van de afmetingen (met name diameter en breedte) heeft op de prestatie zal verder onderzocht dienen te worden. (4)

Subvariant 1a, 2a, 3a

- Er is geconstateerd dat het ontwerp voorgesteld door de TU Delft geotechnisch niet stabiel is bij extreme waterstanden. De sterkte-eigenschappen van het ontwerp zijn nog niet onderzocht. Wanneer blijkt dat deze niet voldoen, zal het ontwerp wijzigen. (5)

Subvariant 1a, 2a, 3a, 4a

- Voor deze subvariant zal gekeken dienen te worden naar mogelijke vismigrerende maatregelen. Deze zijn in deze studie nog niet in de kosten meegenomen. (6)

Subvariant 1b, 2b, 3b

- Doordat bij subvariant B vrije stroomturbines in de doorlaatmiddelen worden geplaatst, zal er energie onttrokken worden. Als gevolg daarvan zal de afvoercapaciteit van de doorlaatmiddelen afnemen ten opzichte van een situatie waarin geen turbines geplaatst worden. Er is berekend dat dit effect er bij dit ontwerp voor zorgt dat de afvoercapaciteit 5% afneemt (zie bijlage 4). (7)

Subvariant 1b, 2b, 3b

- Op dit moment is voor de afvoercoëfficiënt van het doorlaatmiddel voorgesteld door Witteveen+Bos [Notitie 5, 2008] uitgegaan van een waarde van 0,6 bij subvarianten 1b, 2b en 3b. Wanneer een ontwerp wordt gemaakt met een hogere afvoercoëfficiënt is een kleinere natte doorsnede nodig. Daardoor wordt tevens de stroomsnelheid hoger. In theorie levert een twee maal zo hoge afvoercoëfficiënt een acht maal hogere energieproductie op. Voor deze subvariant zal daarom aandacht besteedt dienen te worden aan het hydraulisch ontwerp van het doorlaatmiddel. (8)

Variant 2

- Er zijn verschillende faalmechanismen die er toe kunnen leiden dat een dijklichaam faalt. Enkele faalmechanismen hebben betrekking op de grondmechanische eigenschappen van de dijk. Bij deze variant zal onderzoek aan moeten tonen of de grondmechanische stabiliteit en sterkte bij hoogwaterstanden op zee voldoende is om te voldoen aan wettelijke eisen tijdens de bouwphase. (9)

Variant 3

- Het ontwerp en de kostenraming zijn gebaseerd op de hoofdafmetingen van de werkhaven Bommenede. Welke maatregelen nodig zijn om het bouwdok wederom geschikt te maken voor het vervaardigen van caissons, verdient in een mogelijk vervolg meer aandacht. (10)
- Aangezien de getijcentrale op een nieuwe locatie wordt gebouwd, zal de uitvoering op sommige onderdelen vereenvoudigen. Zo hoeft bij het plaatsen van onderloopsheidschermen geen rekening gehouden te worden met de bodembescherming en een drempel. Doordat er meer ruimte in de diepte beschikbaar is, zou een grotere inlaathoogte voor de turbine hier ook mogelijk zijn. (11)
- De grondsamenstelling en de bodemligging aan de meerzijde zal bepalend zijn voor werkzaamheden die nodig zijn ten behoeve van de fundering van de constructie (zoals bijvoorbeeld verdichting, dan wel het treffen van voorzieningen om zettingen na installatie van de turbines te kunnen opvangen of compenseren). (12)

Variant 4

- Door het relatief lage verval spelen de hydraulische verliezen die optreden door de sifonconstructie een significante rol. Het ontwerp van de sifonconstructie zal daarom erop gericht dienen te zijn om de hydraulische verliezen te minimaliseren. (13)
- De kosten voor de zeewerende turbinebehuizing zijn gelijk gesteld aan de andere varianten (zie hoofdstuk 9), aangezien deze constructie dezelfde zeewerende eigenschappen dient te hebben als de andere varianten. De kosten voor de sifonconstructie vallen dan ook onder deze post. Mogelijk kunnen de civiele kosten lager uitvallen door de aanwezigheid van de (helft van de) oorspronkelijke caissons. Dit zal in een volgende fase onderzocht moeten worden. (14)

Subvariant 4a

- Bij subvariant 4a is het mogelijk optreden van cavitatie een aandachtspunt. (15)

Subvariant 4b

- Bij subvariant B is de techniek bewezen op laboratoriumschaal. In de praktijk zijn er nog geen projecten waarbij energie op deze wijze wordt opgewekt. (16)

12 REFERENTIES

[TU Delft, 2008]

Van Duivendijk, Vrijling et al., 2008, Verkennende studie getijcentrale in de Brouwersdam.

[Notitie 5, 2008]

RWS, 2008, Notitie Civiele aspecten doorlaatmiddel Brouwersdam

[Van Duivendijk, 2010]

Van Duivendijk, 2010, Notitie over onderzoeksvragen, Getijcentrale in de Brouwersdam

[Lancaster University, 2005]

M B Widden et al., 2005, Lancaster University Renewable Energy Group, Engineering Department, Lancaster University.

[HR 2006]

Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2006, Hydraulische Randvoorwaarden

[Deltares, 2009]

Deltares, 2009, Overzicht stand van techniek voor kleinschalige waterkracht

[TU Delft, 1984]

Glerum, 1984, Waterbouwkunde, dictaat TU Delft

[Hydropower & Dams, 2009]

Hydropower & Dams, 2009, Marine Energy supplement

[DMB-DW, 1968]

Driemaandelijks bericht Deltawerken, 1968, nr. 43, blz. 129 e.v.

[DMB-DW, 1970]

Driemaandelijks bericht Deltawerken, mei 1970, nr. 54, blz. e.v.

[Alstom, 2010]

Alstom Power: Internet: <http://www.power.alstom.com/>.

[Andritz, 2010]

Andritz Hydro GmbH: <http://www.andritz.com/>.

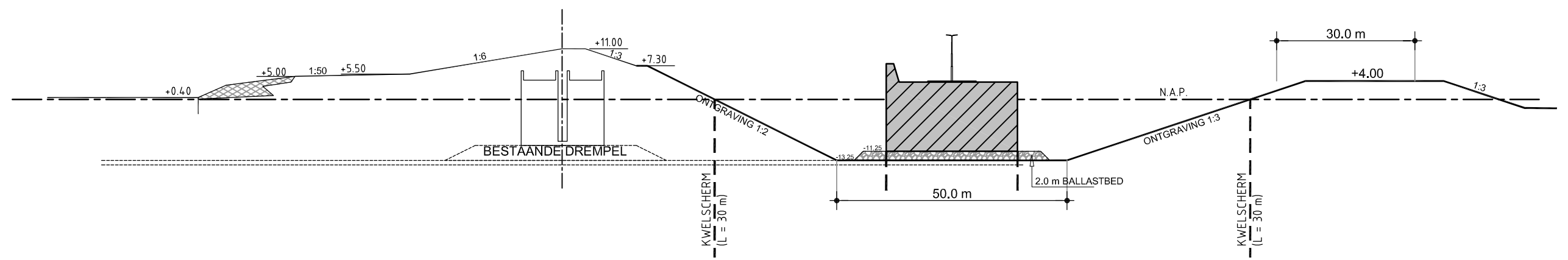
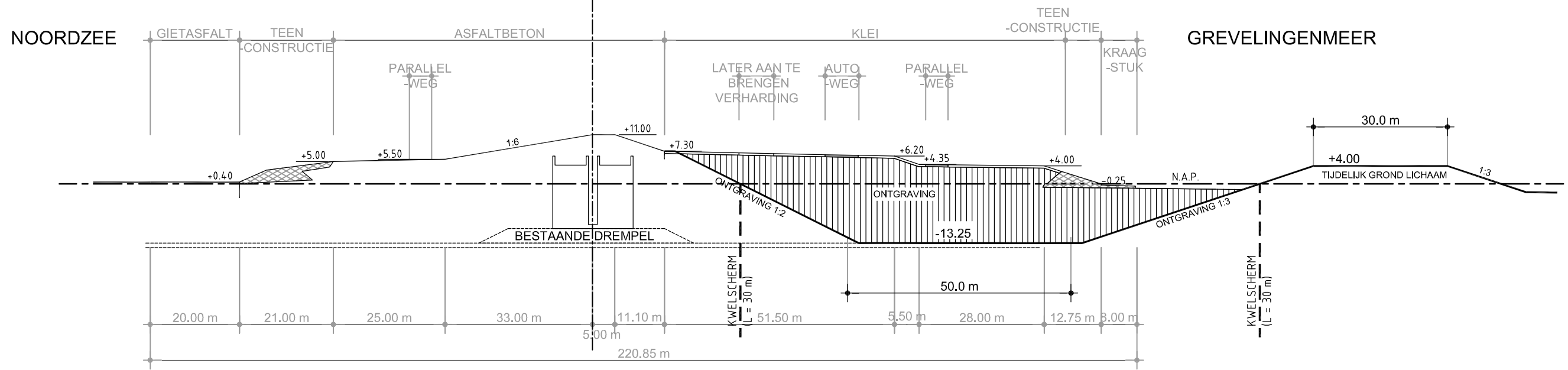
[Carbon Trust, 2009]

Carbon Trust, Technical overview of wave and tidal stream energy. 2009.

=0=0=0=

Bijlage 1

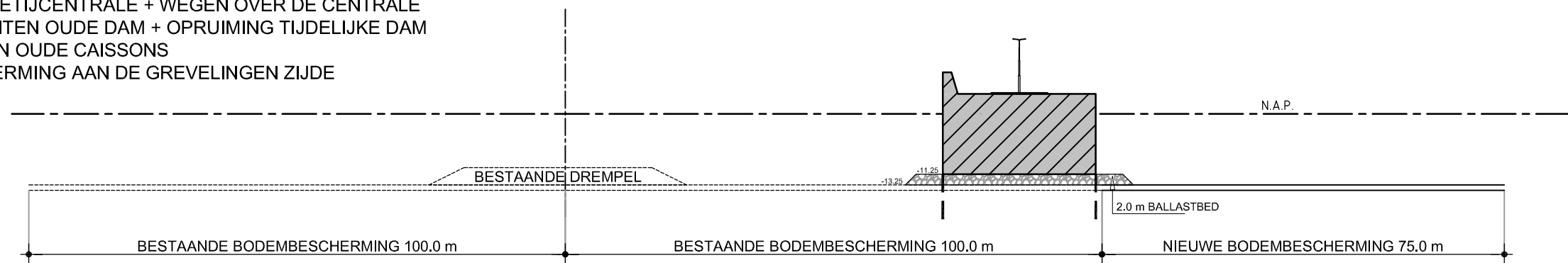
Dwarsdoorsneden van schetsontwerp



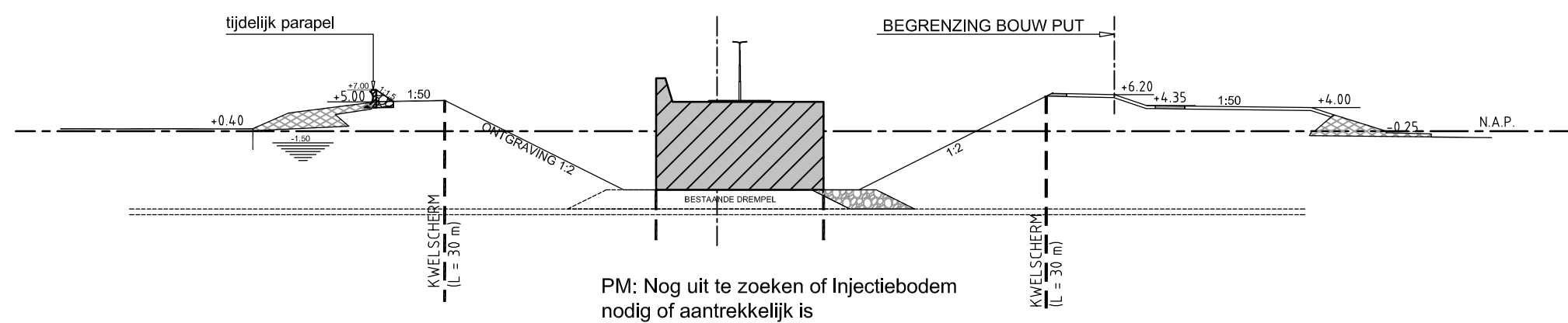
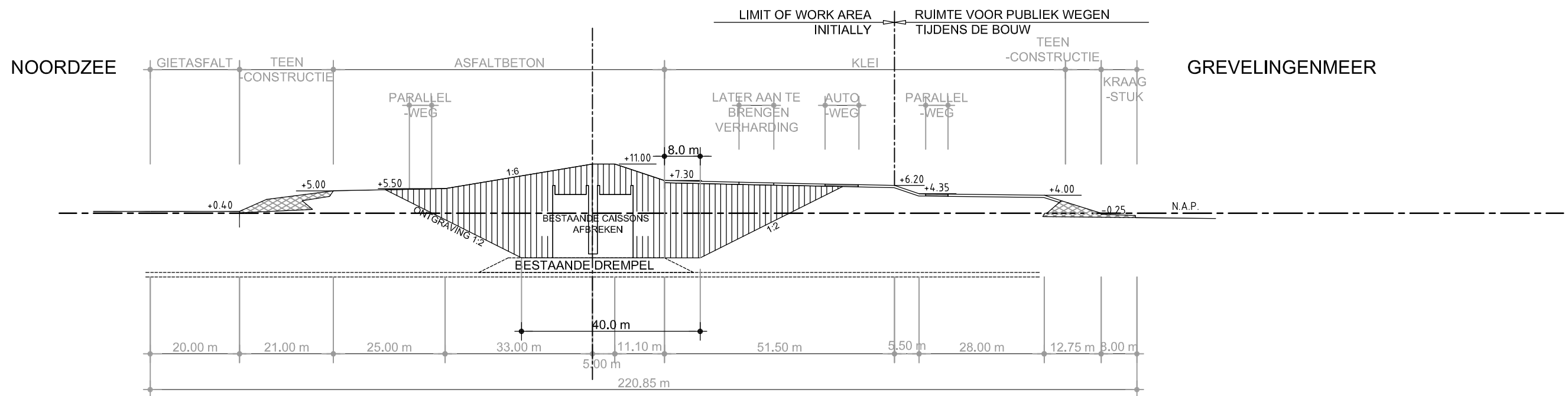
BOUW VOLGORDE:

1. TIJDELIJKE OMLEIDING (GRONDLICHAAM)
2. AANLEG BOUWPUT + GETIJCENTRALE + WEGEN OVER DE CENTRALE
3. VERWIJDEREN RESTANTEN OUDE DAM + OPRUIMING TIJDELIJKE DAM
4. AFBREKEN / OPDRIJVEN OUDE CAISSONS
5. EXTRA BODEM BESCHERMING AAN DE GREVELINGEN ZIJDE

PM: Nog uit te zoeken of Injectiebodem nodig of aantrekkelijk is

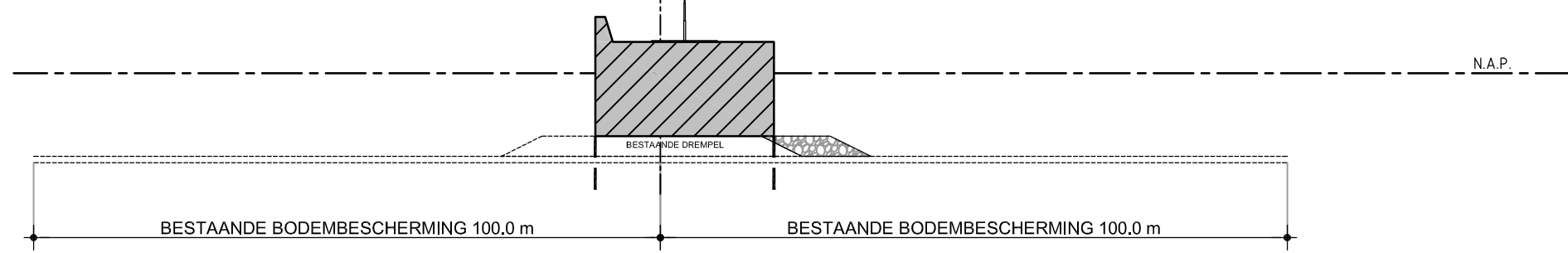


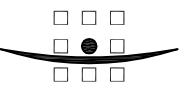
					First edition		PA	LM	LM	11.JUN.2010	
					revision	description		drawn	chkd	appr.	date
client GROEN SERVICE ZUID-HOLLAND				project MIRT VERKENNING GREVELINGEN		description VARIANT 1A; CENTRALE MET BULBTURBINES AAN BINNEN- ZIJDE VAN DE BROUWERSDAM			HASKONING NEDERLAND B.V. A COMPANY OF </		

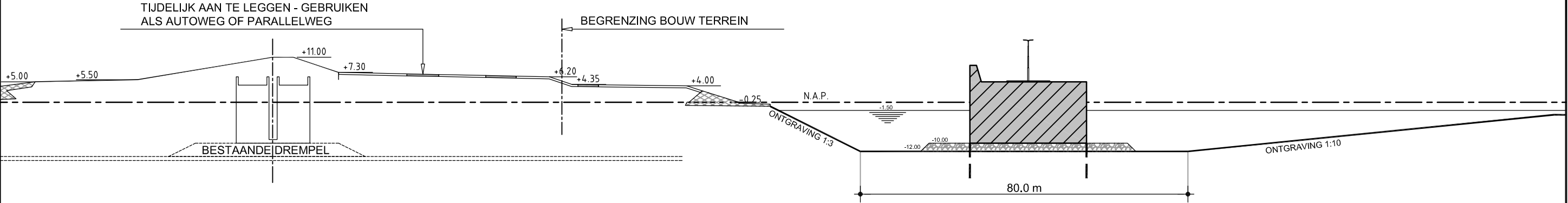
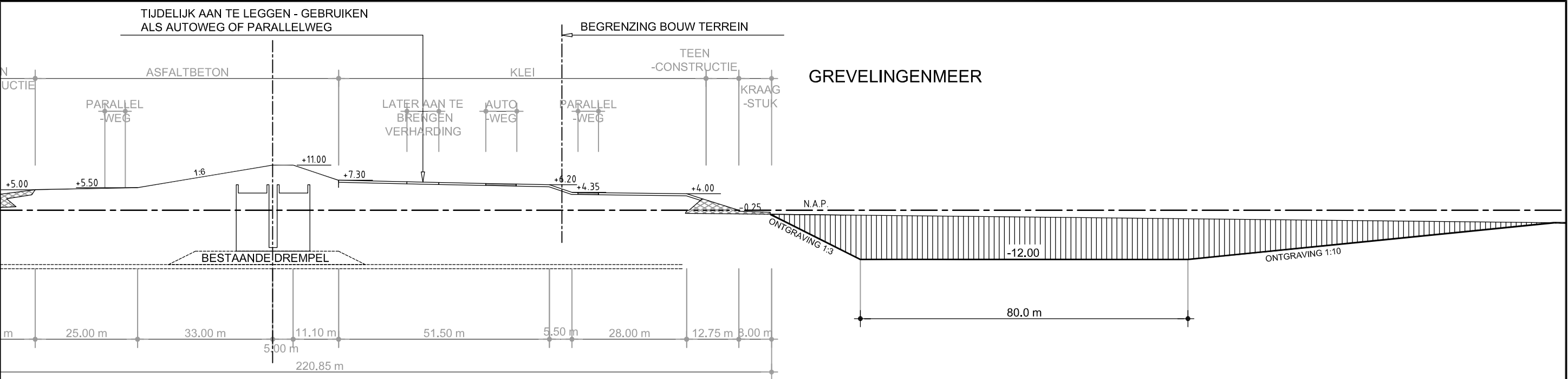


BOUW VOLGORDE:

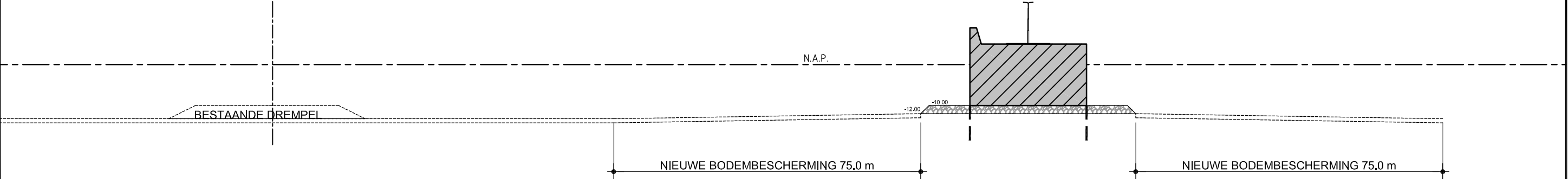
1. TIJDELIJKE OMLEIDING (BINNEN GRENZEN OUDE DAM)
2. AANLEG BOUWPUT + GETIJCENTRALE + WEGEN OVER DE CENTRALE
3. VERWIJDEREN RESTANTEN OUDE DAM



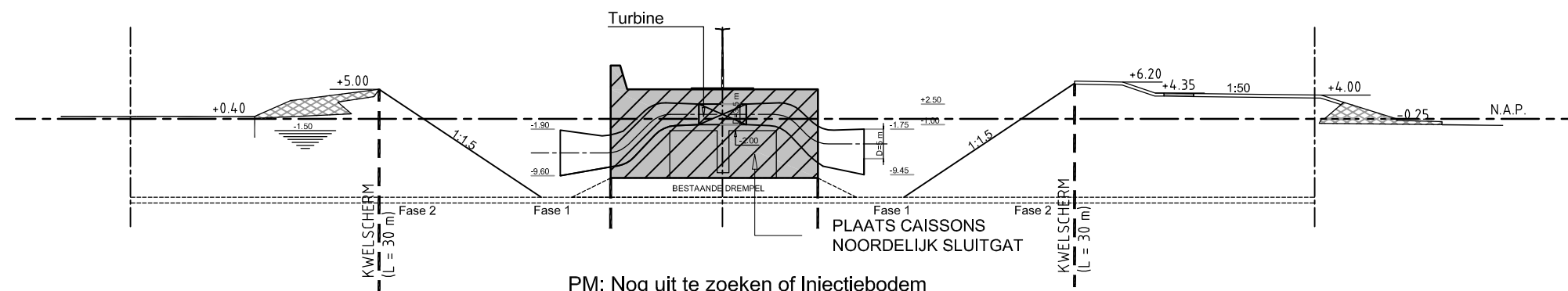
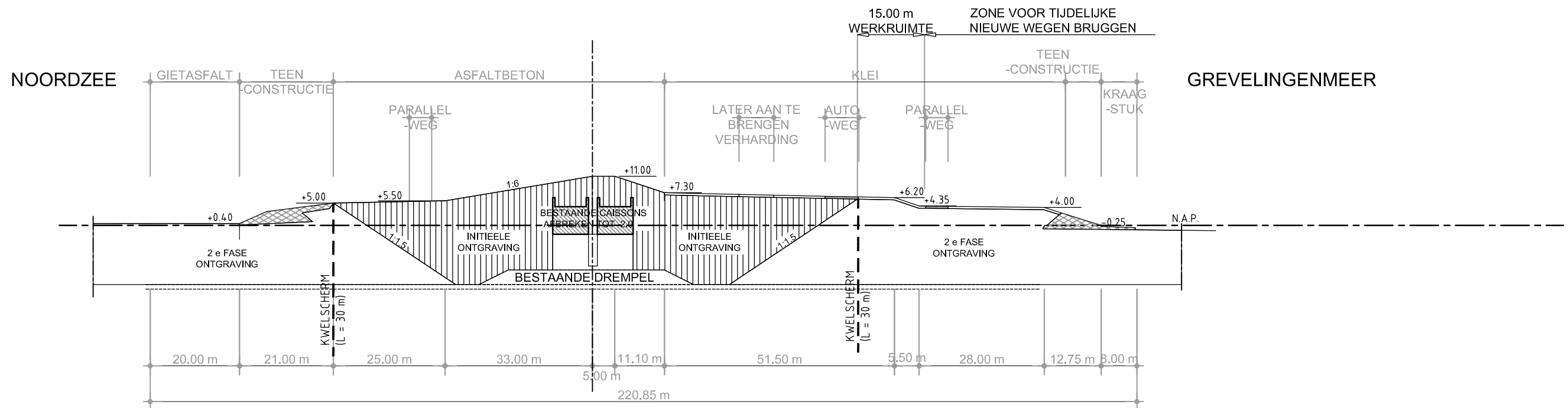
client GROEN SERVICE ZUID-HOLLAND		project MIRT VERKENNING GREVELINGEN		First edition		PA	LM	LM	11.JUN.2010
				revision	description	drawn	chkd	appr.	date
size A3		scale 1:1000		phase CONCEPT		project number 9V9366.A0		drawing number / 332.002	
description VARIANT 2A; CENTRALE MET BULBTURBINES TER PLAATSE VAN OUDE CAISSONS		HASKONING NEDERLAND B.V. A COMPANY OF  ROYAL HASKONING COASTAL & RIVERS		George Hintzenweg 85 P. O. Box 8520 3009 AM Rotterdam +31 (0)10 44 33 666 +31 (0)10 44 33 688 info@rotterdam.royalhaskoning.com www.royalhaskoning.com		Telephone Fax E-mail Internet			



- BOUW VOLGORDE:**
- 1. MAKEN NATTE BOUWPUT
 - 2. BOUWEN GETIJCENTRALE MET PREFAB ELEMENTEN (NAT), INCLUCIEF BRUGGEN - AFBOW TER PLAATSE
 - 3. VERWIJDEREN OUDE DAM EN CAISSONS
 - 4. EXTRA BODEMBESCHERMING a.d. ZEEZIJDE EN GREVELINGEN ZIJDE



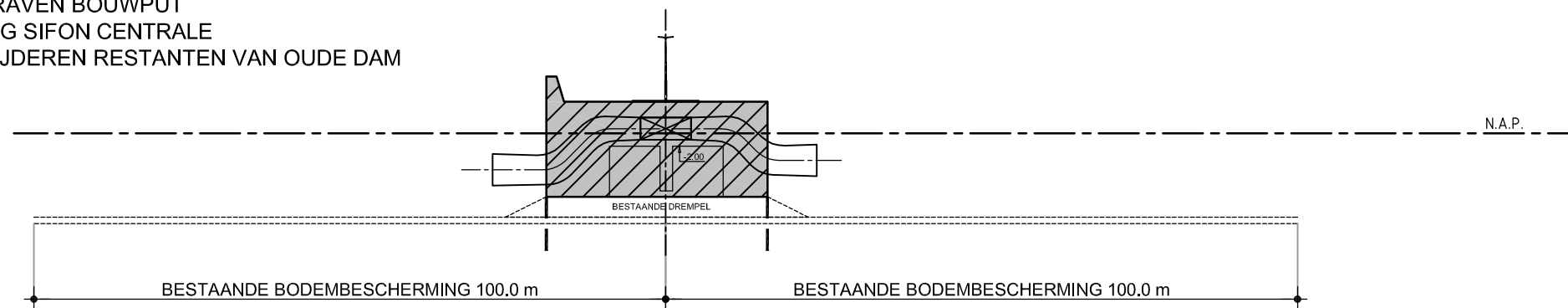
				First edition		PA	LM	LM	11.JUN.2010	
				revision	description		drawn	chkd	appr.	date
client GROEN SERVICE ZUID-HOLLAND			project MIRT VERKENNING GREVELINGEN			description CENTRALE MET BULBTURBINES IN NATTE BOUWPUT		HASKONING NEDERLAND B.V. A COMPANY OF George Hintzenweg 85 P. O. Box 8520 3009 AM Rotterdam +31 (0)10 44 33 666 +31 (0)10 44 33 688 info@rotterdam.royalhaskoning.com www.royalhaskoning.com Telephone Fax E-mail Internet ROYAL HASKONING COASTAL & RIVERS		
size A3			scale 1:1000		phase CONCEPT					
			project number 9V9366.A0		drawing number / 332.004					



PM: Nog uit te zoeken of Injectiebodemp
nodig of aantrekkelijk is

BOUW VOLGORDE:

1. TIJDELIJKE VERKEERSOMLEIDING
2. OUTGRAVEN BOUWPUT
3. AANLEG SIFON CENTRALE
4. VERWIJDEREN RESTANTEN VAN OUDE DAM



First edition		PA	LM	LM	11.JUN.2010
revision	description	drawn	chkd	appr.	date
description		HASKONING NEDERLAND B.V. A COMPANY OF			
VARIANT 4; GEDEELTELIJKE HANDHAVING OUDE CAISSONS MET SIFONCONSTRUCTIE		George Hintzenweg 85 P. O. Box 8520 3009 AM Rotterdam +31 (0)10 44 33 666 +31 (0)10 44 33 688 info@rotterdam.royalhaskoning.com www.royalhaskoning.com			
		Telephone Fax E-mail Internet			
		ROYAL HASKONING COASTAL & RIVERS			

client		project		description	
GROEN SERVICE ZUID-HOLLAND		MIRT VERKENNING GREVELINGEN		VARIANT 4; GEDEELTELIJKE HANDHAVING OUDE CAISSONS MET SIFONCONSTRUCTIE	
size	scale	phase	project number	drawing number	
A3	1:1000	CONCEPT	9V9366.A0	/ 332.003	

Bijlage 2

Kostenramingen van varianten en subvarianten

Omschrijving	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b
(a) Aanleg tijdelijke voorzieningen								
Grondlichaam met tijdelijke bescherming en verharding			4,6	4,7				
Werkzaamheden bij natte bouwput					41,9	42,8		
Werkzaamheden bij bouwdok					4,4	4,5		
Installeren tijdelijke damwand	0,5	0,5	0,5	0,5			0,5	0,5
Ontgraven bouwput	11,7	12,0	10,8	11,1			12,2	12,6
Bemalen bouwput (2 jaar)	8,6	8,8	7,7	7,8			8,6	8,8
PM – injectiebodem	48,7	50,1	48,6	49,7			48,7	50,3
<i>Sub-totaal aanleg tijdelijke voorzieningen (excl. PM injectie bodem)</i>	<i>20,8</i>	<i>21,3</i>	<i>23,6</i>	<i>24,1</i>	<i>46,3</i>	<i>47,3</i>	<i>21,3</i>	<i>21,9</i>
(b) Bouw getijcentrale								
Civiele werken	152,2	156,4	170,6	174,6	167,8	171,2	152,2	154
Turbines en andere apparatuur	235	44,3	234,3	43,9	233,8	43,7	235	33,2
Sifons							0	0
<i>Sub-totaal aanleg getijcentrale</i>	<i>387,2</i>	<i>200,7</i>	<i>404,9</i>	<i>218,5</i>	<i>401,6</i>	<i>214,9</i>	<i>387,2</i>	<i>187,2</i>
(c) Verwijdering tijdelijke voorzieningen en oude dam								
Verwijdering tijdelijke damwand	0,4	0,4	0,4	0,4			0,4	0,4
Verwijderen tijdelijke dam			1,2	1,3				
Verwijderen (restanten van) Brouwersdam	86,2	88,6	86,3	88,2	97,0	98,9	86,2	88,8
Verwijderen caissons in den droge	4,1	4,2					2,1	2,2
Verwijderen caissons in den natte			17,4	17,8	17,3	17,7		
<i>Sub-totaal verwijdering tijdelijke voorzieningen en oude dam</i>	<i>90,7</i>	<i>93,2</i>	<i>105,3</i>	<i>107,7</i>	<i>114,3</i>	<i>116,6</i>	<i>88,7</i>	<i>91,4</i>
(d) Totaal	499	315	534	350	562	379	497	301

Opdrachtgever:	Natuur- en Recreatieschap De Grevelingen	Datum	8-jul-10
Project:	MIRT Grevelingen	Prijspeil	1-jun-10
Onderdeel:	Variant 1a	Status	Definitief
		Project nr.	9V9366.A0
		Niveau raming	Haalbaarheid

post	omschrijving	eenheid	hoeveelheid	prijs	totaal	totaal op basis investeringskosten
------	--------------	---------	-------------	-------	--------	------------------------------------

Variant 1a

AA	Centrale met bulbturbines ter plaatse van oude caissons					
1,00 AA	<i>Aanleg tijdelijke voorzieningen</i>					
1,10 AA	Omleggen weg (B = 6m, L = 900 m)	m3	5.400	€ 40,00	€ 216.000,00	€ 375.958,34
1,20 AA	Verwijderen bestaande top laag (B=105,5; L =812,5)	m2	85.719	€ 25,00	€ 2.142.975,00	€ 3.729.950,58
1,30 AA	Aanbrengen tijdelijke damwanden AZ 26 (L = 1000 m, D = 15)	m2	15.000	€ 20,00	€ 300.000,00	€ 522.164,36
1,40 AA	Ontgraven bouwput (A=1069m2, L = 812,5m)	m3	868.563	€ 5,00	€ 4.342.812,50	€ 7.558.873,07
1,50 AA	Installeren bemalingsinstallatie	post	1	€ 1.500.000,00	€ 1.500.000,00	€ 2.610.821,81
1,60 AA	Bemalen bouwput (A =600 m2, L = 812,5, 2jaar)	m3	487.500	€ 7,00	€ 3.412.500,00	€ 5.939.619,63
1,61 AA	Aanbrengen waterondoorlatende laag dik 1m d.m.v. jetgrouten	m3	40.000	€ 700,00	€ 28.000.000,00	€ 48.735.340,52

totaal Aanleg tijdelijke voorzieningen € 11.914.287,50 € 20.737.387,80

2,00 AA	<i>Bouw getijcentrale</i>					
2,10 AA	Aanbrengen beton t.b.v. turbines	m3	128.540	€ 650,00	€ 83.551.000,00	€ 145.424.515,55
2,20 AA	Aanvullen met zand	m3	116.600	€ 15,00	€ 1.749.000,00	€ 3.044.218,23
2,30 AA	Installeren turbines	eur	1	€ 135.000.000,00	€ 135.000.000,00	€ 234.973.963,20
2,40 AA	Aanleggen weg op getijcentrale (L = 812,5m; B =10,5m)	m2	8.531	€ 50,00	€ 426.550,00	€ 742.430,70
2,50 AA	Aansluiten weg op getijcentrale (B = 10,5 m, L = 100m)	m2	1.050	€ 50,00	€ 52.500,00	€ 91.378,76
2,60 AA	Instandhouden damwanden (2 jaar)	ton	2.328	€ 720,00	€ 1.676.160,00	€ 2.917.436,73

totaal Bouw getijcentrale € 222.455.210,00 € 387.193.943,18

3,00 AA	<i>Verwijdering tijdelijke voorzieningen en oude dam</i>					
3,10 AA	Verwijderen damwanden AZ 26	m2	15.000	€ 15,00	€ 225.000,00	€ 391.623,27
3,20 AA	Verwijderen resterende top laag (B = 17m, L =812,5 m)	m2	13.813	€ 25,00	€ 345.325,00	€ 601.054,70
3,30 AA	Ontgraven dam	m3	9.831.437	€ 5,00	€ 49.157.185,00	€ 85.560.433,92
3,50 AA	Verwijderen caissons 'in den droge' (S = 18x812,5; h = 16,2)	m3	236.925	€ 10,00	€ 2.369.250,00	€ 4.123.793,05

totaal Verwijdering tijdelijke voorzieningen en oude dam € 52.096.760,00 € 90.676.904,94

subtotaal directe kosten € 286.466.257,50

nader te detailleren directe kosten pct 10% € 286.466.257,50 € 28.646.625,75

totaal directe kosten € 315.113.000,00

indirecte kosten					
eenmalige kosten	pct	2%	€ 315.113.000,00	€ 6.302.260,00	
bouwplaatskosten	pct	5%	€ 315.113.000,00	€ 15.755.650,00	
uitvoeringskosten	pct	4%	€ 315.113.000,00	€ 12.604.520,00	
algemene kosten	pct	4%	€ 315.113.000,00	€ 12.604.520,00	
winst & risico	pct	10%	€ 315.113.000,00	€ 31.511.300,00	

subtotaal indirecte kosten € 78.778.250,00

nader te detailleren indirecte kosten pct € 315.113.000,00 € -

totaal indirecte kosten € 78.778.250,00

bijz. gebeurtenissen en object onvoorzien

€ -

€ -

subtotaal bijz. gebeurtenissen en object onvoorzien € -

object onvoorzien pct 10% € 393.891.250,00 € 39.389.125,00

totaal bijz. gebeurtenissen en object onvoorzien € 39.389.125,00

Totaal Bouwkosten Variant 1a € 433.280.000,00

bandbreedte bouwkosten			
ondergrens bouwkosten	pct	-50%	€ 216.640.000,00
bovengrens bouwkosten	pct	50%	€ 649.920.000,00

vastgoed			
vastgoed	eur		€ -

engineering			
engineering, administratie en toezicht	eur	1	€ 15.000.000,00

bijkomende kosten			
bijkomende kosten	eur	1	€ 5.000.000,00

Totaal Basisraming € 453.280.000,00

project onvoorzien			
project onvoorzien	pct	10%	€ 453.280.000,00

Totaal investeringskosten excl. B.T.W. Variant 1a € 498.610.000,00 € 498.610.000,00

bandbreedte investeringskosten			
ondergrens investeringskosten	pct	-50%	€ 249.310.000,00
bovengrens investeringskosten	pct	50%	€ 747.920.000,00

Uitgangspunten

- hoeveelheid grondlichaam incl. 10% verlies door zettingen
- doorlooptijd 2 jaar
- geen rekening gehouden met bestaande kabels en leidingen
- exclusief kosten vastgoed
- bandbreedte niet rekenkundig bepaald

Opdrachtgever:	Natuur- en Recreatieschap De Grevelingen	Datum	8-jul-10
Project:	MIRT Grevelingen	Prijspeil	1-jun-10
Onderdeel:	Variant 1b	Status	Definitief
		Project nr.	9V9366.A0
		Niveau raming	Haalbaarheid

onderbouwing van de raming van kosten per categorie						totaal op basis investeringskosten
post	omschrijving	eenheid	hoeveelheid	prijs	totaal	

Variant 1b

AB	Centrale met vrije stroomturbines ter plaatse van oude caissons					
1,00 AB	<i>Aanleg tijdelijke voorzieningen</i>					
1,10 AB	Omleggen weg (B = 6m, L = 900 m)	m3	5.400	€ 40,00	€ 216.000,00	€ 386.336,86
1,20 AB	Verwijderen bestaande top laag (B=105,5; L = 812,5)	m2	85.719	€ 25,00	€ 2.142.975,00	€ 3.832.917,79
1,30 AB	Aanbrengen tijdelijke damwanden AZ 26 (L = 1000 m, D = 15)	m2	15.000	€ 20,00	€ 300.000,00	€ 536.578,98
1,40 AB	Ontgraven bouwput (A=1069m2, L = 812,5m)	m3	868.563	€ 5,00	€ 4.342.812,50	€ 7.767.539,66
1,50 AB	Installeren bemalingsinstallatie	post	1	€ 1.500.000,00	€ 1.500.000,00	€ 2.682.894,89
1,60 AB	Bemalen bouwput (A = 600 m2, L = 812,5, 2jaar)	m3	487.500	€ 7,00	€ 3.412.500,00	€ 6.103.585,89
1,61 AB	Aanbrengen waterondoorlatende laag dik 1m d.m.v. jetgrouten	m3	40.000	€ 700,00	€ 28.000.000,00	€ 50.080.704,70

totaal Aanleg tijdelijke voorzieningen € 11.914.287,50 € 21.309.854,07

2,00 AB	<i>Bouw getijcentrale</i>					
2,10 AB	Aanbrengen beton t.b.v. turbines	m3	128.540	€ 650,00	€ 83.551.000,00	€ 149.439.034,24
2,20 AB	Aanvullen met zand	m3	116.600	€ 15,00	€ 1.749.000,00	€ 3.128.255,45
2,30 AB	Installeren turbines + schuiven	eur	1	€ 24.750.000,00	€ 24.750.000,00	€ 44.267.765,76
2,40 AB	Aanleggen weg op getijcentrale (L = 812,5m; B = 10,5m)	m2	8.531	€ 50,00	€ 426.550,00	€ 762.925,88
2,50 AB	Aansluiten weg op getijcentrale (B = 10,5 m, L = 100m)	m2	1.050	€ 50,00	€ 52.500,00	€ 93.901,32
2,60 AB	Instandhouden damwanden (2 jaar)	ton	2.328	€ 720,00	€ 1.676.160,00	€ 2.997.974,07

totaal Bouw getijcentrale € 112.205.210,00 € 200.689.856,72

3,00 AB	<i>Verwijdering tijdelijke voorzieningen en oude dam</i>					
3,10 AB	Verwijderen damwanden AZ 26	m2	15.000	€ 15,00	€ 225.000,00	€ 402.434,23
3,20 AB	Verwijderen resterende top laag (B = 17m, L = 812,5 m)	m2	13.813	€ 25,00	€ 345.325,00	€ 617.647,12
3,30 AB	Ontgraven dam	m3	9.831.437	€ 5,00	€ 49.157.185,00	€ 87.922.373,79
3,50 AB	Verwijderen caissons 'in den droge' (S = 18x812,5; h = 16,2)	m3	236.925	€ 10,00	€ 2.369.250,00	€ 4.237.632,49

totaal Verwijdering tijdelijke voorzieningen en oude dam € 52.096.760,00 € 93.180.087,63

subtotaal directe kosten € 176.216.257,50

nader te detailleren directe kosten pct 10% € 176.216.257,50 € 17.621.625,75

totaal directe kosten € 193.838.000,00

<i>indirecte kosten</i>					
eenmalige kosten	pct	2%	€ 193.838.000,00	€ 3.876.760,00	
bouwplaatskosten	pct	5%	€ 193.838.000,00	€ 9.691.900,00	
uitvoeringskosten	pct	4%	€ 193.838.000,00	€ 7.753.520,00	
algemene kosten	pct	4%	€ 193.838.000,00	€ 7.753.520,00	
winst & risico	pct	10%	€ 193.838.000,00	€ 19.383.800,00	

subtotaal indirecte kosten € 48.459.500,00

nader te detailleren indirecte kosten pct € 193.838.000,00 € -

totaal indirecte kosten € 48.459.500,00

<i>bijz. gebeurtenissen en object onvoorzien</i>					
				€ -	
				€ -	
subtotaal bijz. gebeurtenissen en object onvoorzien				€ -	

object onvoorzien pct 10% € 242.297.500,00 € 24.229.750,00

totaal bijz. gebeurtenissen en object onvoorzien € 24.229.750,00

Totaal Bouwkosten Variant 1b € 266.527.000,00

<i>bandbreedte bouwkosten</i>			
ondergrens bouwkosten	pct	-50%	€ 133.260.000,00
bovengrens bouwkosten	pct	50%	€ 399.790.000,00

<i>vastgoed</i>			
vastgoed	eur		€ -

<i>engineering</i>			
engineering, administratie en toezicht	eur	1	€ 15.000.000,00

<i>bijkomende kosten</i>			
bijkomende kosten	eur	1	€ 5.000.000,00

Totaal Basisraming € 286.527.000,00

<i>project onvoorzien</i>			
project onvoorzien	pct	10%	€ 286.527.000,00

Totaal investeringskosten excl. B.T.W. Variant 1b € 315.180.000,00 € 315.180.000,00

<i>bandbreedte investeringskosten</i>			
ondergrens investeringskosten	pct	-50%	€ 157.590.000,00
bovengrens investeringskosten	pct	50%	€ 472.770.000,00

- Uitgangspunten**
- hoeveelheid grondlichaam incl. 10% verlies door zettingen
 - doorlooptijd 2 jaar
 - geen rekening gehouden met bestaande kabels en leidingen
 - exclusief kosten vastgoed
 - bandbreedte niet rekenkundig bepaald

Opdrachtgever:	Natuur- en Recreatieschap De Grevelingen	Datum	8-jul-10
Project:	MIRT Grevelingen	Prijspeil	1-jun-10
Onderdeel:	Variant 2a	Status	Definitief
		Project nr.	9V9366.A0
		Niveau raming	Haalbaarheid

onderbouwing van de raming van kosten per categorie						
post		omschrijving	eenheid	hoeveelheid	prijs	totaal
						totaal op basis investeringskosten

Variant 2a

BA Centrale met bulbturbines aan binnenzijde van de Brouwersdam in droge bouwput						
<i>Aanleg tijdelijke voorzieningen</i>						
1,00 BA		Aanleggen grondlichaam t.b.v. weg (A = 144 m2, L = 900 m)	m3	142.560	€ 15,00	€ 2.138.400,00
1,10 BA		Aanbrengen bekleding grondlichaam (L=900m, B=15m, D=0,5m)	m2	6.750	€ 20,00	€ 135.000,00
1,20 BA		Aanleggen tijdelijke weg (B = 10,5, L = 900m)	m2	9.450	€ 40,00	€ 378.000,00
1,30 BA		Verwijderen bestaande toplaag (B=27,3; L =812,5)	m2	22.181	€ 25,00	€ 554.525,00
1,40 BA		Aanbrengen tijdelijke damwanden AZ 26 (L = 1000 m, D = 15)	m2	15.000	€ 20,00	€ 300.000,00
1,50 BA		Ontgraven bouwput (A=1400m2, L = 812,5m)	m3	1.137.500	€ 5,00	€ 5.687.500,00
1,60 BA		Installeren bemalingsinstallatie	post	1	€ 1.000.000,00	€ 1.000.000,00
1,70 BA		Bemalen bouwput (A =600 m2, L = 812,5, 2jaar)	m3	487.500	€ 7,00	€ 3.412.500,00
1,80 BA		Aanbrengen waterondoorlatende laag dik 1m d.m.v. jetgrouten	m3	40.000	€ 700,00	€ 28.000.000,00
1,81 BA						€ 48.587.458,31
totaal Aanleg tijdelijke voorzieningen					€ 13.605.925,00	€ 23.609.904,06
<i>Bouw getijcentrale</i>						
2,00 BA		Aanleg drempel (B=35m, L=812,5m, D=2,75m)	m2	28.438	€ 250,00	€ 7.109.500,00
2,10 BA		Aanbrengen beton t.b.v. turbines	m3	128.540	€ 650,00	€ 83.551.000,00
2,20 BA		Aanvullen met zand	m3	116.600	€ 15,00	€ 1.749.000,00
2,30 BA		Installeren turbines	eur	1	€ 135.000.000,00	€ 135.000.000,00
2,40 BA		Aanleggen weg op getijcentrale (L = 812,5m; B =10,5m)	m2	8.531	€ 50,00	€ 426.550,00
2,50 BA		Aansluiten kering op getijcentrale (A = 228 m2, L = 100m)	m3	22.800	€ 25,00	€ 570.000,00
2,60 BA		Aansluiten bekleding op getijcentrale (B = 82, L = 100m)	m2	8.200	€ 50,00	€ 410.000,00
2,70 BA		Aanbrengen bodembescherming dik 1,00 m	m2	81.250	€ 35,00	€ 2.843.750,00
2,80 BA		Instandhouden damwanden (2 jaar)	ton	2.328	€ 720,00	€ 1.676.160,00
2,90 BA						€ 2.908.584,08
totaal Bouw getijcentrale					€ 233.335.960,00	€ 404.900.043,88
<i>Verwijdering tijdelijke voorzieningen en oude dam</i>						
3,00 BA		Verwijderen damwanden AZ 26	m2	15.000	€ 15,00	€ 225.000,00
3,10 BA		Verwijderen resterende toplaag (B = 95m, L =812,5 m)	m2	77.188	€ 25,00	€ 1.929.700,00
3,20 BA		Ontgraven dam	m3	9.562.500	€ 5,00	€ 47.812.500,00
3,30 BA		Ontgraven tijdelijke dam	m3	142.560	€ 5,00	€ 712.800,00
3,50 AA		Verwijderen caissons 'in den natte' (S = 18x812,5; h = 16,2)	eur	1	€ 10.000.000,00	€ 10.000.000,00
3,60 BA						€ 17.352.663,68
totaal Verwijdering tijdelijke voorzieningen en oude dam					€ 60.680.000,00	€ 105.295.963,22
subtotaal directe kosten					€ 307.621.885,00	
nader te detailleren directe kosten			pct	10%	€ 307.621.885,00	€ 30.762.188,50
totaal directe kosten					€ 338.384.000,00	
<i>indirecte kosten</i>						
		eenmalige kosten	pct	2%	€ 338.384.000,00	€ 6.767.680,00
		bouwplaatskosten	pct	5%	€ 338.384.000,00	€ 16.919.200,00
		uitvoeringskosten	pct	4%	€ 338.384.000,00	€ 13.535.360,00
		algemene kosten	pct	4%	€ 338.384.000,00	€ 13.535.360,00
		winst & risico	pct	10%	€ 338.384.000,00	€ 33.838.400,00
subtotaal indirecte kosten					€ 84.596.000,00	
nader te detailleren indirecte kosten			pct		€ 338.384.000,00	€ -
totaal indirecte kosten					€ 84.596.000,00	
<i>bijz. gebeurtenissen en object onvoorzien</i>						
					€ -	
subtotaal bijz. gebeurtenissen en object onvoorzien					€ -	
object onvoorzien			pct	10%	€ 422.980.000,00	€ 42.298.000,00
totaal bijz. gebeurtenissen en object onvoorzien					€ 42.298.000,00	
Totaal Bouwkosten Variant 2a					€ 465.278.000,00	
<i>vastgoed</i>						
		vastgoed	eur		€ -	
<i>engineering</i>						
		engineering, administratie en toezicht	eur	1	€ 15.000.000,00	€ 15.000.000,00
<i>bijkomende kosten</i>						
		bijkomende kosten	eur	1	€ 5.000.000,00	€ 5.000.000,00
Totaal Basisraming					€ 485.278.000,00	
<i>project onvoorzien</i>						
		project onvoorzien	pct	10%	€ 485.278.000,00	€ 48.527.800,00
Totaal investeringskosten excl. B.T.W. Variant 2a					€ 533.810.000,00	€ 533.810.000,00
<i>bandbreedte investeringskosten</i>						
		ondergrens investeringskosten	pct	-50%	€ 266.910.000,00	
		bovengrens investeringskosten	pct	50%	€ 800.720.000,00	

Uitgangspunten

- hoeveelheid grondlichaam incl. 10% verlies door zettingen
- doorlooptijd 2 jaar
- geen rekening gehouden met bestaande kabels en leidingen
- exclusief kosten vastgoed
- bandbreedte niet rekenkundig bepaald

Opdrachtgever:	Natuur- en Recreatieschap De Grevelingen	Datum	8-jul-10
Project:	MIRT Grevelingen	Prijspeil	1-jun-10
Onderdeel:	Variant 2b	Status	Definitief
		Project nr.	9V9366.A0
		Niveau raming	Haalbaarheid

onderbouwing van de raming van kosten per categorie						totaal op basis investeringskosten
post	omschrijving	eenheid	hoeveelheid	prijs	totaal	

Variant 2b

BB	Centrale met vrije stroom turbines aan binnenzijde van de Brouwersdam in droge bouwput					
1,00 BB	<i>Aanleg tijdelijke voorzieningen</i>					
1,10 BB	Aanleggen grondlichaam t.b.v. weg (A = 144 m2, L = 900 m)	m3	142.560	€ 15,00	€ 2.138.400,00	€ 3.796.119,14
1,20 BB	Aanbrengen bekleding grondlichaam (L=900m, B=15m, D=0,5m)	m2	6.750	€ 20,00	€ 135.000,00	€ 239.653,99
1,30 BB	Aanleggen tijdelijke weg (B = 10,5, L = 900m)	m2	9.450	€ 40,00	€ 378.000,00	€ 671.031,16
1,40 BB	Verwijderen bestaande topklaag (B=27,3; L=812,5)	m2	22.181	€ 25,00	€ 554.525,00	€ 984.400,94
1,50 BB	Aanbrengen tijdelijke damwanden AZ 26 (L = 1000 m, D = 15)	m2	15.000	€ 20,00	€ 300.000,00	€ 532.564,41
1,60 BB	Ontgraven bouwput (A=1400m2, L = 812,5m)	m3	1.137.500	€ 5,00	€ 5.687.500,00	€ 10.096.533,67
1,70 BB	Installeren bemalingsinstallatie	post	1	€ 1.000.000,00	€ 1.000.000,00	€ 1.775.214,71
1,80 BB	Bemalen bouwput (A =600 m2, L = 812,5, 2jaar)	m3	487.500	€ 7,00	€ 3.412.500,00	€ 6.057.920,20
1,81 BB	Aanbrengen waterondoorlatende laag dijk 1m d.m.v. jetgrouten	m3	40.000	€ 700,00	€ 28.000.000,00	€ 49.706.011,89

totaal Aanleg tijdelijke voorzieningen € 13.605.925,00 € 24.153.438,21

2,00 BB	<i>Bouw getijcentrale</i>					
2,10 BB	Aanleg drempel (B=35m, L=812,5m, D=2,75m)	m2	28.438	€ 250,00	€ 7.109.500,00	€ 12.620.888,98
2,20 BB	Aanbrengen beton t.b.v. turbines	m3	128.540	€ 650,00	€ 83.551.000,00	€ 148.320.964,27
2,30 BB	Aanvullen met zand	m3	116.600	€ 15,00	€ 1.749.000,00	€ 3.104.850,53
2,40 BB	Installeren turbines + schuiven	eur	1	€ 24.750.000,00	€ 24.750.000,00	€ 43.936.564,08
2,50 BB	Aanleggen weg op getijcentrale (L = 812,5m; B =10,5m)	m2	8.531	€ 50,00	€ 426.550,00	€ 757.217,83
2,60 BB	Aansluiten kering op getijcentrale (A = 228 m2, L = 100m)	m3	22.800	€ 25,00	€ 570.000,00	€ 1.011.872,38
2,70 BB	Aansluiten bekleding op getijcentrale (B = 82, L = 100m)	m2	8.200	€ 50,00	€ 410.000,00	€ 727.838,03
2,80 BB	Aanbrengen bodembescherming dijk 1,00 m	m2	81.250	€ 35,00	€ 2.843.750,00	€ 5.048.266,83
2,90 BB	Instandhouden damwanden (2 jaar)	ton	2.328	€ 720,00	€ 1.676.160,00	€ 2.975.543,89

totaal Bouw getijcentrale € 123.085.960,00 € 218.504.006,83

3,00 BB	<i>Verwijdering tijdelijke voorzieningen en oude dam</i>					
3,10 BB	Verwijderen damwanden AZ 26	m2	15.000	€ 15,00	€ 225.000,00	€ 399.423,31
3,20 BB	Verwijderen resterende topklaag (B = 95m, L=812,5 m)	m2	77.188	€ 25,00	€ 1.929.700,00	€ 3.425.631,83
3,30 BB	Ontgraven dam	m3	9.562.500	€ 5,00	€ 47.812.500,00	€ 84.877.453,34
3,50 BB	Ontgraven tijdelijke dam	m3	142.560	€ 5,00	€ 712.800,00	€ 1.265.373,05
3,60 BB	Verwijderen caissons 'in den natte' (S = 18x812,5; h = 16,2)	eur	1	€ 10.000.000,00	€ 10.000.000,00	€ 17.752.147,10

totaal Verwijdering tijdelijke voorzieningen en oude dam € 60.680.000,00 € 107.720.028,63

subtotaal directe kosten € 197.371.885,00

nader te detaileren directe kosten pct 10% € 197.371.885,00 € 19.737.188,50

totaal directe kosten € 217.109.000,00

indirecte kosten

eenmalige kosten	pct	2%	€ 217.109.000,00	€ 4.342.180,00
bouwplaatskosten	pct	5%	€ 217.109.000,00	€ 10.855.450,00
uitvoeringskosten	pct	4%	€ 217.109.000,00	€ 8.684.360,00
algemene kosten	pct	4%	€ 217.109.000,00	€ 8.684.360,00
winst & risico	pct	10%	€ 217.109.000,00	€ 21.710.900,00

subtotaal Indirecte kosten € 54.277.250,00

nader te detaileren indirecte kosten pct € 217.109.000,00 € -

totaal Indirecte kosten € 54.277.250,00

bijz. gebeurtenissen en object onvoorzien

	€	-
	€	-
subtotaal bijz. gebeurtenissen en object onvoorzien	€	-

object onvoorzien pct 10% € 271.386.250,00 € 27.138.625,00

totaal bijz. gebeurtenissen en object onvoorzien € 27.138.625,00

Totaal Bouwkosten Variant 2b € 298.525.000,00

bandbreedte bouwkosten

ondergrens bouwkosten	pct	-50%	€ 149.260.000,00
bovengrens bouwkosten	pct	50%	€ 447.790.000,00

vastgoed

vastgoed eur € -

engineering

engineering, administratie en toezicht eur 1 € 15.000.000,00 € 15.000.000,00

bijkomende kosten

bijkomende kosten eur 1 € 5.000.000,00 € 5.000.000,00

Totaal Basisraming € 318.525.000,00

project onvoorzien

project onvoorzien pct 10% € 318.525.000,00 € 31.852.500,00

Totaal investeringskosten excl. B.T.W. Variant 2b € 350.380.000,00 € 350.380.000,00

bandbreedte investeringskosten

ondergrens investeringskosten	pct	-50%	€ 175.190.000,00
bovengrens investeringskosten	pct	50%	€ 525.570.000,00

Uitgangspunten

- hoeveelheid grondlichaam incl. 10% verlies door zettingen
- doorlooptijd 2 jaar
- geen rekening gehouden met bestaande kabels en leidingen
- exclusief kosten vastgoed
- bandbreedte niet rekenkundig bepaald

Opdrachtgever:	Natuur- en Recreatieschap De Grevelingen	Datum	8-jul-10
Project:	MIRT Grevelingen	Prijspeil	1-jun-10
Onderdeel:	Variant 3a	Status	Definitief
		Project nr.	9V9366.A0
		Niveau raming	Haalbaarheid

onderbouwing van de raming van kosten per categorie						totaal op basis investeringskosten
post	omschrijving	een heid	hoeveelheid	prijs	totaal	

Variant 3a

CA	Centrale met bulbturbines aan binnenzijde Brouwersdam in natte bouwput					
1,00 CA	<i>Aanleg tijdelijke voorzieningen (bouwdok + invaren)</i>					
1,10 CA	Dijklichaam t.b.v. afsluiting bouwdok (2x A=396m2, L=100m)	m3	79.200	€	15,00	€ 1.188.000,00
1,20 CA	Droogpompen bouwdok (2x 700x100x7)	m3	980.000	€	1,00	€ 980.000,00
1,30 CA	Verwijderen dijklichaam (2x A=396m2, L=100m)	m3	79.200	€	5,00	€ 396.000,00
1,40 CA	Ontgraven t.p.v. uiteindelijke locatie getijcentrale (A=1400,L=812,5)	m3	1.137.500	€	5,00	€ 5.687.500,00
1,50 CA	Aanleg drempel (S = 40,000m2, D=2,75m)	m2	40.000	€	250,00	€ 10.000.000,00
1,60 CA	Invaren + plaatsen turbine-elementen (BxLxh=27,6x812,5x19)	m3	426.075	€	20,00	€ 8.521.500,00

totaal Aanleg tijdelijke voorzieningen (bouwdok + invaren) € 26.773.000,00 € 46.357.699,70

2,00 CA	<i>Bouw getijcentrale</i>					
2,10 CA	Aanbrengen beton t.b.v. turbines	m3	128.540	€	650,00	€ 83.551.000,00
2,20 CA	Aanvullen met zand	m3	116.600	€	15,00	€ 1.749.000,00
2,30 CA	Installeren turbines	eur	1	€	135.000.000,00	€ 135.000.000,00
2,40 CA	Aansluiten kering op getijcentrale (A=2000m2, L=200m)	m3	400.000	€	15,00	€ 6.000.000,00
2,50 CA	Aanleggen weg op getijcentrale (L = 812,5m; B =10,5m)	m2	8.531	€	50,00	€ 426.562,50
2,60 CA	Aansluiten weg op getijcentrale (B = 10,5 m, L = 200m)	m2	2.100	€	50,00	€ 105.000,00
2,70 CA	Aansluiten bekleding op getijcentrale (B = 82, L=200 m)	m2	16.400	€	50,00	€ 820.000,00
2,80 CA	Aanbrengen bodembescherming dik 1,00 m	m2	121.875	€	35,00	€ 4.265.625,00

totaal Bouw getijcentrale € 231.917.187,50 € 401.566.777,45

3,00 CA	<i>Verwijdering tijdelijke voorzieningen en oude dam</i>					
3,10 CA	Verwijderen bestaande toplaag (B=122,5, L=812,5)	m2	99.531	€	25,00	€ 2.488.275,00
3,20 CA	Ontgraven dam	m3	10.700.000	€	5,00	€ 53.500.000,00
3,30 CA	Verwijderen caissons 'in den natte'	eur	1	€	10.000.000,00	€ 10.000.000,00

totaal Verwijdering tijdelijke voorzieningen en oude dam € 65.988.275,00 € 114.259.314,83

subtotaal directe kosten € 324.678.462,50

nader te detaileren directe kosten pct 10% € 324.678.462,50 € 32.467.846,25

totaal directe kosten € 357.146.000,00

indirecte kosten					
eenmalige kosten	pct	2%	€ 357.146.000,00	€	7.142.920,00
bouwplaatskosten	pct	5%	€ 357.146.000,00	€	17.857.300,00
uitvoeringskosten	pct	4%	€ 357.146.000,00	€	14.285.840,00
algemene kosten	pct	4%	€ 357.146.000,00	€	14.285.840,00
winst & risico	pct	10%	€ 357.146.000,00	€	35.714.600,00

subtotaal indirecte kosten € 89.286.500,00

nader te detaileren indirecte kosten pct € 357.146.000,00 € -

totaal indirecte kosten € 89.286.500,00

bijz. gebeurtenissen en object onvoorzien € -

subtotaal bijz. gebeurtenissen en object onvoorzien € -

object onvoorzien pct 10% € 446.432.500,00 € 44.643.250,00

totaal bijz. gebeurtenissen en object onvoorzien € 44.643.250,00

Totaal Bouwkosten Variant 3a € 491.076.000,00

bandbreedte bouwkosten			
ondergrens bouwkosten	pct	-50%	€ 245.540.000,00
bovengrens bouwkosten	pct	50%	€ 736.610.000,00

vastgoed			
vastgoed	eur		€ -

engineering			
engineering, administratie en toezicht	eur	1	€ 15.000.000,00

bijkomende kosten			
bijkomende kosten	eur	1	€ 5.000.000,00

Totaal Basisraming € 511.076.000,00

project onvoorzien			
project onvoorzien	pct	10%	€ 511.076.000,00

Totaal investeringskosten excl. B.T.W. Variant 3a € 562.180.000,00 € 562.180.000,00

bandbreedte investeringskosten			
ondergrens investeringskosten	pct	-50%	€ 281.090.000,00
bovengrens investeringskosten	pct	50%	€ 843.270.000,00

- Uitgangspunten**
- hoeveelheid grondlichaam incl. 10% verlies door zettingen
 - doorlooptijd 2 jaar
 - geen rekening gehouden met bestaande kabels en leidingen
 - exclusief kosten vastgoed
 - bandbreedte niet rekenkundig bepaald

Opdrachtgever:	Natuur- en Recreatieschap De Grevelingen	Datum	8-jul-10
Project:	MIRT Grevelingen	Prijspeil	1-jun-10
Onderdeel:	Variant 3b	Status	Definitief
		Project nr.	9V9366.A0
		Niveau raming	Haalbaarheid

onderbouwing van de raming van kosten per categorie						totaal op basis investeringskosten
post	omschrijving	een heid	hoeveelheid	prijs	totaal	

Variant 3b

CB	Centrale met vrije stroomturbines aan binnenzijde Brouwersdam in natte bouwput					
1,00 CB	<i>Aanleg tijdelijke voorzieningen (bouwdok + invaren)</i>					
1,10 CB	Dijklichaam t.b.v. afsluiting bouwdok (2x A=396m2, L=100m)	m3	79.200	€	15,00	€ 1.188.000,00
1,20 CB	Droogpompen bouwdok (2x 700x100x7)	m3	980.000	€	1,00	€ 980.000,00
1,30 CB	Verwijderen dijklichaam (2x A=396m2, L=100m)	m3	79.200	€	5,00	€ 396.000,00
1,40 CB	Ontgraven t.p.v. uiteindelijke locatie getijcentrale (A=1400,L=812,5)	m3	1.137.500	€	5,00	€ 5.687.500,00
1,50 CB	Aanleg drempel (S = 40,000m2, D=2,75m)	m2	40.000	€	250,00	€ 10.000.000,00
1,60 CB	Invaren + plaatsen turbine-elementen (BxLxh=27,6x812,5x19)	m3	426.075	€	20,00	€ 8.521.500,00

totaal Aanleg tijdelijke voorzieningen (bouwdok + invaren) € 26.773.000,00

2,00 CB	<i>Bouw getijcentrale</i>					
2,10 CB	Aanbrengen beton t.b.v. turbines	m3	128.540	€	650,00	€ 83.551.000,00
2,20 CB	Aanvullen met zand	m3	116.600	€	15,00	€ 1.749.000,00
2,30 CB	Installeren turbines	eur	1	€	24.750.000,00	€ 24.750.000,00
2,40 CB	Aansluiten kering op getijcentrale (A=2000m2, L=200m)	m3	400.000	€	15,00	€ 6.000.000,00
2,50 CB	Aanleggen weg op getijcentrale (L = 812,5m; B =10,5m)	m2	8.531	€	50,00	€ 426.562,50
2,60 CB	Aansluiten weg op getijcentrale (B = 10,5 m, L = 200m)	m2	2.100	€	50,00	€ 105.000,00
2,70 CB	Aansluiten bekleding op getijcentrale (B = 82, L=200 m)	m2	16.400	€	50,00	€ 820.000,00
2,80 CB	Aanbrengen bodembescherming dik 1,00 m	m2	121.875	€	35,00	€ 4.265.625,00

totaal Bouw getijcentrale € 121.667.187,50

3,00 CB	<i>Verwijdering tijdelijke voorzieningen en oude dam</i>					
3,10 CB	Verwijderen bestaande top laag (B=122,5, L=812,5)	m2	99.531	€	25,00	€ 2.488.275,00
3,20 CB	Ontgraven dam	m3	10.700.000	€	5,00	€ 53.500.000,00
3,30 CB	Verwijderen caissons 'in den natte'	eur	1	€	10.000.000,00	€ 10.000.000,00

totaal Verwijdering tijdelijke voorzieningen en oude dam € 65.988.275,00

subtotaal directe kosten € 214.428.462,50

nader te detaileren directe kosten pct 10% € 214.428.462,50 € 21.442.846,25

totaal directe kosten € 235.871.000,00

indirecte kosten

eenmalige kosten	pct	2%	€ 235.871.000,00	€	4.717.420,00
bouwplaatskosten	pct	5%	€ 235.871.000,00	€	11.793.550,00
uitvoeringskosten	pct	4%	€ 235.871.000,00	€	9.434.840,00
algemene kosten	pct	4%	€ 235.871.000,00	€	9.434.840,00
winst & risico	pct	10%	€ 235.871.000,00	€	23.587.100,00

subtotaal Indirecte kosten € 58.967.750,00

nader te detaileren indirecte kosten pct € 235.871.000,00 € -

totaal indirecte kosten € 58.967.750,00

bijz. gebeurtenissen en object onvoorzien

€ -

€ -

subtotaal bijz. gebeurtenissen en object onvoorzien € -

object onvoorzien pct 10% € 294.838.750,00 € 29.483.875,00

totaal bijz. gebeurtenissen en object onvoorzien € 29.483.875,00

Totaal Bouwkosten Variant 3b € 324.323.000,00

bandbreedte bouwkosten

ondergrens bouwkosten pct -50% € 162.160.000,00

bovengrens bouwkosten pct 50% € 486.480.000,00

vastgoed

vastgoed eur € -

engineering

engineering, administratie en toezicht eur 1 € 15.000.000,00 € 15.000.000,00

bijkomende kosten

bijkomende kosten eur 1 € 5.000.000,00 € 5.000.000,00

Totaal Basisraming € 344.323.000,00

project onvoorzien

project onvoorzien pct 10% € 344.323.000,00 € 34.432.300,00

Totaal investeringskosten excl. B.T.W. Variant 3b € 378.760.000,00

bandbreedte investeringskosten

ondergrens investeringskosten pct -50% € 189.380.000,00

bovengrens investeringskosten pct 50% € 568.140.000,00

Uitgangspunten

- hoeveelheid grondlichaam incl. 10% verlies door zettingen
- doorlooptijd 2 jaar
- geen rekening gehouden met bestaande kabels en leidingen
- exclusief kosten vastgoed
- bandbreedte niet rekenkundig bepaald

Opdrachtgever: Natuur- en Recreatieschap De Grevelingen				Datum 8-jul-10		
Project: MIRT Grevelingen				Prijspeil 1-jun-10		
Onderdeel: Variant 4a				Status Definitief		
				Project nr. 9V9366.A0		
				Niveau raming Haalbaarheid		
onderbouwing van de raming van kosten per categorie						
post		omschrijving	eenheid	hoeveelheid	prijs	totaal
						totaal op basis investeringskosten

Variant 4a					
DA	Sifon met waterkrachtturbines				
1,00 DA	Aanleg tijdelijke voorzieningen				
1,10 DA	Omleggen weg (B = 6m, L = 900 m)	m3	5.400	€ 40,00	€ 216.000,00
1,20 DA	Verwijderen bestaande toplaag (B=105,5; L =812,5)	m2	85.719	€ 25,00	€ 2.142.975,00
1,30 DA	Aanbrengen tijdelijke damwanden AZ 26 (L = 1000 m, D = 15)	m2	15.000	€ 20,00	€ 300.000,00
1,40 DA	Ontgraven bouwput (A=1150m2; L = 812,5m)	m3	934.375	€ 5,00	€ 4.671.875,00
1,50 DA	Installeren bemalingsinstallatie	post	1	€ 1.500.000,00	€ 1.500.000,00
1,60 DA	Bemalen bouwput (A =600 m2, L = 812,5, 2jaar)	m3	487.500	€ 7,00	€ 3.412.500,00
1,61 DA	Aanbrengen waterondoorlatende laag dik 1m d.m.v. jetgrouten	m3	40.000	€ 700,00	€ 28.000.000,00
totaal Aanleg tijdelijke voorzieningen					€ 12.243.350,00
					€ 21.312.905,15
2,00 DA	Bouw getijcentrale				
2,10 DA	Aanbrengen beton t.b.v. zand	m3	128.540	€ 650,00	€ 83.551.000,00
2,20 DA	Aanvullen met zand	m3	116.600	€ 15,00	€ 1.749.000,00
2,30 DA	Installeren turbines	eur	1	€ 135.000.000,00	€ 135.000.000,00
2,40 DA	Aanleggen weg op getijcentrale (L = 812,5m; B =10,5m)	m2	8.531	€ 50,00	€ 426.550,00
2,50 DA	Aansluiten weg op getijcentrale (B = 10,5 m, L = 100m)	m2	1.050	€ 50,00	€ 52.500,00
2,60 DA	Instandhouden damwanden (2 jaar)	ton	2.328	€ 720,00	€ 1.676.160,00
2,70 DA	Kosten sifons	eur	106		€ -
totaal Bouw getijcentrale					€ 222.455.210,00
					€ 387.244.242,11
3,00 DA	Verwijdering tijdelijke voorzieningen en oude dam				
3,10 DA	Verwijderen damwanden AZ 26	m2	15.000	€ 15,00	€ 225.000,00
3,20 DA	Verwijderen resterende toplaag (B = 17m, L =812,5 m)	m2	13.813	€ 25,00	€ 345.325,00
3,30 DA	Ontgraven dam	m3	9.831.437	€ 5,00	€ 49.157.185,00
3,40 DA	Verwijderen caissons 'in den droge' (S = 18x812,5; h = 8,2)	m3	119.925	€ 10,00	€ 1.199.250,00
totaal Verwijdering tijdelijke voorzieningen en oude dam					€ 50.926.760,00
					€ 88.651.978,88
subtotaal directe kosten					€ 285.625.320,00
nader te detailleren directe kosten					pct 10% € 285.625.320,00 € 28.562.532,00
totaal directe kosten					€ 314.188.000,00
indirecte kosten					
	eenmalige kosten	pct	2%	€ 314.188.000,00	€ 6.283.760,00
	bouwplaatskosten	pct	5%	€ 314.188.000,00	€ 15.709.400,00
	uitvoeringskosten	pct	4%	€ 314.188.000,00	€ 12.567.520,00
	algemene kosten	pct	4%	€ 314.188.000,00	€ 12.567.520,00
	winst & risico	pct	10%	€ 314.188.000,00	€ 31.418.800,00
subtotaal indirecte kosten					€ 78.547.000,00
nader te detailleren indirecte kosten					pct € 314.188.000,00 € -
totaal indirecte kosten					€ 78.547.000,00
bijz. gebeurtenissen en object onvoorzien					
					€ -
subtotaal bijz. gebeurtenissen en object onvoorzien					€ -
object onvoorzien					pct 10% € 392.735.000,00 € 39.273.500,00
totaal bijz. gebeurtenissen en object onvoorzien					€ 39.273.500,00
Totaal Bouwkosten Variant 4a					
bandbreedte bouwkosten					
	ondergrens bouwkosten	pct	-50%	€ 216.000.000,00	
	bovengrens bouwkosten	pct	50%	€ 648.010.000,00	
vastgoed					
	vastgoed	eur		€ -	
engineering					
	engineering, administratie en toezicht	eur	1	€ 15.000.000,00	€ 15.000.000,00
bijkomende kosten					
	bijkomende kosten	eur	1	€ 5.000.000,00	€ 5.000.000,00
Totaal Basisraming					€ 452.009.000,00
project onvoorzien					
	project onvoorzien	pct	10%	€ 452.009.000,00	€ 45.200.900,00
Totaal investeringskosten excl. B.T.W. Variant 4a					
					€ 497.210.000,00
bandbreedte investeringskosten					
	ondergrens investeringskosten	pct	-50%	€ 248.610.000,00	
	bovengrens investeringskosten	pct	50%	€ 745.820.000,00	

- Uitgangspunten
- hoeveelheid grondlichaam incl. 10% verlies door zettingen
 - doorlooptijd 2 jaar
 - geen rekening gehouden met bestaande kabels en leidingen
 - exclusief kosten vastgoed
 - bandbreedte niet rekenkundig bepaald

Opdrachtgever:	Natuur- en Recreatieschap De Grevelingen	Datum	8-jul-10
Project:	MIRT Grevelingen	Prijspeil	1-jun-10
Onderdeel:	Variant 4b	Status	Definitief
		Project nr.	9V9366.A0
		Niveau raming	Haalbaarheid

onderbouwing van de raming van kosten per categorie						totaal op basis investeringskosten
post	omschrijving	eenheid	hoeveelheid	prijs	totaal	

Variant 4b

DA	Sifon met lucht aangedreven machines					
1,00 DA	Aanleg tijdelijke voorzieningen					
1,10 DA	Omleggen weg (B = 6m, L = 900 m)	m3	5.400	€ 40,00	€ 216.000,00	€ 387.748,76
1,20 DA	Verwijderen bestaande topklaag (B=105,5; L = 812,5)	m2	85.719	€ 25,00	€ 2.142.975,00	€ 3.846.925,49
1,30 DA	Aanbrengen tijdelijke damwanden AZ 26 (L = 1000 m, D = 15)	m2	15.000	€ 20,00	€ 300.000,00	€ 538.539,95
1,40 DA	Ontgraven bouwput (A=1150m2, L = 812,5m)	m3	934.375	€ 5,00	€ 4.671.875,00	€ 8.386.637,74
1,50 DA	Installeren bemalingsinstallatie	post	1	€ 1.500.000,00	€ 1.500.000,00	€ 2.692.699,74
1,60 DA	Bemalen bouwput (A = 600 m2, L = 812,5, 2jaar)	m3	487.500	€ 7,00	€ 3.412.500,00	€ 6.125.891,91
1,61 DA	Aanbrengen waterondoorlatende laag dik 1m d.m.v. jetgrouten	m3	40.000	€ 700,00	€ 28.000.000,00	€ 50.263.728,52

totaal Aanleg tijdelijke voorzieningen € 12.243.350,00 € 21.978.443,59

2,00 DA	Bouw getijcentrale					
2,10 DA	Aanbrengen beton t.b.v. zand	m3	128.540	€ 650,00	€ 83.551.000,00	€ 149.985.170,76
2,20 DA	Aanvullen met zand	m3	116.600	€ 15,00	€ 1.749.000,00	€ 3.139.687,90
2,30 DA	Installeren turbines	eur	1	€ 18.500.000,00	€ 18.500.000,00	€ 33.209.963,48
2,40 DA	Aanleggen weg op getijcentrale (L = 812,5m; B = 10,5m)	m2	8.531	€ 50,00	€ 426.550,00	€ 765.714,05
2,50 DA	Aansluiten weg op getijcentrale (B = 10,5 m, L = 100m)	m2	1.050	€ 50,00	€ 52.500,00	€ 94.244,49
2,60 DA	Kosten sifons	eur			€ -	€ -

totaal Bouw getijcentrale € 104.279.050,00 € 187.194.780,69

3,00 DA	Verwijdering tijdelijke voorzieningen en oude dam					
3,10 DA	Verwijderen damwanden AZ 26	m2	15.000	€ 15,00	€ 225.000,00	€ 403.904,96
3,20 DA	Verwijderen resterende topklaag (B = 17m, L = 812,5 m)	m2	13.813	€ 25,00	€ 345.325,00	€ 619.904,36
3,30 DA	Ontgraven dam	m3	9.831.437	€ 5,00	€ 49.157.185,00	€ 88.243.692,91
3,50 DA	Verwijderen caissons 'in den droge' (S = 18x812,5; h = 8,2)	m3	119.925	€ 10,00	€ 1.199.250,00	€ 2.152.813,44

totaal Verwijdering tijdelijke voorzieningen en oude dam € 50.926.760,00 € 91.420.315,67

subtotaal directe kosten € 167.449.160,00

nader te detaileren directe kosten pct 10% € 167.449.160,00 € 16.744.916,00

totaal directe kosten € 184.194.000,00

indirecte kosten						
eenmalige kosten	pct	2%	€ 184.194.000,00	€ 3.683.880,00		
bouwplaatskosten	pct	5%	€ 184.194.000,00	€ 9.209.700,00		
uitvoeringskosten	pct	4%	€ 184.194.000,00	€ 7.367.760,00		
algemene kosten	pct	4%	€ 184.194.000,00	€ 7.367.760,00		
winst & risico	pct	10%	€ 184.194.000,00	€ 18.419.400,00		

subtotaal indirecte kosten € 46.048.500,00

nader te detaileren indirecte kosten pct € 184.194.000,00 € -

totaal indirecte kosten € 46.048.500,00

bijz. gebeurtenissen en object onvoorzien						
					€ -	
					€ -	
subtotaal bijz. gebeurtenissen en object onvoorzien					€ -	

object onvoorzien pct 10% € 230.242.500,00 € 23.024.250,00

totaal bijz. gebeurtenissen en object onvoorzien € 23.024.250,00

Totaal Bouwkosten Variant 4b € 253.267.000,00

bandbreedte bouwkosten						
ondergrens bouwkosten	pct	-50%	€ 126.630.000,00			
bovengrens bouwkosten	pct	50%	€ 379.900.000,00			

vastgoed						
vastgoed	eur			€ -		

engineering						
engineering, administratie en toezicht	eur	1	€ 15.000.000,00	€ 15.000.000,00		

bijkomende kosten						
bijkomende kosten	eur	1	€ 5.000.000,00	€ 5.000.000,00		

Totaal Basisraming € 273.267.000,00

project onvoorzien						
project onvoorzien	pct	10%	€ 273.267.000,00	€ 27.326.700,00		

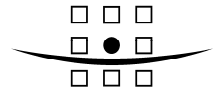
Totaal investeringskosten excl. B.T.W. Variant 4b € 300.590.000,00 € 300.590.000,00

bandbreedte investeringskosten						
ondergrens investeringskosten	pct	-50%	€ 150.300.000,00			
bovengrens investeringskosten	pct	50%	€ 450.890.000,00			

- Uitgangspunten**
- hoeveelheid grondlichaam incl. 10% verlies door zettingen
 - doorlooptijd 2 jaar
 - geen rekening gehouden met bestaande kabels en leidingen
 - exclusief kosten vastgoed
 - bandbreedte niet rekenkundig bepaald

Bijlage 3

Toelichting op hydraulisch model



Memo

Aan : Bert te Slaa
 Van : Leslie Mooyaart
 Datum : 22 juni 2010
 Kopie : Tom Van Den Noortgaete
 Onze referentie : 9V9366.A0/M/903703/Rott

Betreft : Hydraulisch model

Beschrijving hydraulisch model (variant 1, 2 en 3)

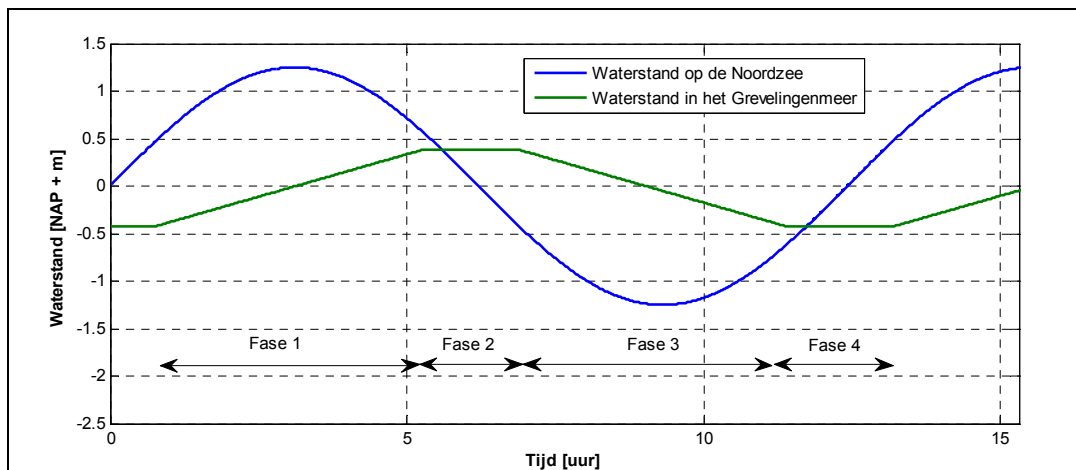
Deze techniek betreft de winning van energie uit verval, d.w.z. uit de potentiële energie van het water. Het verval over de getijcentrale bepaalt de hoeveelheid water die door de getijcentrale stroomt en de richting van de stroming. Het verval over de getijcentrale wordt beschreven met de formule 1.

$$H = z - h \quad (1)$$

Waarin:

H verval [m]
 z waterstand in Grevelingenmeer [NAP + m]
 h waterstand op Noordzee [NAP + m]

Waterstandgegevens van het peilstation Brouwershavensche Gat 08 van 2009 zijn gebruikt voor de waterstand op de Noordzee. De waterstand op het Grevelingenmeer wordt bepaald door de eigenschappen van de getijcentrale (aantal turbines en diameter).



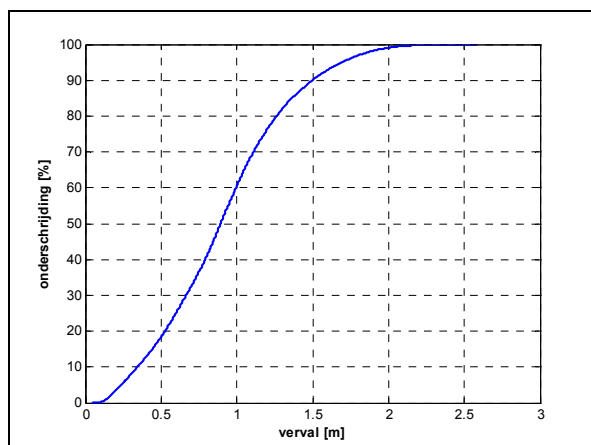
Figuur 1 Waterstandsverloop in Grevelingenmeer en Noordzee met getijcentrale

Tabel 0.1 Acties bij operatie getijcentrale

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

Voor de overgangswaarden voor het verval (H_{start} en H_{stop}) is respectievelijk een waarde van 0,9 meter en van 0,2 meter aangehouden. De waarde van 0,9 meter is gekozen op basis van ervaringen bij riviercentrales in Nederland. De waarde van 0,2 meter is gebaseerd op ervaringen bij La Rance¹.

Het debiet door de getijcentrale tijdens het vasthouden van de waterstand (fase 2) en het wachten (fase 4) is nul. Tijdens het turbineren (fase 1 en 3) wordt het debiet gekenmerkt door het ontwerpverval van de generator (H_{rated}) en het ontwerpdebiet (Q_d). Het ontwerpverval wordt gekozen op het verval dat in 10% van de gevallen overschreden wordt. Dit dient iteratief bepaald te worden. In de onderstaande figuur is het verval tijdens operatie uitgezet tegen de overschrijding voor het jaar 2009. Er wordt een ontwerpverval van de generator van 1,5 meter gevonden.



Figuur 2

¹ Naast deze overgangswaarden zijn er ook eisen gesteld aan de minimale en maximale waterstand. Dit om er voor te zorgen dat bijvoorbeeld tijdens een storm de waterstand in het Grevelingenmeer ontoelaatbaar hoog wordt.

Het ontwerpdebiet hangt af van het ontwerpverval en de diameter. Het maximale debiet van de turbine hangt af van de diameter en het ontwerpverval van de generator (zie formule 2 ⁽²⁾).

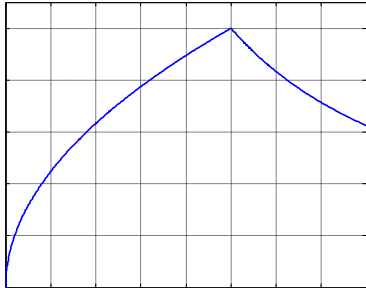
$$Q_d = 3,125 \cdot \sqrt{H_{rated}} \cdot D^2 \quad (2)$$

Waarin:

Q_d	Ontwerpdebiet [m^3/s]
H_{rated}	Ontwerpverval van generator (rated head) [m]
D	Diameter turbine bij de waaier [m]

In formule 3 is getoond welk debiet optreedt tijdens het legen van het bassin (fase 1 en 3).

$$H < H_{rated}$$

$$Q_{1,3} = n \cdot Q_d \cdot \sqrt{\frac{H}{H_{rated}}}$$


$$H > H_{rated}$$

$$Q_{1,3} = n \cdot Q_d \cdot \frac{H_{rated}}{H}$$

(3)

Waarin:

Q_3	debiet tijdens legen (fase 3) [m^3/s]
n	aantal turbines [-]
H_{rated}	ontwerpverval van generator [m]
Q_d	ontwerpdebiet van één turbine [m^3/s]

Door het vullen en legen van het bassin verandert het waterpeil in het bassin. Aangenomen wordt dat de waterstand in het bassin overal gelijk is. De kombergingsbenadering is dan geldig (zie formule 4)

$$Q = S \cdot \frac{dz}{dt} \quad (4)$$

Waarin:

Q	debiet [m^3/s]
S	wateroppervlak [m^2]
dz/dt	waterstandsvariatie in de tijd [m/s]

² Deze formule is gebaseerd op de eigenschappen van de Bulb-turbine in de riviercentrale bij Alphen aan de Maas en algemeen geldende vergelijkingsformules voor turbines. De formule is als volgt afgeleid van de turbine in Alphen:

$$Q_d = Q_{d,alphen} \frac{\sqrt{H_{rated}}}{\sqrt{H_{rated,alphen}}} \frac{D^2}{D_{alphen}^2} = 100 \cdot \frac{\sqrt{H_{rated}}}{\sqrt{4}} \frac{D^2}{4^2} = 3,125 \cdot \sqrt{H_{rated}} \cdot D^2$$

Het vermogen en de energieopbrengst zijn te berekenen met formule 5 en 6.

$$P(t) = \frac{\eta \cdot \rho \cdot g \cdot H \cdot Q_{1,3}}{10^6} \quad (5)$$

$$E = \frac{\int P(t) dt}{3,6 \cdot 10^6} \quad (6)$$

Waarin:

η	rendement [-]
ρ	dichtheid [kg/m ³]
g	zwaartekrachtsversnelling [m/s ²]
H	verval [m]
Q_3	debiet tijdens turbineren [m ³ /s]
$P(t)$	vermogen op een bepaald tijdstip [MW]
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%. In het model wordt aangenomen dat het rendement 80% is.

Aanpassingen voor variant sifon

Door de sifon treden er extra hydraulische verliezen op. Er is ingeschat dat deze verliezen ongeveer 10 % bedragen.

Door dit verlies zal het start- en stopverval hoger dienen te zijn. Er wordt daarom voorgesteld om dit verlies op te tellen bij het verval op de volgende wijze (formule 7);

$$H_{start,sifon} = \frac{1}{\eta_{sifon}} \cdot H_{start} \quad (7)$$

$$H_{stop,sifon} = \frac{1}{\eta_{sifon}} \cdot H_{stop}$$

Ten slotte zal ook het verval waaruit energie gewonnen wordt lager zijn. Het vermogen kan dan worden berekend met formule 9.

$$P(t) = \frac{\eta_{sifon} \cdot \eta \cdot \rho \cdot g \cdot H \cdot Q}{10^6} \quad (9)$$

Met behulp van deze formules is de energieopbrengst van een sifonvariant te berekenen.

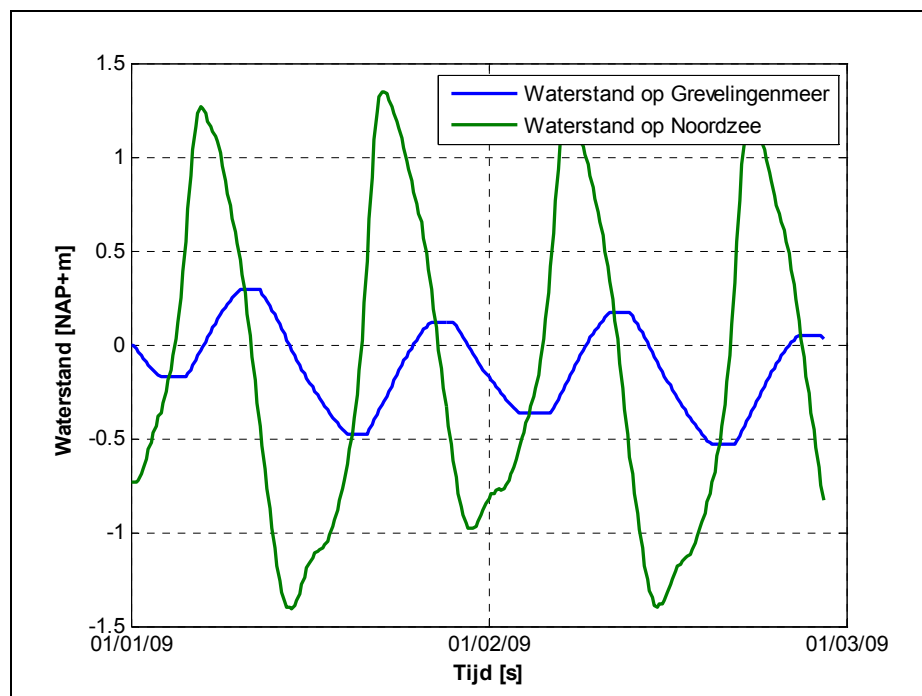
Resultaten

Met behulp van dit model zijn voor de verschillende varianten met Bulb-turbines de volgende resultaten verkregen.

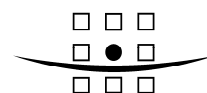
Variant	n [-]	D [m]	H _{rated} [m]	Q _d [m ³ /s]	P _t [MW]	Δh [m]	H _{gem} [m]	P [MW]	E [GWh/jaar]
Bulbturbines (1,2,3)	106	3,5	1,5	47	0,57	0,57	0,91	60	193
Sifon (4a)	106	3,5	1,5	47	0,51	0,56	0,92	54	173
Sifon (4b)	106	3,5	1,5	47	0,35	0,56	0,92	37	118

n	aantal turbines
D	diameter turbine (bij de waaier)
H _{rated}	ontwerpverval van de generator
Q _d	ontwerpdebiet
P _t	geïnstalleerd vermogen van een turbine-eenheid
Δh	gemiddeld tijverschil op grevelingenmeer
H _{gem}	gemiddeld verval
P	geïnstalleerd vermogen getijcentrale
E	energieopbrengst

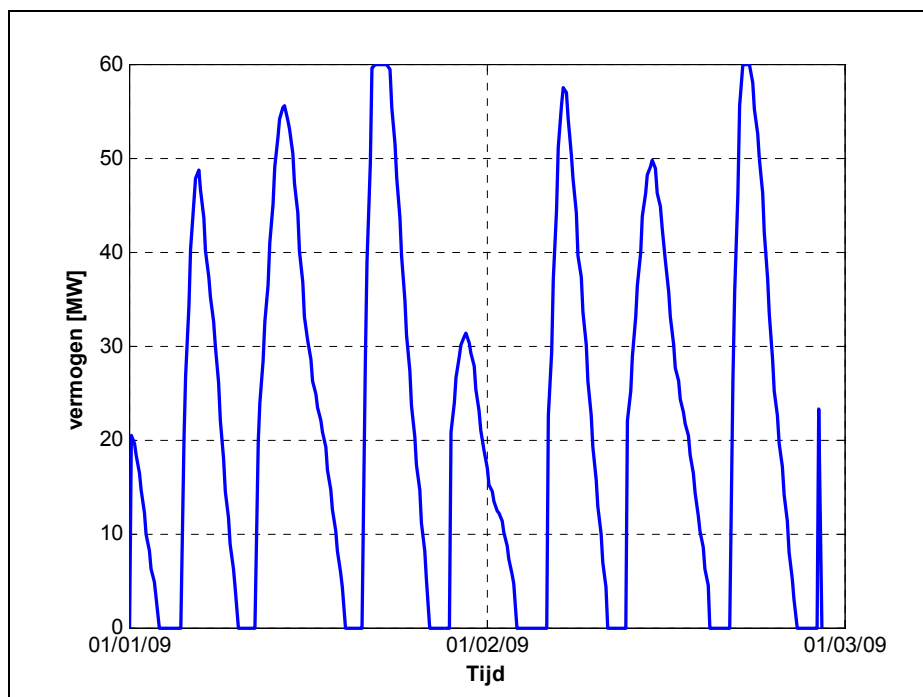
Ter illustratie zijn de waterstanden bij enkele getijden en het daaruit volgende vermogen voor de varianten 1, 2 en 3 gegeven.



Figuur 3 Waterstandsverloop op Grevelingen en Noordzee volgens hydraulisch model



ROYAL HASKONING



Figuur 4 Verloop van vermogen gedurende operatie

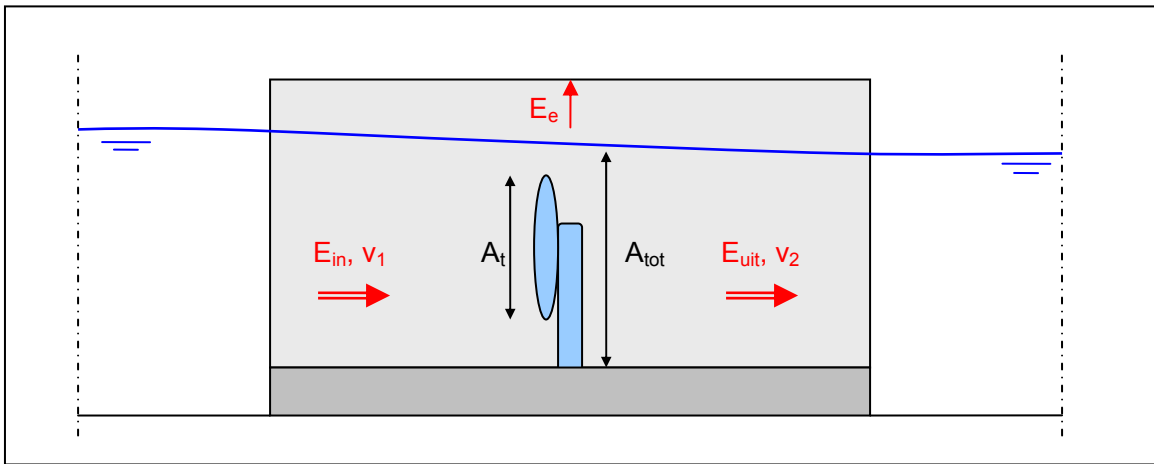
Bijlage 4

Berekeningen met betrekking tot de invloed van vrije stroomturbines op de doorlaatcapaciteit

Effect van turbine op stroomsnelheid

Toegepaste symbolen;

Parameter	Symbool	Dimensie
Energiedebiet	$\dot{E}$	[W]
Dichtheid	ρ	[kg/m ³]
Natte doorsnede	A_{tot}	[m ²]
Oppervlak turbine	A_t	[m ²]
Stroomsnelheid	v	[m/s]
Rendement	η	[-]
Betz-limiet	C_p	[-]



Uitwerking energiebalans. Punt 1 is aan de bovenstroomse zijde van de turbine en punt 2 is aan de benedenstroomse zijde van de turbine.

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_e + \dot{E}_{uit}$$

$$\dot{E} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot (\rho \cdot A \cdot v) \cdot v^2$$

$$\dot{E}_{in} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_{tot} \cdot v_1^3$$

$$\dot{E}_e = \frac{1}{2} \cdot \eta \cdot C_p \cdot \rho \cdot A_t \cdot v_1^3$$

$$\dot{E}_{uit} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_{tot} \cdot v_2^3$$

Invullen energiebalans:

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_{tot} \cdot v_1^3 = \frac{1}{2} \cdot \eta \cdot C_p \cdot \rho \cdot A_t \cdot v_1^3 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_{tot} \cdot v_2^3$$

$$A_{tot} \cdot v_1^3 = \eta \cdot C_p \cdot A_t \cdot v_1^3 + A_{tot} \cdot v_2^3$$

$$v_2^3 = \frac{A_{tot} - \eta \cdot C_p \cdot A_t}{A_{tot}} \cdot v_1^3$$

Relatie tussen stroomsnelheid achter turbine en voor turbine.

$$\frac{v_2}{v_1} = \sqrt[3]{\frac{A_{tot} - \eta \cdot C_p \cdot A_t}{A_{tot}}}$$

Oppervlakten bij stroomsluizen Brouwersdam:

$$A_{tot} = B \cdot h_{gem} = 600 \cdot 8,5 = 5100 m^2$$

(20 doorlaatmiddelen met 30 meter breedte, drempelhoogte: NAP - 8,5 m)

$$A_t = n_t \cdot A_l = 80 \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 6^2 = 2262 m^2$$

(80 turbines met diameter van 6 meter)

Invullen:

$$\frac{v_2}{v_1} = \sqrt[3]{\frac{A_{tot} - \eta \cdot C_p \cdot A_t}{A_{tot}}} = \sqrt[3]{\frac{5100 - 0,35 \cdot 2262}{5100}} = 0,95$$

Effect van afvoercoëfficiënt op energieprestatie

In te vullen voor verschillende afvoercoëfficiënten:

$$A_{s,nieuw} = \frac{A_{s,oud} \cdot \mu_{oud}}{\mu_{nieuw}}$$

$$\hat{v} = \frac{\hat{Q}}{A_s} = \frac{A_k \cdot \omega \cdot \zeta_k}{A_s}$$

$$\hat{P} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_t \cdot \hat{v}^3$$

$$E = \int_0^T P dt = \int_0^T \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_t \cdot v(t)^3 dt \approx \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_t \cdot \xi \cdot \hat{v}^3 \cdot T = \frac{1}{2} \cdot 1025 \cdot A_t \cdot \hat{v}^3 \cdot 0,42 \cdot 24 \cdot 365,25$$

(Oppervlak turbines te bepalen aan de hand van schetsen)

$$\xi = \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} \frac{\omega}{\pi} \cdot \sin^3(\omega \cdot t) dt = 0,42$$