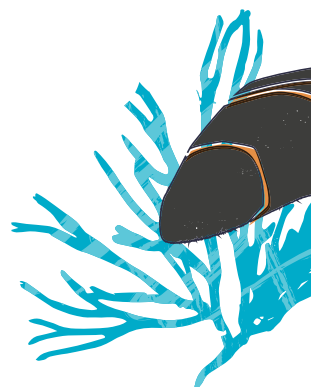


PROGRAMMA **NAAR EEN RIJKE WADDENZEE**



**Verkenning naar geschikte
techniek(en) voor opwekken
energie uit waterstromen
in het Lauwersmeergebied**



COLOFON



Februari 2019

Een rapport van:

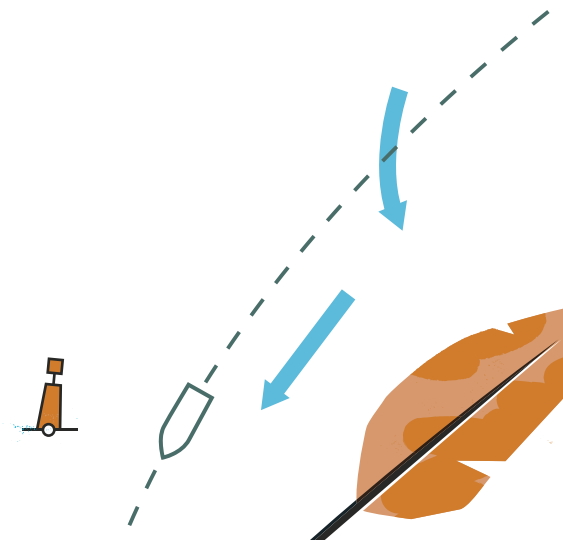
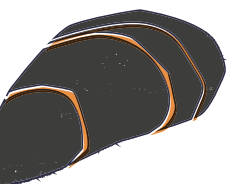
Programma naar een Rijke Waddenzee
rijkewaddenzee.nl

Opgesteld door:

Stichting Humsterland Energie
Buitensingel 90 - 9883 SK Oldehove. The Netherlands.
Telefoon (062) 3960244
humsterlandenergie.nl

Auteurs:

Ir. W.L. Walraven en Ir. Jan Hendrik de Vries



INHOUDSOPGAVE



Samenvatting

Doel	4
Aanpak	4
Varianten	4
Conclusies	7
Aanbevelingen	7

1. Inleiding

Doel	8
Aanpak	8

2. De bestaande situatie

Cleveringsluizen	9
Geulen in de Waddenzee	13
Debiet en stroomsnelheden in de belangrijkste geulen in het Lauwersmeergebied	13

3. Energie winnen uit waterstromen

Variant 1 Winst energie uit getijdestroom op de Waddenzee	15
Variant 2 Energieopbrengst uit het verval van de Cleveringsluizen in huidige situatie	19
Variant 3 Energie uit de R.J. Cleveringsluizen, bij herinvoering gedempt getij op het Lauwersmeer	21

4. Productie van waterstof

23

5. Aanvullende aspecten

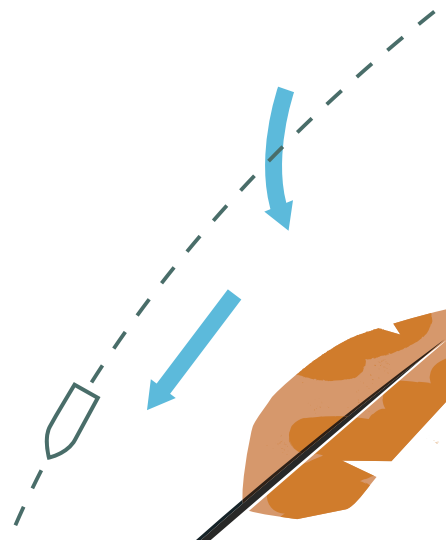
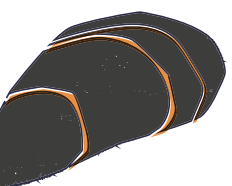
28

Vergunningen	28
Energiewinning en interactie met fauna en waterverkeer	29

6. Conclusies en aanbevelingen

30

Bronnen	31
---------	----



Samenvatting



Het Programma naar een Rijke Waddenzee (PRW) werkt aan een duurzame Waddenzee van Werelderfgoedklasse. De Stichting Humsterland Energie is gevraagd om in opdracht van het Programma naar een Rijke Waddenzee de mogelijkheden van energieopwekking uit waterstromen te onderzoeken.

Doel

Het doel van deze studie betreft het verkennen van de technische mogelijkheden en rentabiliteit van de opwekking van duurzame energie uit waterstromen rond Lauwersoog.

Aanpak

In deze studie zijn 3 varianten onderzocht:

- › Opwekking duurzame energie uit getijdenstroming op de Waddenzee;
- › Opwekking duurzame energie uit Cleveringsluizen bij spui zoetwater (huidige situatie);
- › Opwekking duurzame energie uit Cleveringsluizen bij herinstructie gedempt getij op het Lauwersmeer (met gemiddeld waterpeil - 0,90 m NAP).

In deze studie is niet of maar zeer beperkt naar de effecten op ecologie, waterkwaliteit of landbouw gekeken.

Varianten

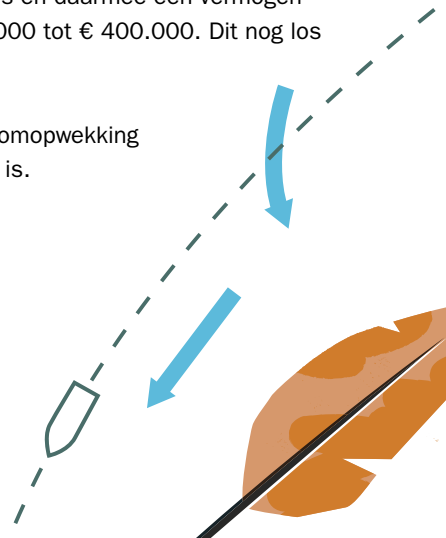
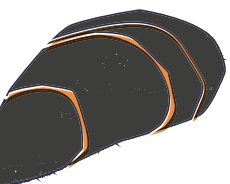
VARIANT 1 ENERGIE UIT GETIJDENSTROMING OP HET WAD

In de geulen tussen Lauwersoog en Schiermonnikoog treffen we maximale stroomsnelheden aan van 0,8 tot 1,2 m/s. De gemiddelde op energiedichtheid gewogen stroomsnelheden zijn een factor lager. In de Duitse bocht komen stroomsnelheden voor van 3 tot 5 m/s. Op grond van natuurkundige wetten hebben wij vastgesteld welke energie er te winnen is uit getijdenstroming met hoog rendement turbines (>70 %).

Op de meest kansrijke locaties tussen de eilanden en voor een geul ten oosten van de haven van Lauwersoog hebben we vast kunnen stellen dat in diepe geulen met in tweerichting werkende visvriendelijke turbines van 5 m diameter de jaaropbrengst respectievelijk 11.000 kWh bij 0,8 m/s) en 5.000 kWh bij 0,6 m/s bedraagt. De investeringsruimte bij een gewenste terugverdientijd van 10 jaar bedraagt dan respectievelijk € 11.479 en € 4.843.

De kosten van een dergelijke turbinesystemen die uitgelegd zijn op stroomsnelheden 3 m/s en daarmee een vermogen kunnen opwekken van 100 kW, kosten bedragen € 1.500 tot € 4.000 per kW. Dus € 150.000 tot € 400.000. Dit nog los van de kosten van stroomaansluiting op het energienetwerk.

De opwekking van duurzame energie is technisch mogelijk. Echter, we stellen vast dat stroomopwekking uit de getijdenstroming in dit deel van het Waddengebied in economisch opzicht niet zinvol is.



VARIANT 2 ENERGIE UIT DE R.J. CLEVERINGSLUIZEN, BIJ SPUI ZOETWATER (HUIDIGE SITUATIE)

In deze variant wordt uitgegaan van de bestaande situatie: een waterpeil van de – 0,90 op het Lauwersmeer en getijde op de Waddenzee. Er kan dus alleen gespuid worden bij een waterpeil lager dan – 0,90 op de Waddenzee.

Op basis van de database van het waterschap Noorderzijlvest, waarbij in een periode van 4 jaar per kwartier de openingstijden van de spuicomplexen zijn vastgelegd, met het daarbij behorende verval (het verschil in waterhoogte tussen het Lauwersmeer en de Waddenzee), hebben wij de volgende waarden kunnen vaststellen:

Spui debieten ontleend aan database waterschap Noorderzijlvest 2010 - 2014			
Huidig regime	Debiet (m3/jaar)	Spui uren	Gem. Stroom (m/s)
Spui-eenheid 1	409.279.140	379	1,87
Spui-eenheid 2	465.885.180	433	1,87
Spui-eenheid 3	354.330.934	438	1,41
Totaal	1.229.495.254	Gemiddeld	1,72

Indien turbines in de spuiokers worden geplaatst, dan neemt het spuivolume per tijdseenheid af; immers het spuioppervlak wordt minder en ook de weerstand neemt toe door de turbines. Uitgangspunt blijft dat er op jaarbasis 1,229 miljard m3 moet worden afgevoerd. De tijdsduur van spuien neemt dan toe tot 760 uur. De maximale energieopbrengst hebben wij vastgesteld voor 24 turbines van elk 3 m, zonder vermogensbeperking.

Verval	Max	2,07 m		
	Gem	0,40 m		
Bij peil Lauwersmeer		-0,90 m		
		kWh/jaar	Spuiregime	Investeringsruimte
Maximale opbrengst	1.073.008		verval > 0 m	€ 1.416.370

De investeringsruimte is vastgesteld op basis van de verkoop van stroom voor 4 cent per kWh en een netto SDE+ subsidie van 9,2 cent per kWh. In deze variant is ook berekend wat het effect is van het eerder (verval >0 m) of later openen (verval > 0,12 m) van de sluisdeuren.

De opwekking van duurzame energie is technisch mogelijk maar we stellen vast dat de investeringsruimte te beperkt is om de turbines te realiseren.

VARIANT 3 ENERGIE UIT DE R.J. CLEVERINGSLUIZEN, BIJ HERINTRODUCTIE GEDEMPPT GETIJ OP HET LAUWERSMEER (GEMIDDELD WATERPEIL - 0,90 M NAP)

In deze variant wordt uitgegaan van gedempt getijde op het Lauwersmeer, met waterpeilen van de maximaal -0,50 m NAP en een minimaal peil van -1.27 m NAP. Het gemiddelde waterpeil is dan – 0,90 m NAP; en de getijdeslag 80 cm.

Hierbij moet netto 1,229 miljard m³ gespuid worden per jaar om de gewenste run-off van waterstromen naar het meer plus de regenval af te kunnen voeren. Vanuit deze randvoorwaarden is de energieopbrengst berekend met 24 turbines van elk 3 m en een maximum vermogen per turbine van 100 kW:

Spuien			
Peil m NAP	m ³	kWh	uren
-0,50	5.155.067.973	3.347.751	2.699

Inlaten			
Peil m NAP	m ³	kWh	uren
-1,27	3.925.572.719	2.574.053	703

Totaal resultaat van maximaal spuien en gedoseerd inlaten variant 3			
m ³ netto spuien	kWh	uren	Turbine vermogen per eenheid in kW
1.229.495.254	5.921.804	3.402	100

Vanuit het gegeven dat een gemiddeld huishouden in Noord Nederland 3.000 kWh stroom gebruikt per jaar, is af te leiden dat de R.J. Cleveringsluizen stroom kunnen leveren voor bijna 2.000 huishoudens. Daarnaast draagt het opwekken van stroom met de R.J. Cleveringsluizen bij aan de CO₂ reductie met ruim 3.800.000 kg per jaar.

www.co2emissiefactoren.nl/lijst-emissiefactoren

De rentabiliteit van deze variant is bepaald en deze biedt met een gewenste pay out van 10 jaar een investeringsruimte van 6,6 mln. Eur. Voor deze investeringsruimte zijn er turbines te koop in de markt. Deze variant is economisch haalbaar en interessant.

Opbrengst	5.921.804 kWh	per kWh
Verkoop stroom		€ 0,040
SDE+ zuivere netlevering		€ 0,092
		€ 0,132
Onderhoud		€ 0,020
Netto opbrengst		€ 0,112
Jaaropbrengst		€ 663.242
Investeringsruimte		
Bij gewenste pay-out van 10 jaar		€ 6.632.420
Aantal turbines	24	
Vermogen per turbine	100 kW	
Investeringsruimte per turbine		€ 276.351
Investeringsruimte per kW turbine vermogen		€ 2.764

MOGELIJKHEDEN VAN WATERSTOFPRODUCTIE EN VERSTERKING REGIONALE ECONOMIE

De opgewerkte duurzame energie kan worden ingezet voor verduurzaming en versterking van de marktpositie van het bedrijfsleven in Lauwersoog en de regio rond het Lauwersmeer. De energiemix van continue getijdenstroom met 'piek-energie' als zonne- en windenergie is hierbij optimaal. Om de energie functioneel in te kunnen zetten is omzetting in waterstof een hele interessante optie. De koppeling van de getijdeturbine en de waterstof-economie is technisch en economisch haalbaar.

De berekeningen in deze studie zijn getoetst aan modelberekeningen van de Antea groep voor vergelijkbare situaties.

Conclusies

- › De winning van getijdestroom bij Lauwersoog met een gedempt getijde op het Lauwersmeer is technische en economisch haalbaar. Andere onderzochte methoden van winnen van duurzame energie uit waterstromen zijn technisch en/of economisch niet haalbaar;
- › Met de getijdeturbine bij Lauwersoog kan duurzame energie worden opgewerkt gelijk aan het energieverbruik van circa 2.000 huishoudens; en wordt een bijdrage geleverd aan de CO2 reductie met circa 3.800.000 kg per jaar;
- › De inzet van getijde-stroom voor de ontwikkeling van de waterstof-economie in Lauwersoog is technisch en economisch haalbaar. Daarmee wordt de verduurzaming en marktpositie van het lokale bedrijfsleven versterkt.

Aanbevelingen

- › Wij bevelen aan om een nadere detailstudie uit te voeren om daarbij een algoritme voor een optimaal spuiregime uit te werken vanuit dynamische simulaties, zodanig dat de stroomproductie gelijkmatig over het jaar verdeeld is;
- › Bij positief resultaat, uitvoer van een pilot in één van de spuicplexen om ervaring op te doen met de winning van getijde-energie op deze locatie.

1. Inleiding



Het Programma naar een Rijke Waddenzee (PRW) werkt aan een duurzame Waddenzee van Werelderfgoedklasse. PRW brengt overheden, natuurorganisaties en (economische) gebruikers van het Waddengebied bij elkaar. Het programma wordt gefinancierd (tevens opdrachtgevers) door het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, Ministerie van Infrastructuur & Waterstaat, Rijkswaterstaat en de drie Waddenprovincies (Noord-Holland, Fryslân en Groningen) en de Coalitie Wadden Natuurlijk (Waddenvereniging, Natuurmonumenten, Staatsbosbeheer, It Fryske Gea, Groninger Landschap, Landschap Noord-Holland, Staatsbosbeheer, Vogelbescherming Nederland en Stichting Wad).

Het program werkt met verschillende strategieën en één van de strategieën is het kwalitatief verbeteren van de Rand van het Wad (aan de zuidzijde van de Waddenzee). PRW zet er op in het gebied qua landschap, natuur, economie en sociale cohesie te verbeteren. Binnen deze strategie is het Lauwersmeergebied een prioritair gebied.

De Stichting Humsterland Energie is gevraagd om in opdracht van het Programma naar een Rijke Waddenzee de mogelijkheden van energieopwekking uit waterstromen te onderzoeken.

Doel

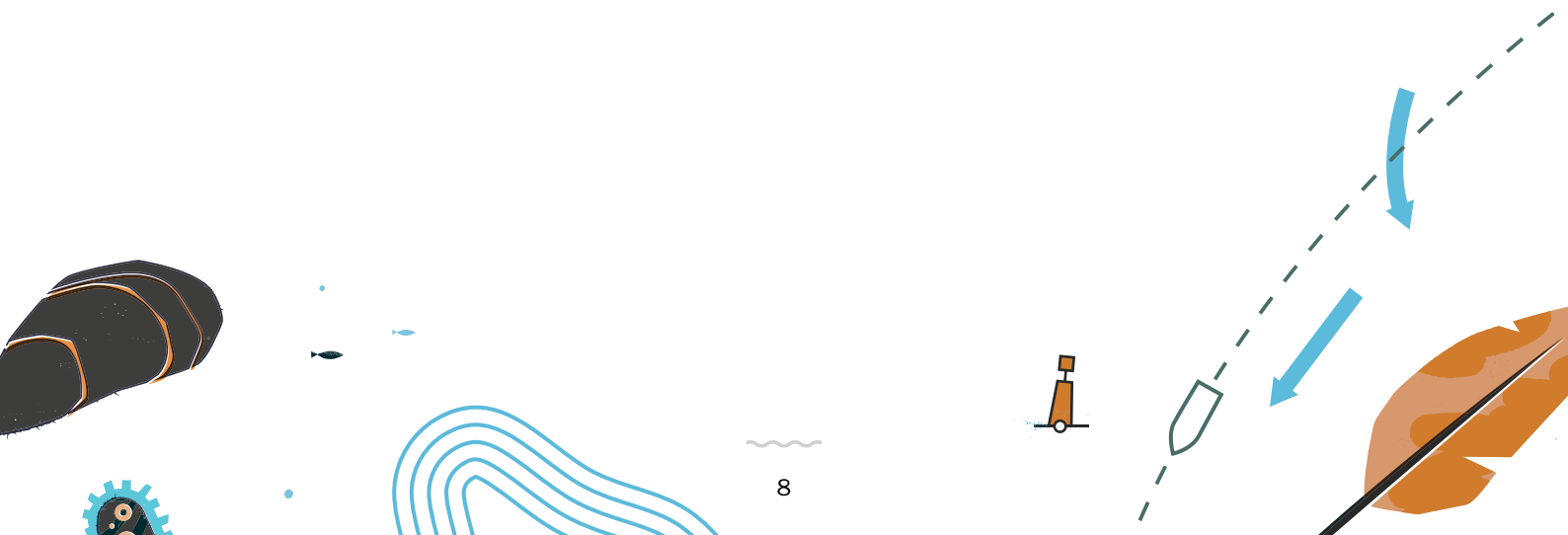
Het doel van deze studie betreft het verkennen van de technische mogelijkheden en rentabiliteit van de opwekking van duurzame energie uit waterstromen rond Lauwersoog.

Aanpak

In deze studie zijn 3 varianten onderzocht:

- › Opwekking duurzame energie uit getijdestroming op de Waddenzee;
- › Opwekking duurzame energie uit Cleveringsluizen bij spui zoetwater (huidige situatie);
- › Opwekking duurzame energie uit Cleveringsluizen bij herinductie gedempt getij op het Lauwersmeer (gemiddeld waterpeil - 0,90 m NAP).

In deze studie is niet of maar zeer beperkt naar de effecten op ecologie, waterkwaliteit of landbouw gekeken.



2. De bestaande situatie

Cleveragesluizen

Op basis van kwartiergegevens gemeten door het waterschap Noorderzijlvest in de periode van 1 jan 2010 tot 31 dec 2014 kan het volgende worden vastgesteld:

Peil NAP in meters	Waddenzee	Lauwersmeer
Gemiddeld	0,02	-0,91
Maximum	3,69	0,15
Minimum	-2,97	-1,27

Gemiddeld is dus het peil in de zee hoger dan in het meer. Dit gegeven prikkelt de veronderstelling dat er energie is te winnen door getijdenstroming van water in en uit het meer.

Openingsuren per jaar spuicomplex in Cleveragesluizen (voor spuiactiviteiten):

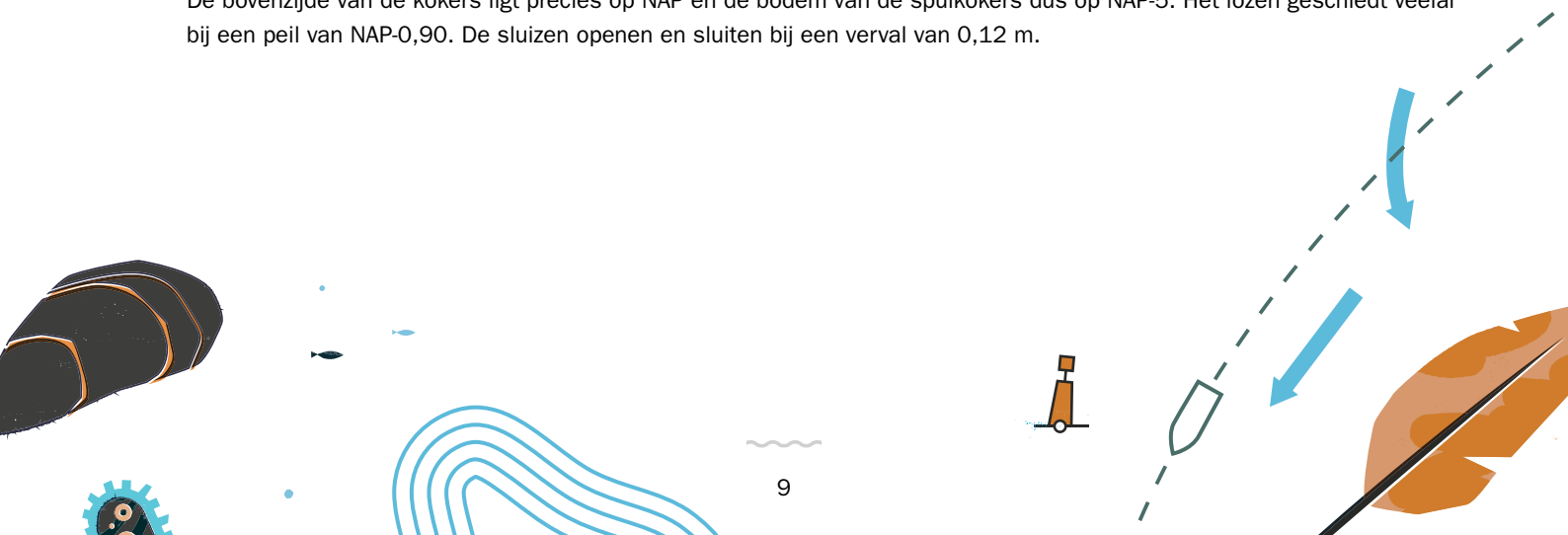
Debieten ontleend aan database waterschap Noorderzijlvest 2010 – 2014			
	Debiet (m3/jaar)	Openingsuren	Stroom gemiddeld (m/s)
Spui-eenheid 1	409.279.140	379	1,87
Spui-eenheid 2	465.885.180	433	1,87
Spui-eenheid 3	354.330.934	438	1,41
Totaal	1.229.495.254	Gemiddeld	1,72

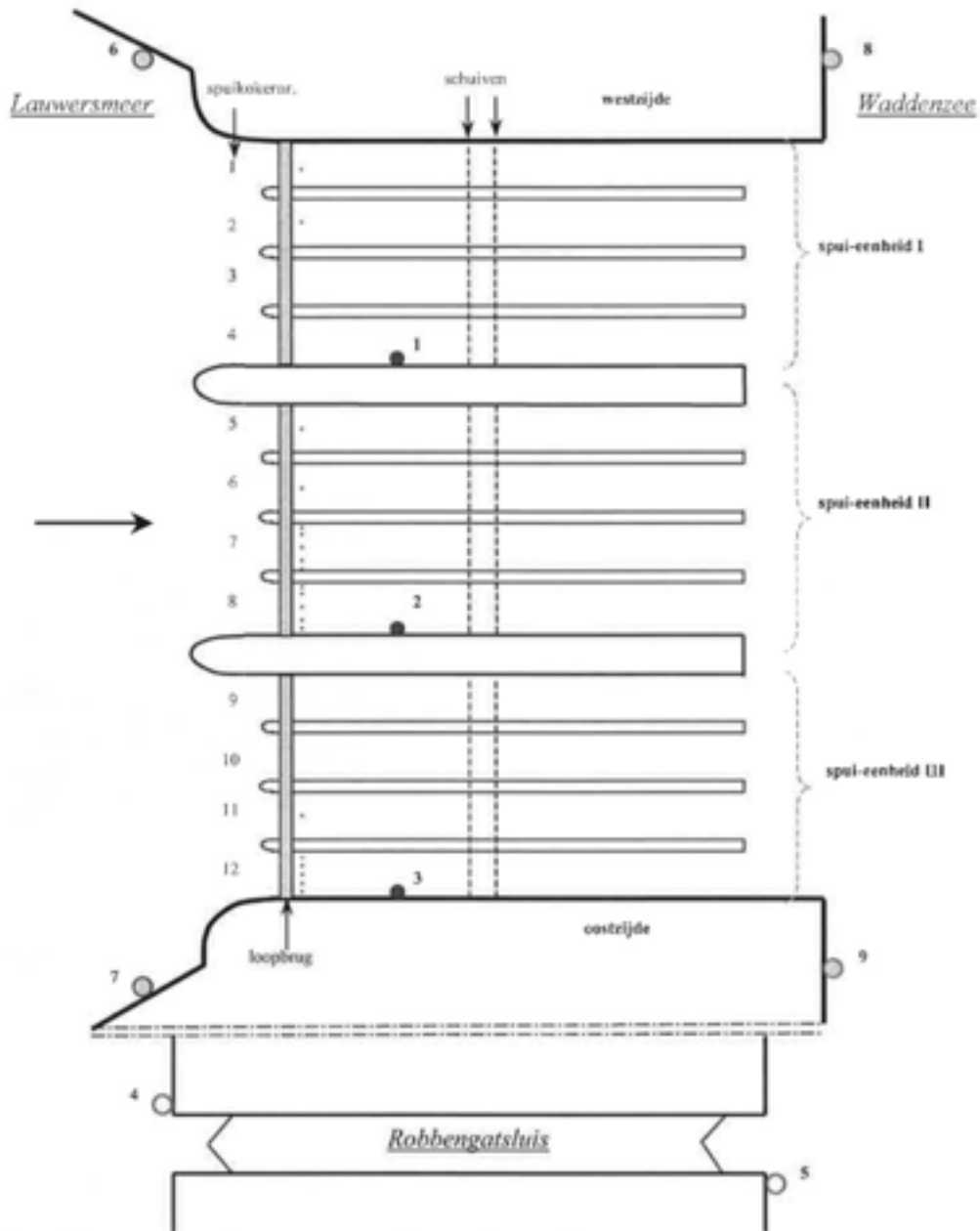
FYSIEKE EIGENSCHAPPEN VAN HET SPUICOMPLEX

De R.J. Cleveragesluizen zijn opgebouwd uit 3 spui-eenheden, met daarin 4 spuiokers van elke 10 m breed. Daarmee heeft het complex een totale waterbreedte van 120 m. De spuiokers zijn 5 m diep en de bodembekleding is ontworpen op een maximale stroomsnelheid van 4,5 m/s. De lengte van de spuiokers bedraagt 66 m en in het midden zijn schuiven geplaatst die elk van de kokers kunnen afsluiten.

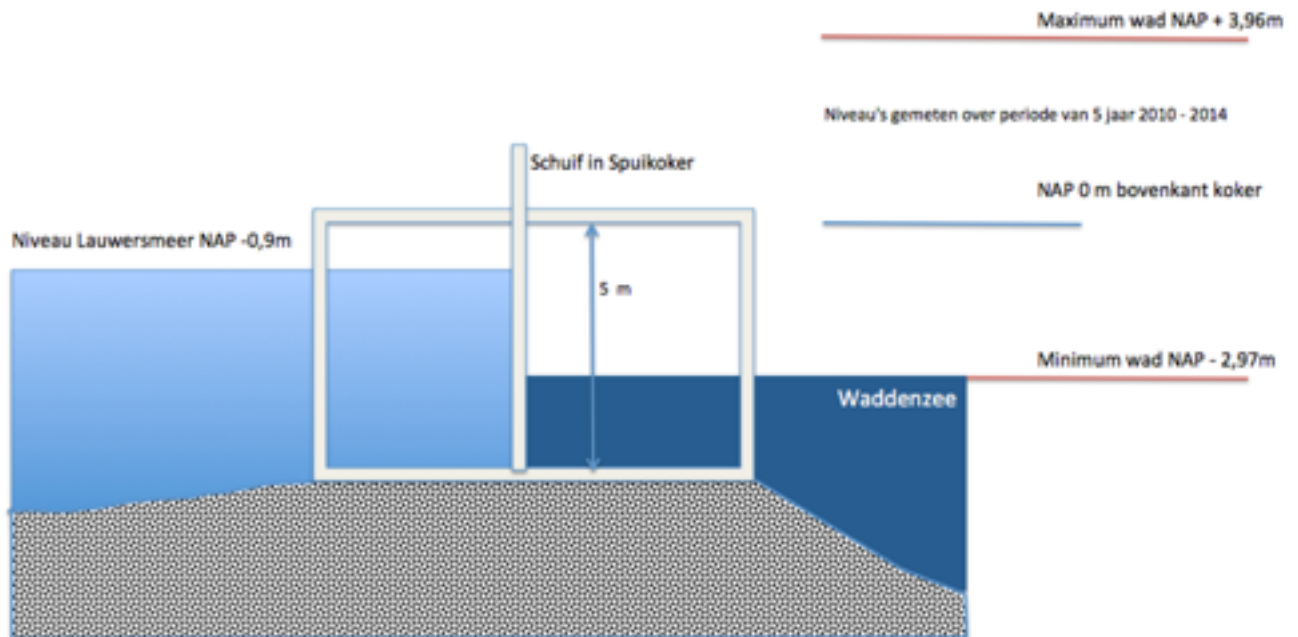
In de naast gelegen Robbengatsluis wordt het peil gemeten;- de data zijn als kwartiergegevens opgenomen in de database van het waterschap.

De bovenzijde van de kokers ligt precies op NAP en de bodem van de spuiokers dus op NAP-5. Het lozen geschiedt veelal bij een peil van NAP-0,90. De sluisen openen en sluiten bij een verval van 0,12 m.





Afbeelding 1 Bovenaanzicht spuicomplex;-
peilniveau wordt gemeten in punten 4 en 5 aan weerszijden Robbengatsluis;-
overige punten zijn gepland voor meting stroomsnelheid



Afbeelding 2 Dwarsdoorsnede spuikoker in Cleveringsluizen

De stroomsnelheid is een functie van het hoogteverschil (verval) tussen Waddenzee en het Lauwersmeer.

Verval h_c (m)	Stroom- snelheid v (m/s)
0,05	0,99
0,10	1,40
0,20	1,98
0,30	2,43
0,40	2,80
0,50	3,13
0,60	3,43
0,70	3,71
0,80	3,96
0,90	4,20
1,00	4,43

Relatie verval en stroomsnelheid afgeleid uit Bernoulli/ Torricelli:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_c}$$

g = gravitas 9,81 m/s²

Op basis van de gegevens van het waterschap is vastgesteld dat de totale door de sluisen gestroomde water per jaar op jaarbasis 1,229 miljard m³ bedraagt. Bij een peil van - 0,90 m NAP is het spuioppervlak $(5 - 0,90) \times 120$ m².

RUNOFF, REGENWATER EN VERDAMPING

Het Lauwersmeer heeft een bergingscapaciteit van 65 miljoen m³. In een uur kunnen de sluiskokers tezamen bij een verval van 90 cm 7,2 miljoen m³ afvoeren. Het meer heeft een oppervlak van 58 km², waardoor het peil met 0,13 m zal dalen.

De run off van het achterland kan als volgt worden bepaald:

Verdampingsverlies Lauwersmeer	
Oppervlak meer	58 km ²
Windsnelheid (*)	6,15 m/s
Relatieve vochtigheid (*)	82%
Zonuren per dag gemiddeld	6 uur
Gemiddelde temperatuur (*)	10,75° C
Verdampingsverlies (Lentech formule)	1,154 mm/dag
Per jaar	421 mm/jr
Regen (*)	951 mm
Infiltratie in de bodem	pm
Af te voeren per jaar	530 mm
	30.727.820 m ³
Afgevoerd debiet	1.229.495.254 m ³
Run-off achterland	1.198.767.434 m ³
(*) KNMI gegevens 2017	

Turbine gegevens per spui-eenheid

$$P = 1/2 \cdot \rho \cdot \eta \cdot A \cdot v^3$$

Vermogen in Watt

Oppervlak turbines in een spui-eenheid

Diameter per turbine	3 m
Aantal turbines per koker	2 turbines
Aantal kokers per spui-eenheid	4
Oppervlak van 8 turbines	56,52 m ²

Rendement van stroomopwekking

η	Betz x Ng x Tg = 39,37%
Betz (max vermogen uit stroom)	59,20%
Ng (generator rendement)	95%
Tg (Turbine rendement)	70%

q (dichtheid van water)	1000 kg.m ³
--------------------------------	------------------------

Geulen in de Waddenzee

Het waddengebied kent al tientallen jaren een sterke sedimentatie. De platen slibben gestaag op en sommige geulen worden smaller en ondieper; ze vormen bovendien steeds wijdere bochten (meanders). Water dat met opkomend tij het gebied rond de vaargeul vult, neemt meer zand en slib met zich mee dan met afgaand water weer richting zee wordt meegevoerd. Dat sediment van zand en slib wordt niet alleen op de platen afgezet, maar ook in de vaargeul. Om te voorkomen dat de vaargeul verzandt en het eiland onbereikbaar wordt, moet bijna dagelijks en over steeds grotere delen worden gebaggerd.

Het gebaggerde volume is de laatste decennia toegenomen van enkele tienduizenden naar bijna twee miljoen kubieke meter per jaar. Voor relevante opbrengst zijn turbine diameters van tenminste 5 m noodzakelijk. De diepte van enkel geulen voldoen hieraan. Dat is op locatie 1 boven de haven en op locatie 5 in het zeegat tussen Ameland en Schiermonnikoog.

Debiet en stroomsnelheden in de belangrijkste geulen in het Lauwersmeergebied

De stromingssnelheden in onderstaande tabel zijn gemiddelde waarden met rustig weer. Ze zijn ontleend aan de database van Rijkswaterstaat. Bij het plaatsen van turbines mogen deze waarde aangehouden worden als een ondergrens; dat wil zeggen dat de berekende opbrengsten die hiervan zijn afgeleid tenminste gehaald zullen worden.

Stroom snelheid (m/s) in geulen tussen Lauwersoog en Schiermonnikoog				
# op kaart	Opkomend water		Aflopend water	
	Max	Min	Min	Max
1	0,87	0,15	0,15	0,66
2	1,02	0,20	0,10	0,77
3	0,87	0,20	0,10	0,66
4	1,17	0,26	0,20	0,97
5	1,17	0,20	0,15	0,92
6	0,82	0,20	0,15	0,66

Periode 12 uur en 25 minuten



Afbeelding 3
stroomsnelheden tabel ontleend
aan HP 33 D NL Tides

Gelet op de kosten van stroomkabels komen de locaties 1 en 6 het beste in aanmerking om turbines te plaatsen. Het energiedebiet aangeboden aan een oppervlakte A loodrecht op de stromingsrichting bedraagt (massadebiet vermenigvuldigd met kinetische energie):

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

- ρ : de dichtheid van water (1.000 kg/m³)
- v : de stromingssnelheid (m/s)
- η : het specifieke rendement (de Betz limiet x Ng en Tg)
- Betz: limiet voor fluïdum als water en lucht is 59,2%
- Ng: Generator rendement (95%)
- Tg (*): Turbine rendement (70%)

3. Energie winnen uit waterstromen

Variant 1 Woningen energie uit getijdestroom op de Waddenzee

Het is duidelijk dat voor de winning van energie uit waterstromen op de Waddenzee de watersnelheid een doorslaggevende factor is: een verdubbeling van de snelheid betekent een verachtvoudiging van het aangeboden vermogen. Voor een optimale inzet van een stroomturbine dient de oppervlakte A, beschreven door de rotorbladen, bij een gegeven snelheid en randvoorwaarden (bijvoorbeeld diepte geul bij laagwater) zo groot mogelijk te zijn.

Onderstaande tabel toont de potentiële jaaropbrengst gedurende 6.000 bedrijfsuren met een rotor diameter van 5 m, waarbij de gewogen gemiddelde snelheid als variabele is ingevoerd. De investeringsruimte is berekend voor een terugverdientijd van 10 jaar en een waarde van de stroom van € 0,097 per kWh.

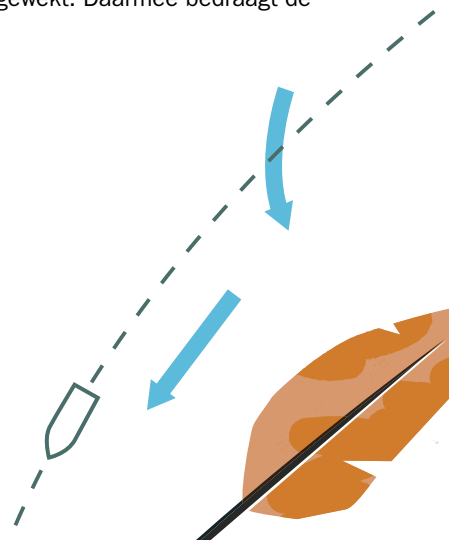
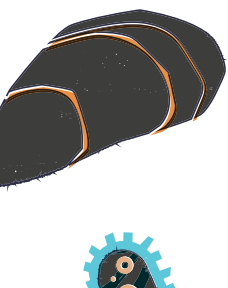
V (m/s)	P (kW)	kWh/ jaar	Investeringsruimte
0,6	0,8	5.006	€ 4.843
0,8	2,0	11.867	€ 11.479
1	3,9	23.178	€ 22.421
1,2	6,7	40.051	€ 38.743
1,4	10,6	63.600	€ 61.523
1,6	15,8	94.937	€ 91.835
1,8	22,5	135.174	€ 130.758
2	30,9	185.423	€ 179.366
2,2	41,1	246.798	€ 238.736
2,4	53,4	320.411	€ 309.945
2,6	67,9	407.375	€ 394.067

De berekening toont dus aan dat de rentabiliteit van een dergelijke installatie zeer sterk afhankelijk is van de stroom-snelheid.

(*) Er zijn turbines met hogere rendementen: Fish-Flow heeft bewezen rendementen van 90% in optimale condities

RENTABILITEIT LOCATIE 1: HAVEN TEN OOSTEN VAN DE HAVEN LAUWERSOOG

Het gewogen berekende gemiddelde van de stroomsnelheid bedraagt 0,6 m/s rechtsboven van de haven van Lauwersoog (locatie 1). Op jaarbasis kan met een getijdenturbine van 5 m ruim 5.000 kWh worden opgewekt. Daarmee bedraagt de investeringsruimte € 4.843 bij een gewenste terugverdientijd van 10 jaar.



RENTABILITEIT LOCATIE 5 EN 6 : ZEEGAT TUSSEN SCHIERMONNIKOOG EN AMELAND

Tussen de eilanden Schiermonnikoog en Ameland is de gemiddelde gewogen stroomsnelheid 0,8 m/s. Daarmee kan op jaarbasis kan met een getijdenturbine van 5 m ruim 11.000 kWh worden opgewekt. De investeringsruimte bedraagt daarmee € 11.479 bij een terugverdientijd van 10 jaar.

Voor een goede rentabiliteit moeten we dus op zoek naar locaties met hogere gemiddelde stroomsnelheden van meer dan 2 m/s;- die zijn in het Lauwersmeergebied niet gevonden. In de Duitse bocht komen hogere stroomsnelheden voor met maximale waarde van 5 tot 6 knopen. Met gemiddelde gewogen van waarden tot 2 – 3 m/s. Analoge turbines kunnen daar geplaatst worden met een investeringsruimte van € 180.000 - € 600.000, bij een gewenste terugverdientijd van 10 jaar.

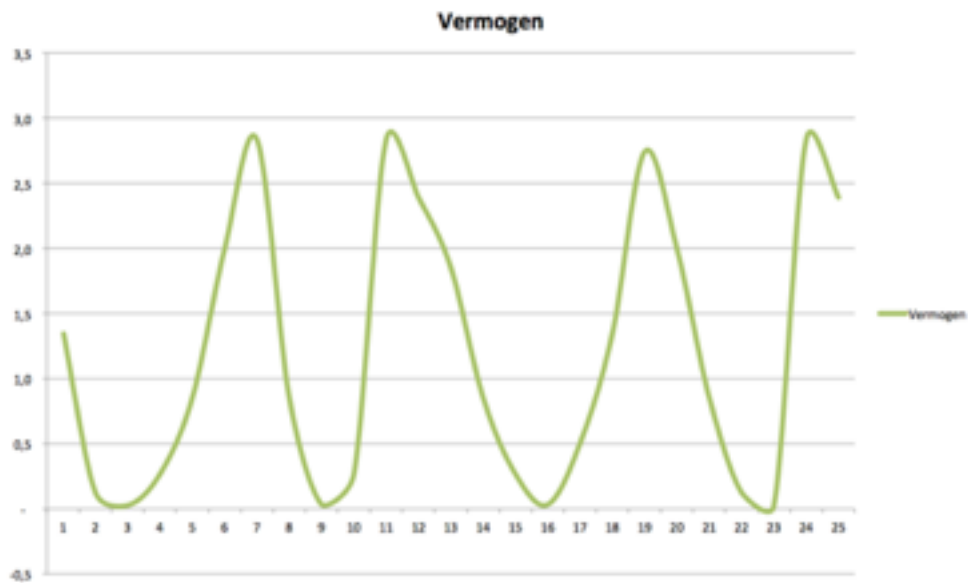
VERANTWOORDING STROOMOPBRENGST IN HET WAD

De stroomopbrengst uit getijden turbines bestaat uit 2 componenten:

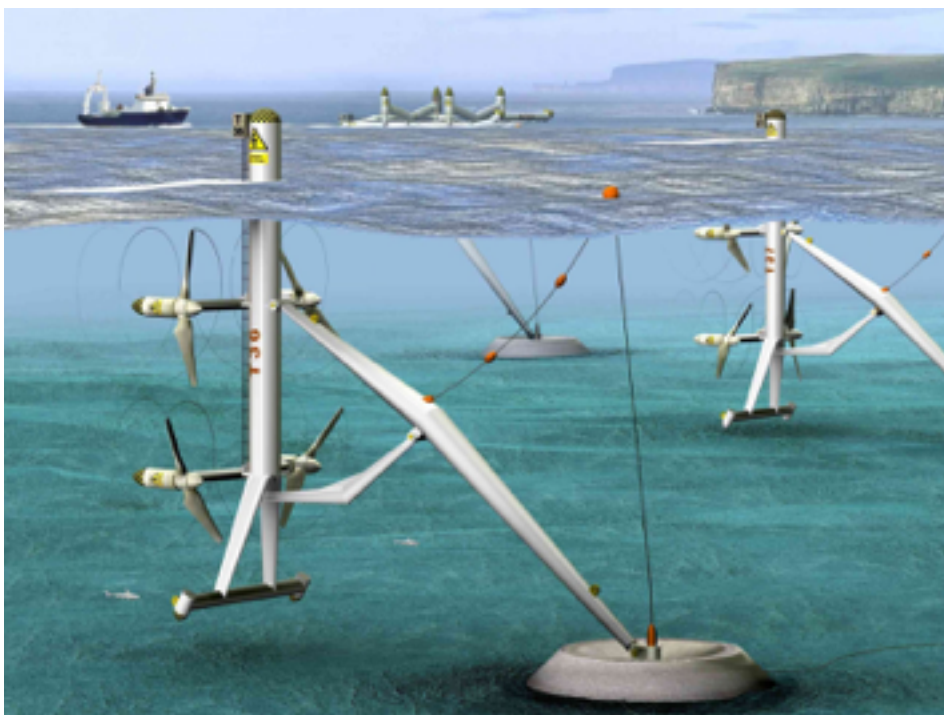
1. Verkoop aan een energieleverancier
2. Subsidie uit de SDE + regeling 2018 (15 jaar);- waarbij de turbines 6.000 bedrijfsuren in bedrijf zijn

SDE + voor waterkracht	
Verval	< 50 cm
Fasebedrag	€ 0,130 per kWh
Correctie bedrag	€ 0,038 per kWh
Netto SDE+ subsidie	€ 0,092 per kWh
Voor maximaal	3.700 vollast uren
Berekende bedrijfstijd	6.000 uur
Gemiddelde SDE	€ 0,057 per kWh
Totaal opbrengsten maximaal per kWh	
Prijs per kWh	
Verkoop	0,040 per kWh
SDE+	0,057 per kWh
Totaal	0,097 per kWh

Vermogen in kW als functie van de getijdenstroomsnelheid op (locatie 1)



Afbeelding 4
potentieel turbine-vermogen
in kW in getijdenstroom
gedurende een etmaal

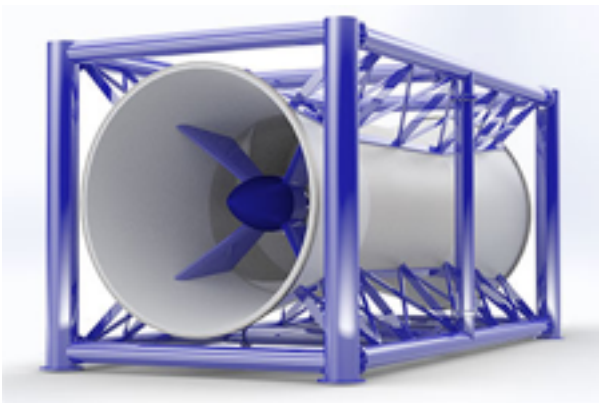


Afbeelding 5
Art-impressie van met stroom
meebewegende turbine

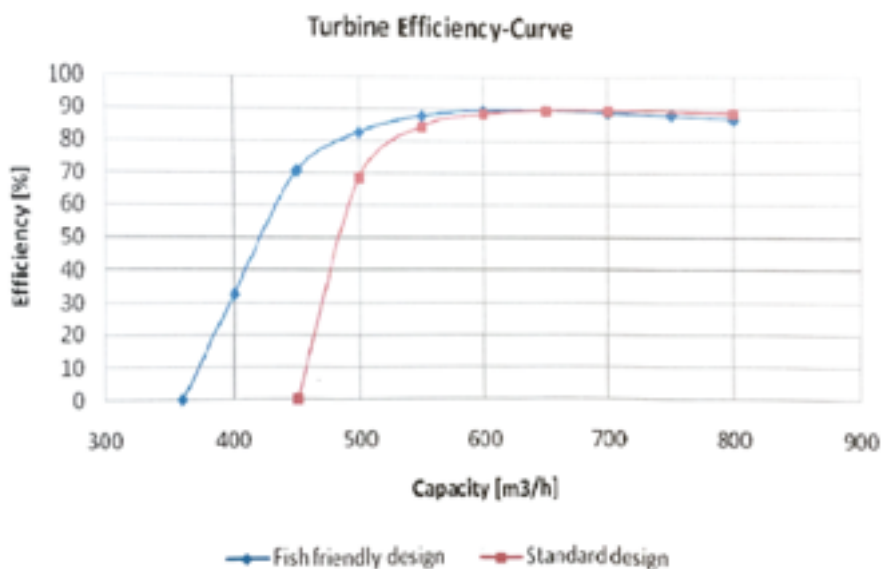
INZET MOGELIJKE INNOVATIEVE TURBINES

Fish Flow Innovations heeft een turbines ontwikkeld die in twee richtingen met hoog rendement (> 80%) functioneren. Inmiddels heeft het bedrijf een opdracht voor het plaatsen van dergelijke turbines tussen eilanden in Indonesië (Tidal Bridge project) onder een nieuw te plaatsen brug. Deze locatie is ideaal omdat op de grens van 2 oceanen een vrijwel continue stroomsnelheid voorkomt van meer dan 5 m/s. Deze turbines zijn ook geschikt voor diepe geulen met getijdenstroming groter dan 3 m/s.

De turbines worden afgezonken en onderhoud vindt plaats door lucht te persen in de onderliggende fundatie, waardoor de turbines boven water komen. De turbines zijn visvriendelijk.



Afbeelding 6
Freeflow visvriendelijke turbines
van Fishflow Innovations



Afbeelding 7
Turbine rendement

CONCLUSIE

De opwekking van duurzame energie is technisch mogelijk. Echter, we stellen vast dat stroomopwekking uit de getijdenstroming in dit deel van het Waddengebied in economisch opzicht niet zinvol is.

Variant 2 Energieopbrengst uit het verval van de Cleveringsluizen in huidige situatie

Indien op basis van de huidige spuiactiviteit in elk van de kokers 2 turbines van elk 3 m worden geplaatst dan geldt het volgende:

Op basis van de gemiddelde stroomsnelheid kunnen geen betrouwbare waarde worden berekend van de potentiële energie, omdat de vermogensfactor een weging heeft van de snelheid tot de 3-de macht. Daarom is voor elk kwartier bij het gemeten voorkomende verval uit de gegevens van de database de energieopbrengst berekend voor het uitgaande spuivolume. De investeringsruimte is bepaald voor een pay-out van 10 jaar

Alleen spuien huidig regime	kWh/jaar	Spuiregime open/dicht	Investeringsruimte
Scenario 1			
Maximale opbrengst	1.073.008	verval > 0 m	€ 1.416.370
Scenario 2			
Maximale opbrengst bij 760 uur spuien	1.132.183	verval > 0,12 m	€ 1.494.482

Verval	Max	2,07 m
	Gem	0,40 m
Bij peil Lauwersmeer		-0,90 m

Stroomprijs	SDE+ 2018	€ 0,092 per kWh
Verkoop stroom		€ 0,040 per kWh
Totaal		€ 0,132 per kWh

Door het plaatsen van turbines wordt de spuicapaciteit van het complex verkleind. Enerzijds omdat de turbines een gezamenlijk oppervlak hebben van 169 m² tegen over het spui oppervlak van de gezamenlijke kokers van (5 - 0,90 NAP) m x 120 m = 496 m². Daarnaast hebben de turbines ook een zekere weerstand. Om het zelfde debiet van 1,229 miljard m³ te spuien hebben de turbines 760 uur nodig. Indien onverhoopt meer gespuid zou moeten worden dan kunnen de turbine deuren worden geheven.

ENERGIEOPBRENGST MET INLATEN EN UITLATEN GEBRUIKMAKEND VAN MAXIMALE SPUICAPACITEIT

Een interessante optie ontstaat om in principe altijd te spuien en het peil te herstellen door zout water vanuit de Waddenzee in te laten. Wij hebben daarbij de energieopbrengst berekenend voor de grenzen van het peil in met Lauwersmeer van -0,90 m NAP voor zowel spuien als inlaten. Hierbij moet netto 1,229 miljard m³ gespuid worden per jaar om de gewenste run-off van waterstromen naar het meer plus de regenval af te kunnen voeren.

Vanuit deze randvoorwaarden is de energieopbrengst berekend met 24 turbines van elk 3 m en een maximum vermogen per turbine van 100 kW:

Spuien			
Peil m NAP	m3	kWh	uren
-0,90	2.622.900.373	1.205.081	1.735

Inlaten			
Peil m NAP	m3	kWh	uren
-0,90	1.393.405.119	990.954	273

Totaal resultaat van maximaal spuien en gedoseerd inlaten variant 2			
m3 netto spuien	kWh	uren	Turbine vermogen per stuk in kW
1.229.495.254	2.196.035	2.009	100

Opbrengst 2.196.035 kWh	per kWh
Verkoop stroom	€ 0,040
SDE+ zuivere netlevering	€ 0,092
	€ 0,132
Onderhoud	€ 0,020
Netto opbrengst	€ 0,112
Jaaropbrengst	€ 245.956
Investeringsruimte	
Bij gewenste payout van 10 jaar	€ 2.459.560

Bij deze optie bedraagt de investeringsruimte voor turbines per kW turbinevermogen € 1.025
Het lijkt niet waarschijnlijk dat voor deze prijs in de markt turbines te verkrijgen zijn.

CONCLUSIE

De opwekking van duurzame energie is technisch mogelijk maar we stellen vast dat de investeringsruimte te beperkt is om de turbines te realiseren.

Variant 3 Energie uit de R.J. Cleveringsluizen, bij herintroductie gedempt getij op het Lauwersmeer (gemiddeld waterpeil - 0,90 m NAP)

In deze variant is berekend wat de maximale stroomopbrengst kan zijn met de volgende randvoorwaarden:

1. De huidige run-off te realiseren voor het achterland (1,229 miljard m³/jaar)
2. We gaan daarbij uit van een maximaal peil niveau van -0,50 m NAP in het Lauwersmeer
3. Inlaat van zeewater en deze hoeveelheid direct weer te spuien met een minimaal peilniveau in het Lauwersmeer van -1,27 NAP

Indien altijd gespuid wordt bij een positief verval dan geldt met 24 turbines met een diameter van 3 m en een vermogen van 100 kW per turbine:

Spuien			
Peil m NAP	m ³	kWh	uren
-0,50	5.155.067.973	3.347.751	2.699

Inlaten			
Peil m NAP	m ³	kWh	uren
-1,27	3.925.572.719	2.574.053	703

Totaal resultaat van maximaal spuien en gedoseerd inlaten variant 2			
m ³ netto spuien	kWh	uren	Turbine vermogen per stuk in kW
1.229.495.254	5.921.804	3.402	100

Uitgaan van een gemiddeld stroomverbruik per huishouden in Noord Nederland van 3.000 kWh stroom per jaar, is af te leiden dat de R.J. Cleveringsluizen stroom kunnen leveren voor bijna 2.000 huishoudens. Daarnaast draagt het opwekken van stroom met de R.J. Cleveringsluizen bij aan de CO₂ reductie met ruim 3.800.000 kg per jaar.

www.co2emissiefactoren.nl/lijst-emissiefactoren

RENTABILITEIT VOOR SCENARIO 3 SPUIEN EN GEDOSEERD INLATEN

De rentabiliteit van deze variant is bepaald en deze biedt met een gewenste pay out van 10 jaar een investeringsruimte van 6,6 mln. Eur. Voor deze investeringsruimte zijn er turbines te koop in de markt.

Opbrengst	per kWh
Verkoop stroom	€ 0,04
SDE+	€ 0,09
	€ 0,13
Onderhoud	€ 0,02
Netto opbrengst	€ 0,11
Jaaropbrengst	€ 663.242
Investeringsruimte	
Bij gewenste payout van 10 jaar	€ 6.632.420
Aantal turbines	24
Vermogen per turbine	100 kW
Investeringsruimte per turbine	€ 276.351
Investeringsruimte per kW turbine vermogen	€ 2.764

CONCLUSIE

Deze variant is technisch en economisch haalbaar.

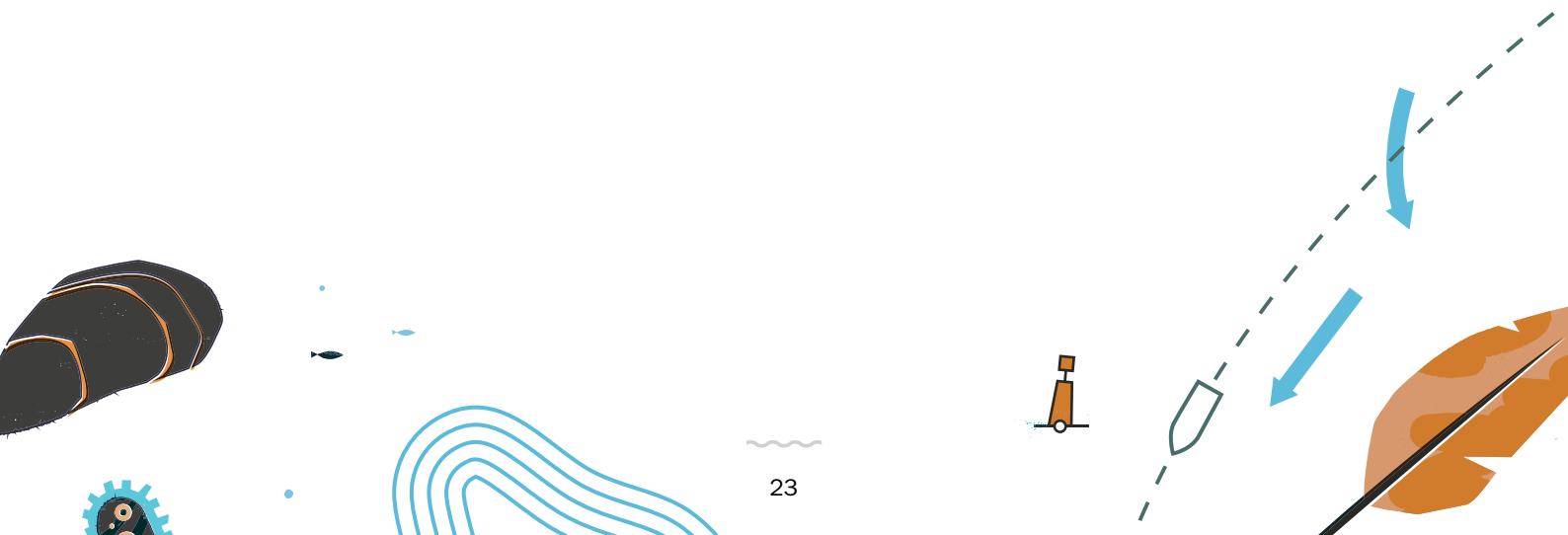
4. Productie van waterstof



Voor de productie van waterstof met elektrolyse inclusief het verbruik van randapparatuur en het op druk brengen van de geproduceerde waterstof tot 600 bar is circa 60 kWh per kg benodigd. We gaan ervan uit dat de stroom geproduceerd door de turbines rechtstreeks afgenomen wordt door de electrolyzers voor waterstofproductie. In de relatief korte periodes (5% van de tijd) van omschakeling van spuien en inlaten wordt stroom van het openbare net betrokken tegen een prijs van € 0,07 /kWh.

We gaan ervanuit dat van de totale stroomproductie 60% ingezet wordt voor de productie van waterstof; hetgeen leidt tot de volgende rentabiliteitsopstelling:

Kostprijs per kWh (eigen gebruik voor productie waterstof)		
Afschrijving	15 jaar	
Capex turbines (*)	€ 1.750 / kW	
Totale investering voor 24 turbines		€ 4.200.000
Kosten afschrijving per jaar		€ 280.000
Kostprijs analyse		
		per kWh
SDE + (eigen gebruik) (**)		€ 0,0620
Onderhoud	af	€ 0,0200
Afschrijving	af	€ 0,0473
Netto kosten stroom voor eigen gebruik uit turbines		€ 0,0053
Kosten voor aanvullend stroom uit het net		
Suppletie 5 % van de productie		€ 0,0035
Totaal kosten eigen stroom		€ 0,0088



Netto kosten stroom voor eigen gebruik uit turbines	€ 0,0053
Kosten voor aanvullend stroom uit het net	
Suppletie 5 % van de productie	€ 0,0035
Totaal kosten eigen stroom	€ 0,0088
Energie kosten per kg waterstof productie	€ 0,5270
Verkoop waarde in markt 2020 - 2025 per kg	€ 4,00
Productie van de totale stroom in kg 60%	€ 59.218
Omzet	€ 236.872
Kosten opwekken stroom met turbines	€ 31.206
Netto omzet	€ 205.666

We kunnen concluderen, dat er met stroom uit de Cleveringsluizen concurrerend waterstof kan worden geproduceerd. De huidige marktprijzen variëren van € 7,50 tot € 9,50 per kg waterstof. Per kg waterstof kan een personen auto 100 km rijden. Met de voorgestelde productie kan dus 6 miljoen autokilometers worden gereden met waterstof.

(*) De kosten van de turbines zijn ingeschat op grond van marktverkenning.

(**) Voor eigen gebruik is een korting van 3 cent aangehouden; in de regelgeving van RVO is deze korting nog niet opgenomen.

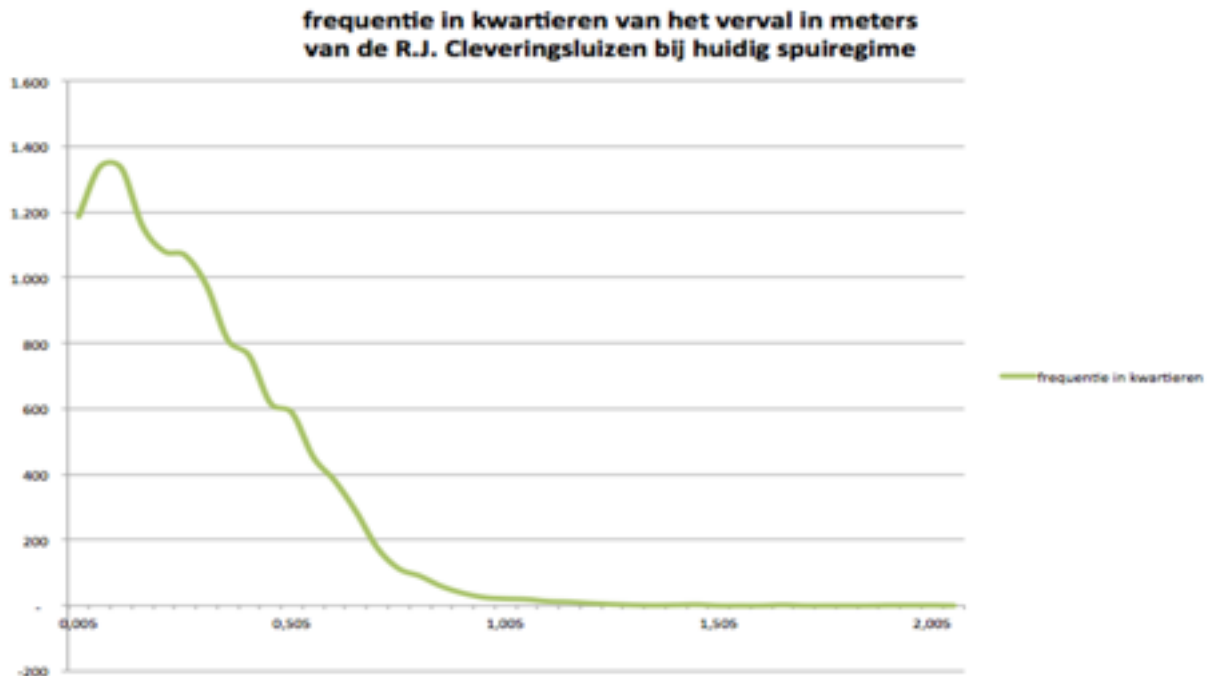
PRIJZEN VAN TURBINES EN SYNERGIE IN BESTAANDE SITUATIES

De prijzen van laag-verval turbines zijn nog te hoog. Als men de componenten vergelijkt met andere grote energie opwekkers zoals WKK installaties dan is de prijs per kW te hoog. Die liggen nu nog in de orde grootte van € 1.500 per kW. Op termijn zou die prijs moeten kunnen dalen naar € 750 per kW.

In beginsel is het verstandig om nieuwe technieken te combineren met bestaande situaties. Dit is bij de Cleveringsluizen bij uitstek aan de orde. De bouwkundige constructie is aanwezig en ook de infrastructuur voor afvoer van stroom.

HET VERVAL

Het verval bij geopende sluisen bepaalt de hoeveelheid water die gespuid kan worden en uiteraard ook de hoeveelheid energie die kan worden opgewekt.



Afbeelding 8 Het spuien gebeurt momenteel bij een relatief laag verval

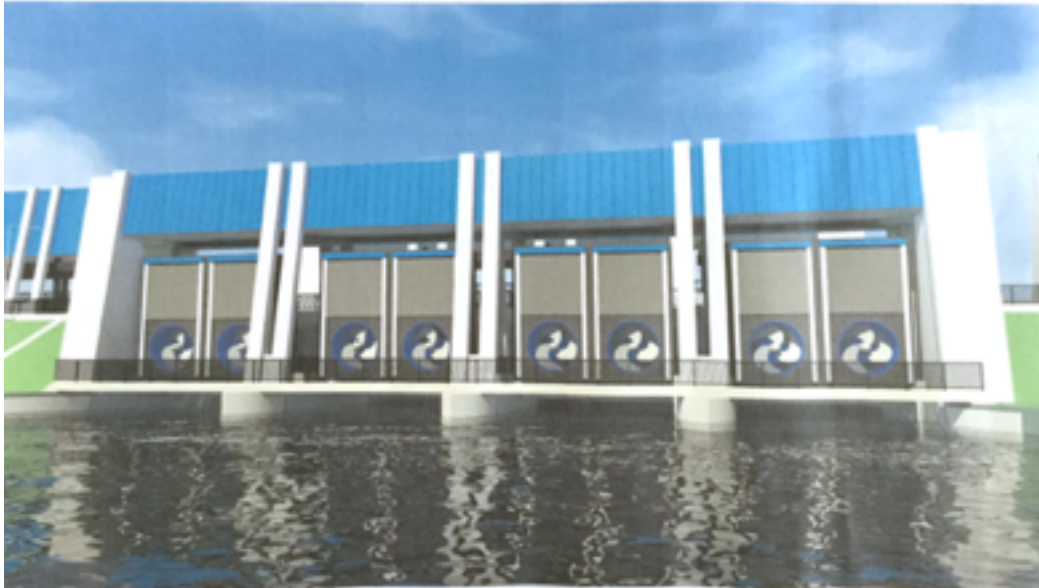
ONDERHOUD EN STROOMSNELHEID

Turbines vervuilen sneller bij lage stroomsnelheden. Bij stroomsnelheden groter dan 5 m/s hebben micro organismen, algen en schaaldieren onvoldoende mogelijkheden om zich te hechten aan de rotoroppervlaktes.

Bij turbinesnelheden lager dan 2 m/s zal er met name in voedselrijke omgevingen als het wad snel aangroei plaatsvinden. De werkingsgraad van de turbines vermindert daarmee aanzienlijk. En frequent onderhoud is dan geboden.

Bij de plaatsing van turbines in de Cleveringsluizen, zal met het oog op regelmatig voorkomende lage snelheden een constructie moeten worden toegepast, waarbij de turbines gemakkelijk schoongemaakt kunnen worden. Dat kan bijvoorbeeld door deze op te nemen in sluisdeuren die gelift kunnen worden.

Bij zeer hoge stroomsnelheden, waarbij turbines op de bodem zijn geplaatst, kunnen kiezels en stenen meegevoerd worden en daardoor de turbinebladen beschadigen.



Afbeelding 9 2 turbines per deur, diameter turbine = 3 m, capaciteit ca. 3.200 m³ per seconde bij gebruik van 8 turbines

OPTIMALISATIE VAN DE STROOMPRODUCTIE VOOR WATERSTOF

Uit de door ons verrichtte analyse is af te leiden dat de periode van spuien en inlaten in scenario 3: 3.402 uur bedraagt. Dat is op zich een werkbare periode, echter voor de productie van waterstof is gewenst dat jaarrond (dus 8.760 uur) stroom geproduceerd wordt.

Waterstof wordt met electrolyzers geproduceerd. Deze processen kunnen goed presteren bij variaties in stroomaanbod van 100 % tot 15%. Stilstand is niet bevorderlijk voor de procesbeheersing en brengt extra kosten met zich mee.

Het is mogelijk om de stroomproductie van de R.J. Cleveringsluizen in scenario 3 gelijkmatiger te verdelen over het gehele jaar om zo een meer rendabele waterstof productie mogelijk te maken.

OVERZICHT VAN VRIJESTROOM TURBINES IN DE MARKT

Diverse bedrijven leveren vrije stroom turbines. Als regel zal voor elke toepassing een maatwerkberekening moeten worden gemaakt. Dit vanwege 2 argumenten:

1. Het vermogen van de turbines varieert enorm met de watersnelheid. Het kengetal "investering in Euro per kW" heeft daarom slechts een indicatieve betekenis
2. Het rendement van een turbine is ook afhankelijk van de watersnelheid. De schoepen worden ontworpen op een optimaal werkingsgebied.

Capex: (Capital Expenditures). Dit is een internationaal begrip voor de totale investeringskosten. Dus turbines inclusief inpassing in de lokale situatie en aansluiting op de net.

Opex: (Operational Expenditures). Dit zijn de onderhoudskosten en bestaan uit een vaste component en een variabele component. ECN heeft deze uit marktonderzoek verkregen kosten gedeuid op € 0,01 - € 0,03 per kWh

TRL: (Technology Readiness Level). In de tabel hierna wordt hiermee aangeduid in welke mate de technologie uitontwikkeld en marktrijp is.

Free flow turbines								
	Vermogen (kW)	Water-snelheid (m/s)	Diameter (m)	Rendement	CAPEX (€/kW)	Vis	TRL	
Tocardo	40 - 200	>1	3-9	30-35%	3.000 -4.000	+	9	www.tocardo.com
Encurrent	5 - 125	>1	1,5 - 5	25-30%	2.500 - 4.000	+	9	www.newenergycorp.ca
Oryon	5 - 150	>1	0,5 -10	25-30%	2.500 -3.000	+	8	www.oryonwatermill.com
Kenetic Hydro-power System	40	>1	5	30-35%	3.000 -4.000	+	8	www.verdantpower.com
Wave rotor	30	>1	5	30-35%		+	8	www.ihcmerwede.com
Vivace	1 - 100	>1	Trilling			++	8	www.vortexhydroenergy.com
Water 2 Energy	10		2	25 - 30%		++	8	www.water2energy.nl
Fishflow	5 - 200	>1	2 - 12	35 - 42%	1.500 -2.000	++	8/9	www.fishflowinnovations.nl

5. Aanvullende aspecten

Vergunningen

Hoewel in het kader van deze quick scan geen detailstudie is verricht naar de vergunningen die noodzakelijk zijn om energie uit getijden in het Waddengebied te kunnen winnen, willen wij er graag op wijzen dat in analogie met andere studies zoals in de provincie Zeeland vergunningstrajecten snel opgestart moeten worden, omdat deze gezien de doorlooptijd op het kritieke pad liggen. Onderstaande tabel geeft een indruk van betrokken instanties.

Wet en regelgeving	Procedure periode
Wet milieubeheer Ex. art 8.41 lid 1	Parallel aan ruimtelijke procedure
Wet milieubeheer Ex. art. 10.52	Parallel aan ruimtelijke procedure
Wabo Ex. art 2.1 lid 1 onder e	26 weken
Mijnbouwwet Ex. art 40 , Ontgrondingenwet	26 weken
Natuurbeschermingswet 1998 Hoofdstuk III, Titel 2 Ex. art 16 (natuurmonument) Ex. art 19d (natura-2000 gebied)	26 weken
Wet bodembescherming Ex. art 28 Wbb	12 weken
Flora en faunawet Ex. art 75, lid 3 Hoofdstuk V, Titel 3, afdeling 2a	16 weken
Waterwet Ex. art 6.2, Ex. art 6.3, Ex. art 6.8, Ex. art 5.4, eerste lid, Wtw	26 weken
Besluit algemene regels voor inrichtingen milieubeheer Besluit lozen buiten inrichtingen Besluit bodemkwaliteit Projectplan	
Wet ruimtelijke ordening	26 weken
Ex. art 3.2 Wro (tijdelijke ontheffing bestemmingsplan) Ex. art 3.26 lid 4, art 3.28 lid 4 (inpassingsplan) Ex. art 3.38 lid 6 (beheersverordening)	
Scheepvaartverkeerswet	8 weken

Energiewinning en interactie met fauna en waterverkeer

SCHADE VOOR VOGELS

Vogels die op vis jagen onder water kunnen bij diepere duiken verstrikt raken in turbines. Toegang tot turbinekokers zal daarom met gaaswerk belemmerd moeten worden.

SCHADE VOOR VISSSEN EN ONDERWATER DIEREN

Nederland telt vele dammen in rivieren. “Het probleem met de huidige turbines in dammen is dat deze niet voldoende visvriendelijk zijn”, oordeelt Ackermans (bron 12). Op dit moment staan de stuwen in de Maas en Rijn uit. In rivieren kan energie uit stromend water worden gehaald. Ook worden vanuit Rijkswaterstaat veel natte kunstwerken vernieuwd. Een sterftcijfer van minder dan één procent lijkt politiek en ecologische acceptabel. Bedrijven als Fish Flow Innovations hebben inmiddels concepten getest en ontwikkeld, die beschadiging van vissen tot minder van 1 % bepreken.

Scheepsschroeven zijn grote potentiële moordenaars van vissen. Vooral bij laag water in de rivieren en op het wad produceren de schroeven een aanzuigende werking waar vissen niet aan kunnen ontkomen. Studies hebben laten zien dat bijvoorbeeld op de Rijn 50 – 60% van de vissen worden doodgeslagen door schroefwerking bij laag water.

SCHADE VOOR VISSERIJ & SCHEEPVAART

Turbines met grotere vermogens onder water zijn tamelijk forse constructies. Deze zullen met boeien gemarkeerd moeten worden en opgenomen worden op zeekaarten

SCHADE VOOR TOERISME

Het vaartoerisme zal als regel geen hinder ondervinden van goed gemarkeerde onderwaterturbines. Voor de duiksport is het opletten geblazen. Turbines functioneren optimaal bij grote stroomsnelheden en duikers zullen de locaties waar turbines zijn moeten mijden om ongelukken te voorkomen.

6. Conclusies en aanbevelingen

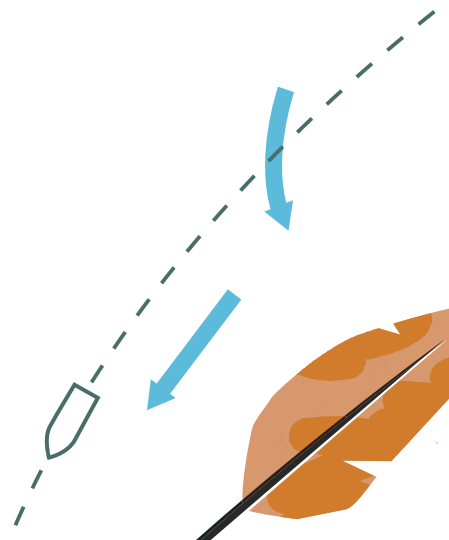
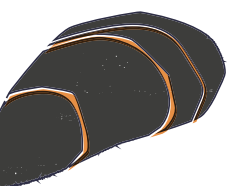


CONCLUSIES

- › De winning van getijdestroom bij Lauwersoog met een gedempt getijde op het Lauwersmeer is technische en economisch haalbaar. Andere onderzochte methoden van winnen van duurzame energie uit waterstromen zijn technisch en/of economisch niet haalbaar;
- › Met de getijdeturbine bij Lauwersoog kan duurzame energie worden opgewerkt gelijk aan het energieverbruik van circa 2.000 huishoudens; en wordt een bijdrage geleverd aan de CO2 reductie met circa 3.800.000 kg per jaar;
- › De inzet van getijde-stroom voor de ontwikkeling van de waterstof-economie in Lauwersoog is technisch en economisch haalbaar. Daarmee wordt de verduurzaming en marktpositie van het lokale bedrijfsleven versterkt.

AANBEVELINGEN

- › Wij bevelen aan om een nadere detailstudie uit te voeren om daarbij een algoritme voor een optimaal spuiregime uit te werken vanuit dynamische simulaties, zodanig dat de stroomproductie gelijkmatig over het jaar verdeeld is;
- › Bij positief resultaat, uitvoer van een pilot in één van de spuicplexen om ervaring op te doen met de winning van getijde-energie op deze locatie.



Bronnen

1. Kwartiergegevens waterstanden ter hoogte van de Cleveringsluizen periode 2010 – 2014 (Waterschap Noorderzijlvest)
2. Stroomsnelheden als functie van de tijd tussen Ameland en Schiermonnikoog (Rijkswaterstaat HP – 33 D NL Tides)
3. SDE + subsidie op waterkracht
www.rvo.nl/sites/default/files/2016/02/Tabel%20Water%20SDE%202017.pdf
4. Investering indicaties van ECN voor turbines 2017
www.ecn.nl/publications/PdfFetch.aspx?nr=ECN-N-17-013
5. Website haven Lauwersoog
<https://www.havenlauwersoog.nl>
6. Low head rendementen van turbines in ondiep water stroming
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/49/10/102005/pdf>
7. De Betz limiet voor turbines wind en vloeistofen
www.coursera.org/learn/wind-for-renewable-energies/lecture/JErMJ/standard-betz-law
8. Wadden in beeld 2017
www.waddenzee.nl/fileadmin/content/Dossiers/Overheid/waddenzeebeheer/WIB-2017-web.pdf
9. Tidal testing Grevelingendam
www.anteagroup.nl/sites/default/files/files/Tidal-testing-centre_Grevelingendam.pdf
10. Eerste stappen richting getijdenenergiecentrale op de Grevelingendam
www.anteagroup.nl/sites/default/nl_antea_files/Tidal%20Test%20Centre%20Schelde%20Kringen.pdf
11. Fish Flow innovations visvriendelijke turbines uit Medenblik
fishflowinnovations.nl/innovaties/vrije-stromingsturbine
12. Energie uit de Schelde
www.anteagroup.nl/sites/default/nl_antea_files/Tidal%20Test%20Centre%20Schelde%20Kringen.pdf
13. Stroomsnelheden in het Vierhuizengat (max 1,2 m/s slide 21)
www.slideshare.net/deltaressoftwaredagen/dsdnl-2018-geulmanagement-vierhuizergat-paarlberg

PROGRAMMA **NAAR EEN
RIJKE WADDENZEE**

WWW.RIJKEWADDENZEE.NL

 [@RIJKEWADDENZEE](https://twitter.com/RIJKEWADDENZEE)

