Aan:	De heer P. Van Dijken
Onze referentie:	Offerte 2018-20 en uw daarop gebaseerde opdracht dd. 29 juni 2018
Datum:	21 augustus 18

Onderwerp:	Quick scan energie op en rondom zeedijk tussen Lauwersoog en Dijkmagazijn

Geachte heer van Dijken,

Op grond van door ons verzamelde gegevens de door de heer Otten versterkte gegevens, bieden wij u een rapport van onze quick-scan aan.

Wij zullen dit rapport zoals u verzocht toelichten en stemmen de daartoe geschikte datum en plaats met u af.

Voor eventuele eerdere vragen en gewenste toelichtingen zijn wij uiteraard bereikbaar.

Conform afspraak zullen wij u voor onze werkzaamheden € 3.586,- excl. BTW declareren.

Met vriendelijke groet,

Ir. W.L. Walraven,

Secretaris Humsterland Energie, tel. 06 53 122 571

- Humsterland Energie –
Handelsnaam van Stichting Middag Humsterland Duurzaam
Buitensingel 90 - 9883 SK Oldehove. The Netherlands.
Telefoon (062) 3960244
www.humsterlandenergie.nl

Uw bedrijfsgegevens

Bedrijf	Waterschap Noorderzijlvest Stedumermaar 1 | 9735AC | Groningen Postbus 18 | 9700 AA | Groningen
Projectnaam	Verkenning naar geschikte technieken voor opwekken energie op en rondom de zeedijk
Contactpersoon en telefoon	de heer Peter van Dijken, 06 38 74 39 04
Mail	P.vanDijken@noorderzijlvest.nl e.ottens@noorderzijlvest.nl

Inhoudsopgave

Samenvatting **4**
Rentabiliteit *4*
Zonnepanelen op terrein van 3,5 hectare nabij de dijk *4*
Zonnepanelen op de dijk *5*
Getijden stuw (Dynamic Tidal Power) *6*
Zwermmolens *7*
Maanenergie: energie uit getijdenstroom met hevels *8*
Energie opwekken uit de R.J. Cleveringsluizen *9*
Energie opwekken variant 1; alleen spuien bij peil - 0,90 m NAP 9
Energie opwekken variant 2; spuien en inlaten bij peil -0,90 m NAP 9
Energie opwekken variant 3; spuien bij max peil -0,50 m NAP en inlaten bij min peil -1.27 NAP 10

Zonnepanelen op terrein URM 001382 – 3,5 hectare **12**
Optimale hoek in veldopstelling *12*
Optimale keuze en rentabiliteit veldopstelling *15*
PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM - PV GIS 17
Diffuus licht en plantengroei onder panelen *18*
Effect van diffuus licht op ecosystemen 18
Lichtdoordringing in gewassen 18
Leefgebied voor bloemverstuivers (bijen…) 18
Pilots voor opslag van elektriciteit *18*
Waterstof 19

Zonnepanelen op de zeedijk **21**
Investering en rentabiliteit *22*
Aandachtspunten voor de constructie *23*

Getijden stuw **27**

Zwermmolens **31**
Energie uit wind *31*
Verhoogde windsnelheid door stuwing over de dijk *31*
Kerngegevens van windmolens 32

De theoretisch ideale molen. 33
Tip Speed Ratio, TSR 33
Investeringsruimte zwermmolens *36*
Opbrengsten van windmolens over de jaren heen 39
Aanbevelingen 39

Maanstroom – hevels over de zeedijk van kwel naar geulen **40**

Aanbevelingen **43**

Getijdencentrale in combinatie met de R.J Cleveringsluizen **44**
Fysieke eigenschappen van het spuicomplex 45
Runoff, regenwater en verdamping 47
Variant 1 49
Variant 2 50
Variant 3 52

Geraadpleegde literatuur **54**

Samenvatting

Rentabiliteit

Voor de beschouwde energieopties hanteren wij de volgende criteria:

a. Investeringsruimte. Daarbij wordt aangegeven hoeveel de investering mag kosten bij een terugverdientijd van bijvoorbeeld 10 jaar. Dit criterium wordt gebruikt als niet helder vaststaat hoe groot een specifieke investering is, maar wel berekend kan worden wat de jaarbaten zijn.
b. Terugverdientijd. Dat is de periode in jaren dat een investering is terugverdiend. Bij de terugverdientijd wordt het volume aan inkomsten over de periode na de terugverdientijd niet gewogen.
c. Netto contante waarde. Daarbij worden de jaarlijkse baten verdisconteerd naar investeringsmoment tegen een rentepercentage minus de investeringskosten. We gaan daarbij in dit rapport uit van een periode van 15 jaar (de SDE+ periode) tegen een rentepercentage van 4%.
d. De interne rentevoet (IRR). Over een beschouwde projectperiode (vaak de economische levensduur) wordt bepaald wat het gemiddelde rendement is van een investering uitgedrukt in een rentepercentage.

In dit rapport zijn alle prijzen exclusief BTW. 1 kWh niet fossiel opgewekte stroom vermijdt 0,69 kg CO2. Een gemiddeld huishouden gebruikt landelijk 3.600 kWh elektriciteit en in het Lauwersmeergebied 3.000 kWh.

Zonnepanelen op terrein van 3,5 hectare nabij de dijk

Voor een veldopstelling worden meerdere panelen op een onderconstructie gemonteerd in stacks. De stacks moeten een bepaalde onderlinge afstand hebben waardoor onderlinge over-schaduwing wordt voorkomen.

We hebben gekeken naar de optimale netto contante waarde in 15 jaar om zo de optimale hoek van de stacks te bepalen. Een hoek van 36° levert de meeste opbrengst per paneel maar leidt tot een grotere afstand tussen de stacks, waardoor er per saldo veel minder panelen per hectare kunnen worden geplaatst en de veld opbrengst lager is. Een hoek van 16° leidt tot het beste resultaat. Hierbij is machinaal onderhoud van de paden goed mogelijk en de diffuse lichttoetreding onder de panelen voldoende voor de groei van gras ten behoeve van eventuele schapenbeweiding.

Productie in kWh/jaar bij 16° stackhoek met totaal 9.300 panelen			2.471.143 kWh
Investering € 1.987.763			
		€/kWh	
Opbrengst	SDE+ najaar 2018	0,0610	
	Verkoop stroom	0,0400	
		0,1010	
	Onderhoud verzekering/..	0,0080	
		0,0930	€ 229.816

Terugverdientijd $\frac{\text{€ 1.987.763}}{\text{€ 229.816/jaar}}$ = 8,6 jaar

Netto contante waarde in 15 jaar bij 4% rente € 732.387

Zonnepanelen op de dijk

Op het dijkvlak van Lauwersoog richting de slagboom van het defensie terrein (1.400 m) hebben wij zonnepanelen geprojecteerd. Randvoorwaarden zijn daarbij:

1. Beworteling van de grasmat moet in tact blijven, door voldoende lichttoetreding en bevochtiging
2. Schapen moeten kunnen grazen en zo de grasmat onderhouden door de hoefdruk, de uitwerpselen en het grazen.
3. De zichtlijn van de dijk moet niet verstoord worden. Panelen mogen dus van zeezijde niet zichtbaar zijn.
4. Stormbestendig.

Vanwege de ligging van het dijkvlak kan de opgewekte elektriciteit goed afgevoerd worden naar de haven en zo bijdragen aan verduurzaming van de haven. De productie van het dijkvlak is voldoende om 75% van de stroombehoefte het Werelderfgoedcentrum af te dekken.

Aantal panelen	5.600	
Wattpiek per paneel	280	Watt
Maximaal vermogen	1.568	kW
Hellingshoek panelen ten opzicht van horizon	20°	

Productie in kWh/jaar			1.473.920
		€/kWh	
Opbrengst	SDE+ najaar 2018	0,0610	
	Verkoop stroom	0,0400	
		0,1010	
	Onderhoud verzekering/..	0,0080	
		0,0930	€ 137.075

Terugverdientijd $\frac{1.225.000}{137.075}$ = 8,9 jaar

Netto contante waarde in 15 jaar bij 4% rente € 299.048

Extreme stormvlagen met een snelheid van 130 km per uur kunnen tegen de dijk aanwaaien. Die windkracht wordt door het opstuwend effect van de dijk nog groter. Bij ongunstige windhoeken kan de liftkracht op een vlakke plaat zoals een zonnepaneel 200 - 350 kg per m2 worden. Daarop moet de verankering berekend zijn.

Getijden stuw (Dynamic Tidal Power)

We hebben vast gesteld dat stuwen substantieel kunnen bijdragen aan duurzame energieopwekking. Miljoenen huishoudens kunnen van stroom worden voorzien door stuwen in de Noordzee. Echter getijdenstuwen zijn grote constructies. De lengte in km van de stuw vermenigvuldigd met de getijdenstroom snelheid moet 40 of meer bedragen voor een substantiële opbrengst. Dat houdt in dat bij een getijdenstroom van 2 m/s een stuw van 20 km aangelegd moet worden. Bovendien vraagt de turbine in de stuwconstructie waterdieptes van 25 m – 30 m.

Dergelijke omstandigheden zijn niet aanwezig in het Waddengebied. Wel aan de Noorzeezijde van de eilanden. Richting Duitse bocht zijn de stroomsnelheden groter, waterdiepte voldoende en verschil tussen eb en vloed behoorlijk, waardoor de potentie van stuwen ook groter is. Combinatie met de bestaande en geplande windmolenparken op zee lijkt een aantrekkelijke optie.
Stuw constructies moeten behandeld worden als een nieuw energie deltaplan. Humsterland Energie kan een haalbaarheid studie uitvoeren in 2 fases geprojecteerd op de Noordzee. A. Quick scan haalbaarheid. B. Verdiepingslag met stakeholders. In samenwerking met ondermeer:

- Bodemstroming en sediment transport deskundigen (Deltares);
- Vloeistofmechanica en betonwerk experts (Antea)
- Martiem Ecoloog (Natuur en Milieu)
- Betonwerk deskundigen voor constructies in zee
- Stroom afvoerexpertise (Tennet)
- Markt en marktontwikkeling (Eneco)
- Maritieme experts visserij en scheepvaart
- Vergunningen in territoriale wateren
- Turbine-experts

Zwermmolens

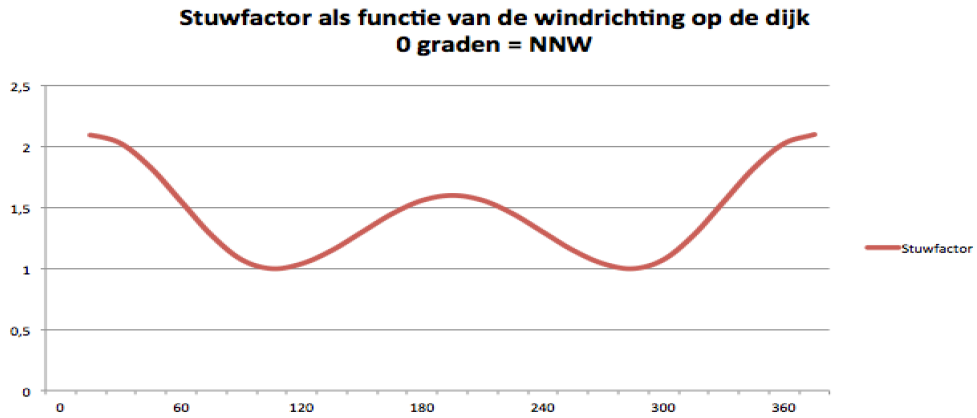
We hebben de term *zwermmolens* geïntroduceerd voor een type kleine niet bijster opvallende molens. Dijken hebben een stuwend effect op de wind. Waardoor het boven de kruin van de dijk 2 tot 2,3 keer zo hard kan waaien. Omdat de opbrengst van een windmolen een 3-de machtsfunctie is van de windsnelheid, levert het plaatsen van windmolens op de dijk beduidend meer productie op dan op een vlakte met eenzelfde windprofiel. Bovendien waait het op de dijk harder dan op land. (De berekeningen zijn gebaseerd op de gesommeerde uur-opbrengst (8760 afzonderlijke berekeningen) voor alle windrichtingen met het uurgemiddelde per windrichting voor het jaar 2017;- bron: KNMI).

Afbeelding 1: EAZ molen met een rotoroppervlak van 113 m2

De opbrengst van een ideale molen met een wind-doorstromend oppervlak van 10 m^2 kevert daardoor in theorie, zonder shut-down maatregelen 36.178 kWh op jaarbasis. Zonder het stuweffect van de dijk zou dat 13.992 kWh zijn.

We hebben een 3 tal kleine molens beschouwd.
De in Groningen toegestane EAZ molen van 13 kW met een as hoogte van 15 m en 2 Chinese molens van 0,4 kW en 5 kW.

Merk en type	Bouw hoogte	As	Generator	Jaar opbrengst	Investering excl. BTW	Pay-out
	(m)		(kW)	(kWh)		(jaren)
EAZ 12	15 - 27	Hor	13	72.328	€ 42.050	7,3
Bang good 0,4 kW	3 - 4	Vert	0,5	1.214	€ 336	3,4
Greef 5 kW	8 - 10	Vert	5	15.111	€ 4.000	3.4



Maanenergie: energie uit getijdenstroom met hevels

Wij hebben onderzocht in welke mate hevels zijn toe te passen met water uit de Waddenzee en een achter de dijk liggende kwel. Voorwaarde voor succesvolle toepassing zijn:

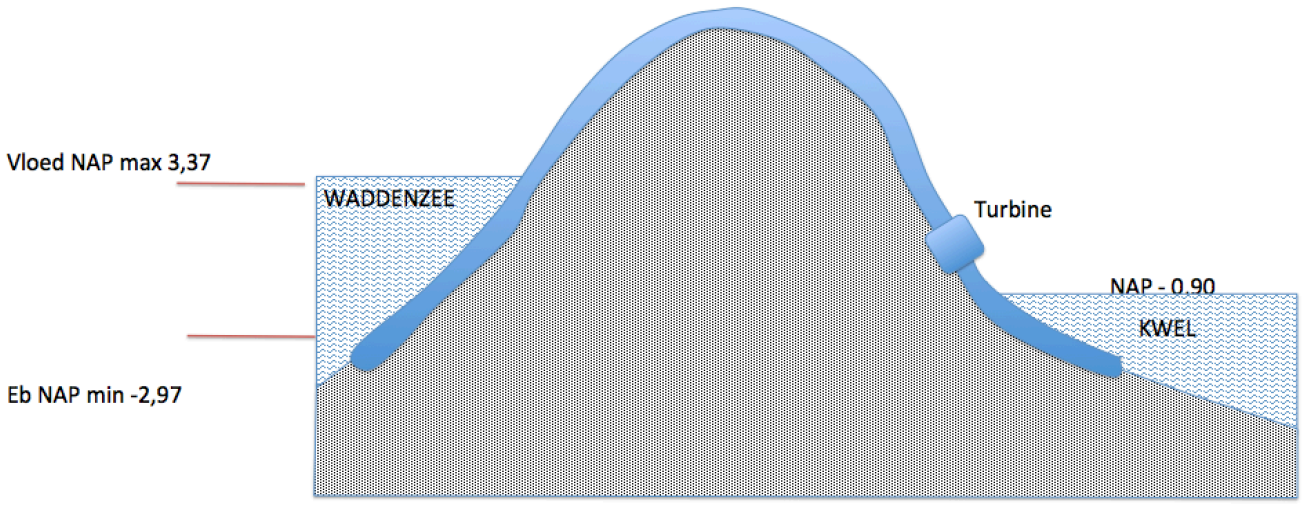
1. Hevel bouwhoogte ten opzichte van de waterhoogtes lager dan 10 m.
2. Nabijheid van de mogelijkheid stroom af te voeren.

Aan de kustweg bestaan locaties die mogelijk zou kunnen voldoen;- de dijkkruinen liggen op 8 m NAP. Voordeel van een hevelprincipe is dat er vrijwel altijd stroming in de hevel is en er dus betrouwbaar en voorspelbaar stroom wordt geproduceerd.
In de nabijheid van de kwel is er een midden spanning stroomaansluiting.

Rentabiliteit

Diameter hevel	1	1,25	1,50	m
Max vermogen	85	133	190	kW
Energie/	82.449	128.148	183.683	kWh/jr

De investeringsruimte voor een hevel bij een terugverdientijd van 15 jaar (SDE+ periode) bedraagt € 363.692. Het waterschap zou een proef kunnen overwegen om hier ervaring mee op te doen.



Afbeelding 2 Schets hevelsysteem over dijk tussen Waddenzee en kwel

Energie opwekken uit de R.J. Cleveringsluizen

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 (m^3/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

Energie opwekken variant 1; alleen spuien bij peil - 0,90 m NAP

Indien turbines in de spuikokers worden geplaatst, dan neemt het spuivolume per tijdseenheid af;- immers het spui-oppervlak wordt minder en ook de weerstand neemt toe door de turbines. Uitganspunt 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	Investerings-ruimte
Scenario 1			
Maximale opbrengst	1.073.008	verval > 0 m	€ 1.416.370
Scenario 2			
Maximale opbrengst			
Spui-uren 760 uur	1.132.183	verval > 0,12 m	€ 1.494.482

Energie opwekken variant 2; spuien en inlaten bij peil -0,90 m NAP

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

Investeringsruimte

Bij gewenste payout van	10 jaar	€ 2.459.560

Energie opwekken variant 3; spuien bij max peil -0,50 m NAP en inlaten bij min peil -1.27 NAP

Deze variant is analoog aan variant 2 echter met andere peil standen. Wij hebben daarbij de energieopbrengst berekenend voor de grenzen van het peil in met Lauwersmeer van maximaal -0,50 m NAP en een minimaal peil van -1.27 m NAP. 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
-0,50	5.155.067.973	3.347.751	2.699

Inlaten

Peil m NAP	m3	kWh	uren
-1,27	3.925.572.719	2.574.053	703

Totaal resultaat van maximaal spuien en gedoseerd inlaten variant 3

m3 netto spuien	kWh	uren	Turbine vermogen per eenheid in kW
1.229.495.254	5.921.804	3.402	100

Opbrengst variant 3		**per kWh**
Verkoop stroom		€ 0,04
SDE+		€ 0,09
		€ 0,13
Onderhoud		€ 0,02
Netto opbrengst		€ 0,11
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

Noot 1: Vanuit het gegeven dat een gemiddeld huishouden in Noord Nederland 3.000 kWh stroom gebruikt per jaar, is af te leiden dan de R.J. Cleveringsluizen stroom kunnen leveren voor bijna 2.000 huishoudens.

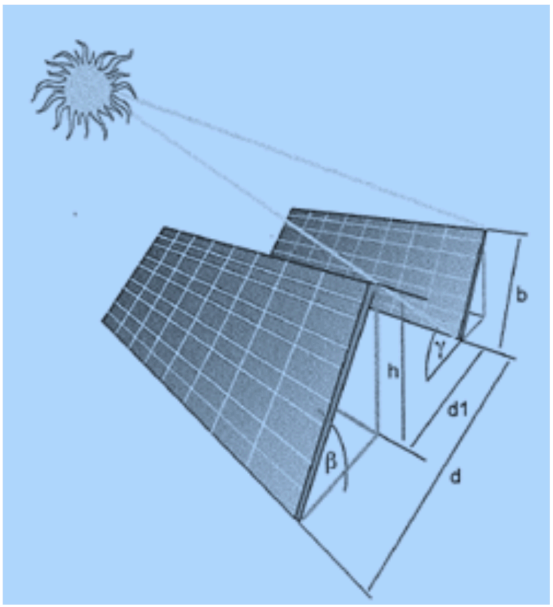
Noot 2: Opwekken van stroom met de R.J. Cleveringsluizen draagt bij aan de CO2 reductie met ruim 3.800.000 kg per jaar

https://www.co2emissiefactoren.nl/lijst-emissiefactoren/

Zonnepanelen op terrein URM 001382 – 3,5 hectare

Optimale hoek in veldopstelling

Voor het toepassen van zonnepanelen gaan we uit van de optimale bezetting van het terrein zodat de beschikbare 3,5 hectare (circa 150 x 233 m) nuttig belegd kan worden. De lengterichting 233 m ligt vrijwel ideaal noord/zuid. De paneelrijen in stacks zullen circa 150 m breed zijn.



Afbeelding 3: maatverhoudingen paneelopstelling

Overschaduwen van panelen moet worden voorkomen. Omdat alle panelen in een string dan minder presteren. Voor de over-schaduwingshoek dient de grootste hoogte van de zon boven de horizon in de winter te worden ingevuld;- dit is in Nederland 14°.

β = hoek zonnepaneel
γ = over-schaduwingshoek
b = paneelstack breedte
d = afstand tussen panelen
d1 = afstand tussen frames
h = effectieve hoogte

Na berekening is te zien dat bij een hoek van 36° de afstand (d) tussen de voorkant van de panelen 5,9 m moet zijn. De afstand tussen de frames (d1) bedraagt dan: 4,56 m, bij een paneelstack breedte b van 1,65 m.

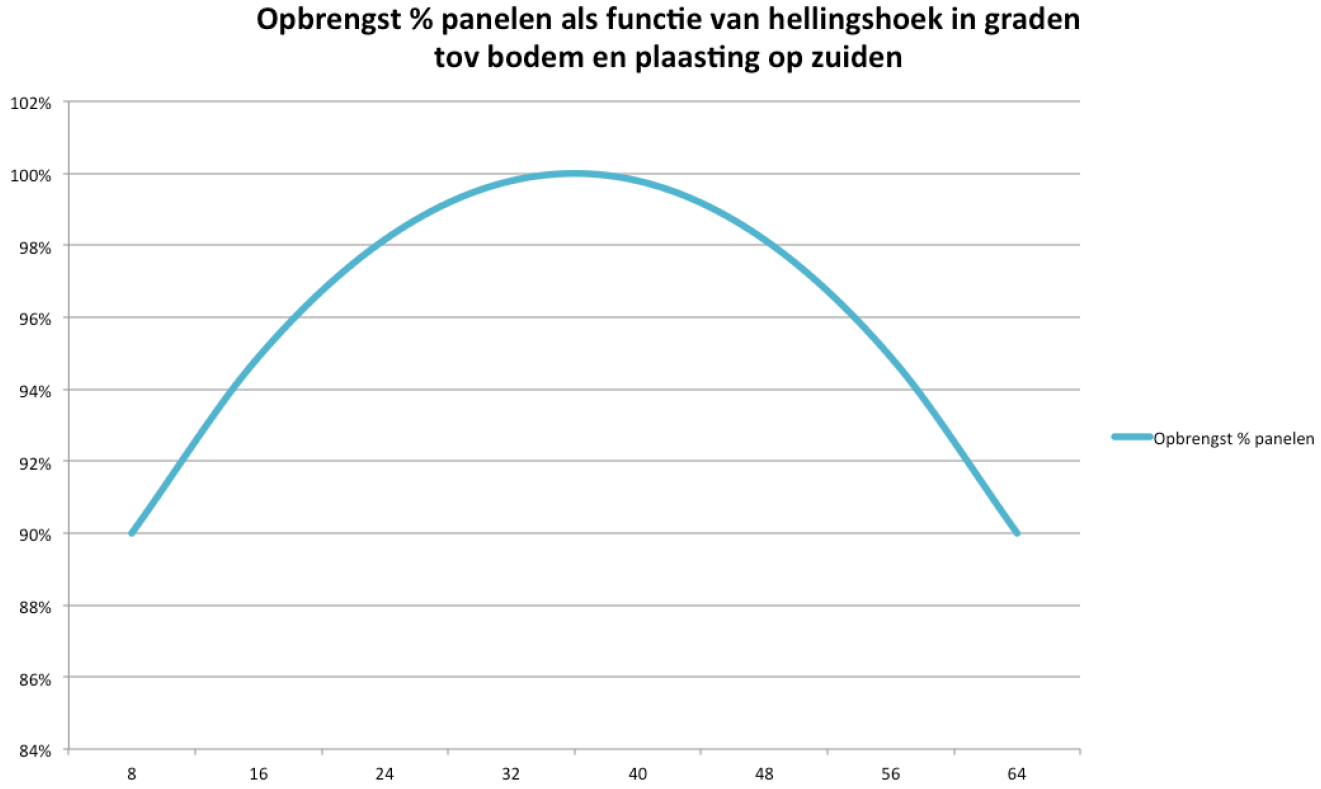
Voor een veldopstelling moeten een aantal criteria in beschouwing worden genomen:

1. De opbrengst in kWh;
2. De terugverdientijd;
3. De totale netto contante waarde in een periode van 15 jaar;- met een rekenrente van 4%;
4. De wens om gewas te laten groeien voor bijvoorbeeld schapen;- hoe groter de pad breedte (d1) is des te meer zonlicht zal toetreden;
5. De mate waarin machinaal onderhoud kan worden verricht;- minimale pad breedte van 2,5 m is dan gewenst;
6. Het zelfreinigend vermogen van de panelen; een grotere hoek regent gemakkelijker af.

$$d1 = \frac{\sin(\beta) \times b}{\operatorname{tg}(\Upsilon)} \qquad d = \frac{b \times [(\sin \beta) + \cos(\beta)]}{\operatorname{tg}(\Upsilon)}$$

Bij een gegeven perceellengte L, is het aantal stacks L/d. Voor b geldt de stackbreedte. De beschouwde panelen hebben een formaat van 1,65 x 1 m. Bij 2 panelen in een stack, bedraagt de stackbreedte

3,30m. Op de perceel lengte L van 233m kunnen we 31 stackrijen bij een hellingshoek van 16° plaatsen (zie tabel 2). In elke stack rij van 150 m kunnen 300 panelen van 1 m breed worden opgenomen.



Afbeelding 4: relatie opbrengst en hellingshoek; de optimale hellingshoek in Nederland is 36°.

Onderstaande tabel toont de uitkomsten voor verschillende hellingshoeken in de veldopstelling op het zuiden;- NCW = netto contante waarde.

Hellingshoek in graden	Opbrengst % panelen	opbrengst (kWh/jaar)	Investering totaal	opbrengst (euro/jaar)	Payout	NCW (4%,15 jaar)
8	90,0%	3.250.800	2.745.334	302.324	9,08	€ 832.960
16	94,9%	2.471.143	1.987.759	229.816	8,65	€ 732.387
24	98,2%	2.061.429	1.608.971	191.713	8,39	€ 661.538
32	99,8%	1.760.400	1.356.446	163.717	8,29	€ 585.471
40	99,8%	1.592.743	1.230.184	148.125	8,31	€ 529.712
48	98,2%	1.401.771	1.103.921	130.365	8,47	€ 449.845
56	94,9%	1.275.429	1.040.790	118.615	8,77	€ 378.006
64	90,0%	1.134.000	977.659	105.462	9,27	€ 290.567

Tabel 1: relatie tussen hellingshoek en rentabiliteit in een veldopstelling

De terugverdientijd is maximaal bij een hellingshoek van 36°. Echter de netto contante waarde is hoger bij een veldbezetting met lagere hellingshoeken. Daarom bezien we de criteria onderhoud, gewasgroei en de mogelijkheid om vee te laten grazen om een afgewogen advies te geven.

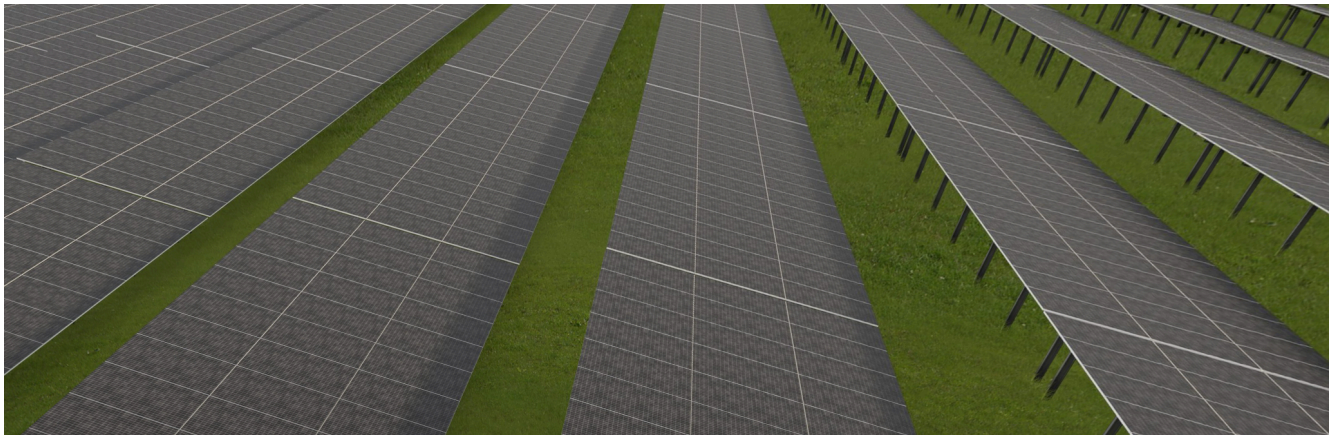
Hellingshoek in graden	Aantal stacks per perceel breedte van circa 233 m	Aantal panelen	Vermogen (kW)	d1 (m)	h (m)	d (m)
8	43,0	12.900	3.612	2,16	0,46	5,43
16	31,0	9.300	2.604	4,28	0,91	7,45
24	25,0	7.500	2.100	6,31	1,34	9,33
32	21,0	6.300	1.764	8,23	1,75	11,03
40	19,0	5.700	1.596	9,98	2,12	12,51
48	17,0	5.100	1.428	11,54	2,45	13,75
56	16,0	4.800	1.344	12,87	2,74	14,72
64	15,0	4.500	1.260	13,95	2,97	15,4

Tabel 2: relatie tussen hellingshoek en pad breedte (d1), afstand tussen de panelen (d) en het hoogteverschil(h) tussen de stack top en bottom van in dit geval 2 panelen per stack.

In verband met regenwaterafvoer, maaibaarheid en gewasgroei, adviseren wij een hellingshoek van 16 graden. In een stack van 2 panelen met een stack breedte van 2 x 1,65 m per rij = 3,30 m.

De laagste hoogte van de rij wordt 85 cm en de top wordt 176 cm. Dit maakt het veld geschikt voor het houden van schapen. De licht toetreding van diffuus licht maakt gewasgroei goed mogelijk.

De pad breedte (d1) wordt 4,28 m en is daarmee prima machinaal te onderhouden. Ook is hierdoor het machinaal met waterdruk schoonmaken van de panelen prima uitvoerbaar.



Afbeelding 5: Veldopstelling met een stack van 3 panelen in de lengterichting

Optimale keuze en rentabiliteit veldopstelling

Wij adviseren op grond van bovengenoemde criteria de volgende configuratie:

Aantal panelen, uitgevoerd in 2 panelen per stack in lengterichting	9.300		
Wattpiek per paneel	280	Watt	
Maximaal vermogen	2.604	kW	
Hellingshoek panelen	16		
Aanleg van 9300 zonnepanelen op 3,5 hectare (alle prijzen excl. BTW)			€ 1.822.800
Inpassingskosten			
Aansluitkosten netwerkstation Enexis 2,6 mW			€ 46.500
Kabelaanleg naar netwerkstation 1500 m Enexis			€ 75.563
Organisatiekosten (externe deskundigen)			€ 5.000
Monitor en bewaking systeem op alle hoekpunten en bij entree			€ 5.000
800 m Heras hekwerk + entree			€ 15.400
Terrein gereed maken voornamelijk maaien (*)			€ 2.500
Leges voor vergunning			pm
Onvoorzien % van de inpassingsposten	10%		€ 15.000
Totaal			€ 1.987.763
Prijs per Watt-piek turnkey			€ 0,76

(*) Dit is een stelpost die nader gespecificeerd moet worden

Productie in kWh/jaar			2.471.143
		€/kWh	
Opbrengst	SDE+ najaar 2018	0,0610	
	Verkoop stroom	0,0400	
		0,1010	
	Onderhoud verzekering/..	0,0080	
		0,0930	€ 229.816

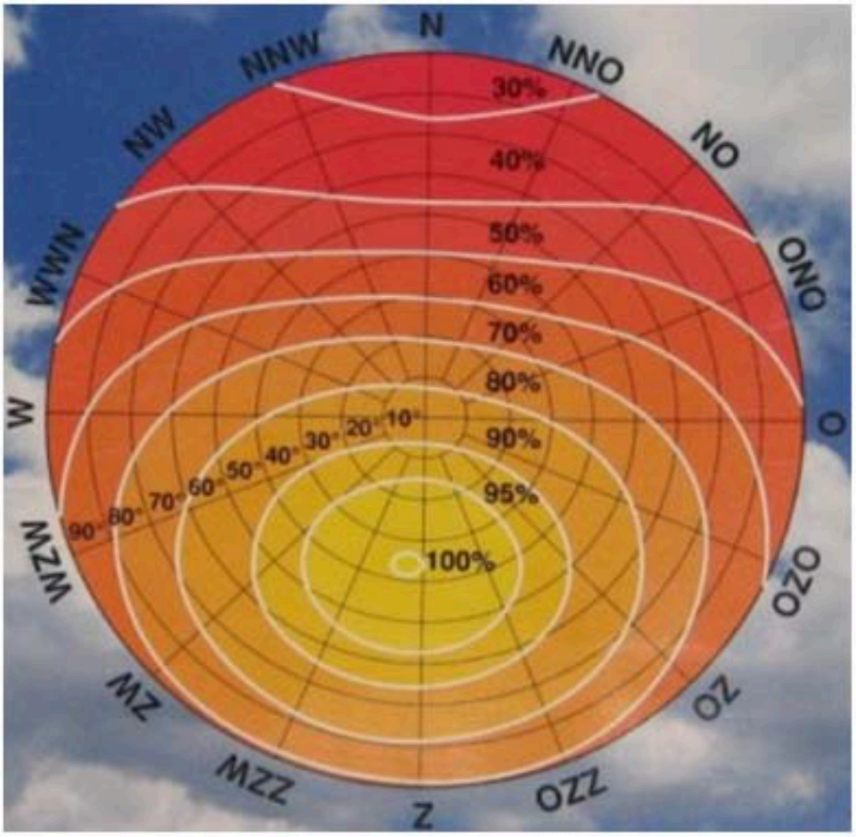
Terugverdientijd $\frac{\text{€ 1.987.763}}{\text{€ 229.816/ jaar}}$ = 8,6 jaar

Netto contante waarde in 15 jaar bij 4% rente € 732.387

Opmerking: Bovengenoemde berekeningen zijn gebaseerd op concrete praktijkcijfers van leveranciers. Fiscale maatregelen als EIA en de kleinschaligheidsaftrek zijn niet meegenomen. De verkoopprijs van stroom is ontleend aan een aanbod van Current, inclusief de bonus voor stroom met duurzame garantie van oorsprong (GVO).

Merk op dat de terugverdientijd bij 16° hellingshoek ruim 6 maanden langer is dan bij het instralingsoptimum van 36°, maar dat de opbrengst gedurende de projectperiode ruim € 170.000 hoger is. Het terrein rendeert dus beter in een veldopstelling met aan kleinere hellingshoek. Dit komt omdat er per hectare veel meer panelen kunnen worden geplaatst, die elkaar niet overschaduwen.

Wij adviseren in ieder geval reeds nu de SDE + aan te vragen om rechten veilig te stellen.



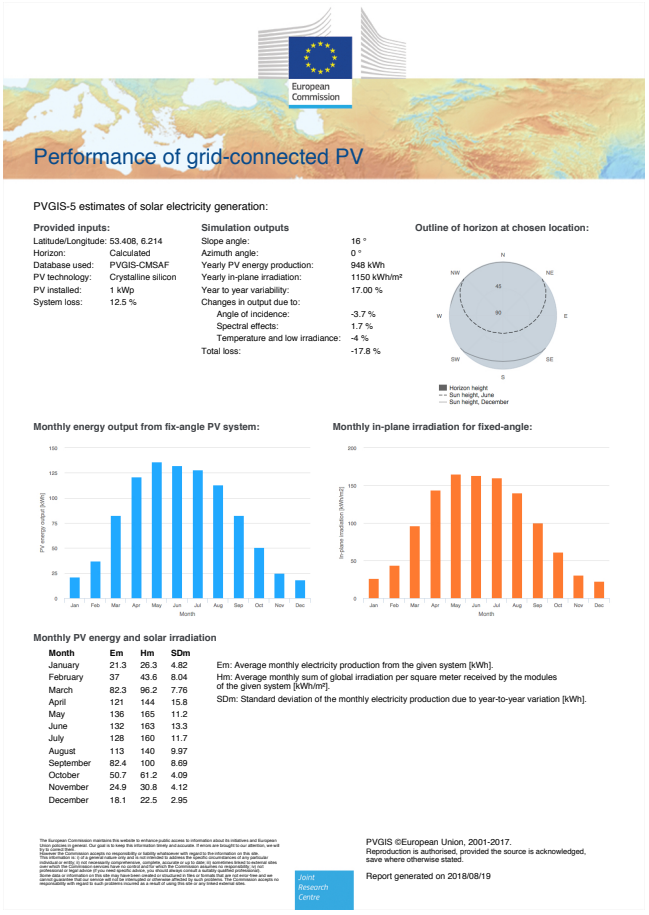
Afbeelding 6 : Optimale hellingshoek en oriëntatie in Nederland van zonnepanelen (Schellekens 2010)

PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM - PV GIS

http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#PVP

De EU heft een nuttige software module ontwikkeld voor de voorspelling van opbrengsten uit de zon PV systemen voor elke locatie wereldwijd te berekenen. Uitgangspunt is hierbij de straling som op een specifieke locatie in een 10 jarig gemiddelde in kWh/m^2. Satelliet metingen worden gecombineerd met de nauwkeurige metingen van weerstations. De afwijking tussen resultaten van het PV-GIS en bijvoorbeeld het weerstation Cabauw in ons land is +/ 0,4%. Wij concluderen daarom dat dit tool uitstekend gebruikt kan worden voor PV systemen in Nederland. Bekend moeten zijn:

- Het type paneel en de locatie
- De typische systeemverliezen (kabelverliezen, omvormerverliezen/ stof/ sneeuw/ degradatie e.d. tot aan de geijkte meters om de afgifte aan het net te meten. Goede systemen halen 8 tot 14 %.
- Het PV-GIS berekent vervolgens opbrengst op jaarbasis. Voor het stuk grond van 3,5 hectare terrein URM 001382 te Lauwersoog, geldt de hieronder afgebeelde uitkomst. 1 kW-piek met 16 graden op het zuiden in het vrije veld behaalt derhalve behaalt 948 kWh, uit een stralingssom op die locatie van 1150 kWh/m^2



Diffuus licht en plantengroei onder panelen

Effect van diffuus licht op ecosystemen

Ecosystemen profiteren van diffuus licht. Wetenschappers hebben aangetoond dat een toename van diffuus licht op een heldere dag de fotosynthese van een loofbos tijdens de middaguren met 23% verhoogt (Farquhar en Roderick 2003; Gu et al. 2003). De toename van diffuus licht in dit onderzoek resulteerde van een vulkanische aërosol na de uitbarsting van de Mount Pinatubo in 1991. Deze uitbarsting zorgde voor een injectie van SO2 in de stratosfeer en vormde daar een sulfaat laag. Het aërosol veroorzaakte een afname van de totale hoeveelheid zonnestraling en een toename van de hoeveelheid diffuse straling. Na de uitbarsting was een sterke afname van de hoeveelheid CO2 in de atmosfeer te meten. Deze afname van CO2 wordt verklaard door een toename van de fotosynthese op aarde. Bossen zijn grote koolstof verbruikers.

Lichtdoordringing in gewassen

Een belangrijk positief effect van diffuus licht is een betere lichtdoordringing in ecosystemen en in gewassen in het algemeen. Meerdere onderzoeksgroepen onderzochten het effect van bewolking op de lichtdoordringing en de fotosynthese van bomen of kleinere planten op de bosgrond. Bewolking reduceert de hoeveelheid directe straling en verhoogt de hoeveelheid diffuse straling. Gelijktijdig neemt de totale daglichtsom af. Desondanks, reageert het op de bosbodem groeiende kruid Arnica latifolia met een 37% hogere koolstof opname op een bewolkte dag dan op een heldere dag (Young en Smith 1983). De wetenschappers stelden vast dat diffuus licht tot een lagere bladtemperatuur en een lager waterdamp deficit tussen blad en lucht en dus tot een lagere transpiratie leidt. Gelijktijdig was de CO2 opname tijdens bewolking hoger. Deze waarnemingen zijn van belang voor alle planten die gevoelig zijn voor temperatuurveranderingen, zoals veel op de bosbodem groeiende planten. Het wordt aangenomen dat diffuus licht bijdraagt aan het voorkomen van waterstress en zo in staat is de fotosynthese te verhogen (Young en Smith, 1983).

Leefgebied voor bloemverstuivers (bijen…)

Bijen en andere bloemverstuivers (vlinders, sluipwespen…) hebben grote behoefte aan een gezonde leefomgeving. Bijen sterven in een alarmerend tempo. Velden met zonnepanelen, mits goed ontworpen bieden een goede leefomgeving, waar geen pesticiden nodig zijn voor gewasonderhoud. Beworteling wordt beter en gewasvariatie zal geleidelijk toenemen.

Bij veldopstelling van zonnepanelen is het van belang om de draagconstructie voldoende hoog (circa 1.80 m) uit te voeren en behoorlijke open ruimte tussen de rijen te creëren. Daarmee wordt verzekerd dat de planten zowel licht als regenwater zullen ontvangen.

è Ontwerp de veldopstelling zodanig dat er een nieuw rijk ecosysteem kan ontstaan.

Pilots voor opslag van elektriciteit

Zonder opslag voor elektriciteit kunnen zon- en windenergie slechts beperkt bijdragen aan de energietransitie. In Nederland wordt nu 14% stroom fossielvrij opgewekt. De grote fossiel gestookte centrales blijven als back-up nodig als er onvoldoende zon en wind is.

Ons buurland Duitsland waar inmiddels meer dan 30% van de energie fossielvrij wordt opgewekt loopt tegen grenzen aan. Kerncentrales zijn uitgefaseerd en de hoeveelheid fossiel gestookte energie is nu meer dan voor het begin van de “Energiewende”. Het net kan de onbalans vaak niet meer aan;- er is teveel aanbod zonder vraag.

Het kernpunt van opslagtechnieken is dat deze in tijden van hoge productie met elektriciteit worden geladen, en ontladen op een tijdstip met een lage productie. Opslagsystemen kunnen worden onderscheiden naar verschillende tijdspannes van opslag: minuten tot uren, minuten tot dagen en seizoensopslag. De toepasbaarheid van opslagtechnieken wordt bepaald door een groot aantal factoren, zoals rendement, energiedichtheid, levensduur, energieverliezen en de investeringen en operationele kosten. Algemeen geldt dat de opslagkosten stijgen als de opslagduur langer wordt.

Waterstof

Waterstof staat momenteel in de belangstelling als kandidaat voor opslag voor zowel de korte als lange termijn. Laten we eens bezien wat de opslag kosten zijn van waterstof.

Waterstof als opslagmedium

a	Productiekosten van waterstof (Inclusief opslag tot 600 bar)	60	kWh/kg
b	Energie-inhoud waterstof (op stookwaarde)	33	kWh/kg
c	Rendement omzetting naar stroom (in brandstofcellen)	57%	
d	Elektriciteitsprijs tbv Elektrolyse proces	0,0100	€/kWh

$$\text{Energetische opslagkosten} \quad \frac{(a \times d)}{(b \times c)} = 0{,}0319 \text{ €/kWh}$$

Opslagkosten per kWh in Euro voor waterstof in relatie tot stroomprijs

Stroomprijs/ kWh	Energetische opslagkosten waterstof	Capex (*)	Opex (**)	Totale kosten/ kWh
0,0050	€ 0,0159	0,0100	0,0050	0,0309
0,0100	€ 0,0319	0,0100	0,0050	0,0469

Stroomprijs/ kWh	Energetische opslagkosten waterstof	Capex (*)	Opex (**)	Totale kosten/ kWh
0,0150	€ 0,0478	0,0100	0,0050	0,0628
0,0200	€ 0,0638	0,0100	0,0050	0,0788
0,0250	€ 0,0797	0,0100	0,0050	0,0947
0,0300	€ 0,0957	0,0100	0,0050	0,1107
0,0350	€ 0,1116	0,0100	0,0050	0,1266
0,0400	€ 0,1276	0,0100	0,0050	0,1426
0,0450	€ 0,1435	0,0100	0,0050	0,1585
0,0500	€ 0,1595	0,0100	0,0050	0,1745

(*) Capex: Capital expenditures / kWh; (**) Opex: Operational expenditures / kWh

Referentie: https://core.ac.uk/download/pdf/154676106.pdf (Large scale hydrogen production)

De kosten van opslag verhogen de prijs voor energie voor gebruikers. In periodes dat stroom vanwege overproductie niets tot bijna niets kost kan waterstof economisch verantwoord ingezet worden.
Huidige kostprijzen voor stroom van bronnen als wind en zon inclusief subsidie liggen ruim boven de 2 cent per kWh.
Echter er moet aangetekend worden dat de exploitanten de rentabiliteit van de windmolen - en zonneparken natuurlijk niet behalen met gratis stroom.

Humsterland Energie wil met een aantal partners (hopelijk ook het Waterschap, Enexis en Entrance/..) **drie van de meest veel belovende state of the art opslagmogelijkheden** op praktijkschaal uitvoeren met de stroom uit de 3,5 hectare van terrein URM 001382.

Randvoorwaarde: Kostprijs per kWh opslag moet dan circa 2 eurocent per kWh bedragen.

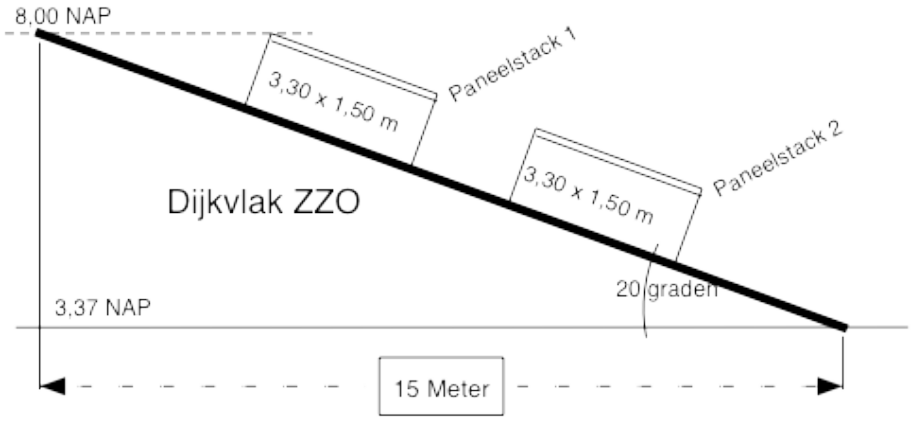
Zonnepanelen op de zeedijk

Op het dijkvlak van Lauwersoog tot aan de slagboom van het defensie hebben wij zonnepanelen geprojecteerd. Randvoorwaarden zijn daarbij:

- Beworteling van de grasmat moet in tact blijven, door voldoende lichttoetreding en bevochtiging
- Schapen moeten kunnen grazen en zo de grasmat onderhouden door de hoefdruk, de uitwerpselen en het grazen.
- De zichtlijn van de dijk moet niet verstoord worden. Panelen mogen dus van zeezijde niet zichtbaar zijn.

Vanwege de ligging van het dijkvlak kan de opgewekte elektriciteit goed afgevoerd worden naar de haven en zo bijdragen aan verduurzaming van de haven.

Afbeelding 7: Zeedijk bij Lauwersoog 1.408 m voor zonnepanelen richting ZZO (15 graden)



Afbeelding 8: Twee stackrijen op dijkvlak, waar schapen onder door kunnen lopen en gras blijft groeien door voldoende licht- en vochttoetreding

We stellen voor op het dijkvlak 1.400 m lang te plaatsen:

Aantal stackrijen	2		Totaal aantal panelen	5600	
Lengte per stack	1400	m	Positie	ZZO, 15°	
Paneelgrootte	1,65 x 1 m		Hoek t.o.v. horizon	20°	
Panelen per stack	2				
Stackhoogte	1,5	m	Opbrengstfactor	94	%

Investering en rentabiliteit

Aantal panelen	5.600	
Wattpiek per paneel	280	Watt
Maximaal vermogen	1.568	kW
Hellingshoek panelen ten opzicht van horizon	20°	

Aanleg van 5600 zonnepanelen op dijkvlak van 1.400 m				€ 1.097.600
Inpassingskosten				
Aansluitkosten netwerkstation Enexis 1,57 mW				€ 28.000
Kabelaanleg naar netwerkstation 1500 m Enexis				€ 45.500
Organisatiekosten (externe deskundigen)				€ 5.000
Monitor en bewaking systeem op alle hoekpunten en bij entree				€ 5.000
1.450 m. Heras hekwerk a € 22 per m + entree				€ 31.900
Terrein gereed maken voornamelijk maaien				pm
Leges voor vergunning				pm
Onvoorzien % van de inpassingsposten			10%	€ 12.000
Totaal				€ 1.225.000
Prijs per wattpiek turn-key				€ 0,78
Productie in kWh/jaar				1.473.920
		€/kWh		
Opbrengst	SDE+ najaar 2018	0,0610		
	Verkoop stroom	0,0400		
		0,1010		
	Onderhoud verzekering/..	0,0080		
		0,0930		€ 137.075

Terugverdientijd $\frac{€\ 1.225.000}{€\ 137.075\ /jaar} = 8{,}9$ jaar

Netto contante waarde in 15 jaar bij 4% rente € 299.048

Aandachtspunten voor de constructie

a. Corrosiebestendigheid;- volgens opgave van diverse leveranciers zijn de panelen ontworpen op zilte omstandigheden. Dat geldt ook voor de draagconstructie en de kabelverbindingen.

b. Op de dijk worden schapen gehouden;- Kabels moeten zodanig zijn weggewerkt dat de schapen deze niet kunnen aanvreten. De hoogte van de constructie is zodanig gekozen, dat schapen er niet bovenop kunnen springen.

c. In Lauwersoog kan het bijzonder hard waaien;- dat houdt in dat de panelen stevig verankerd moeten zijn. Hiervoor zijn schroefankers beschikbaar; deze constructie is in de prijs opgenomen.

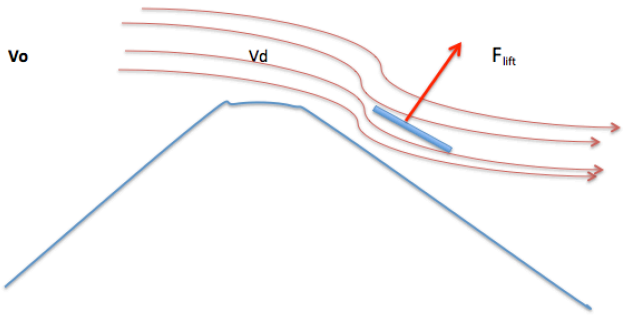
Afbeelding 9: Schroefanker

Direct over de kruin kunnen de windsnelheden van zee een factor 2 groter worden vanwege de opstuwing van de wind door de dijk, waardoor V_d 2x zo groot kan worden als V_o. We berekenen nu de maximale liftkracht die op de panelen van de eerste rij worden uitgeoefend. Als de aanvalshoek van de wind 14 graden is dan is de lift kracht maximaal.

Liftkracht loodrecht op de eerste paneelrij $F_l = \rho.v_d.C_l.S/2$

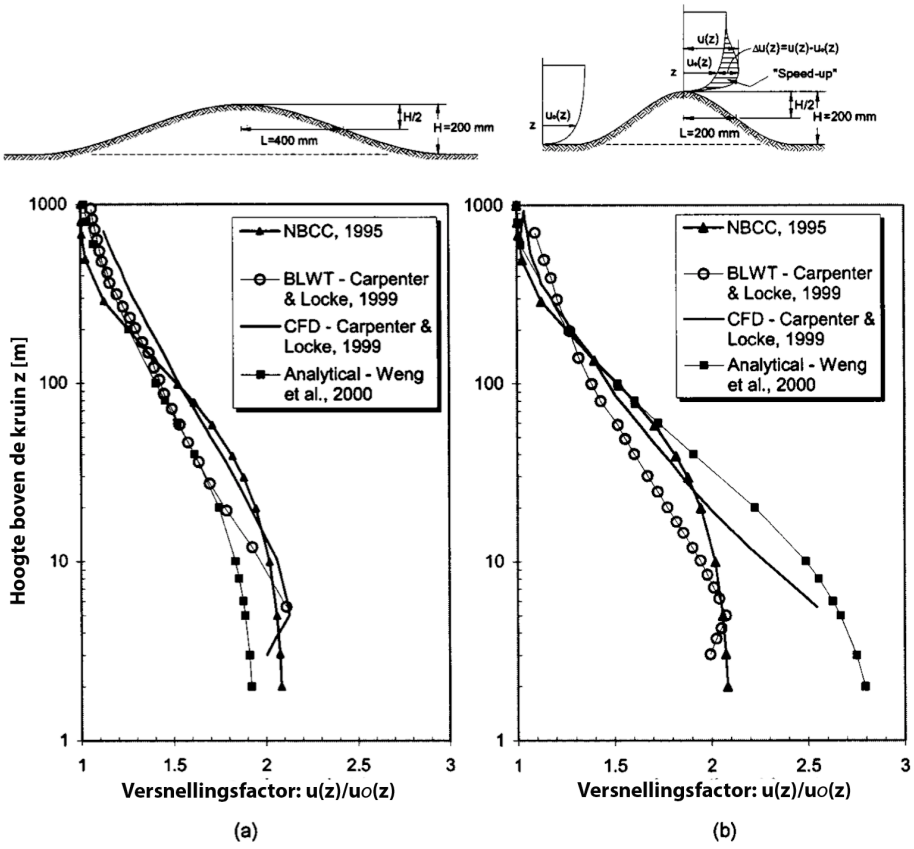
F_l	Liftkracht	10.073	Newton
		1.027	kg
q	dichtheid lucht	1,23	kg/m3
V_d	luchtsnelheid over de dijk	72,2	m/s
C_l	Lift coëfficiënt	1	
S	Oppervlak per m paneelrij	3,3	m2
V_o	Luchtsnelheid voor de dijk	36,1	m/s

Dit houdt in dat de paneelconstructie ontworpen moet worden tegen een liftkracht van 1027 kg per meter stacklengte van 3,3 m.



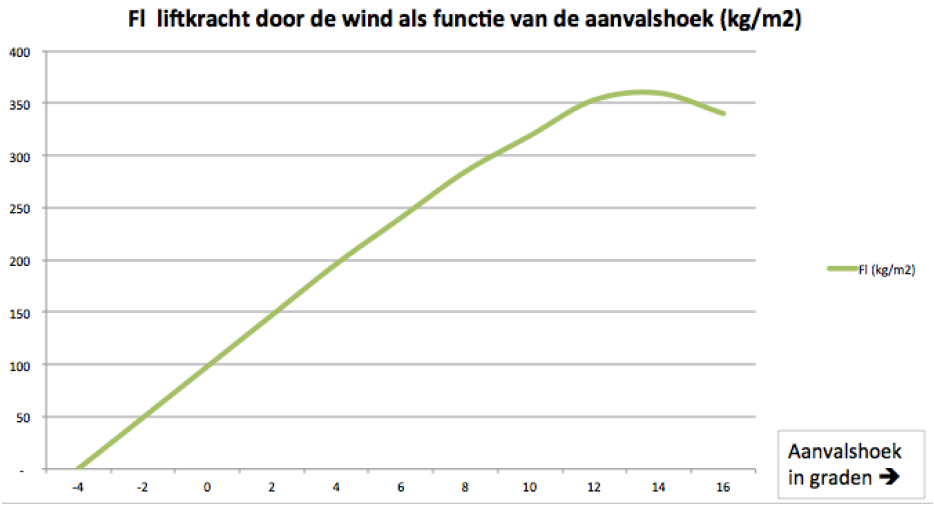
Bij de berekening van de lift krachten op een paneelstack speelt de windsnelheid een rol en de aanvalshoek van de wind ten opzichte van het paneel. We kunnen concluderen dat op basis van diverse berekeningen (zie afb. 11) dat de maximale windsnelheid waarmee de panelen te maken krijgen v_d circa 2 x zo groot is als de ongestoorde windsnelheid v_o.

Afbeelding 10: Windaaanval loodrecht op de dijk



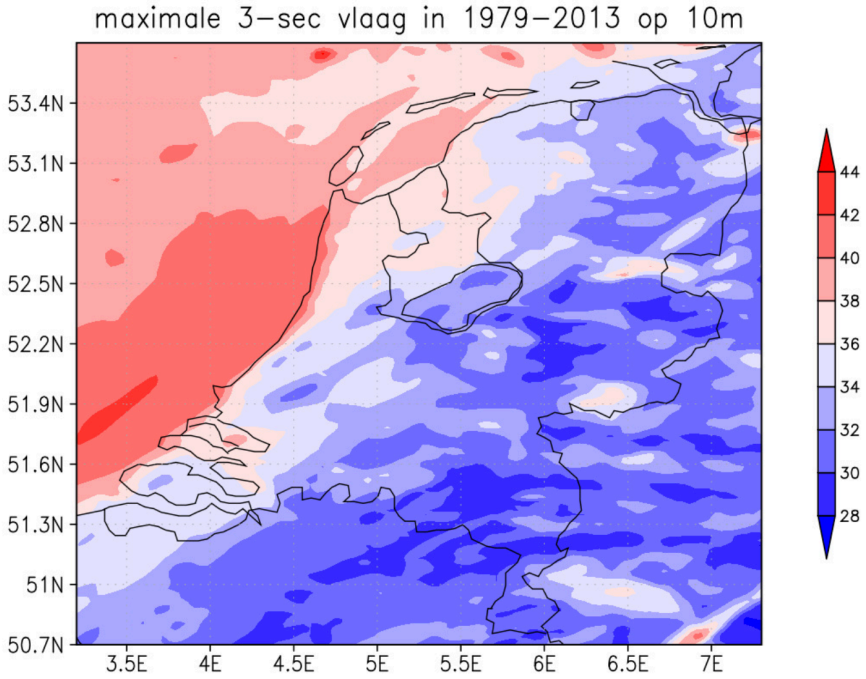
Afbeelding 11: Vergelijking tussen een aantal type berekeningen. CFD computer fluid dynamics, BLWT berekend met de eindige elementen methode voor wind tunnel simulatie, NBCC is de berekening volgends de National

Building Code of CanadaComparison(a) flauwe helling, en (b) steile sinusoïde helling [Reynolds getal R H =1.3 105, ruwheidslengte lengte z=0.02 m]



Afbeelding 12: Liftkracht loodrecht t.o.v. paneelvlak bij diverse aanvalshoeken van de wind.

We hebben vanuit de meest ongunstige condities de liftkrachten berekend. Voor de windvlagen van 3 seconden hebben wij ons gebaseerd [op literatuur 11 – KNMI studie 2017]



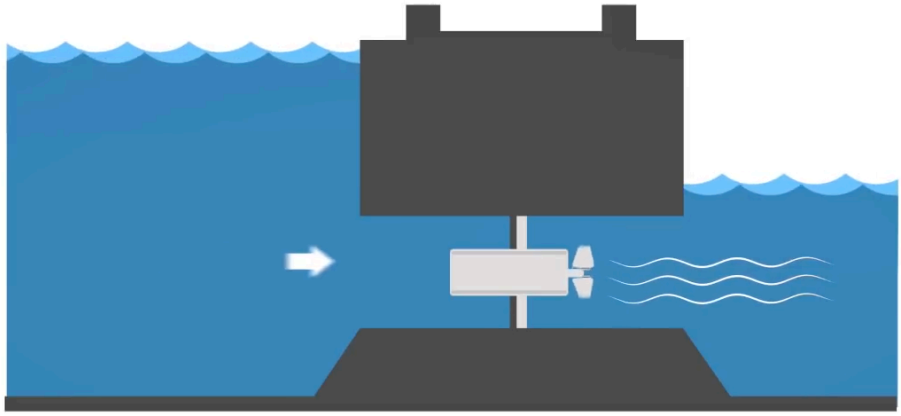
Afbeelding 13: Maximale 3 sec windvlagen Lauwersoog 36 m/s

Alvorens over te gaan tot installatie van panelen op 1.400 m dijkvlak, adviseren wij om twee stackrijen van 15 m als pilot aan te leggen waarmee beproefd kan worden hoe de grasmat, de schapen en de constructie zich gedurende een aantal maanden gedraagt.

Ook adviseren wij in ieder geval reeds nu de SDE + aan te vragen om rechten veilig te stellen.

Getijden stuw

Van alle technische oplossingen om energie te verkrijgen uit getijdenwerking, wordt de getijden stuw als de meest veelbelovende gezien om grote hoeveelheden stroom op te wekken. Tevens is deze optie kostbaar en heeft invloed op het gebied. Dit is in 2014 geduid in onderstaande studie.



Getijden stuw

http://www.humsterlandenergie.nl/resources/Linkpagina/Wave-and-tidal-current-energy-–-A-review-of-the-current-state-of-research-beyond-technology.pdf

De energie uit stroming is te berekenen met de volgende formule:

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

ρ:	de dichtheid van water (1.000 kg/m^3)
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 59,3%
Ng	Generator rendement (95%)
Tg (*)	Turbine rendement (70%)

De stroomsnelheid heeft verreweg de grootste invloed. Bezien we de stroomsnelheden in de Waddenzee, dan kan worden vastgesteld dat deze soms even pieken boven de 1 m/s en verder veel lager zijn.

Beschouwen we een turbine met een diameter van 5 meter dan is vast te stellen hoe groot de investeringsruimte (bij een 10 jarig breakeven punt) bedraagt indien de opgewekte stroom incl. SDE + minus onderhoudskosten een waarde heeft van € 0,097 /kWh.

V (m/s)	P (kW)	kWh/ jaar	Investerings-ruimte
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

Vrije stromingsturbines in dit gebied hebben derhalve geen economisch haalbare toekomst. We moeten dus op zoek naar methodes om de stroomsnelheden te vergroten. Dat kan met stuw constructies. Waar uit het verval gemiddeld stroomsnelheden zijn te behalen van 1 tot 4 m/s.

Stroomsnelheid als gevolg van verval in een stuw

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

v = stroomsnelheid		m/s
g = gravitas	9,81	m/s2
hc = hoogteverschil verval		m

Verval (m)	Stroomsnelheid (m/s)
0,2	0,89
0,4	1,77
0,6	2,66
0,8	3,54
1	4,43
1,2	5,32
1,4	6,20

De energie die te winnen is uit stuwen aan de kustlijn is te bepalen vanuit de vloeistofmechanica. De volgende variabelen zijn daarbij van belang:

1. Verschil tussen eb en vloed;- 2,5 – 3,5 m leveren bij de huidige technologie met low tide turbines prima resultaten ;- grotere getijverschillen bieden meer energieopbrengsten;
2. De stroomsnelheden als functie van het getijdenverloop;
3. Voldoende vrije diepte (25 m);- ook bij eb moeten turbines boven en onder de turbine gevoed kunnen worden met bij voorkeur laminaire waterstromen;
4. Sediment transport voorkomen;- turbines kunnen vervuilen door aankoeken van slib en schelpen e.d.
5. Hoogte van de stuw
6. Lengte van de stuw
7. Positie, aantal van de turbines
8. Vorm van de turbine toegangspoorten
9. Visvriendelijke turbines die bi-directioneel werken
10. Afvoer van grote vermogens van elektriciteit

Aan de Chinese kust zijn door een Nederlands consortium waaronder de Anteagroep studies verricht naar de winbare energie uit stuwen. De hoogte van de stuw, de lengte van de stuw en de diepte van het water zijn daarbij de kritische ontwerp parameters. Bij opkomend en terugtrekkend water is het zaak de watermassa voor de stuwconstructie vast te houden. Hoe langer de stuw, des te beter dat gaat. Daarbij is bedacht dat de stuw een T-vorm of H-vorm moet hebben, om zo afvloeien langs de randen van de stuw te beperken.

Het blijkt dat stuwconstructies pas zinvol zijn bij flinke afmetingen. Er moet daarbij gedacht worden aan stuwlengtes van 15 km en meer met een T-stuk of H-stuk van 5 kilometer en meer. Daarbij vraagt een rendabele oplossing waterdieptes van circa 25 m.

In het waddengebied komen die omstandigheden niet voor. Wel is te overwegen voor de kust van de eilanden dergelijke dammen te bouwen. Het onderzoek daarnaar vat buiten de scope van onze opdracht. Wel kan Humsterland Energie een globale haalbaarheidsstudie uitvoeren naar de mogelijkheden Dynamic Tidal Power technologie in de Noordzee boven de eilanden. Op voorhand verwachten wij te vinden:

- Grote bijdrage aan de energietransitie per dam 10 – 20 miljoen huishoudens;
- De technologie wordt een export product en geeft een boost aan de turbine industrie;
- De energieproductie is voorspelbaar en de combinatie van een groep redelijk uit elkaar gepositioneerde stuwen maakt dat een continue stroom mogelijk wordt, waardoor fossiele centrales afgeschakeld kunnen worden;
- De prijzen per mW turbinevermogen zijn factoren lager dan die van windmolens op zee;

- De stroomproductie kan vrijwel continue worden met de combinatie van dammen, waardoor er per mW vermogen veel meer stroom geproduceerd wordt dan door windmolens; - en er een baseload gecreëerd kan worden.
- Wij verwachten dat de kWh prijs sterk kan concurreren met stroom uit fossiele energie.

Conclusie
We moeten concluderen dat het plaatsen van stuwen in de Waddenzee geen rendabele optie zal zijn. Het water heeft onvoldoende diepte.

Zwermmolens

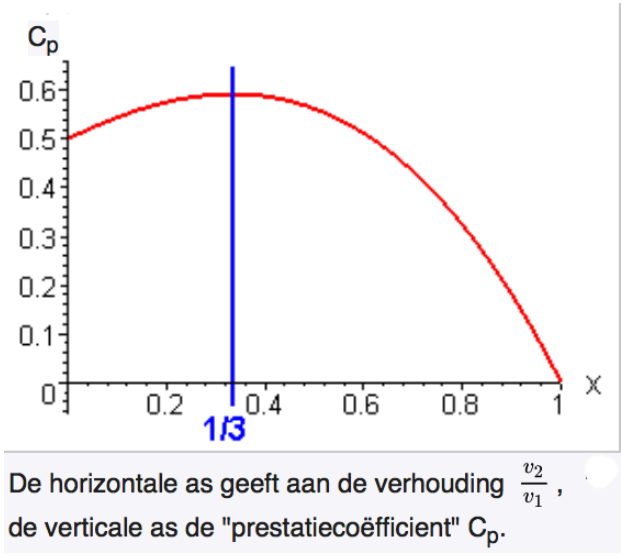
Energie uit wind

De energie die we uit wind kunnen halen heeft een derde-macht functie t.o.v. de windsnelheid

$$P = C_p.\eta.1/2.A.\rho.v^3 \quad [watt]$$

η = het rendement van een molen [%]
A = het doorstromend oppervlak [m2]
v = de inkomende snelheid van de wind [m/s]
ρ = de soortelijke massa van de lucht [kg/m3]

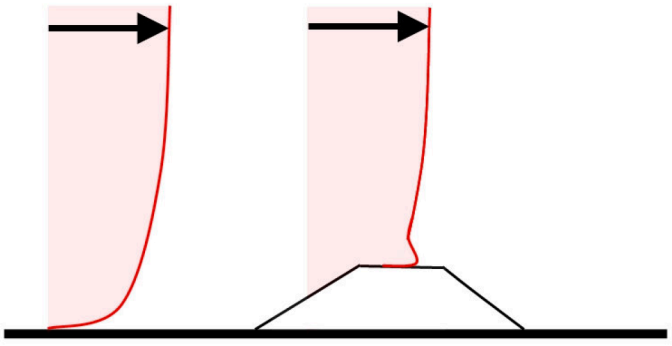
Cp is de prestatiefactor. Albert Betz heeft vast gesteld dat een het theoretisch maximum van de energie die men uit een fluïdum kan halen een functie is van de in- en uitstromende lucht;- de factor Cp is maximaal 16/27 (59,3%).
v_1 is de instromenede lucht door de rotor en v_2 de uitstromende lucht. Het ontwerpen van rotoren geschiedt voor een heersende windsnelheid in een gebied. Het is de kunst de rotorbladen zo te ontwerpen dat de waarde 16/27 wordt benaderd.
De combinatie van η en C_p levert in de praktijk waarden op van 40 tot 50% voor moderne molens.
η is de som van alle mechanische en elektrische verliezen tot aan de stroomafgifte aan het net.



Afbeelding 14: Theoretisch maximum van het vermogen dat uit wind (of elk ander fluidum) is te halen. Wet van Betz.

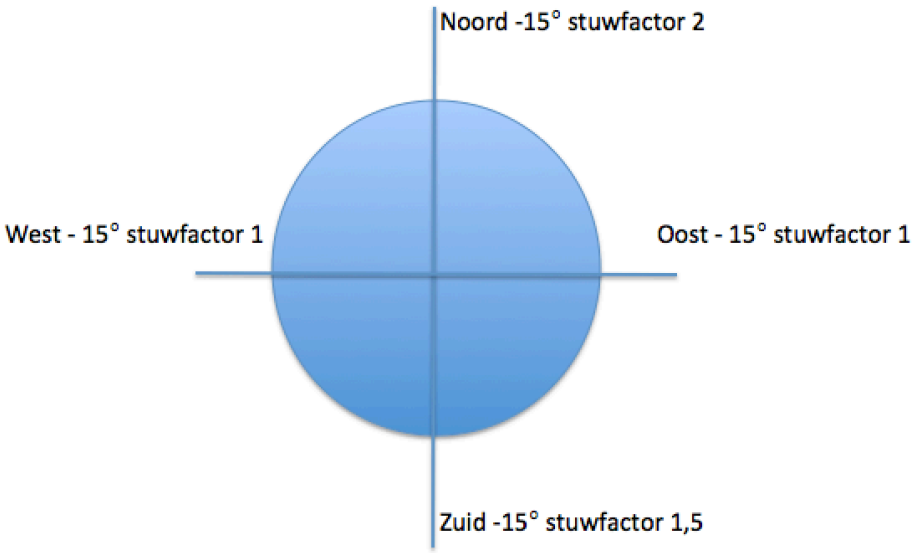
Verhoogde windsnelheid door stuwing over de dijk

Bij een aanstromend windprofiel neemt de windsnelheid toe met de hoogte. De dijkkruin is gelegen op 8 m hoogte ten opzichte van het zeewaterniveau. Hierdoor zal de windsnelheid hoger zijn op de kruin van de dijk dan op zeeniveau. Daarnaast vormt de dijk een blokkade voor de aanstromende wind, waardoor het luchtvolume in de onderste 8 m van het windprofiel ophoopt. Hierdoor treedt een verhoging op van de windsnelheid boven op de dijk. Zie onderstaande afbeelding links voor een schematisering.
In afbeelding 11 hebben we reeds aangegeven in een zone van 1 tot 10 meter boven de kruin en net achter de kruin dat de zeewind snelheid een factor 2 tot 2,3 groter wordt.



Afbeelding 15: Toename van windsnelheid boven de kruin

Om te voorspellen welke hoeveelheid energie er te halen valt uit kleine molens (die we **zwermmolens** noemen) is door ons op grond van de KNMI gegevens voor Lauwersoog op dijkhoogte de uur frequentie van windsnelheid en windrichting bepaald. In combinatie met de moleneigenschappen is daarmee voor elk frequentiegebied vastgesteld hoeveel energie we kunnen verkrijgen uit een bepaald type windmolen.

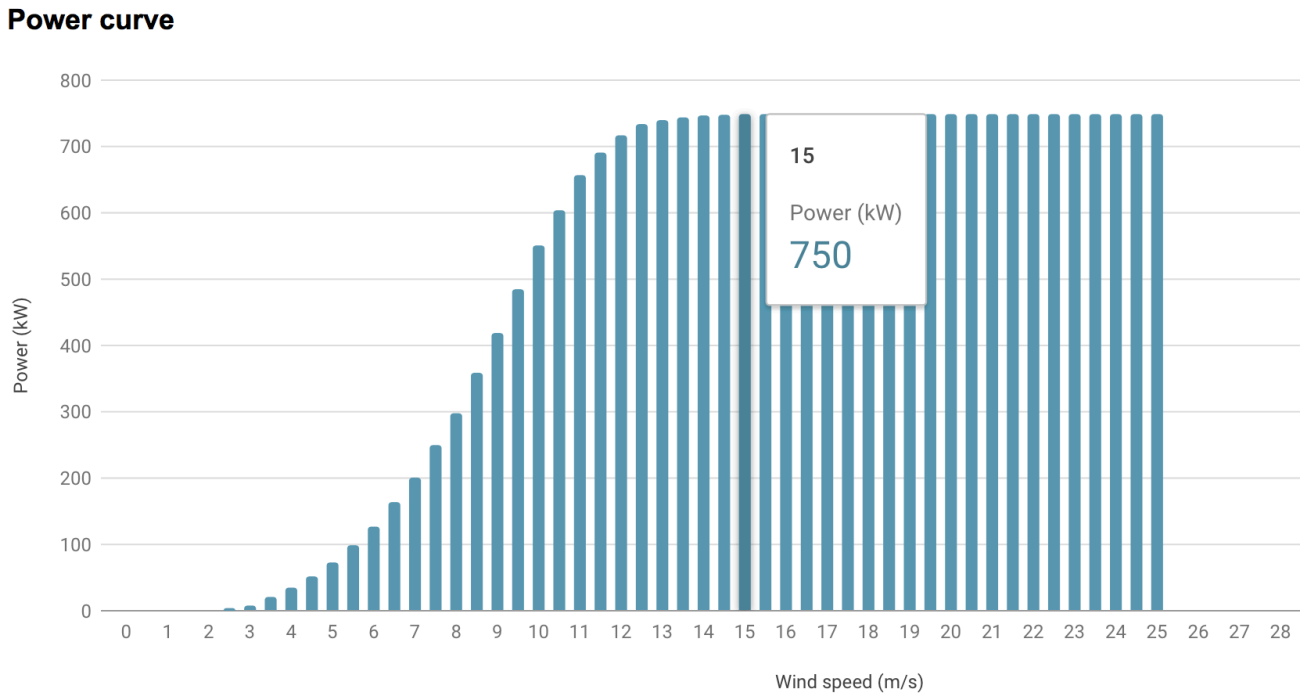


Afbeelding 16: Stuwfactoren waarmee is gerekend. Tussenliggende waarden zijn geëxtrapoleerd

Kerngegevens van windmolens

Bij windmolens is het in de wind opgestelde oppervlak een belangrijke factor voor de potentiële opbrengst. Daarnaast bepaalt het aerodynamische ontwerp van de wieken en het aantal wieken een rol.

Het vermogen van een windturbine neemt toe met de snelheid van de wind. Deze samenhang is niet evenredig. Bij lage windsnelheden (**Cut-in Speed**) begint de turbine te draaien en levert ze stroom. Bij ongeveer 10 tot 15 meter per seconde (windkracht 6) werken de veel type turbines op vol vermogen **(Rated Power).** Ze leveren dan de maximale hoeveelheid stroom per seconde. Bij hogere windsnelheden blijft het vermogen op een tijdje op dit niveau omdat de ingebouwde generator **(Max generator)** niet meer kan leveren. (vollast). Daarna neemt het vermogen weer af omdat de snel draaiende rotor relatief meer luchtweerstand ondervindt. Bij windsnelheden boven de 25 meter per seconde (windkracht 10) worden de meeste windturbines stilgezet om overbelasting te voorkomen. **(Cut-off speed)**
Om te voorkomen dat de windturbines elkaars opbrengst beïnvloeden is er afstand tussen de turbines: *gemiddeld zes maal de rotordiameter*. Bij een rotordiameter van 80 meter is de afstand dus 480 meter.



Afbeelding 17. Power curve van de Lagerwey LW 750-52.

Cut-in speed 2,5 m/s, Cut-off speed 25 m/s, Rated speed 15 m/s 750 kW

De theoretisch ideale molen.

We berekenen dan simpelweg hoeveel energie een molen van 10 m2 uit de wind kan halen, waarbij alleen de Betz-limiet de beperking is. Dan luidt de opbrengst per jaar op de zeedijk als volgt:

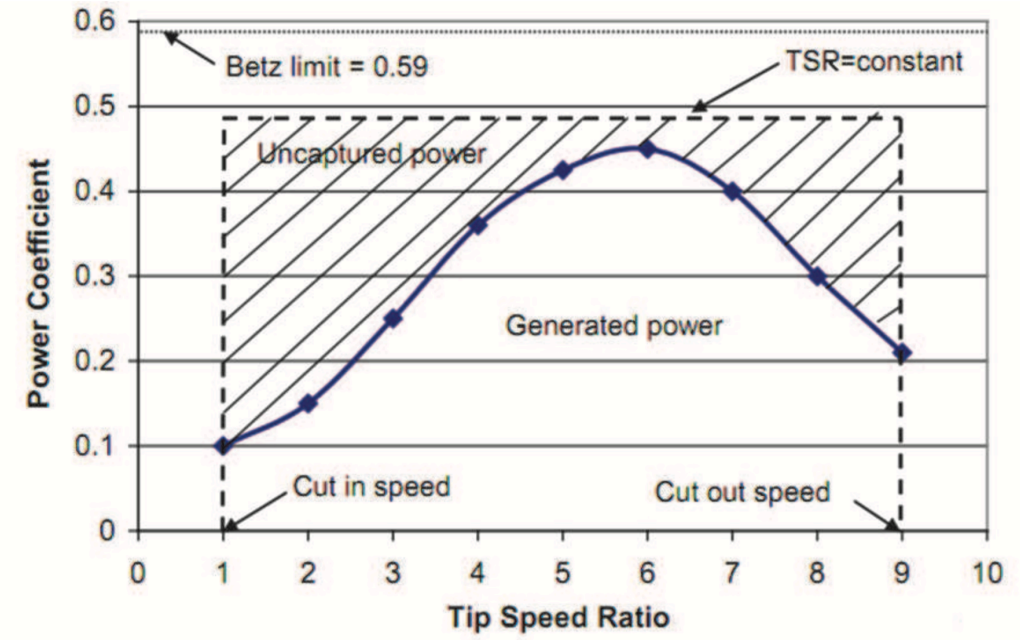
- 13.992 kWh (zonder dijkstuwfactor)
- 36.178 kWh (met dijkstuwfactor)

In de praktijk halen de molens deze opbrengst bij lange na niet. Het turbine rendement, de cut-in speed, de shut-down speed, de wiekconstructie, het aantal wieken en het geïnstalleerde generatorvermogen beperken de potentieel ideale opbrengst en daarnaast speelt de tip speed ratio een cruciale rol.

Tip Speed Ratio, TSR

Een andere belangrijke factor is de Tip-Speed ratio (TSR). Gedefinieerd als de tipsnelheid gedeeld door de aanstromende luchtsnelheid. Er stroomt te veel wind langs de wieken als de rotor te langzaam draait. Anderzijds zal de wind een te snel draaiende rotor ervaren al een platte schijf waardoor er veel

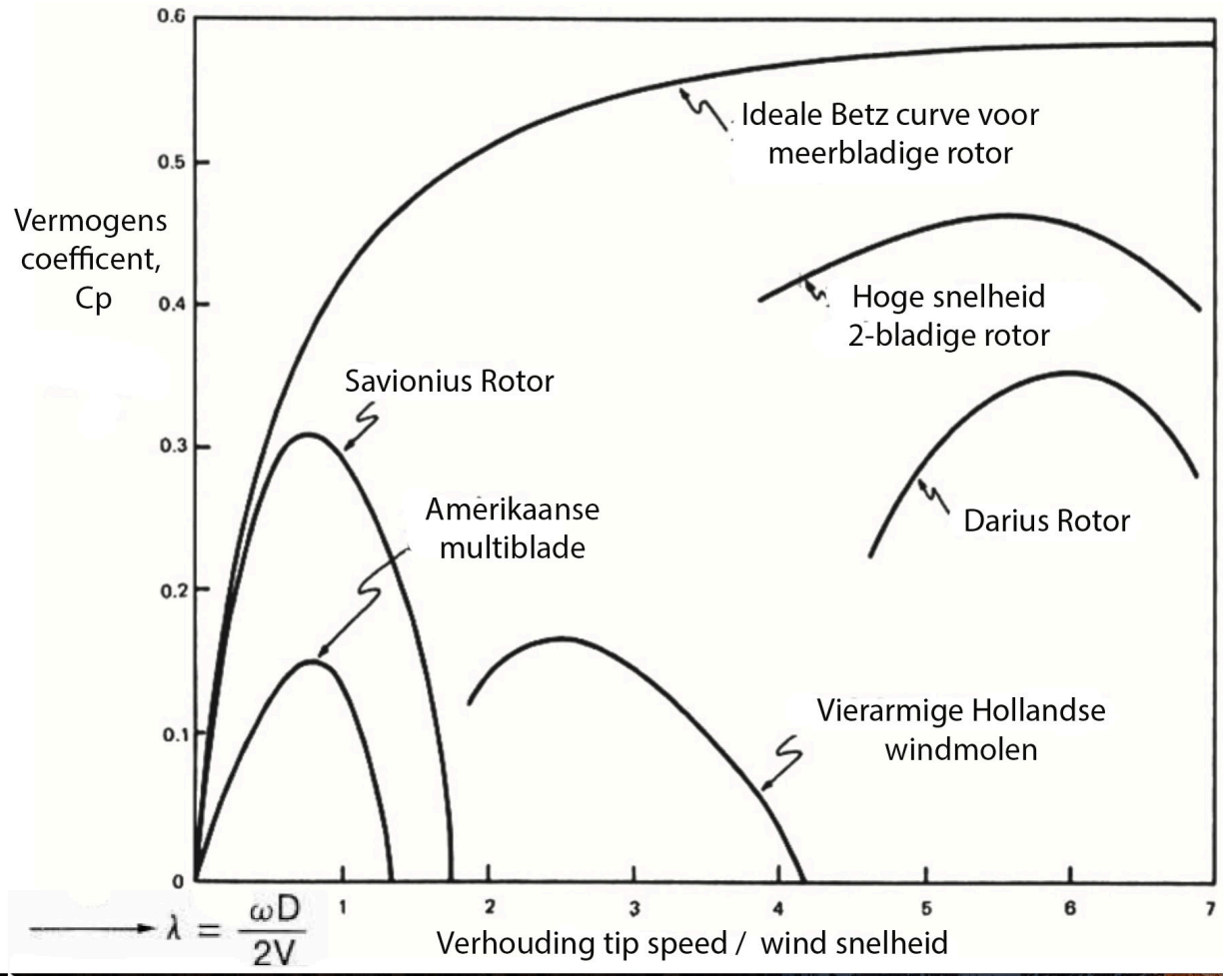
luchtweerstand optreedt. Hoewel een hoge rotorsnelheid gunstig is voor de generator efficiency en de stroomopwekking, leiden te hoge snelheden van de tip tot schade aan de vleugelprofielen door turbulentie en cavitatie. Ook zullen de molens daardoor veel geluid produceren. Uit diverse studies is gebleken dat er voor elk type molenontwerp een bepaald gebied is waarbij de molen optimaal produceert.



Afbeelding 18: De vermogens coëfficiënt als functie van de tip-speed ratio voor een 2-bladige molen

Het windmolen ontwerp kent 2 varianten. (a) de rotorwieken worden aangestuurd zodanig dat boven een bepaalde snelheid de tipsnelheid en daarmee de TSR constant wordt gehouden. (b) daarnaast zijn er molens waarbij de tipsnelheid met de windsnelheid toeneemt totdat gevaar dreigt voor de constructie en de molen uit de wind wordt gezet.

Windmolens presteren optimaal in een bepaalde range van windsnelheden en benaderen lang niet allemaal de Betz limiet. Voor het ontwerp van grote molens voor een specifieke locaties zijn gespecialiseerde ingenieursbureaus vaak maanden bezig met de optimale vormgeving van de wieken. Zo is in de figuur 19 te zien dat de **Amerikaanse veel bladige molen** bij lage snelheden reeds begint te werken maar er bij hogere snelheden snel de brui aangeeft. **De Hollandse windmolen** bereikt ook bij lange na niet de Betz limiet en bezwijkt bij hoge windsnelheden. Deze type molens zijn niet geschikt voor het opwekken van elektriciteit maar wel voor het verpompen van water.



Afbeelding 19 Diverse types windmolens.

De Darius molen heeft een verticale as en is ongevoelig voor windrichtingen. De molen heeft een hoge cut-in speed, maar kan daarentegen hoge windsnelheden aan tot 200 km/uur. Het door de wind aangestoomde oppervlak wordt voor de helft benut. Namelijk voor dat deel van de wieken die met de wind meebewegen. Een cup windmeter is ook een voorbeeld van een Darius rotor. De Darius rotor haalt in de praktijk een Cp waarde van 20%.tot 30% Dat is aanzienlijk minder dan de 3 bladige horizontale molens die een Cp waarde bereiken van 40 en soms 50%.

De Savonius molen. Een Savonius-windturbine bestaat meestal uit twee, drie of soms meer schoepvormige delen die de wind opvangen en van richting doen veranderen waarbij de windenergie wordt overgebracht naar de verticale as. De schoepen hebben minder weerstand voor de wind aan de ronde kant dan aan de open kant. Door dit verschil zal de molen gaan draaien in de richting van de minste weerstand.

Omdat het draaien door het *verschil* in weerstand wordt veroorzaakt is de efficiëntie niet erg groot vergeleken met andere vormen van windturbines. Ze kunnen door de verticale constructie ook alleen

laag bij de grond worden geplaatst waar de windsnelheid niet het grootst is. Ze zijn echter goedkoop en betrouwbaar, en draaien in elke windrichting zodat richtmechanismen niet nodig zijn. Het aangestroomde oppervlak wordt slecht voor 50% benut en de Cp waarde is niet meer dan 30%.

Type molen	**As**	**Cut-in speed (m/s)**	**Rated generator vermogen bij 10 m/s (kW)**	**Cut-out speed (m/s)**	**Wiek-Wind effectiviteit Cp-waarde totaal**	**Productie (kWh/ jaar)**
Driebladig	vertikaal (*)	2	2,70	25	44%	7.727
Tweebladig	vertikaal (*)	2	2,38	25	38%	6.786
Savonius	horizontaal	0,5	0,78	nvt	25%	2.201
Darius	horizontaal	4	0,64	nvt	20%	1.807
Theoretisch ideaal	vertikaal	0	3,64	nvt	59,3%	13.992

Tabel: Ideaal versus praktijk van molens met 10 m2 oppervlak in de wind op de dijk zonder stuwfactor. (*) met rotor snelheid beperking voor constante TSR

Investeringsruimte zwermmolens

We beschouwen nu 3 types

- De EAZ molen (cut-in 3,5 m/s, rated power 13 kW 18 m/s, cut-out 25 m/s), rotordiameter 12 m prijs € 3.234/ kW
- Chinese Bang good molen (cut-in 1,5 m/s, rated power 0,4 kW bij 10 m/s, cut-out 45 m/s), windoppervlak 1,7 m2, prijs € 840 /kW
- Chinese Greef molen type gs 5 kW, cut-in 2,8 m/s, rated power 5 kW bij 12 m/s, max power 6 kW, prijs € 800 / kW.

Opbrengst van de molens op de dijk : SDE+ incl. de verkoop stroom met Garantie van oorsprong € 0,08 per kWh

Greef molen type GS 5 kW, bouwhoogte 10 m.

Opbrengst: 15.222 kWh /jaar

Terugverdientijd $\frac{€\ 4.000}{€\ 1.209}$ 3,4 jaar

http://www.greefenergy.com/post/47

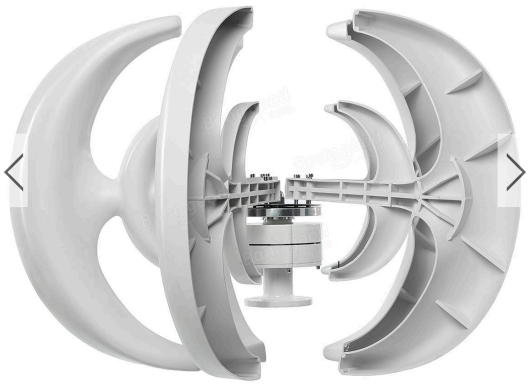
Banggood molen type 0,4 kW, bouwhoogte 4 m

Rotor 90 cm x 60 cm

Opbrengst: 1.215 kWh /jaar

Terugverdientijd $\frac{€\ 336}{€\ 97}$ 3,4 jaar

https://www.banggood.com/12V24V-400W-Wind-Turbine-Wind-Generator-Lantern-Permanent-Magnet-Alternato-with-windmill-Controller-p-1278215.html?rmmds=home-mid-relatedViewed&cur_warehouse=CN



De EAZ molen op de dijk https://www.eazwind.com/nl/home/

Voor de in Groningen toegestane EAZ molen hebben wij de case verder doorgerekend. Op het boerenland levert de molen circa 35.000 kWh tegen een investering van € 42.050.

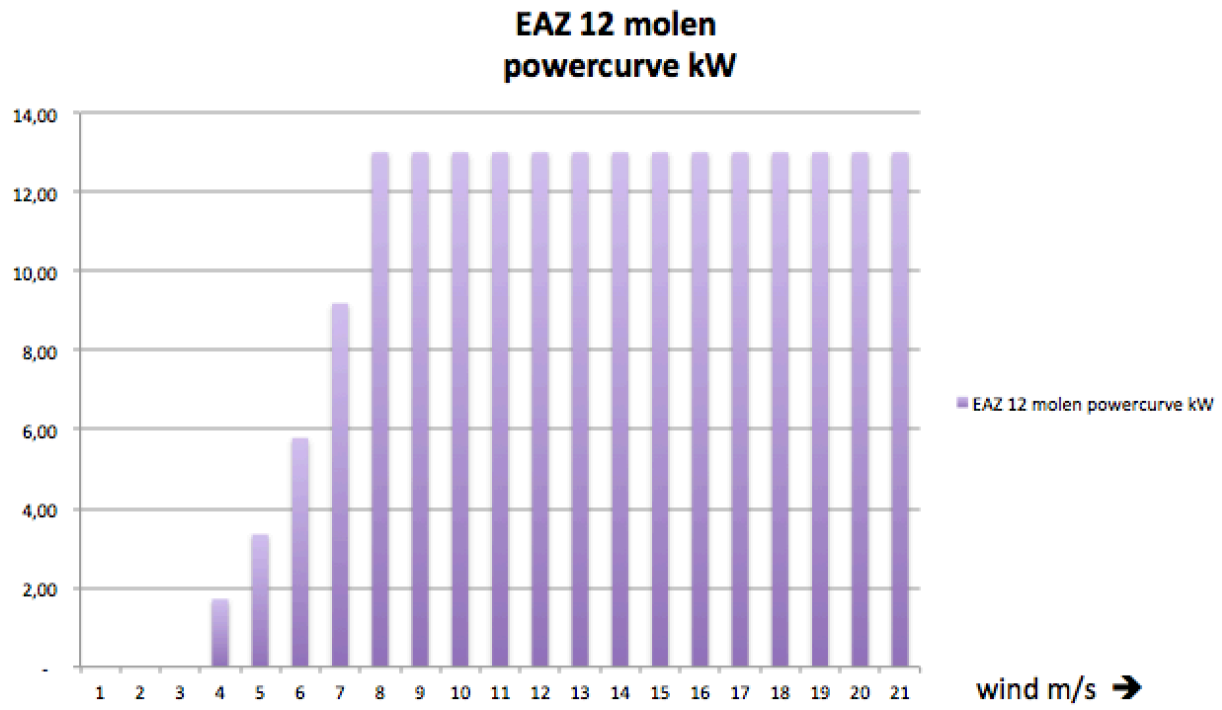
De molens hebben een cut-in 3 m/s, rated power 13 kW bij 8 m/s en een cut-out van 25 m/s.

Vanwege de hogere windsnelheiden op de dijk zal de pichafstelling van de wieken mogelijk iets aangepast moeten worden.

EAZ molen as hoogte 15 m (kan lager op de dijk)		
Rotor diameter	12	m
Oppervlak	113	m2
Opbrengst met 13 kW generator		
Productie	72.328	kWh/jaar

Een leuke optie zou zijn 13 van deze aangepaste molens te plaatsen. Deze leveren op jaar jaarbasis dan op ruim 1 miljoen kWh. Ze zijn volgens de fabrikant 20 jaar onderhoudsvrij.

$$\text{Terugverdientijd EAZ molen} = \frac{\text{€ 42.050}}{\text{€ 5.786}} = 7{,}3 \text{ jaar}$$



Opbrengsten van windmolens over de jaren heen

Opbrengsten van windmolens variëren van jaar tot jaar. Uit de jaarsom van de uurgemiddelden tot de derde macht (de jaar-windpowerfactor) blijkt dat 2017 een mooi gemiddelde is van de afgelopen 5 jaar.

Lauwersoog + 10 m wind knmi database

Jaar	windsom van uurgemiddelde	som uurgemiddelde tot de derde macht	vertaling naar kWh met 10 m2 oppervlak (*)	Variatie t.o.v gemiddelde
2013	55.433	3.937.199	4.921	5,5%
2014	54.288	3.533.526	4.417	-5,4%
2105	56.733	4.369.197	5.461	17,0%
2016	51.026	3.075.782	3.845	-17,6%
2017	53.899	3.752.359	4.690	0,5%

Statistiek	kWh	
Max	5.461	
Min	3.845	
Gem	4.667	
Gem deviatie	429	9,2%

(*) Cut in, Cut out, Tipspeed ratio en max gen vermogen niet mee genomen

Aanbevelingen

Om exact vast te stellen hoe groot de stuwfactor is, adviseren wij het waterschap gedurende één maand met een schrijvende anemometer de windsnelheid en wind richting op de kruin te meten en deze af te zetten tegen de ongestoorde windsnelheid.

Wij adviseren het waterschap voorts om bij de renovatie van de dijk in ieder geval een kabelgoot op te nemen om direct of later te voorzien in voldoende stroom afvoer capaciteit.

Tenslotte adviseren wij om nu reeds SDE+ aan te vragen voor de molens.

Maanstroom – hevels over de zeedijk van kwel naar geulen

Aan de kustweg naar Lauwersoog ligt een grote kwel. Wij hebben globaal begroot hoeveel energie gewonnen kan worden door over de dijk een buis leggen die verbinding maakt tussen de kwel en de Waddenzee;- en waarbij de uiteinden onder water liggen. De stroming kan opgestart worden door op het hoogste punt de lucht uit de buis weg te zuigen.

Met een hevelprincipe is daarmee energie te winnen.

De kwel heeft de volgende eigenschappen:

Zoute kwel achter de Kustweg bij Lauwersoog		
Oppervlak circa	1.500.000	m^2
Diepte circa	2	m
Inhoud	3.000.000	m^3

Afbeelding 20: Kwel met rietvelden achter de zeedijk tussen Lauwersmeer en Delfzijl.

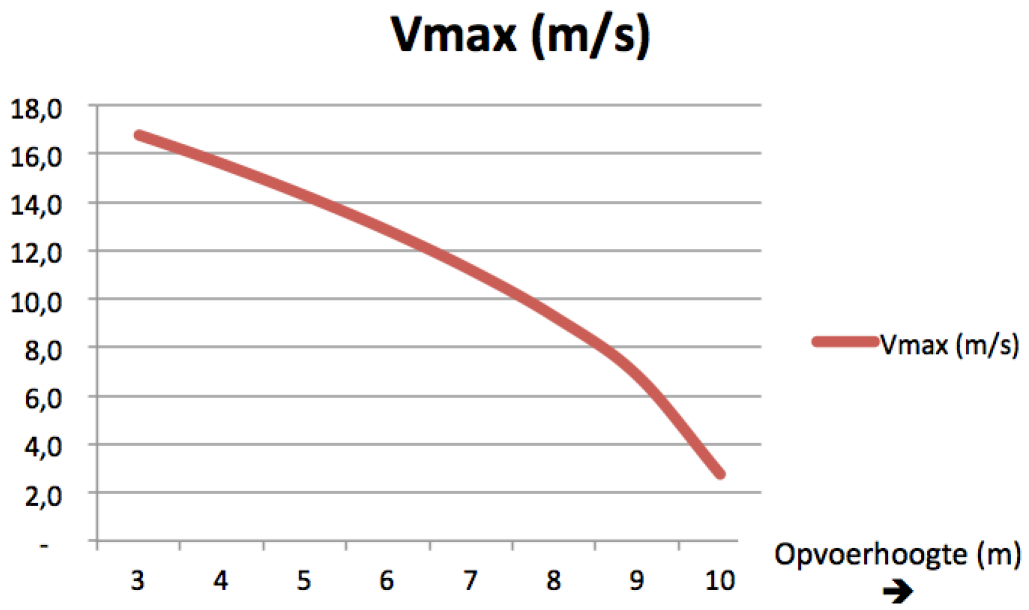
De hevelbuis wordt over de dijk heen gelegd. De uiteinden liggen onder water. In de buis is een turbine opgenomen. In de buis mag geen lucht zijn om de hevelwerking mogelijk te maken. De lucht boven in de buis kan met een pompje worden weggezogen, waardoor de hevel gaat stromen.
Tijdens de vloed stroomt water naar de kwel. Bij eb stroom water vanuit de kwel naar de zee. Dit proces gaat continue door. Het peil in de kwel wordt na geruime tijd gelijk aan het gemiddelde niveau

van de zee. Echter men kan er ook voor kiezen om het peil in de kwel precies te regelen. Dit door middels een afsluiter de stroom te reguleren.

Maximale opvoerhoogte (verschil tussen ingegraven hevel op dijkhoogte en waterniveaus)

De hevelwerking is niet meer mogelijk als de hoogte (h_b) van de waterkolom in de hevel en daarmee de druk t.o.v. het waterniveau in de zee op de kwel groter wordt dan de luchtdruk. Wij hebben ingeschat dat deze hoogte kleiner blijft dan 9 m, waarmee de maximale stroomsnelheid 6,8 m/s bedraagt in de hevelbuis.

$$v_{max} = \sqrt{2\left(\frac{P}{\rho} - g \cdot h_b\right)}$$



Potentiele opbrengsten hevelsysteem

Formules:

Stroomsnelheid in de hevel

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

v = stroomsnelheid		m/s
g = gravitas	9,81	m/s2
hc = hoogteverschil verval		m

Opgewekt vermogen in de hevel turbine

$$P = 1/2 \times r \times h \times A \times v^3$$

V = stroomsnelheid	m/s
A = oppervlak turbine m	m^2
r = dichtheid van water	Kg/m^3

h Rendement van stroomopwekking : Betz x Ng x Tg

Betz (max vermogen uit water stroom)	59,30%
Ng (generator rendement)	95%
Tg (Turbine rendement incl. Instroom- en weerstand verliezen)	70%

De opbrengst calculaties zijn gebaseerd op de gemeten kwartierhoogtes van het peil in Waddenzee in de periode 1.1.2010 – 31.12.2010. Deze gegevens zijn ontleend aan de database van verzamelde gegevens door het waterschap Noorderzijlvest. Voor de 4 x 8760 kwartier situaties zijn de berekeningen uitgevoerd.

Peil max zee	NAP 3,37 m
Peil min zee	NAP -2,97 m
Peil gem zee	NAP -0,01 m

Opbrengsten en rentabiliteit

Diameter hevel	1	1,25	1,50	m
Max vermogen	85	133	190	kW
Energie (Elektriciteit)	82.449	128.148	183.683	kWh/jr
Start peil Kwel	-0,9	-0,9	-0,90	NAP (m)
Gem peil in Kwel na een jaar	-0,30	-0,24 (*)	-0,20	NAP (m)
Instroom vanuit zee	38.346.887	59.400.545	85.140.593	m^3
Uitstroom naar zee	36.766.630	57.889.936	83.691.961	m^3

(*) Merk op dat bij een groter debiet het peil in de kwel sneller het gemiddelde zeepeil nadert.
Voor dergelijke projecten geldt SDE+ subsidie waarmee de potentiele opbrengsten € 0,132 per kWh bedragen. Bij een gewenste terugverdientijd van 15 jaar bedraagt de investeringsruimte: 15 x 183.683 x € 0,132 = € 363.693
Voor de turbines adviseren wij een samenwerking met Fishflow innovations. Dit bedrijf produceert hoog rendement turbines die in twee stromingsrichtingen kunnen werken met een hoog turbine rendement. Bovendien functioneren deze turbines visvriendelijk;- de gemeten mortaliteit is minder dan 0,5 %.
Het beheersen van de kwel is überhaupt een wens van het waterschap. Wij achten het uitvoeren van een proefproject daarom zinvol.

Aanbevelingen

Het waterschap Noorderzijlvest heeft in haar planning opgenomen om de zeedijk tussen Lauwersoog en Delfzijl te renoveren. Wij achten de voorbeeldfunctie van belang en adviseren daarbij:

- Voorzie de dijk van een zware stroomaansluiting voor toekomstige afvoer van groene stroom.
- Plan op de dijk stroomopwekking met
  - Zonnepanelen
  - (Axiale) windturbines, die gebruik maken van de venturi-werking van de dijk
  - Hevelprojecten met achterliggende kwelders
  - Afvoer van stroom uit nabijgelegen nieuw te ontwikkelen zonneweides (per hectare ruim 1 megawatt – opbrengst 1 gWh = 10^6 kWh)

Overige

- Pas het pompregime aan op waterstanden en draai niet alleen op waterbezwaar. Dit kan significant in energie schelen. Geldt ook voor bemaling van peilvakken. Een quick scan naar het energiegebruik op jaarbasis van het Waterschap kan een indicatie geven van een besparing op mogelijk miljoenen kWh.
- Benut de stroomopwekkingscapaciteit van de R.J. Cleveringsluizen.

Getijdencentrale in combinatie met de R.J Cleveringsluizen

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.

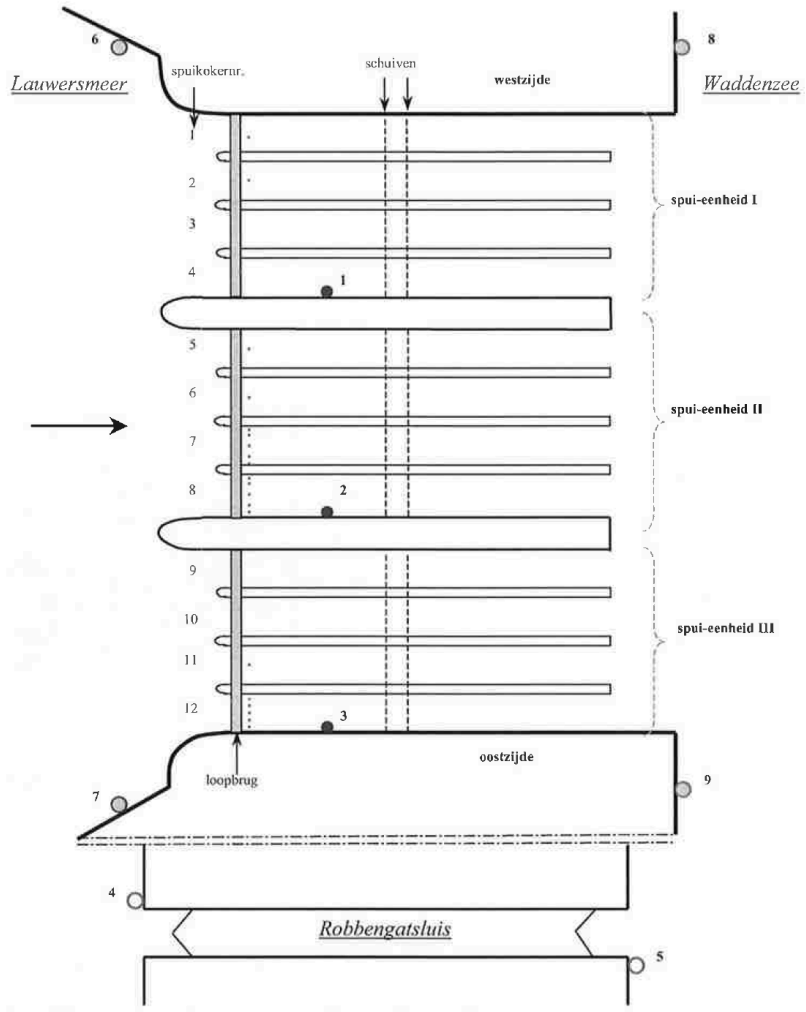
Openingsuren per jaar spuicomplex in Cleveringsluizen

(voor spuiactiviteiten)

Debieten ontleend aan database waterschap Noorderzijlvest 2010 - 2014			
	Debiet (m3/jaar)	Openings-uren	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

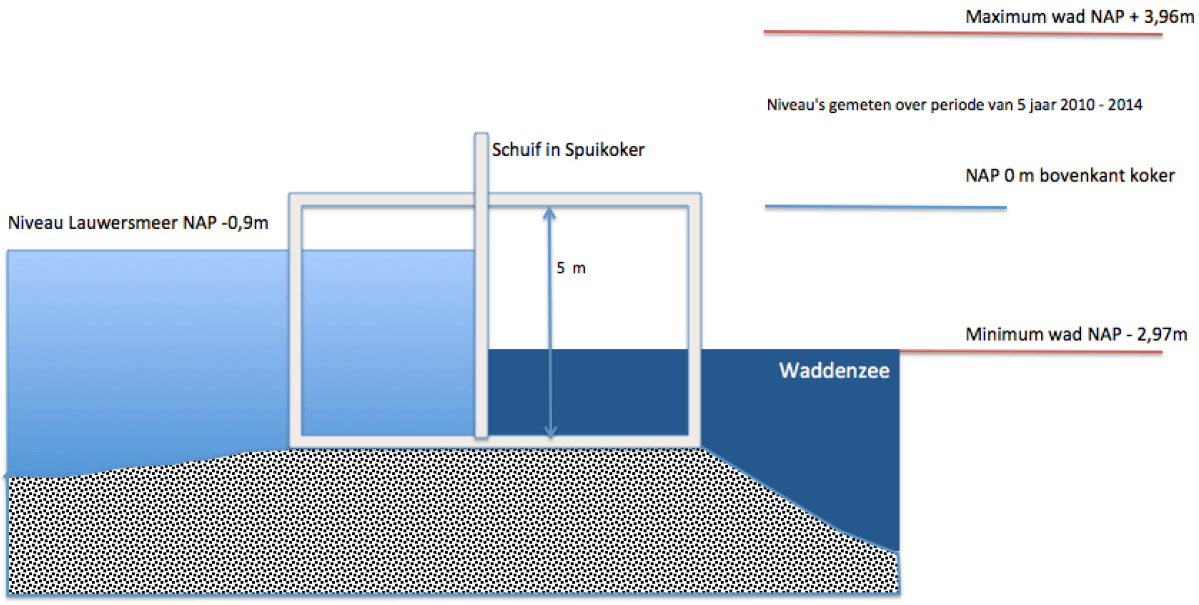
De R.J. Cleveringsluizen zijn opgebouwd uit 3 spui-eenheden, met daarin 4 spuikokers van elke 10 m breed. Daarmee heeft het complex een totale waterbreedte van 120 m. De spuikokers zijn 5 m diep en de bodembekleding is ontworpen op een maximale stroomsnelheid van 4,5 m/s. De lengte van de spuikokers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



Bovenaanzicht spuicomplex

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 spuikokers dus op NAP-5. Het lozen geschiedt veelal bij een peil van NAP-0,90. De sluizen openen en sluiten bij een verval van 0,12 m. Peilniveau wordt gemeten in punten 4 en 5 aan weerszijden Robbengatsluis;- overige punten zijn gepland voor meting stroomsnelheid



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/s^2

Op basis van de gegevens van het waterschap is vastgesteld dat de totale door de sluizen gestroomde water per jaar op jaarbasis 1,229 miljard m^3 bedraagt. Bij een peil van – 0,90 m NAP is het spuioppervlak (5 – 0,90) x 120 m^2

Runoff, regenwater en verdamping

Het Lauwersmeer heeft een bergingscapaciteit van 65 miljoen m^3. In een uur kunnen de sluiskokers tezamen bij een verval van 90 cm 7,2 miljoen m^3 afvoeren. Het meer heeft een oppervlak van 58 km^2, 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	^{o}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 spuieenheid

$P = 1/2 \times r \times h \times A \times v^3$	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	m2
Rendement van stroomopwekking	h	
h	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.m3

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:

Variant 1

Op basis van de gemiddelde stroomsnelheid kunnen geen betrouwbare waarde worden berekend van de potentiele 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	Investerings-ruimte
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 m^2 tegen over het spui oppervlak van de gezamenlijke kokers van (5 - 0,90 NAP) m x 120 m = 496 m^2. Daarnaast hebben de turbines ook een zekere weerstand. Om het zelfde debiet van 1,229 miljard m^3 te spuien hebben de turbines 760 uur nodig. Indien onverhoopt meer gespuid zou moeten worden dan kunnen de turbine deuren worden geheven.

Variant 2

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 (nog) niet waarschijnlijk dat voor deze prijs in de markt turbines te verkrijgen zijn.

Variant 3

Zonder acht te slaan op de oppositie vanuit enige groepering is door ons 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	m3	kWh	uren
-0,50	5.155.067.973	3.347.751	2.699

Inlaten			
Peil m NAP	m3	kWh	uren
-1,27	3.925.572.719	2.574.053	703

Totaal resultaat van maximaal spuien en gedoseerd inlaten			
m3 netto spuien	kWh	uren	Turbine vermogen per eenheid in kW
1.229.495.254	5.921.804	3.402	100

Rentabiliteit voor scenario 3 spuien en gedoseerd inlaten

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 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

Geraadpleegde literatuur

1. Kosten van waterstofproductie - : https://core.ac.uk/download/pdf/154676106.pdf (Large scale hydrogen production)

2. Populair filmpje over getijden energie - http://www.humsterlandenergie.nl/resources/Linkpagina/Wave-and-tidal-current-energy-–-A-review-of-the-current-state-of-research-beyond-technology.pdf

3. Stroomsnelheden in het Vierhuizengat (max 1,2 m/s slide 21) ;- https://www.slideshare.net/deltaressoftwaredagen/dsdnl-2018-geulmanagement-vierhuizergat-paarlberg

4. Fish Flow innovations visvriendelijke turbines uit Medenblik;- http://fishflowinnovations.nl/innovaties/vrije-stromingsturbine/

5. Low head rendementen van turbines in ondiep water stroming;- http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/49/10/102005/pdf

6. Investering indicaties van ECN voor turbines 2017;- https://www.ecn.nl/publications/PdfFetch.aspx?nr=ECN-N--17-013

7. Kwartiergegevens waterstanden ter hoogte van de Cleveringsluizen periode 2010 – 2014 (Waterschap Noorderzijlvest)

8. Stroomsnelheden als functie van de tijd tussen Ameland en Schiermonnikoog (Rijkswaterstaat HP – 33 D NL Tides)

9. De Betz limiet voor turbines wind en vloeistoffen; https://www.coursera.org/learn/wind-for-renewable-energies/lecture/JErMJ/standard-betz-law

10. Consequenties van gebruik getijdenenergie voor omgeving - https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115016676

11. Maximaal optredende windvlagen 3 seconde venster - http://bibliotheek.knmi.nl/knmipubWR/WR2017-01.pdf

12. Hulsbergen K, et al, “Dynamic Tidal Power for Korea” 1st Asian Wave and Tidal Conference Series, 2012.

13. Sarpkaya T, Isaacson M, “Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures” Van Nostrand Reinhold, 1981.

14. Mei CC “Notes on Tidal Diffraction by a Coastal Barrier” Applied Ocean Research, 36(2012), p22-25, 2012.

15. Adema J, “Potential locations for Dynamic Tidal Power in China” Report Strukton, 2010.

16. Arnold J, et al, “Selection of the most suitable turbine for application in DTP Dams” Report Strukton, 2012.

17. [6] Arnold J, et al, “Development of Fish Friendly Pumps and Turbines” HydroVision International, 2011.

18. Rendement van windturbines. http://cdn.intechopen.com/pdfs/16241/InTech-Aerodynamics_of_wind_turbines.pdf

19. Kosten windturbines (ECN 2018) https://www.ecn.nl/publications/PdfFetch.aspx?nr=ECN-N--17-011

20. Database moderne grote windmolens https://www.thewindpower.net/turbine_en_191_lagerwey_lw750-52.php