

# Energie uit water

**STICHTING DTP NETHERLANDS**

[HTTPS://WWW.DYNAMICTIDALPOWER.EU](https://www.dynamictidalpower.eu)

June 1, 2020

Opgesteld door: ir. Walther L. Walraven

# Energie uit water

## Inleiding

Energie uit water heeft in Nederland tot dusver weinig aandacht gekregen als kandidaat-optie voor de energietransitie. Het potentieel zou onvoldoende zijn, zowel in energieopbrengst als in rentabiliteit.

Die opvatting is begrijpelijk. Nederland heeft geen bergen en daarom niet de mogelijkheid om met valmeren energie uit waterkracht te winnen. De stroomsnelheden in de rivieren is beperkt en bovendien worden ze druk bevaren. Daardoor zijn weinig mogelijkheden zijn om turbines te plaatsen. In de Noordzee zijn de stroomsnelheden ook beperkt. Alleen op plaatsen waar de stroming geconditioneerd en waar zo hogere stroomsnelheden ontstaan, zijn er oplossingen denkbaar die een business case hebben met potentie. Het opgesteld vermogen bedraagt nog geen 50 Megawatt en de opgewekte stroom bedraagt 1 kWh per 1000 kWh van de landelijke vraag.

In deze beknopte beschouwing passeert een aantal technieken de revue. In de berekeningen wordt in dit stadium de grote lijn aangehouden volgens het principe van “rekenen voor de komma”. Alleen als de berekening voor de komma potentie heeft dan heeft het zin verder te ontwikkelen. Als dat niet het geval is, dan is het verstandig die optie tijdig te verlaten en niet - met subsidie - achter de komma door te rommelen.

## Inhoudsopgave

<b>Inleiding .....</b>	<b>1</b>
<b>Conclusie .....</b>	<b>2</b>
<b>Turbines in vrije stroming .....</b>	<b>3</b>
Turbines in rivieren .....	5
Turbine in meanderbocht in rivier, waar stroming verhoogd is .....	5
Getijdenenergie .....	6
Marsdiep casus .....	6
<b>Turbine in geconditioneerde stroming .....</b>	<b>7</b>
Tocado turbines in de Oosterschelde stormvloedkering .....	7
<b>Energie uit golfwerking .....</b>	<b>8</b>
<b>Marktkansen voor technologie gericht op energie uit water .....</b>	<b>9</b>
<b>Gevoeligheidsanalyse powerdammen in zee .....</b>	<b>11</b>

## Conclusie

Alle onderstaande business cases zijn berekend exclusief subsidie.

### Vrije turbines in de Noordzee

De opbrengst van turbines is sterk afhankelijk van de stroomsnelheden. Deze zijn in de Noordzee circa 0,7 – 1,3 m/s. In de business cases voor vrijestroom turbines zijn de turbineconstructies en de afvoer van stroom naar land de voornaamste kosten posten. Zonder subsidies zijn de terugverdiëntijden groter dan 30 jaar. Een turbine van 10 meter doorsnee levert 90.000 kWh per jaar bij 1,2 m/s.

### Vrije turbines in rivieren

In rivieren is op sommige plekken in meanderbochten voldoende stroming om met turbines energie te kunnen winnen. Bij een stroomsnelheid van 1,2 m/s levert een turbine van 2 meter doorsnee 9.000 kWh per jaar. De terugverdiëntijd is bijna 30 jaar op voorwaarde dat de stroomafvoer naar het grid dichtbij is. Als alle stromingsenergie van de Rijn wordt ingevangen, dan levert dat een bijdrage van 0,3% aan de huidige landelijke energiebehoefte.

### Turbines in de Noordzee in geconditioneerde stroming

Op locaties in zee waar de stroming wordt gestuwd, zoals bij dammen in zee en in de Oosterscheldewerken zijn stroomsnelheden en daarmee de opbrengsten per turbine beduidend hoger.

**Het Tocado project** is relatief kleinschalig waardoor de investeringen per KW inclusief de stroomafvoer uitkomen op € 3.150 per geïnstalleerde kW. De terugverdiëntijd bedraagt ruim 67 jaar. Een turbine van 4.7 m diameter produceert 497.000 kWh per jaar bij een maximale stroomsnelheid van 4,0 m/s. Dit project is een demo;- bij opschaling wordt de rentabiliteit ongetwijfeld een stuk beter. De vollasturen zijn beperkt (2.100 uur) omdat bij hoogwater en storm de installatie in de parkeerstand moet worden gezet.

**DTP dammen** hebben turbines met een doorsnee van 8 m en krijgen te maken met stroomsnelheden van > 10 m/s als gevolg van het verval. Eén turbine produceert dan gemiddeld 13 -15 miljoen kWh per jaar. Dammen bevatten 2.000 tot 2.500 turbines. De terugverdiëntijd bedraagt circa 8,5 jaar. Een dam van 50 km met 2.500 turbines kan voor 40% bijdragen aan de huidige landelijke energiebehoefte. Dammen gaan een mensenleven mee.

### Schaalvoordelen

Het combineren van vele turbines in een getijdencentrale leidt tot schaalvoordelen door lagere installatiekosten. Als bv. installatiekosten halveren dan worden terugverdiëntijden navenant korter: 10 – 12 jaar voor vrije turbines, 6 tot 7 jaar voor de geconditioneerde stroming variant.

## Turbines in vrije stroming

Er worden diverse proeven gedaan met turbines onder water in vrije stroom situaties.

Het **vermogen** van een onderwaterturbine in vrije stroming kan met de volgende formule worden berekend:

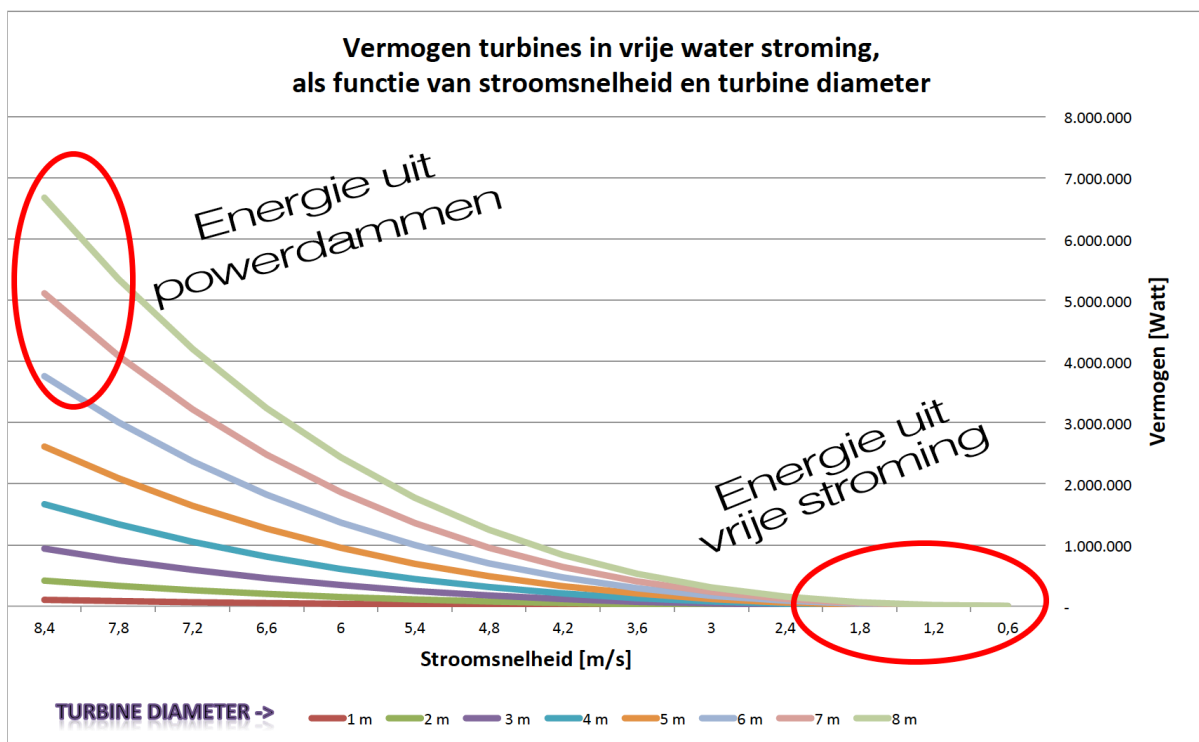
$$P = 1/2 \cdot \rho \cdot \eta \cdot A \cdot v^3$$

$P$	vermogen (watt)
$\rho$	de dichtheid van water (1.000 kg/m <sup>3</sup> )
$v$	de stroomsnelheid (m/s)
$A$	Oppervlak van de turbinedoorstroming (m <sup>2</sup> )
$\eta$ :	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% - 98%)
Tg	Turbine mechanisch rendement (70% - 85%)

Uit de formule blijkt, dat de stroomsnelheid de dominantie factor is, gevolgd door het turbineoppervlak. Het is dus zaak om locaties te vinden waar de stroomsnelheid hoog is.

Turbine – Diameter [m]								
Stroom snelheid[m/s]	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m	8 m
0,6	38	152	342	608	950	1.369	1.863	2.433
1,2	304	1.216	2.737	4.866	7.603	10.948	14.902	19.464
1,8	1.026	4.106	9.238	16.423	25.660	36.951	50.294	65.691
2,4	2.433	9.732	21.897	38.928	60.825	87.587	119.216	155.711
3	4.752	19.008	42.767	76.031	118.798	171.069	232.844	304.123
3,6	8.211	32.845	73.902	131.381	205.283	295.607	402.354	525.524
4,2	13.039	52.157	117.353	208.628	325.982	469.414	638.924	834.513
4,8	19.464	77.855	175.175	311.422	486.597	700.699	953.729	1.245.687
5,4	27.713	110.853	249.419	443.411	692.830	997.675	1.357.946	1.773.644
6	38.015	152.061	342.138	608.246	950.384	1.368.553	1.862.752	2.432.983
6,6	50.598	202.394	455.386	809.575	1.264.961	1.821.544	2.479.323	3.238.300
7,2	65.691	262.762	591.215	1.051.048	1.642.263	2.364.859	3.218.836	4.204.194
7,8	83.520	334.079	751.678	1.336.316	2.087.993	3.006.710	4.092.467	5.345.263
8,4	104.314	417.257	938.827	1.669.026	2.607.853	3.755.309	5.111.392	6.676.104
9	128.302	513.207	1.154.716	2.052.829	3.207.545	4.618.865	6.286.789	8.211.316

TABEL 1 VERMOGEN IN WATT VAN TURBINES ALS FUNCTIE VAN STROOMSNELHEID EN TURBINEDIAMETER



AFBEELDING 1 VERMOGEN ALS FUNCTIE VAN STROOMSNELHEID EN TURBINEDIAMETER. MET EEN OVERAL TURBINERENDEMENT VAN 48%

Bovenstaande grafiek toont lijnen van turbines met diameters van 1 t/m 8 meter. De invloed van de stroomsnelheid is een 3-de machtsfunctie en de diameter is een 2-machtsfunctie in het vermogen.

Grotere diameters leveren exponentieel meer vermogen. Er is inmiddels enige jaren ervaring met grote turbines onder water.

In powerdammen wordt de getijde stroming gedwongen door turbines in de dam. Hierdoor treffen we bij getijdesnelheden van 1 m/s in de turbinerotor stroomsnelheden van meer dan 10 m/s aan. Per turbine kunnen dan vermogens bereikt worden van meer dan 5 MW.

Turbines die in de vrije stroming worden geplaatst kunnen een beperkt vermogen genereren in Nederlandse omstandigheden waar stromingen van maximaal 1,5 m/s optreden.

**Noot:** Voor de uitgewerkte voorbeelden hebben we de in praktijk haalbare rendementen voor de combinatie turbine (80%) en generator (95%) genomen.

De maximale hoeveelheid energie die uit vrije stroming gehaald kan worden is 59,3%.

De gehanteerde totaal rendement wordt dan  $59,3\% \times 80\% \times 95\% = 45\%$

## Turbines in rivieren

In onze rivieren treffen we stroomsnelheden die over de breedte van de rivier variëren van 0,5 – 1,5 m/s. In het midden is de stroomsnelheid het grootst. Maar turbines plaatsen midden in rivieren is geen optie: de scheepvaart heeft voorrang. Vanwege de scheepvaart kunnen we ook geen valmeren maken. Dat zou overigens weinig zin hebben omdat het peilverschil van de Rijn tussen Lobith en zeeniveau 7,8 m bedraagt. De Rijn voert bij Lobith met gemiddeld 2.200 m<sup>3</sup>/s water af. De Maas voert 11% van die hoeveelheid af. De gemiddelde stroomsnelheid in de Rijn bedraagt 1 m/s.

De potentiële energie die uit de Rijn gewonnen kan worden vinden we door het debiet een verval van 7,8 m te laten maken.

$$E = m \cdot g \cdot h / 2 \text{ [Joule]}$$

*m* de gewicht van de waterkolom over de gehele hoogte *h* (kg)

*soortelijk gewicht water 1000 kg/m<sup>3</sup>*

*g* de gravitatieversnelling 9,81 (m/s<sup>2</sup>)

*h* afstand tussen wateroppervlak en hart turbine

$$E = [(2.200 \times 8.760 \times 3.600 \times 1.000) \text{ m}^3 \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 7,8 \text{ m} / 2] / 3.600.000 \text{ Joule/kWh} = 737,3 \times 10^6 \text{ kWh}$$

Als we dus alle stroming van de Rijn zouden kunnen invangen met turbines met een rendement van 45%, dan draagt die operatie 0,3% bij aan het verduurzamen van de stroombehoefte in ons land.

In onderstaande berekeningen is ook de berekening incl. subsidie opgenomen.

## Turbine in meanderbocht in rivier, waar stroming verhoogd is

Gem stroomsnelheid	1,2 m/s
Turbines	1
Diameter	2 m
P <sub>max</sub> /turb	1,2 kW
P <sub>max</sub>	1,22 kW
Vollast	7.500 uur
Jaaropbrengst	9.128 kWh
Stroomprijs	€ 0,06 /kWh
Omzet	€ 548

Turbine + constructie	4.000 €/kW
Aansluiting 250 m	25 €/m
Investering	€ 11.118
Onderhoud 1,5%	€ 167

Payout	29,2 jaar
Met SDE+ 9 cent/kWh	9,2

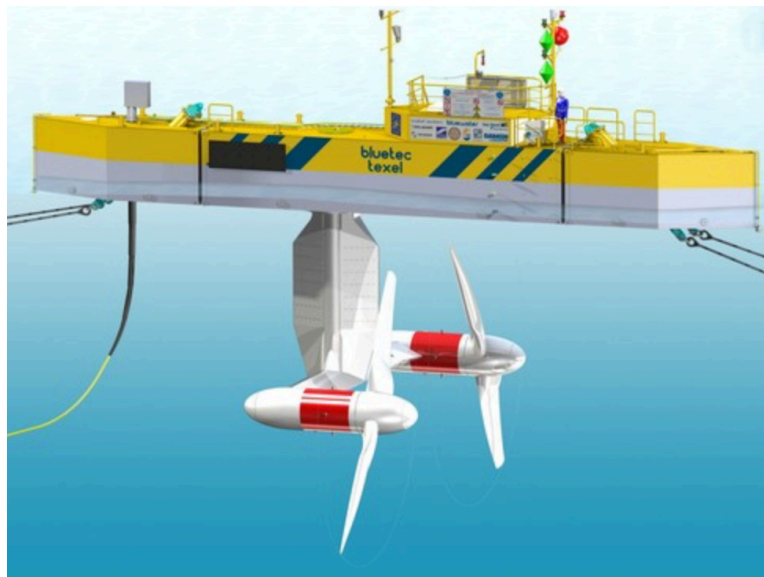
## Getijdenenergie

In de Noordzee treden maximale getijdensnelheden op van 1,3 m/s voor de Zeeuwse kust tot 0,7 m/s boven het Wad. Turbines, die ontworpen zijn om bij de maximale stroming vermogen ( $P_{max}$ ) te kunnen leveren produceren op jaarbasis 2.500 – 3.000 vollasturen (FLH) in getijde situatie met eb en vloed. We werken enkele voorbeelden uit met een stroomprijs van 6 cent per kWh

## Marsdiep casus

<https://www.deingenieur.nl/artikel/proef-met-getijenergie-texel>

Max getijde snelheid	1,2 m/s
Turbines	2
Diameter	10 m
$P_{max}$ /turb	30,4 kW
$P_{max}$ totaal	61 kW
Vollast	3.000 uur
Jaaropbrengst	182.566 kWh
Stroomprijs	€ 0,06 /kWh
Omzet	€ 10.954
Turbine + constructie	2.500 €/kW
Aansluiting 1000 m	100 €/m
Investering	€ 252.139
Onderhoud 1,5%	€ 3.782
Payout	35,2 jaar
Met SDE+ 9 cent/kWh	10,7



AFBEELDING 2 TURBINES MET DIAMETER VAN 10 M IN MARSDIEP

## Turbine in geconditioneerde stroming

### Tocado turbines in de Oosterschelde stormvloedkering

Zeewater wordt door de spui-openingen geperst waardoor de maximale stroomsnelheid van 1 m/s naar 4,5 m/s verhoogd wordt.

Max getijde snelheid	4 m/s
Turbines	5
Diameter	4,7 m
Pmax /turb	248,9 kW
Pmax	1.245 kW
Vollast (incl. verplichte parkeerstand bij storm en hoogwater - waterwet)	2.100 uur
Jaaropbrengst	2.613.909 kWh
Stroomprijs	€ 0,06 /kWh
Omzet	€ 156.835
Turbine + constructie	3.000 €/kW
Aansluiting 1000 m	200 €/m
Investering	€ 3.930.000
Onderhoud 2,5%	€ 98.250
Payout	67,1 jaar
Met SDE+ 9 cent/kWh	13,4

Bron : Obligatie wervingsrapport en [http://publications.deltares.nl/1201321\\_000.pdf](http://publications.deltares.nl/1201321_000.pdf)



AFBEELDING 3: TOCARD0

De Zeeuwse courant MELDT: 5 turbines leveren energie voor 1.000 huishoudens,  
Wij berekenen 776 huishoudens van 3.600 kWh/jaar

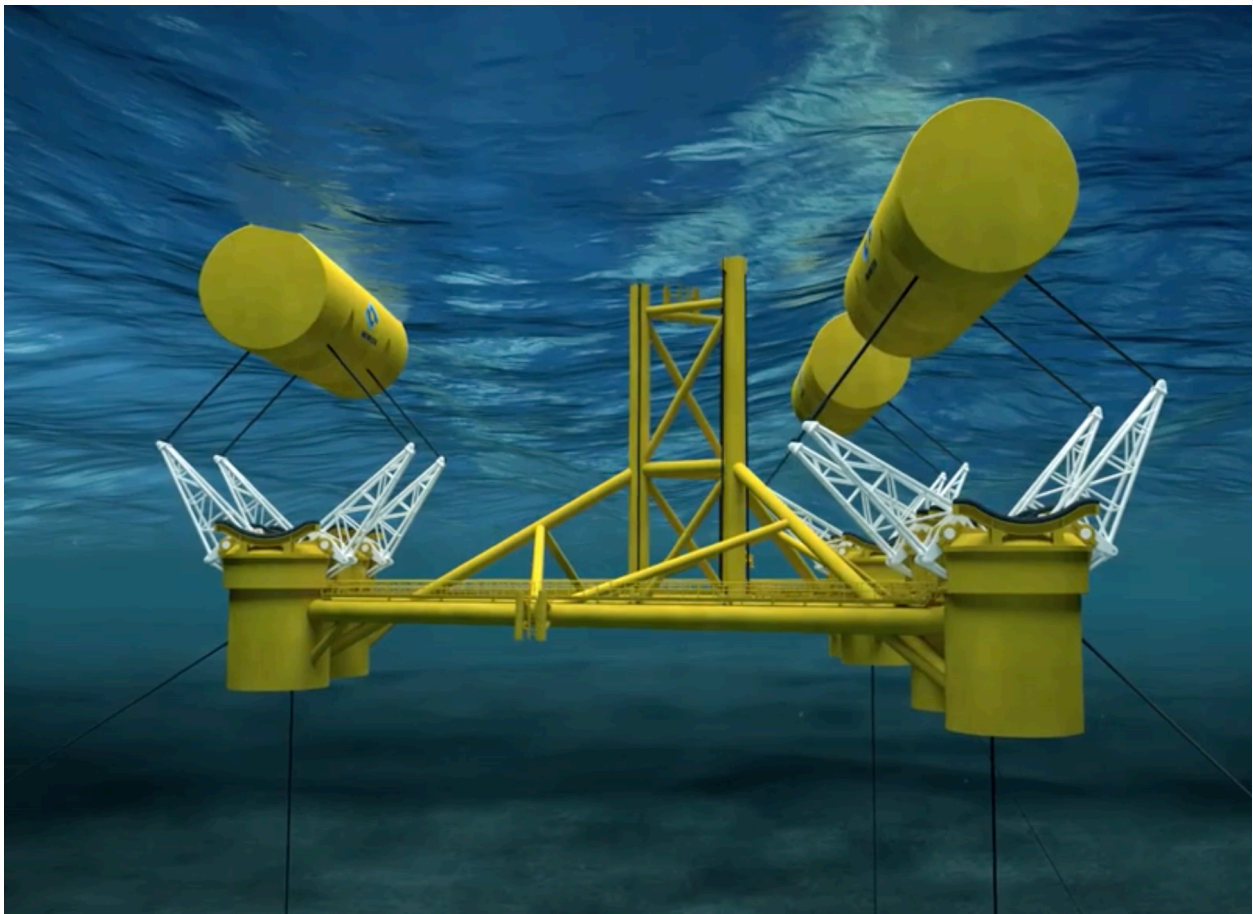


## Energie uit golfwerking

Aan de Nederlandse kust zijn de golven die de kust bereiken bescheiden ten opzichte van andere plekken in de wereld. Per vierkante meter is theoretisch 10 kW vermogen beschikbaar. Aan de kusten in Portugal en Engeland is op sommige plaatsten 8 tot 10 x meer energie te winnen.

Bron: <http://publications.deltares.nl/Deltares092.pdf>

Diverse systemen zijn beproefd in gebieden met veel golfenergie. Het omzetten van de oscillerende beweging van golven in generator vermogen is tot dusver niet erg succesvol gebleken. De energieprijzen van de opgewekte stroom blijken ruim boven de 30 cent per kWh uit te komen. Experts verwachten dat op termijn kWh prijzen (LCOE) bereikt zouden kunnen worden die acceptabel zijn voor de energiemarkt.



<https://youtu.be/7QqYN9LXfhw>

## Marktkansen voor technologie gericht op energie uit water

In de race om technologie te ontwikkelen die CO<sub>2</sub>-vrije energie kan opleveren zijn de marktkansen alleen aanwezig als deze op termijn zonder overheidssteun met een gezonde marge stroom kunnen verkopen op de markt. Subsidies zijn gerechtvaardigd in de pioniers- en vroege volwassenheidsfase. Op deze wijze hebben zon en wind ook hun intrede kunnen maken.

De prijzen voor elektriciteit die door bedrijven en consumenten wordt betaald bestaat uit een aantal componenten:

- Productieprijs, deze wordt als regel uitgedrukt in de LCOE; - dat zijn alle kosten gedurende de levensduur gedeeld door de kilowattuur productie in die periode. Bovenop deze prijs wordt een winstmarge gezet.
- Overheidsmaatregelen, deze bestaan uit productiesubsidies (zoals de SDE++) en heffingen zoals CO<sub>2</sub> beprijzen en accijnzen.
- a) + b) levert een marktprijs op die verhandeld wordt op de beurs.
- Netwerkbedrijven krijgen een vergoeding voor de feitelijke levering tot aan de meter. In de komend jaren gaan die kosten flink omhoog omdat zon, wind en ander niet op afroep beschikbaar vermogen leidt tot de noodzaak van netverzwaring en kosten voor opslag.
- Tenslotte heft de overheid energiebelasting, ODE en BTW.

Elektriciteitsprijzen						Energie uit water	
cent/kWh 2030						overig	DTP(*)
	Gas	Kolen	Biomassa	Zon	Wind		
Vollasturen	> 8.000	> 8.000	> 8.000	950	2.300 - 3.800	3000	> 8.000
<b>Producent</b>							
Productieprijs( LCOE)	3,50	3,00	30,00	4,00	4,00	10,00	4,03
Winstopslag	0,70	0,60	1,00	0,80	0,80	2,00	0,81
<b>Overheden</b>							
af productie subsidie			-23,50			-4,00	
CO <sub>2</sub> beprijzen ETS	3,00	4,00	-	-	-	-	-
Marktprijs op de APX	7,20	7,60	7,50	4,80	4,80	8,00	4,83
<b>Energieleveranciers</b>							
Vastrechtkosten en winstopslag	1,08	1,14	1,13	0,72	0,72	1,20	0,73
<b>TSO's en netwerkbedrijven</b>							
Netwerkkosten	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30
Congestie en balanskosten				5,00	4,00	3,00	
<b>Overheden</b>							
Energiebelasting	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Opslag duurzame energie (ODE)	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
<b>BTW</b>							
	3,90	4,00	3,97	4,37	4,16	4,73	3,33
Gemiddelde prijs	22,48	23,04	22,90	25,19	23,98	27,23	19,19

(\*) Dtp wordt als regel uitgevoerd met een eigen opslagsysteem;- de LCOE is inclusief opslag en de dam produceert het jaarrond een continue vermogen.

Bovenstaande tabel is indicatief. Aanbod gedreven bronnen als wind, zon en turbines die stochastisch draaien, genereren netwerkkosten door piekbelasting, de behoefte aan opslag en de behoefte aan snel inzetbaar vermogen.

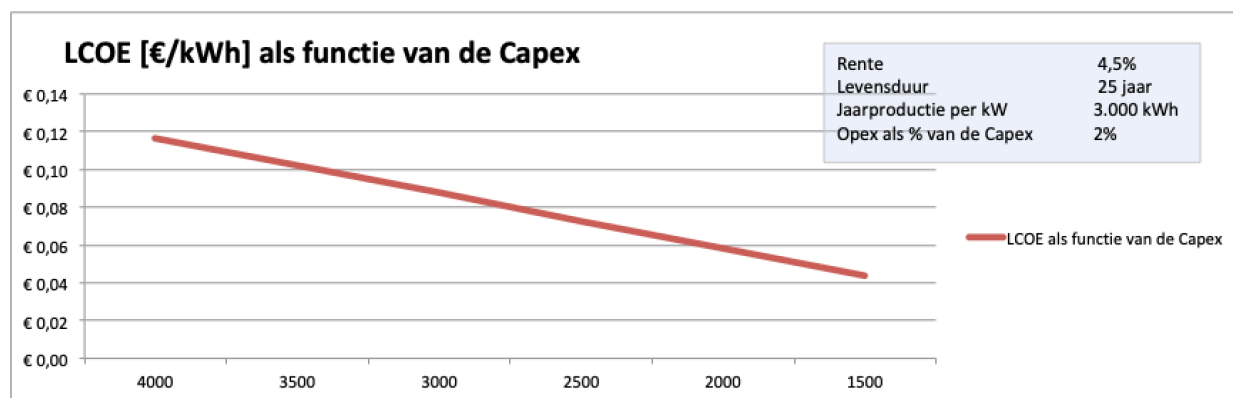
Die netwerkkosten worden thans niet doorberekend aan de producenten, maar worden verdeeld over alle afnemers in de vorm van netwerkkosten. Daar zit een bepaalde mate van onjuist toerekenen van kosten in. De netwerk systeemkosten van bijvoorbeeld Geothermie en DTP zijn veel lager. Dergelijke techniek zou daarvoor gecompenseerd moeten kunnen worden. Waarmee de marktkansen sterk vergroot worden. Dat geldt ook voor de ODE die wordt geheven om opslag van duurzame energie mogelijk te maken. Voor Geothermie en DTP geldt dat niet want deze technieken kunnen een baselaad leveren.

De algemene verwachting is dat de prijzen voor elektriciteit zullen stijgen. Hoewel zon en wind goedkoper zullen worden introduceren deze bronnen steeds hogere netwerkkosten, omdat de opslag en congestieproblematiek toeneemt met de toename van het marktaandeel van deze vormen van energieopwekking. Door een mogelijke afname van de vraag naar kolen en gas zal de wereldmarktprijs dalen. Echter de prijs op de beurs zal worden verhoogd met CO<sub>2</sub> belasting om deze vormen van energie opwekking te ontmoedigen.

De ontwikkeling van baseload vermogen en flexibel inzetbare CO<sub>2</sub>-vrij vermogen zullen door een **aangepast beleidssysteem** moeten worden gestimuleerd. Hetgeen ongetwijfeld tot meer innovaties gaat leiden. Uit de tabel blijkt dat de overheid met de geïntroduceerde instrumenten de energiemarkt zeer sterk kan beïnvloeden. **Hier is dus een lobby naar de politiek geboden.**

Voor energiesystemen uit water, met een jaaropbrengst van 3.000 kWh per KW geïnstalleerd mogen, een levensduur van 25 jaar, een annuïtaire rente van 4,5% en een OPEX van 2% is het verband tussen de LCOE en de Capex in onderstaande grafiek getoond.

Om in de markt te slagen zullen van energie uit water systemen, de investeringen per KW geïnstalleerd vermogen lager moeten zijn dan € 2.150 om met een redelijke winstmarge de concurrentie aan te kunnen zonder subsidies.



AFBEELDING 4: VERBAND TUSSEN LCOE EN CAPEX

## Gevoeligheidsanalyse powerdammen in zee

In onderstaande tabel is het verband tussen damlengte [km] en maximale getijde stroomsnelheid  $V_{\max}$  [m/s] aangetoond voor powerdammen in zee. Het betreft hier een dam aan de kust gebouwd. De LCOE is over de financieringsperiode van 60 jaar bepaald met een annuïtaire rente van 4,5%.

Vermogen, opbrengst, Capex, LCOE en PAY-OUT van powerdammen in de Noordzee	$V_{\max}$ getijde (m/s)		
	0,8	1,0	1,2
<b>Damlengte 50 km aan de kust met walvisstaart</b>			
Vermogen (GW)	10,8	17,2	25
Opbrengst (PJ)	125,3	176,0	259,9
Percentage van landelijke vraag in 2019 zijnde 432 PJ	30%	42%	61%
Capex (€/ kWe)	2.406	1.690	1.366
LCOE inclusief eigen opslag voor baseload (€-cent/kWh), (annuïtaire financiering met rente 4,5%, Opex 1,4% van investering) (1)	5,50	3,90	3,20
Aan te sluiten vermogen op het grid; baseload( GW)	3,97	5,58	8,24
Gridaansluiting vanaf dam (mrd €) (3)	0,15	0,24	0,55
Percentage van de investering	0,6%	0,8%	1,6%
PAY-OUT bij verkoop stroom in 2033 voor € 0,07/ kWh - zonder subsidie (2) & (4)	10,7	8,5	6,8

### Toelichting bij tabel

- 1) Dammen gaan een mensenleven mee; uit overleg met pensioenfondsen is gebleken dat een annuïtaire financiering met een looptijd van 60 jaar mogelijk is.
- 2) De waarde van de stroom van powerdammen in de RES categorie mogen hoger gewaardeerd worden dan de stroom van zon en wind. De vermeden maatschappelijke kosten t.o.v. zon en wind zijn:
  - a) Tenminste 2,5 cent per kWh voor niet uit te geven grid aanpassing. Powerdammen met eigen opslag kennen geen pieken en dalen en kunnen direct kolencentrales vervangen
  - b) 10 – 20 cent per kWh voor vermeden opslagkosten; hetzij via waterstof, hetzij via valmeren in Noorwegen of via chemische opslag in batterijen.
- 3) De grid aansluiting is een onderhandelingsitem met Tennet en is nog niet in de LCOE opgenomen. Omdat de aansluitingskosten t.o.v. wind op zee een factor 10 kleiner zijn, mag verwacht worden dat daar waar voor wind een vergoeding van 1,5 cent/kWh is overeengekomen, dat deze voor powerdammen 0,15 cent/kWh zullen zijn.
- 4) De pay-out is de zogenaamde simpel pay-out, zonder inflatiecorrecties en andere manipuleerbare effecten.