

Opslag en waterstof in de energie transitie

Inleiding

Fossiele centrales leveren stroom op vraag; zijn dus vraaggestuurd. Zon en wind en ook energiedammen in zee zijn aanbod gestuurd. Het opgesteld vermogen in ons land bedraagt 19 GW. De vraag varieert van 9 GW tot circa 17 GW, met een enkele keer een piek tot boven de 18 GW.

Er wordt volop geïnvesteerd in zon en wind. Het gesommeerd vermogen zal in 2030 ruim boven de 30 GW uitkomen. In 2019 is dat gesommeerd vermogen volgens CBS 6,8 GW voor zon en 4,5 GW voor wind.

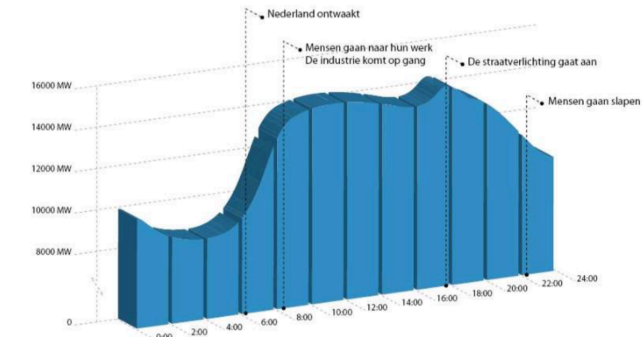
Zon en wind hebben voorrang bij wet op de fossielproducenten. Daarom zullen fossiele centrales steeds minder uren gaan maken en steeds vaker ingezet worden als bijstook. De kosten daarvan zijn hieronder uitgewerkt.

Als er meer geproduceerd wordt dan de vraag dan kunnen we die stroom niet kwijt. De volgende opties zijn dan:

1. Curtailment (weggooien), dat gebeurt nu al met zonnestroom op bijvoorbeeld Vlieland.
2. Exporteren. De meeste landen hebben ook reeds teveel dat is vaak niet mogelijk.
3. Opslag; dat kan in valmeren, batterijen en waterstof.

In dit artikel wordt dieper ingegaan op de kosten van opslag als functie van het rendement van de opslag de vereiste accu capaciteit en het vereiste opslagvolume als percentage van de jaarproductie.

Dagpatroon elektriciteitsverbruik in Nederland



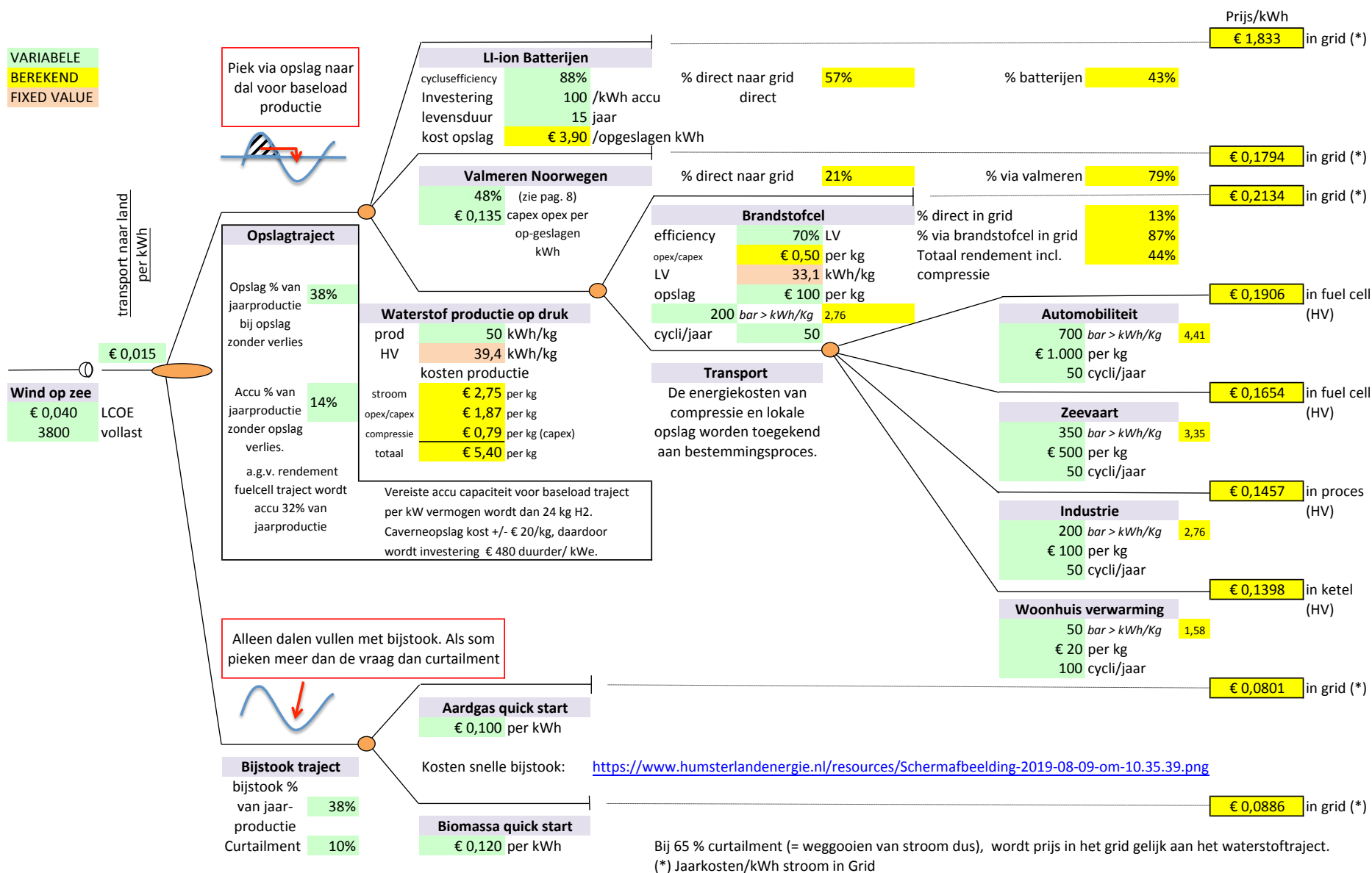
Bron: TenneT⁴.

Inhoudsopgave

- pag. 2 [Flowchart maakprijzen van stroom in het grid met opslag en kosten waterstof voor diverse toepassingen](#)
 pag. 3 [Uitgangspunten](#)
 pag. 4 [Investeringsdetails ter bepaling capex en opex](#)
 pag. 5 [Kostenopbouw waterstof productie](#)
 pag. 6 [Kosten compressie](#)
 pag. 7 [Het opslagprobleem: de volume van de opslag en het rendement van de opslag](#)
 pag. 8 [Opslag in valmeren](#)
 pag. 9 [Naschrift vergelijking zon/ wind en energiedammen \(kosten van waterstofproductie en opslag\)](#)

Samenvatting berekeningen

Maakprijzen per kWh excl. Btw, excl. Accijnzen met wind op zee	Waterstof	Lion batterij	Valmeer	Fuel cell	Auto's	Zeevaart	Industrie	Woonhuizen	Bijstook	Bijstook
	€/kg	€/kWh	€/kWh	€/kWh	€/kWh	€/kWh	€/kWh	€/kWh	aardgas	biogas
	excl. opslag energiekosten, incl. compressor investering	stroom in grid	stroom in grid	stroom in grid incl. compressie	waterstof (HV) incl. compressie	waterstof (HV) incl. compressie	waterstof (HV) incl. compressie	waterstof (HV) incl. compressie	stroom in grid incl. curtailment	stroom in grid incl. curtailment
	€ 5,40	€ 1,833	€ 0,1794	€ 0,2134	€ 0,1906	€ 0,1654	€ 0,1457	€ 0,1398	€ 0,0801	€ 0,0886



Uitgangspunten

Bijstook traject

Wind en zon kunnen niet leveren op commando. Zolang het aangeboden vermogen van wind + zon lager is dan de vraag kunnen fossiele centrales teruggeregeld worden. De bijstook geschiedt met snelle gascentrales. Doordat deze stand-by staan en weinig vollasturen hebben zijn de LCOE kosten hoger dan de baseloadcentrales.

Opslagtraject

Geleidelijk aan zal het vermogen van wind en zon toenemen. Daarbij willen we ook af van fossiele centrales. Hierdoor zal er opslag noodzakelijk zijn we hebben daar bij 3 opties bekeken:

1. Opslag via batterijen - dat is erg kostbaar
2. Opslag via valmeren
3. Opslag via het waterstoftraject

Productie van waterstof

Naast de productie en opslag van waterstof voor gridstabiliteit zijn 4 opties uitgewerkt voor de inzet van waterstof

1. Voor automobilititeit; dit zijn de kWh prijzen van waterstof; voor de kg prijs moet deze waarde vermenigvuldigd worden met 39,4.

Om de TTW te berekenen voor auto's moet de waarde vermenigvuldigd worden met 39,4/33,1. Omdat de fuel cells op onderwaarde functioneren. De TTW wordt dan € 0,2287 per kWh excl. accijnzen, btw en winst. De TTW van benzine is +/- € 0,66 incl. alle kosten.

2. Voor vaartuigen; dit zijn de kWh prijzen van waterstof; voor de kg prijs moet deze waarde vermenigvuldigd worden met 39,4.
3. Voor de industrie; dit zijn de kWh prijzen van waterstof; voor de kg prijs moet deze waarde vermenigvuldigd worden met 39,4.
4. Voor woonhuisverwarming; dit zijn de kWh prijzen van waterstof; voor de kg prijs moet deze waarde vermenigvuldigd worden met 39,4.

Het ketelrendement voor watertstofketels bedraagt 95%. De warmte kost dan € 0,1781 per kWh, incl. BTW excl. winst, belastingen en netwerk-kosten. Bij een aardgasprijs van € 0,80 per m3 voor huishoudens kost warmte € 0,091 per kWh, inclusief alle kosten en belastingen.

5. Brandstofcellen hebben zuiver waterstof nodig: 99,999% (H3) tot 99,9999% (H4) zuiver. H4 staat voor 4 cijfers achter de komma. Deze eis maakt dat in het productie proces een reiniging stap noodzakelijk is.

LOCE, opslagvolume en accupaciteit

De LCOE (levelized cost of electricity) wordt berekend door alle jaarkosten te delen door de jaarproductie. Van windturbines op zee worden de aansluitingskosten aan het grid in de publicaties vaak niet volledig meegenomen. Deze kosten worden door consumenten betaald via de netwerkkosten van het netwerkbedrijf. De nieuwe generaties windmolens op zee zijn groter met grote wiekdiameters en zijn verderop zee geplaatst. Het waait daar vaker en met hogere windsnelheden. Van deze molens verwacht men vollasturen van 4.000 tot 5.000 uur per jaar.

Opslagvolume. Als we van de stroom van windmolens een baselaad willen maken zal vastgesteld moeten worden hoeveel van de productie opgeslagen moet worden. In ons voorbeeld zijn wij uitgegaan van 5 MW turbines voor de Hollandse kust, met een opslagvolume van 38%.
<https://www.humsterlandenergie.nl/resources/stacks-image-f8e606f-1200x582.png>

Accupaciteit. Door de uurproductie van 8.760 uur af te zetten tegen de baselaad kan vastgesteld worden hoe groot de accupaciteit moet zijn. Voor zonne-energie is die 33% en voor het voorbeeld van de 5 MW turbine 14% van de jaarproductie.

Investeringsdetails

rente **4,50%** op alle investeringen

LV = lower heating value 33,1 kWh/kg Bij fuel cells maximaal te benutten 90% in theorie. Praktijk 50 - 70% mogelijk. Dus met 1 kg H₂ 16,5 tot 23,2 kWh.
 HV = higher heating value 39,4 per kg Bij verwarmingsdoeleinden volledig te benutten, niet voor fuel cells

Bron <https://www.humsterlandenergie.nl/resources/Links-duurzaam/Linkpagina/Maximum-conversion-efficiency-of-hydrogen-fuel-cells.pdf>

Investeringen (al deze waarden zijn muteerbaar en worden doorgerekend in de flowchart uitkomsten)

Kosten electrolyzer	turnkey	€ 900 per kWe
Levensduur		15
Kosten stacks per 7,5 jaar (jaren tellen zwaarder dan draaiuren)		€ 250 per kWe
Levensduur		7,5 jaar
Kosten compressor met capaciteit kg waterstof/uur		€ 29.000 per kg/ uur
Levensduur compressor		15 jaar
Kosten opslag 200 bar	200 bar	€ 100 per kg
Kosten opslag 350 bar	350 bar	€ 500 per kg
Kosten opslag 750 bar	750 bar	€ 1.000 per kg
Kosten opslag zoutcaverne	200 bar	€ 20 per kg
Kosten fuel cell		€ 100 per kWe
Levensduur fuel cell		15 jaar
Stacks fuel cell elke 7,5 jaar (jaren tellen zwaarder dan draaiuren)		€ 40 per kWe
Levensduur stacks fuel cell		7,5 jaar

Kosten per kg waterstofproductie

De productie is een functie van het rendement en de vollasturen

Vollasturen	3800	
Dat levert voor een molen van 1 KW op	3800	kWh
Rendement proces	50	kWh kg, ergo productie per kWe
	76,00	kg per jaar

<i>De jaarkosten electrolyzer rente en aflossing</i>	€ 83,80	per kWe
De jaarkosten stacks rente en aflossing	€ 40,01	per kWe
Operationele kosten	2% van de investering	€ 18,00 per kWe
Totaal	€ 141,81	per kWe
Hardware kosten per kg productie	€ 1,87	per kg

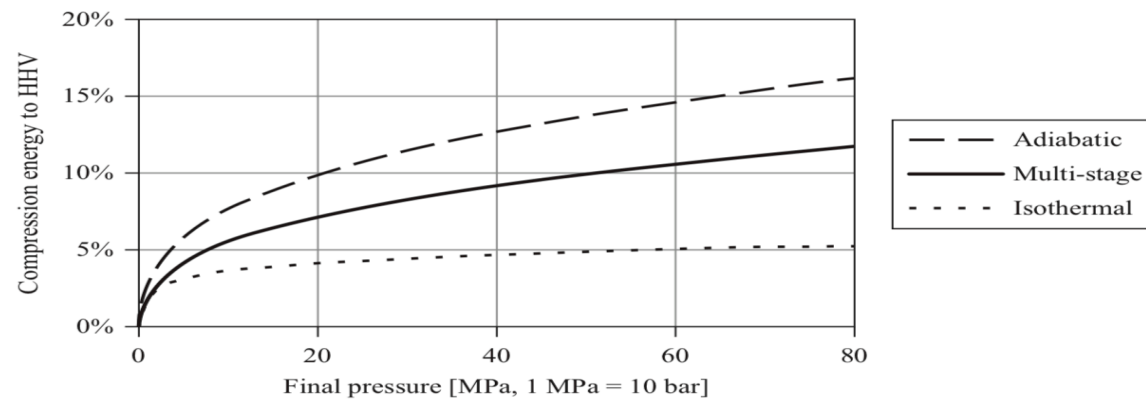
<i>De jaarkosten fuel cell rente en aflossing</i>	€ 9,31	per kWe
De jaarkosten stacks rente en aflossing	€ 6,40	per kWe
Operationele kosten	1% van de investering	€ 1,00 per kWe
Totaal	€ 16,71	per kWe
Betrokken op de verwerking van 1 kg waterstof op LV = lower heating value	€ 0,50	per kg

Kosten compressie

Benodigde capaciteit bij maximale productie	1 kWe levert	0,020 kg H2 per uur
Er is daarvoor een compressor nodig met een investering van		€ 580
De jaarkosten compressor rente en aflossing		€ 54,01
Onderhoud	1% van de investering	€ 6
Totaal		€ 59,81
Compressie kosten per kg productie		€ 0,79 per kg

Energetische kosten Multi stage compressie waterstof

%HV	druk	Energie kWh per kg
0,0%	0	0,00
4,0%	50	1,58
5,5%	100	2,17
6,2%	150	2,44
7,0%	200	2,76
7,5%	250	2,96
8,1%	300	3,19
8,5%	350	3,35
9,0%	400	3,55
9,50%	450	3,74
10,00%	500	3,94
10,20%	550	4,02
10,50%	600	4,14
11,00%	650	4,33
11,20%	700	4,41
11,40%	750	4,49
11,90%	800	4,69



Bron: <https://www.dynamictidalpower.eu/resources/Documenten/Hydrogen-storage-and-compression-2018-.pdf>

Het opslag probleem

Om een baseload te maken is nodig dat	x	38% wordt opgeslagen
Die opslag geschiedt met	r	48% rendement
In het grid komt dan terecht	x.r	18% van de productie
Direct komt er in het grid	y	62% van de productie
De verhouding via opslag/ direct	x.r/y	29%
En die verhouding moet zijn	x/y	61% bij een opslag rendement van 100%

Doordat het opslagproces met verlies gepaard gaat moet het theoretisch berekende opslagvolume worden gecorrigeerd.

De vraag is hoeveel moet er nu via de opslag gaan om de juiste verhouding te houden in relatie tot het opslagrendement.

Stel het nieuwe percentage dat naar de opslag moet = x_n en y_n = het nieuwe percentage dat direct naar het grid gaat.

Dan geldt $\frac{x_n \cdot r}{y_n} = 61\%$ Deze verhouding is noodzakelijk om een baseload te maken.

$x_n \cdot r + y_n = 100\%$ De nieuwe hoeveelheden samen moeten weer 100% opleveren.

Dan volgt $x_n = \frac{(x/y) / r}{(x/y) / r + 100\%} = 79\%$
 $y_n = \frac{100\% - x_n}{1} = 21\%$

efficiëncy opslag	Vereist opslag percentage bij opslag zonder verliezen									
	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
100%	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
90%	0%	11%	22%	33%	44%	56%	67%	78%	89%	100%
80%	0%	13%	25%	38%	50%	63%	75%	88%	100%	100%
70%	0%	14%	29%	43%	57%	71%	86%	100%	100%	100%
60%	0%	17%	33%	50%	67%	83%	100%	100%	100%	100%
50%	0%	20%	40%	60%	80%	100%	100%	100%	100%	100%
40%	0%	25%	50%	75%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
30%	0%	33%	67%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
20%	0%	50%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
10%	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0%	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Tabel toont waarden voor x_n

Toelichting bij de tabel

In de tabel zijn de waarden voor x_n af te lezen

Bij een efficiëncy van de opslag van 100% komen de waarden van x_n uiteraard overeen met het opslagpercentage zonder verliezen.

Indien bijvoorbeeld bij windmolens het vereist opslagpercentage 30% bedraagt zonder verliezen, en het feitelijk opslag rendement percentage 40% bedraagt, dan moet van de jaarproductie 75% via de opslag naar het grid.

Uiteindelijk komt dan in het Grid:

40% x 75% = 30% van jaarproductie via opslag naar het grid

100% - 75% = 25% direct naar het grid

Totaal 55% van de molen productie naar het grid

Bijna 50% gaat dan dus verloren in het opslagproces.

Opslag wind <https://www.humsterlandenergie.nl/resources/stacks-image-f8e606f-1200x582.png>

Opslag in valmeren

Basisprijs van de stroom + zeetransport		0,055 €/kWh
Transformeren naar gelijkstroom		97%
Getransformeerde stroom		0,0567 €/kWh
Transport naar Noorwegen		4%
Stroom aan de wal in Noorwegen		0,0591 €/kWh
Transformeren naar wisselstroom		97%
Stroom richting valmeer		0,0609 €/kWh
Rendement elektromotor		96%
Rendement oppompen 200 mtr hoogte		80%
Stroom in valmeer		0,0793 €/kWh
Rendement omzetten naar stroom van vallend water		77%
Stroom begin retourleiding		0,1030 €/kWh
Transformatie naar gelijkstroom		97%
Stroom begin trafo		0,106 €/kWh
Transport over zee		4%
Stroom aan wal in Nederland		0,111 €/kWh
Transformatie naar wisselstroom		97%
Stroom weer terug in het grid		0,114 €/kWh
Capex/opex aanvoerleiding	0,025	€/kWh
Capex/opex gebruik valmeer	0,040	€/kWh
Capex/opex retourleiding	0,025	€/kWh
Capex/opex transformatoren	0,020	€/kWh
Capex/opex waterwerken en pompen	<u>0,025</u>	€/kWh
		<u>0,135 €/kWh</u>
Kosten opgeslagen stroom		0,249 €/kWh
Rendement van opslagproces	48%	



700 MW leiding van Delfzijl naar Noorwegen

Van de 100% RES productie komt totaal 59% in het grid.
(Opslag + direct naar het grid)

Naschrift

Voor diverse configuraties zijn de volgende berekeningen gemaakt:

RES systeem		LCOE	Aansluiting	Opslag %	Vollast	Accu %	Kg prijs	Via waterstof	opslag	Waterstof	Waterstof	Subsidie
Kale prijzen		€/kWh	Grid	v.d. jaarproductie		v.d. jaarproductie	waterstof	in Grid		woonhuizen	Automobiliteit	
			€/kWh				€/kg	€/kWh		€/kWh (HV) (***)	€/kWh (HV)	
Wind op zee	variant 1	0,040	0,015	38%	3800	14%	5,40	€ 0,2134		€ 0,1398	€ 0,1906	SDE+
	variant 2	0,035	0,015	30%	4400	10%	4,79	€ 0,1436		€ 0,1241	€ 0,1745	SDE+
Wind op land		0,040	0,005	42%	2700	16%	5,98	€ 0,2700		€ 0,1541	€ 0,2042	SDE+
Zonneveld		0,040	0,005	62%	950	33%	12,86	€ 0,5903		€ 0,3287	€ 0,3787	SDE+
Dam in zee	variant 1	0,055	0,0015	0%	3000 (**)	0%	3,98	€ 0,0565	(*)	€ 0,1036	€ 0,1545	-
	variant 2	0,040	0,00075	0%	3000 (**)	0%	3,19	€ 0,0408	(*)	€ 0,0830	€ 0,1328	-

(*) Geen opslag nodig. In de kWh-prijs van de dam is opslag reeds inbegrepen.

(**) Door het eigen opslag systeem bieden de dammen 8760 uur per jaar gelijkmatig vermogen.

(***) Bij een aardgasprijs van 80 cent per m3 komt er voor € 0,09 per kWh warmte in huis, met een ketel die 90% rendement heeft op bovenwaarde.

Per 30 miljard kWh zijn dammen in zee ten minste 3,9 miljard Euro maatschappelijk goedkoper per jaar voor Nederland.

DTP-Netherlands - sept 2020