

# Vollasturen waterstofproductie

Waterstof productie met wind en zon

Concept  
Bestemd voor transitie rekenaars

**HUMSTERLAND ENERGIE**  
<https://www.humsterlandenergie.nl/>

July 15, 2021  
Opgesteld door ir. W.L. Walraven  
0653 122 571 – [walraveninnovation@mac.com](mailto:walraveninnovation@mac.com)

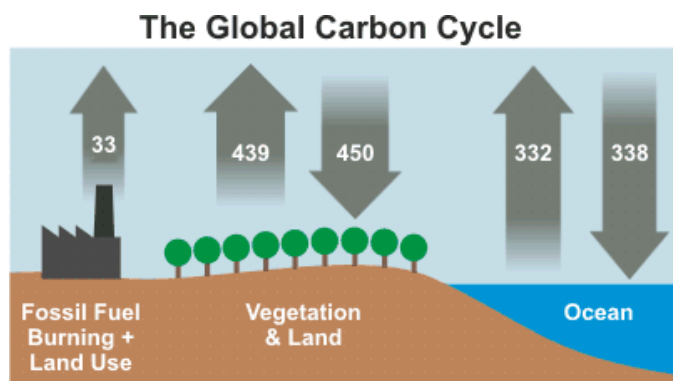
# Vollasturen waterstofproductie

---

## Inhoudsopgave

<b>INLEIDING</b> .....	<b>3</b>
SCOPE VAN HET ONDERZOEK .....	3
<b>VOLLASTUREN</b> .....	<b>4</b>
CONTROLE BEREKENING WIND OP ZEE .....	4
VOLLASTUREN ZON.....	6
COMBINATIE VAN ZONNEWEIDE EN WINDMOLEN .....	6
<b>CONCLUSIES</b> .....	<b>7</b>

## Inleiding



FIGUUR A WERELDWIJDE CO<sub>2</sub> BALANS IN GIGATON. BRON IPCC AR4. OPNAME EN UITSTOOT RESPECTIEVELIJK 788 EN 804 GIGATON.

De wereldeconomie breidt zich voortdurend uit. Er zijn twee beïnvloedende factoren gerelateerd aan die uitbreiding: de bevolkingsgroei en vooruitgang in persoonlijk comfort.

Beide factoren beïnvloeden de huidige fossiele economie door de consumptie te verhogen en meer broeikasgassen te genereren. Bron: [MDPI 2021](#)  
Mtoe = Miljoen ton olie equivalent

Jaar	Uitstoot CO <sub>2</sub> Mton	CO <sub>2</sub> atmosfeer ppm	Energie verbruik Mtoe	Wereld bevolking miljard	Energie/capita MWh/jaar
1975	15.484	331	8	3,9	16,2
2005	27.049	379	15	6,5	20,8
2015	32.294	401	18	7,5	23,6

Deze situatie wordt algemeen als kritiek beschouwd, vandaar dat wereldwijd grootscheeps milieustudies en milieubeschermingsbeleid worden gegenereerd. In dat kader lijkt waterstof opgewekt met groene energie een kansrijke wereldspeler te gaan worden.

### Scope van het onderzoek

Het aantrekkelijke van fossiele energie is dat het vraag gestuurd kan worden ingezet. Dus op elk moment dat er vraag is kan die worden bediend.

Zon en wind zijn aangewezen als de dominante producenten voor fossielvrije energie. Echter de productie is onvoorspelbaar. Er is daarom behoefte aan opslag van energie. Waterstof (H<sub>2</sub>) geproduceerd met groene stroom kan die rol vervullen. De kosten van de productie van waterstof zijn een functie van de stroomprijs en de investeringen. De kg prijs van waterstof kan grofweg aangeduid worden met onderstaande formule:

$$Kg\ prijs = Pe \times \eta + \frac{[I(n, i) + I \times o\%]}{prod} \left[ \frac{\text{€}}{kg} H_2 \right]$$

$Pe$  = Elektriteitsprijs [€/kWh circa € 0,040 - € 0,06]

$\eta$  = Rendement productie [kWh/kg circa 50 - 60]

$I(n, i)$  = Jaarkosten van de Investering, berekend over n jaar tegen een rente van i%

$o\%$  = Percentage van het onderhoud [3 - 7%]

$prod$  = Waterstof die per jaar door de installatie wordt geproduceerd [kg/jaar]

Een jaar telt 8.760 uur. Bij minder vollasturen worden investeringskosten per kg hoger en ook daalt het rendement doordat tijdens de stilstandsuren de installatie stand-by gehouden moet worden. Bij 8.760 zijn de jaarinvesteringkosten + onderhoud circa € 1,50 per kg. In dit onderzoek stellen we vast op hoeveel vollasturen er gerekend kan worden bij de inzet van zon en wind.

## Vollasturen

Het CBS verzamelt de productie en het opgestelde vermogen van zowel wind als zon installaties. Vollasturen worden gedefinieerd als.

$$\text{Vollasturen per jaar} = \frac{\text{Productie in kWh per jaar}}{\text{opgesteld vermogen in KW}}$$

Voor zonnestroom installaties varieert het aantal vollasturen van 800 – 1050 uur per jaar in Nederland. In dit rapport houden we 900 uur aan als een goed gemiddelde.

Gegevens CBS

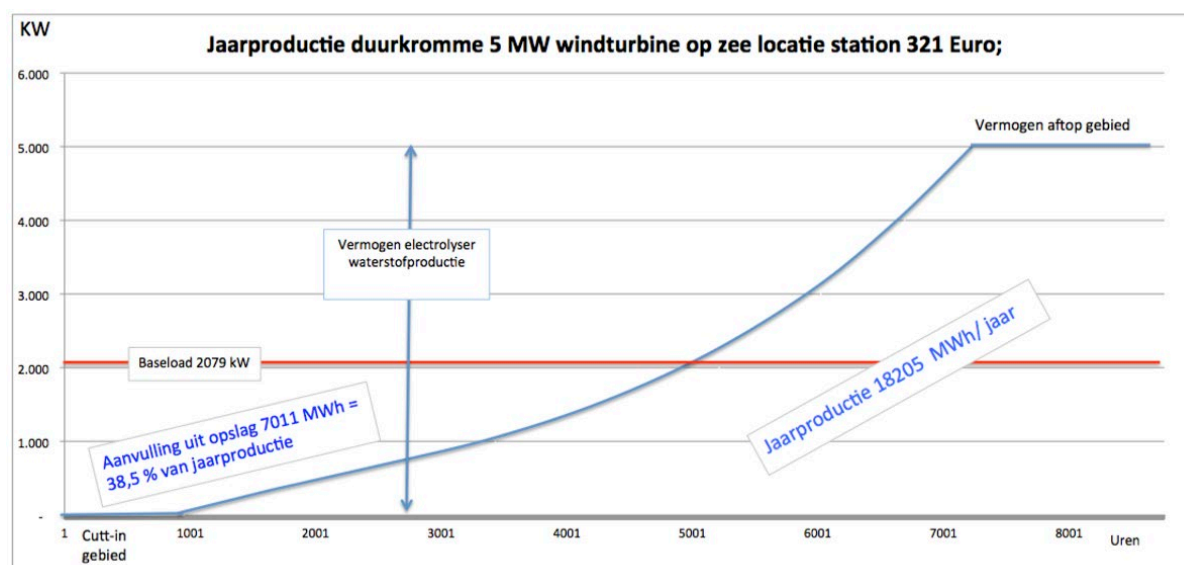
- [Op land \(CBS\) het opgesteld vermogen en de productie van windmolens.](#)
- [Op zee \(CBS\) het opgesteld vermogen en de productie van windmolens.](#)

Jaar	Wind op land		Wind op zee	
	Vollasturen	Aantal molens	Vollasturen	Aantal molens
2019	2106	2032	3733	289
2020 (*)	2154	2144	2229	462

(\*) Voor 2020 is de productie van de nieuw geplaatste molens nog niet betrokken op een vol jaar. Wij houden daarom 2019 aan als referentie.

## Controle berekening wind op zee

Windmolens op zee controle berekening voor een 5 MW molen, locatie Euro 321. Van de locatie Euro 321 heeft het KNMI uur gegevens ter beschikking. Voor die locatie is de productie op jaarbasis berekend en getoond in onderstaande grafiek.



FIGUUR 2 JAARBELASTING DUURKROMMEN 5 MW MOLEN. VOLLASTUREN 3642 UUR PER JAAR

## Gegevens 5 MW windmolen locatie 321 op de Noordzee

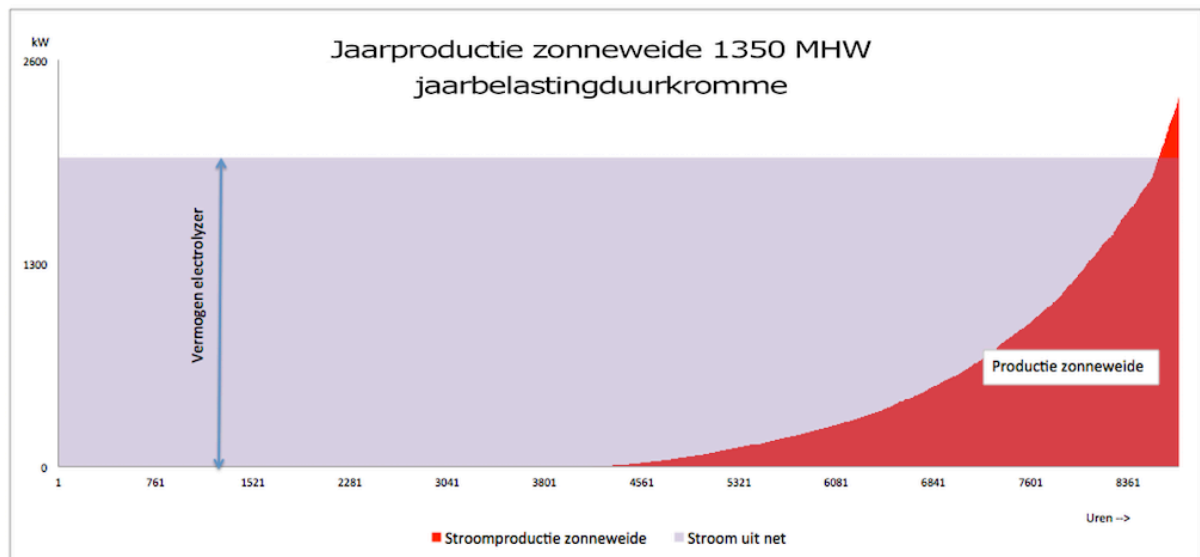
As-hoogte	100 m	Jaarproductie	18.205 MWh
Wiekdiameter	128 m	Vermogen	4,968 MW
Rendement incl. generator	70%	Vollasturen	3.642 h/jr
Stilstandsverliezen	2%	Baseload vermogen	2,079 MW
Totaal rendement incl. Betz factor (*)	41,51%	Aanvulling uit opslag % jaarproductie om baseload te maken	38,5%
Cut in speed	4 m/s	Accucapaciteit voor baseload % van jaar productie	13,2%
Max speed	11,3 m/s	Accucapaciteit voor baseload	2.397 MWh

We concluderen, dat de basisberekening van de 5 MW windmolen goed overeenkomt met de gegevens van het CBS.

### Opmerkingen:

- (\*) Betz heeft gepostuleerd dat uit vrije stroming nooit meer dan 59,3% energie uit een fluidum gewonnen kan worden.
- Per m<sup>2</sup> wiekoppervlak wordt door deze molen 1.415 kWh op jaarbasis uit wind gewonnen. Voor windturbines op land is bedraagt dat getal gemiddeld 872 kWh per jaar.
- Indien een complete elektrolyse installatie bij vollast van 8760 uur per kg € 1,50 kost, exclusief stroomkosten, dan zou voor deze windmolen de productie van waterstof exclusief stroomkosten  $8760/3642 \times € 1,50 = € 3,61$  kosten. Stel dat de stroomkosten € 0,045 per kWh bedragen en het rendement 58 kWh/kg bedraagt, dan kost waterstof € 3,61 + 58 x € 0,04 = € 5,93 per kg. Dan moet de waterstof nog naar land worden gebracht en opgeslagen.

## Vollasturen zon



FIGUUR 3 JAARBELASTINGDUURKROMME ZONNEWEIDE MET 900 VOLLASTUREN

Zonnepanelen in Nederland behalen gemiddeld in Nederland 738 vollasturen. (CBS 2019). De recente zonneweides behalen inclusief een degradatie van 0,6 – 1,0 % per jaar 900 vollasturen. Met een productie per hectare van circa 1 miljoen kWh.

## Combinatie van zonneweide en windmolen

In kringen van het PBL en TNO wordt geopperd dat er voordelen zijn te behalen door elektrolyzers op 20% van het molenvermogen te dimensioneren en deze direct gekoppeld te combineren met zonnestroom, waardoor elektrolyzers beter renderen en de installatiekosten per kg dalen.

Wij gaan dat na door te veronderstellen dat de 5 MW molens direct aan de kust analoog presteren aan de molens op locatie 321. En combineren deze met 4 hectare zonneweide met 900 vollasturen en een totaal vermogen van 4,547 MW.

Voorts hanteren de volgende uitgangspunten:

- Het rendement van elektrolyse inclusief het op druk brengen 58 kWh/kg.
- Prijs van elektrolyse systeem bij 8.760 vollasturen € 1,50 per kg waterstof productie incl. onderhoud en vervanging.
- Kosten van transport en opslag € 1,10 per kg waterstof.
- Kosten brandstofcel verwerking en invoeding in het net per kg € 0,50.
- Prijs stroom uit wind en zon € 0,045 (incl. gewenste marge van producent).

Wij komen tot het volgende resultaat

	<b>5 MW beperkt tot 20%</b>	<b>Zon 4 ha + 5 MW beperkt tot 20%</b>	<b>Restant uit molen</b>	<b>Restant uit zonneweides</b>
Vermogen [kW]	994	994	3.975	4.287
Vollasturen [h/jr]	6.551	7.402	2.943	757
Waterstof [kg/jaar]	112.241	126.940		
Stroom in het grid na opslag d.m.v. fuelcells [kWh]	2.229.112	2.521.019		
Kosten stroom voor waterstofproductie	€ 292.950	€ 331.312		
Kosten waterstof productie transport en opslag en invoeding in het net	€ 404.717	€ 428.234		
Totale kosten H2 traject	€ 697.667	€ 759.546		
Kosten stroom invoeding in grid / kwh	€ 0,3129	€ 0,3012		
Gemiddelde stroomprijs	€ 0,0879	€ 0,0820		
Kostprijs waterstofproductie exclusief opslag	€ 4,61	€ 4,48		

## Conclusies

- De productie van waterstof wordt € 1,83 per kg goedkoper in de zon en windvariant met 7.402 vollasturen.
- De problematiek van piekstromen en noodzaak van bijstook worden niet opgelost, wel enigszins afgezwakt.
- Doordat tussenkomst van het grid wordt vermeden is de stroomprijs voor invoering lager per kg productie scheelt dat ruim 1 cent per kWh, ergo € 0,58 per kg.
- Mogelijk kan voor deze vollasturen in een aangepaste regeling wel energiebelasting en ODE worden vermeden. Immers ODE is in het leven geroepen om opslag van duurzame energie mogelijk te maken. Als dat op deze wijze wordt gerealiseerd dan lijkt het logisch tenminste de ODE te schrappen.
- Doordat de zonneweide en windmolen minder vollasturen kunnen aanbieden wordt de prijs die verkregen kan worden op de markt lager.
- De stroom uit de fuelcells is op elk moment leverbaar. Echter de prijs van ruim 30 cent per kWh zal in uitzonderlijke gevallen door de noodstroommarkt worden afgenomen.

- Indien de exploitant de gemiddelde stroomprijs moet hanteren, dan zal de markt die stroom niet willen kopen zolang de marktprijs lager is dan 8 cent per kWh.
- Met forse subsidies ontstaat een situatie waarbij de onrendabele top kan worden weggewerkt. Defacto betaalt de burger de meerprijs via de belastingen.
- Het is de vraag in welke mate de kostprijzen van productie, opslag en stroomomzetting via fuelcells drastisch kunnen worden verlaagd om daarmee de subsidiestromen te kunnen rechtvaardigen.
- Directe aanwending van waterstof voor transport lijkt meer kansrijk. Hoewel de componenten opslag en tanken de prijs met ruim € 2,75 zullen verhogen, indien er voldoende vraag is. Dat is nu nog niet aan de orde.
- Voor de toepassing van verwarming in woonhuizen komen de opslag en transportkosten ook in beeld. Echter de drukken kunnen lager zijn en opslag in cavernes is voordeliger. Het is aannemelijk als hiervoor een meerprijs ontstaat van € 1,50 per kg, waardoor de prijs uitkomt op circa € 6,00 per kg waterstof. Op bovenwaarde komt de prijs excl. BTW dan uit op 15,35 cent per kWh. Uitgedrukt in aardgasequivalent (9,7 kWh/m<sup>3</sup>) komt de prijs van waterstof voor verwarming dan uit op € 1,49 per aardgasequivalent excl. BTW en exclusief accijns en andere belastingen.