

Auteur A.H.H. (Harry) Schmitz

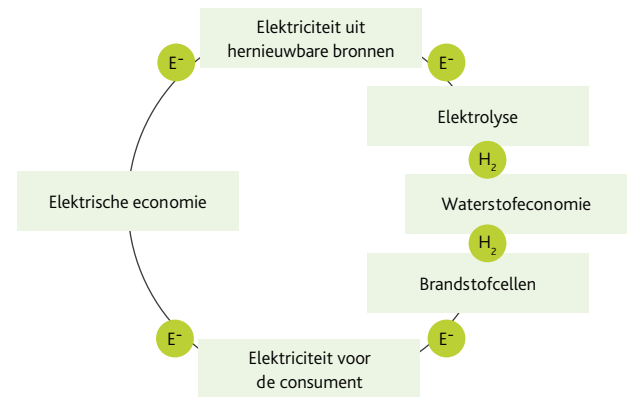
# Waterstofeconomie dankzij Noordzee- en Saharastroom?

De publicatie 'Waterstof, de sleutel voor de energietransitie'<sup>1</sup> stelt de vraag; waterstof voor verwarming van de bebouwde omgeving? Het artikel concludeert dat wind energie van de Noordzee niet voldoende zal zijn voor de energiebehoefte van Noord-West Europa, grotere hoeveelheden energie zullen zodoende moeten worden geïmporteerd. Dit kan volgens het artikel in de vorm van waterstof in tankschepen met een landelijke distributie door het bestaande aardgasnet.<sup>2</sup> Op dezelfde wijze als de eerdere publicatie 'Een supergrid met Noordzee- en Sahara stroom?'<sup>3</sup> wordt de vraag beantwoord of waterstof wel de sleutel is voor de energietransitie van de bebouwde omgeving en ook andere sectoren?

In een duurzame elektrische economie wordt wind- en zonne-energie omgezet in elektronen. De elektronen worden direct aangewend voor de benodigde energie voor gebouwen en klimaatinstallaties. In een duurzame waterstofeconomie daarentegen wordt de energieketen van producent naar consument voorzien van 2 extra conversie stappen. Elektriciteit van wind en zon wordt omgezet in waterstofmoleculen, die bij de eindverbruiker weer terug worden omgezet in elektronen voor de productie van grondstoffen en afvalwarmte voor de verwarming. Zoals weergegeven in figuur 1 wordt in de waterstof economie elektrische energie geconverteerd in chemische energie om daarna weer terug te converteren naar elektrische energie.

In een duurzame circulaire economie is niet de 1e maar de 2e hoofdwet van de thermodynamica maatgevend voor een duurzame energie- en grondstoffenvoorziening. In tegenstelling tot de 1e hoofdwet legt de 2e beperkingen op aan energie conversies.

- Niet alle energie omzettingen hebben een conversie-efficiëntie van 100 procent. Warmte-energie kan bijvoorbeeld nooit volledig in mechanische-energie worden geconverteerd.



Figuur 1: De energie distributie opties voor een duurzame samenleving<sup>4</sup>

- Alle energieconversies zijn onomkeerbaar. Warmte-energie kan niet alleen onvolledig in mechanische-energie worden omgezet maar vanwege de onomkeerbaarheid treden bij deze conversie nog eens extra verliezen op.

Ook in een duurzame circulaire economie treden dus volgens de 2e hoofdwet energieverliezen op, de zogenaamde exergieverliezen. In tegenstelling tot de 1e hoofdwet kunnen exergieverliezen nooit meer worden hergebruikt. Indien geen rekening wordt gehouden met exergieverliezen zal ook in een circulaire economie blijken dat in een wereld met een groeiende bevolking en een groeiende economie grondstoffen en energie schaars zullen worden.

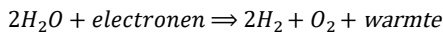
Het beoordelingscriterium voor een duurzame productie van grondstoffen en warmte voor het klimatiseren vormt zodoende het minimaliseren van de exergieverliezen in de energieketen van producent naar consument.

Gelet op de 2e hoofdwet van de thermodynamica zou het nauwkeuriger zijn niet meer te spreken van energie, in de geest van de 1e hoofdwet, maar van exergie overeenkomstig de 2e hoofdwet. Doch om het spraakgebruik niet te doorbreken wordt in het navolgende nog altijd gesproken van energie in plaats van exergie maar wordt de bijbehorende energie kwaliteit aangegeven met woorden zoals wind, zonnestraling, chemisch en elektrisch.

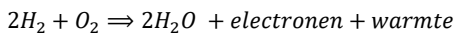
## Waterstof

Hoewel het waterstofatoom H het meest voorkomende element in het heelal is komt het waterstof molecuul  $H_2$  nauwelijks voor op aarde. Omdat, vanwege de valentie-elektronen, alleen  $H_2$  bruikbaar is voor energie conversies moet het voor een waterstof economie worden gemaakt. In tegenstelling tot bijvoorbeeld aardgas vormt waterstof dus geen primaire energiebron. Waterstof, vloeibaar of gasvormig, kan dus alleen maar fungeren als chemische energiedrager.

Gelet op het vigerende klimaatbeleid wordt voorgesteld  $H_2$  te produceren door het elektrolyseren van gedemineraliseerd water middels lage spanning gelijkstroom elektriciteit (internationaal aangeduid als Low Voltage Direct Current (LVDC)) uit wind en zon volgens:



Onder toevoer van elektronen worden 2 watermoleculen gesplitst in 2 waterstof- en 1 zuurstofmolecuul. 18kg gedemineraliseerd vloeibaar water wordt omgezet in 2 kg waterstofgas met als afvalproduct 16 kg zuurstofgas. In een brandstofcel bij de eindverbruiker worden de 2 geproduceerde waterstof moleculen, onder toevoer van 1 zuurstof molecuul weer verbrand tot 2 watermoleculen met als restproducten elektronen en warmte volgens:



Waterstof is het kleinste molecuul op aarde met de in tabel 1 vermelde fysische eigenschappen. De getabelleerde waarden van moleculair waterstof geven direct al de mate van aanwendbaarheid weer voor energie transport. Namelijk een zeer geringe specifieke gasmassa en een extreem lage kooktemperatuur.

## Sahara energie

Zonne-energie uit de Sahara kan als elektrische en als chemische energie worden geïmporteerd. Als referentie voor de chemische waterstof energie uit de Sahara fungeert het in figuur 2 weergege-

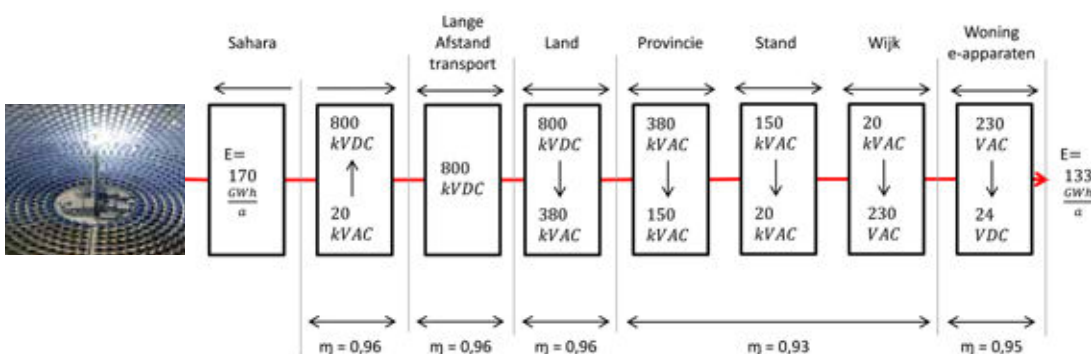
<b>Chemische formule</b>	$H_2$	
<b>Specifieke gasmassa</b>	0,09	$\left[ \frac{kg}{Nm^3} \right]$
<b>Specifieke vloeistofmassa</b>	70,79	$\left[ \frac{kg}{m^3} \right]$
<b>Bovenste verbrandingswaarde</b>	38,9	$\left[ \frac{kWh}{kg} \right]$
<b>Kooktemperatuur</b>	-252,0	$[^{\circ}C]$

Tabel 1: De fysische eigenschappen van moleculair waterstof

ven elektrische energie distributiesysteem volgens.<sup>3</sup>

De elektrische energie uit de Sahara wordt geproduceerd door een zon-thermische elektriciteit centrale. Directe zonnestraling wordt omgezet in warmte. Een gedeelte van de warmte wordt voor de nacht opgeslagen in een hoge temperatuur fase overgang warmtebuffer (in het Engels "High Temperature Phase Change Material (HT-PCM)) en het overige gedeelte drijft overdag een stoomturbine aan voor de elektriciteitsproductie. Een zon-thermische elektriciteitscentrale kan middels de HT-PCM warmtebuffer min of meer continue elektriciteit leveren en zich enigszins aanpassen aan de dagelijkse elektriciteitsvraag. De zon-thermische centrale met een gemiddeld elektrisch vermogen van 50 MW produceert jaarlijks circa  $170 \left[ \frac{GWh}{a} \right]$  aan elektrische draaistroom van 20 kiloVolt Alternating Current (kVAC). Voor transport naar Nederland met een 3000km lange land – en zee kabel wordt middels trafo's en gelijkrichters de wisselstroom opgekrikt en omgevormd naar hoge spanning gelijkstroom van 800 kiloVolt Direct Current (kVDC). Bij aankomst in Nederland wordt de gelijkstroom middels omvormers en trafo's weer omgezet naar het landelijke hoog spanning wissel / draaistroom net van 380 kVAC. Via het provinciale hoogspanningsnet, het stedelijke middenspanningsnet en het laagspanningsnet op wijk en straat niveau wordt de Sahara stroom uiteindelijk aan huis afgeleverd als 0,23 kVAC wisselstroom. Aangezien het overgrote deel van het wit en bruingoed functioneert op 0,024 of 0,048 kVDC gelijkstroom vindt in de elektrische apparaten nog

Figuur 2: Geïmporteerde elektrische energie uit de Sahara<sup>3</sup>



een conversie plaats van hogere wissel – naar lagere gelijkstroomspanning. Met verwijzing naar figuur 2 en literatuur<sup>3</sup> resulteert een conversie efficiëntie van:

$$\eta_{Sahara\ elektriciteit} = 0,96 \times 0,96 \times 0,96 \times 0,93 \times 0,95 \approx 0,78$$

Van de geproduceerde elektrische energie in de Sahara blijft dan nog in Nederland voor consumptie over  $170 \times 0,78 \approx 133 \left[ \frac{GWh}{a} \right]$

Om te bezien of een moleculaire energie import efficiënter is dan een import van elektronen,<sup>1</sup> en bij gelijkstroom kun je met recht spreken van import, wordt de elektriciteitsproductie en distributie volgens figuur 2 omgebouwd naar waterstof als energiedrager. Een en ander zoals weergegeven in figuur 3.

De successievelijke conversie efficiënties in een waterstofeconomie worden in detail beschreven in literatuur.<sup>4-6</sup> Bijgaand volgt een beknopte toelichting op de gekozen waterstof conversies.

Vanwege het vigerende klimaatbeleid wordt waterstof, zoals reeds verwoord, middels lage spanning gelijkstroom elektrolyse geproduceerd uit gedemineraliseerd water. Wellicht mede omdat de zon – thermische centrale in de elektrische economie hoge spanning wisselstroom produceert wordt deze, zoals aangegeven in<sup>1</sup> voor de waterstof economie vervangen door fotonvoltaïsche zonnecellen. De PhotoVoltaic (PV) centrale wordt nu zo gedimensioneerd dat de jaarlijkse elektriciteit productie  $170 \left[ \frac{GWh}{a} \right]$  bedraagt, dus net zoveel als de zon – thermische centrale maar dan op LVDC niveau. Om middels elektrolyse 1 kg waterstof gas te produceren met een bovenste (chemische) verbrandingswaarde van 38,9 kWh is 55 kWh elektrische energie benodigd. Voor de productie van 1 kg waterstofgas zijn 9 kg gedemineraliseerd water benodigd. De benodigde elektrische energie om 9 kg water te demineraliseren bedraagt gemiddeld 0,1 kWh. De conversie efficiëntie van de elektrolyse bedraagt zodoende:

$$\eta_{elektrolyse} = \frac{38,9}{55+0,1} \approx 0,71$$

Uiteindelijk resulteert een chemische waterstof energie van  $170 \times 0,71 \approx 120 \left[ \frac{GWh}{a} \right]$ . Dit is circa  $\frac{120 \times 10^9}{38,9 \times 10^3} \approx 3,1 \times 10^6 \left[ \frac{kg}{a} \right]$  waterstofgas per jaar waarvoor  $9 \times 3,1 \times 10^6 \left[ \frac{kg}{a} \right]$  gedemineraliseerd water per jaar benodigd is, dat wil zeggen  $27.900 \left[ \frac{m^3}{a} \right]$ . Gelet op de

gemiddelde afstand Sahara – Rotterdam circa 3000 km is cryogeen transport van vloeibare waterstof met tankschepen de efficiëntste wijze van lange afstand distributie. Hiertoe moet het geproduceerde waterstofgas vloeibaar worden gemaakt. De dagelijkse waterstof productie bedraagt  $\frac{3,1 \times 10^6}{365} \approx 8.500 \left[ \frac{kg}{d} \right]$  en het half dagelijkse massadebiet aan waterstof  $\frac{8.500}{12} \approx 710 \left[ \frac{kg}{h} \right]$ . De conversie efficiëntie van een dergelijke 'Hydrogen Liquefaction Plant'<sup>4,5</sup> stemt overeen met:

$$\eta_{liquefaction} \approx 0,7$$

Bij Kawasaki Heavy Industries is een Liquefied Hydrogen Cargo tankschip in ontwikkeling met een transportvolume van  $2.500 m^3$  waarmee per vracht dus circa  $2.500 \times 70,79 \approx 0,177 \times 10^6 \left[ \frac{kg}{schip} \right]$  vloeibaar waterstof kan worden getransporteerd. Om de jaarproductie van waterstof van de PV centrale van de Sahara naar Rotterdam te brengen zijn circa  $\frac{3,1 \times 10^6}{0,177 \times 10^6} \approx 18$  vrachten benodigd. Volgens<sup>6</sup> bedraagt de transport efficiëntie van cryogene waterstof tankschepen:

$$\eta_{schip} \approx 0,9$$

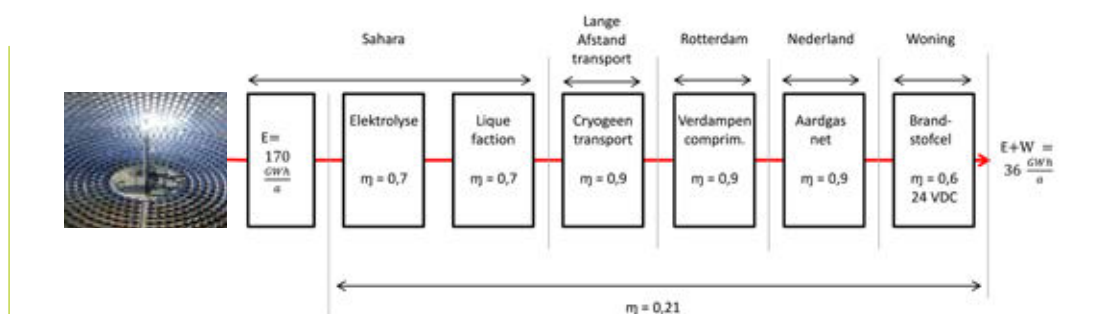
De bulkaanvoer door schepen wordt vervolgens door het bestaande aardgas net in Nederland gedistribueerd.<sup>1</sup> Hiertoe moet in de haven van Rotterdam het vloeibare waterstof tijdelijk worden opgeslagen in cryogene waterstoftanks en middels een verdampert met waterstofpomp en compressor worden omgezet in gecompri-meerd waterstofgas. De conversie efficiëntie wordt geschat op:

$$\eta_{vaporization} \approx 0,9$$

De transport efficiëntie van gecompri-meerd waterstof gas door het bestaande Nederlandse aardgasnet over een gemiddelde transport afstand van 150 km bedraagt circa:

$$\eta_{aardgasnet} \approx 0,9$$

In gebouwen wordt dan door brandstofcellen de chemische energie van de, via het aardgasnet gedistribueerde, waterstof omgezet in elektriciteit – en afvalwarmte. In tegenstelling tot de elektrische economie betreft het geen LVAC maar LVDC zodat de energie-conversie van 230 VAC naar 24 of 48 VDC in de elektrische apparaten niet meer benodigd is indien de gebouwen worden voorzien



**Figuur 3:**  
Geïmporteerde  
chemische energie  
uit de Sahara

van een LVDC-net. De elektrische efficiëntie van brandstofcellen bedraagt  $\eta_{el. \text{ brandstofcel}} = 0,5$ .<sup>7</sup> Ook staat lage temperatuur afvalwarmte ter beschikking voor het verwarmen van leef zones en het sanitaire warmwater. Volgens<sup>7</sup> bedraagt de thermische efficiëntie van de brandstofcel  $\eta_{th. \text{ brandstofcel}} = 0,4$ . Aangezien in gebouwen geen lineaire gelijktijdigheid bestaat tussen elektriciteit en warmtevraag en in goed geïsoleerde gebouwen een verschuiving optreedt van minder verwarmen naar meer koelen, kan niet zondermeer de totale vollast efficiëntie  $\eta_{tot} = 0,9$  worden verdisconteerd. Maar door het installeren van een lage temperatuur PCM warmtebuffer, met name voor het sanitaire warmwater dat een heel jaar ter beschikking moet staan, resulteert een overall efficiëntie van de brandstofcellen van circa:

$$\eta_{\text{brandstofcel}} = 0,6$$

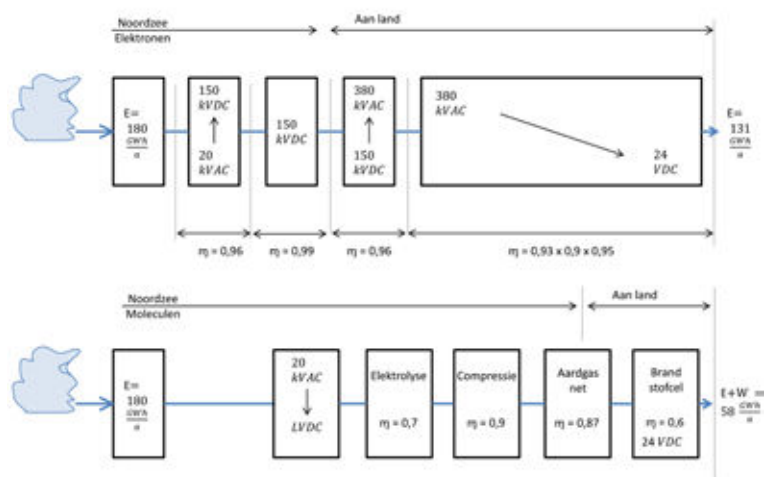
De totale conversie efficiëntie van Sahara waterstof bedraagt zodoende

$$\eta_{\text{Sahara waterstof}} = 0,7 \times 0,7 \times 0,9 \times 0,9 \times 0,9 \times 0,6 \approx 0,21$$

In Nederland resulteert dan aan benutbare elektriciteit en warmte energie uit de Sahara van  $170 \times 0,21 \approx 36 \left[ \frac{GWh}{a} \right]$

### Noordzee energie

Net hetzelfde als de zonne-energie uit de Sahara kan wind-energie van de Noordzee als elektrische<sup>3</sup> en als chemische energie aan land worden gebracht. Figuur 4 geeft de beide mogelijkheden weer. Het elektrische referentie systeem uit<sup>3</sup> is een windturbine centrale bestaande uit 10 windmolens met elk een gemiddeld elektrisch vermogen van 5 MW zodat een totaal elektrisch vermogen resulteert van  $10 \times 5 = 50$  MW. Om de windcentrales van de Noordzee vergelijkbaar te maken met de boven genoemde zon-thermische en PV centrales in de Sahara is het elektrische referentiesysteem uit<sup>3</sup> aangepast. Volgens<sup>8</sup> bedraagt het aantal vollast draaiuren op de Noordzee circa  $3.600 \left[ \frac{h}{a} \right]$  zodat de 50 MW wind centrale circa  $50 \text{ MW} \times 3,6 \left[ \frac{kh}{a} \right] \approx 180 \left[ \frac{GWh}{a} \right]$  elektrische energie op een niveau van 20 kVAC levert. Voor transport aan land met een 100 km zee-kabel wordt middels trafo's en gelijkrichters de wisselstroom opgekrakt en omgevormd naar hoge spanning gelijkstroom 150 kVDC. Bij aankomst aan wal wordt de gelijkstroom middels omvormers en trafo's weer omgezet naar het landelijke 380 kVAC hoogspanning net. Vanaf hier wordt de elektriciteit op dezelfde wijze als voor de Sahara elektriciteit in Nederland gedistribueerd. Voor een combinatie van Noordzee en Sahara elektriciteit zijn



Figuur 4: Elektriciteit<sup>3</sup> en waterstof van de Noordzee

accu's benodigd voor de dagelijkse en wekelijkse vermogens afstemming tussen vraag en aanbod. Op wijk, straat, woning en elektrische apparaten niveau moet dan voorzien worden in een accu-functie. Met verwijzing naar figuur 4 en literatuur<sup>3</sup> bedraagt de conversie-efficiëntie:

$$\eta_{\text{Noordzee elektriciteit}} = 0,96 \times 0,99 \times 0,96 \times 0,93 \times 0,9 \times 0,95 \approx 0,72$$

Van de geproduceerde elektrische energie op de Noordzee blijft dan nog in Nederland voor consumptie over  $180 \times 0,72 \approx 131 \left[ \frac{GWh}{a} \right]$ . Voor meer details zie literatuur<sup>3</sup>.

De productie-, distributie en consumptie keten van Noordzee waterstof ziet er als volgt uit. De windturbines leveren 20 kVAC elektriciteit. Voor het op zee demineraliseren van zeewater en de aansluitende elektrolyse wordt de hoge spanning wisselstroom middels trafo's en gelijkrichters omgevormd tot LVDC elektriciteit. Dit met een conversie efficiëntie van:

$$\eta_{HVAC \rightarrow LVDC} \approx 0,96$$

Net hetzelfde als in de Sahara vindt op de Noordzee middels 'wind'-elektrolyse de waterstof productie plaats met dezelfde conversie - efficiëntie volgens:

$$\eta_{\text{elektrolyse}} \approx 0,7$$

Op zee wordt het geproduceerde waterstofgas in een meer-trap compressie met tussenkoelers min of meer isotherm opgekrakt voor injectie in het Noordzee gedeelte van het aardgasnet. Dit met een conversie-efficiëntie van:

$$\eta_{\text{compressie}} \approx 0,9$$

Vanaf de Noordzee wordt het gecomprimeerde waterstofgas over een gemiddelde afstand van 250 km in Nederland gedistribueerd.

De distributie – efficiëntie bedraagt:

$$\eta_{\text{aardgasnet}} \approx 0,87$$

In de gebouwen wordt de chemische waterstofenergie door verbranding omgezet in LVDC plus gedeeltelijk bruikbare warmte. Dit met een conversie – efficiëntie van:

$$\eta_{\text{brandstofcel}} = 0,6$$

De totale conversie efficiëntie van de Noordzee waterstof bedraagt dan

$$\eta_{\text{Noordzee waterstof}} = 0,96 \times 0,7 \times 0,9 \times 0,87 \times 0,6 \approx 0,32$$

In Nederland resulteert dan aan benutbare elektriciteit en warmte energie van de Noordzee waterstof circa  $180 \times 0,32 \approx 58 \left[ \frac{\text{GWh}}{\text{a}} \right]$ .

Tabel 2 vat de berekeningsresultaten samen.

Omschrijving	Sahara zon		Noordzee wind		
	Elektriciteit	Waterstof	Elektriciteit	Waterstof	
Elektriciteit productie	170	170	180	180	$\left[ \frac{\text{GWh}}{\text{a}} \right]$
Conversie (distributie)- efficiëntie	0,78	0,21	0,72	0,32	
Elektriciteit consumptie (LVDC)	133	36	131	58	$\left[ \frac{\text{GWh}}{\text{a}} \right]$
Elektriciteit consumptie procentueel	100	27	100	44	[%]

Tabel 2: Samenvatting geïmporteerde Sahara en geproduceerde Noordzee energie

### Energie-oogst

De energie-oogst gedurende de levensduur van een elektriciteit centrale wordt in het Engels uitgedrukt met de EROI-factor, de zogenaamde 'Energy Returned On Invested' factor en in Duits- talige literatuur met 'Energieernte-faktor'. De Energieernte-factor stamt volgens<sup>9</sup> uit de Biologie. Dit is de verhouding tussen het energie verbruik van een dier om voedsel te vergaren en de levens-energie die resulteert uit het verteren van het vergaarde voedsel. Als het op de wat kortere termijn niet lukt om gemiddeld niet meer levensenergie uit voedsel te halen dan het verbruik aan levens-energie, zullen de energiereserves van het dier uitgeput raken en sterft het dier.

Op de wat langere termijn, voor in tijden van nood, bijvoorbeeld 's winter, als het voedselaanbod lager is moeten er voorraden voorhanden zijn. Het jachtvermogen van roofdieren moet zomers groter zijn dan gemiddeld zodat vetvoorraden kunnen worden aangemaakt voor de winter. Eekhoortjes moeten zomers meer nootjes verzamelen dan gemiddeld om deze als voorraad aan te leggen voor 's winters. Om een dier in leven te houden is een seizoenmatige termijnopslag noodzakelijk. Een langere termijn voedselopslag be-

staat dus uit 2 componenten namelijk tijdens de betere jaargetijden een grotere dan gemiddelde voedselvergaring waarbij het overschot boven het gemiddelde wordt opgeslagen voor slechtere tijden. Een jaargemiddelde ernte-factor van 1 is noodzakelijk voor het in leven blijven van het dier. Dit betekent echter wel dat het dier voortdurend op de rand van de hongerdood leeft. Een 2e vraag die zich dan stelt is; hoeveel meer voedsel moet er worden vergaard om een populatie dieren niet te laten uitsterven? In een voedsel scenario met een gemiddelde ernte-factor van 1, waarbij de individuele dieren van een populatie nog net in leven blijven, is er geen voedsel voorhanden voor lichaamsgroei, voortplanting, groot brengen van nakomelingen en groei van de populatie. Voor

het in stand houden en groeien van een dierenpopulatie is een aanzienlijk hogere ernte-factor dan 1 benodigd. Met een te kleine ernte-factor, iets groter dan 1, is de soort alsnog gedoemd uit te sterven.

Overeenkomstig de voedsel vergaring door dieren wordt de energie-ernte-factor van elektriciteitscentrales gedefinieerd als:

$$\text{Energieerntefactor} = \frac{\text{Geleverde elektrische energie (Exergie) centrale}}{\text{Benodigde Energie (Exergie) voor de bouw, bedrijfsvoering en ontmanteling van de elektriciteitscentrale}}$$

Volgens<sup>9</sup> is de ernte-factor van elektriciteitscentrales de maatgevende grootte voor beoordeling van de kwaliteit van een centrale. Heeft een elektriciteitscentrale een te lage ernte-factor dan houdt de centrale alleen zichzelf in leven, maar is de ernte-factor voldoende groot dan wordt een hele samenleving in leven gehouden.

Literatuur<sup>10</sup> geeft ernte-factoren voor centrales zonder de bijbehorende energie (exergie) distributie. Per energieconcept worden 2 ernte-factoren vermeld. Eentje zonder en een 2e met over-vermogen en seizoenopslag. De zomerse levering van Sahara energie (elektronen of waterstofmoleculen) is meer dan de winterse terwijl de zomerse levering van Noordzee energie juist minder is dan de winterse. Hoewel elektriciteit uit zon en wind min of meer complementaire energiebronnen zijn zullen zij toch net zoals bij de voedselvergaring, moeten worden voorzien van over-vermogen gekoppeld aan seizoenopslag. Maar door de complementariteit van zon en wind niet in die mate zoals

Omschrijving	Sahara zon				Noordzee wind			
	Elektriciteit		Waterstof		Elektriciteit		Waterstof	
Elektriciteit productie	Zon-thermisch		PV		Windturbines		Windturbines	
Erntefactor productie [10]	10 *)	21 (**)	2,3 *)	6,7 (**)	4 *)	16 (**)	4*)	16 (**)
Conversie – efficiëntie (tabel 2)	0,78	0,78	0,21	0,21	0,72	0,72	0,32	0,32
Erntefactor na distributie	7,8	16,4	0,5	1,4	2,9	11,5	1,3	5,1

Tabel 3: Energie-ernte-factoren van geïmporteerde Sahara en geproduceerde Noordzee energie

in literatuur<sup>10</sup> vermeld. In tabel 3 zal de uiteindelijk ernte-factor voor de combinatie Noordzee en Sahara elektriciteit inliggen tussen de vermelde waarden met en zonder over-vermogen met opslag. Verder wordt in tabel 3 de invloed van de conversie-efficiëntie van de distributie aangegeven. Volgens literatuur<sup>11,12</sup> is een ernte-factor van energiecentrales van minimaal 14 benodigd om onze westerse samenleving in stand te houden.

Naast de zeer lage conversie-efficiëntie voor transport blijkt een waterstofeconomie ook zeer grondstof en materiaal intensief te zijn. Een tweetal voorbeelden mogen dit verduidelijken.

- De jaarlijkse Nederlandse elektriciteit consumptie in 2017 bedroeg circa  $120 \times 10^9 \left[ \frac{kWh(e)}{a} \right]$ . Laten we eens veronderstellen dat de helft van de vraag wordt geproduceerd door Sahara waterstof. Het aantal cryogene tankschepen met waterstof dat jaarlijks aan meert in Rotterdam bedraagt dan  $\frac{\frac{1}{2} \times 120 \times 10^9}{36 \times 10^6} \times 18 \approx 30.000$  stuks. In 2017 meerden in Rotterdam 29.650 zeeschepen aan. Dus alleen al om de helft van het huidige Nederlandse elektriciteitsverbruik te dekken moet de Rotterdamse havencapaciteit worden verdubbeld. En dan hebben we het nog niet eens over de benodigde energie voor de productie van grondstoffen.
- Een 2e interessant getal is de benodigde demi-waterproductie in de Sahara. Deze bedraagt voor de helft van de Nederlandse elektriciteitsvraag  $\frac{\frac{1}{2} \times 120 \times 10^9}{36 \times 10^6} \times 27.900 \approx 46.500.000 \left[ \frac{m^3}{a} \right]$ . In een tijd van zoetwater schaarste met bijzondere aandacht voor watermanagement lijkt het mij niet aangebracht om de jaarlijkse (drink-) waterproductie in de Sahara aan te wenden voor de helft van de Nederlandse elektriciteitsvraag.

Overigens zijn de benodigde energie investeringen in de bovengenoemde faciliteiten niet verdisconteerd in de berekende energie-ernte-factoren.

Ook moet worden vastgesteld dat de ernte-factoren van waterstof, 0,5 á 1,4 voor Sahara- en 1,3 á 5,1 voor Noordzee waterstof, aanzienlijk lager zijn dan het minimum energie-ernte criterium van 14 voor het consolideren van onze huidige westerse samenleving. Een waterstofeconomie is nauwelijks in staat zichzelf in leven te houden, laat staan een westerse samenleving. Een verbetering van de conversie-efficiënties van een waterstofeconomie is maar zeer beperkt mogelijk omdat de conversie-

#### Referenties

1. Waterstof – de sleutel voor de energietransitie, A. van Wijk en C. Hellinga, TVVL Magazine, Juni 2018
2. Verkenning waterstof infrastructuur, Ministerie van economische zaken, November 2017
3. Een supergrid met Noordzee – en Saharastroom?, A.H.H. Schmitz, TVVL Magazine, Mei 2010
4. Does a hydrogen economy make sense?, U. Bossel, Oktober 2006
5. On the way to a sustainable energy future, U. Bossel, September 2005
6. Energie, B. Diekmann en K. Heinloth, 1997
7. H2 - home - Dezentrale energievoorziening met Wasserstoff - Brennstoffzellen, A. Herrmann, November 2017
8. Fraunhofer Windmonitor 2016 en 2017
9. Unbequeme Wahrheiten bei der Energiebilanzierung, F. Müller, December 2014
10. Energie-Erntefactor, Institut für Festkörper-Kernphysik, TU-Berlin, augustus 2017
11. What is the minimum EROI that a sustainable society must have? C. Hall, S. Balogh en D. Murphy; Energies 2009.
12. Energy, EROI and quality of life, J. Lambert, C. Hall, S. Balogh, A Gupta en M. Arnold, Energy policy 2014.

Ad \*) Met over-vermogen en opslag volgens<sup>10</sup> bestaande uit een combinatie van oververmogen gecombineerd met langere termijn opslag

Ad \*\*) Zonder over-vermogen en opslag volgens<sup>10</sup>

efficiënties meer van thermodynamische dan van technische aard zijn.

#### Conclusies

Het indirect transporteren van elektronen door moleculair waterstof is een factor  $\frac{0,72}{0,32} \approx 2,3$  slechter dan voor het directe transport van wind-elektronen van de Noordzee en een factor  $\frac{0,78}{0,21} \approx 3,7$  slechter voor directe zonne-elektronen van de Sahara. Waterstof is niet de sleutel voor de energietransitie van de bebouwde omgeving en ik denk ook niet voor andere sectoren! Waterstof uit wind- en zonne-elektrolyse zal hoogstens een nichemarkt vormen.

Doch ook moet worden geconstateerd dat geen van de besproken duurzame energiesystemen voldoet aan het minimum energie-ernte criterium van 14 voor het consolideren van onze huidige westerse samenleving. Dit betekent dat als we willen toegroeien naar een duurzame circulaire samenleving wij onze energie-intensiteit met meer dan de helft zullen moeten gaan verlagen naar een ernte-factor van 6 of 7. Dit betekent onder andere dat we moeten toegroeien naar een stationaire economie. Doen we dit niet dan zullen energie en de benodigde energie (beter exergie) voor de productie van grondstoffen voor Noord-West Europa schaars worden ook in een circulaire economie.

*Naschrift: In de volgende uitgave van TVVL Magazine komt de TVVL Community Waterstof met een inhoudelijke reactie op dit artikel.*