



BTO 2016.086 | Februari 2017

## BTO rapport

### De vraag naar water in een waterstofeconomie

Kansen en gevolgen voor de drinkwatersector

# BTO

**De vraag naar water in een waterstofeconomie.**

**Kansen en gevolgen voor de drinkwatersector**

**BTO 2016.086 | Februari 2016**

**Opdrachtnummer**

400695-043

**Projectmanager**

Jan Willem Kooiman

**Opdrachtgever**

BTO - Verkennend onderzoek

**Kwaliteitsborger**

Ad van Wijk

**Auteurs**

Frank Oesterholt; Henk-Jan van Alphen, Nienke Koeman-Stein

**Verzonden aan**

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten.  
Een jaar na publicatie is het openbaar.

**Jaar van publicatie**  
2017

**Meer informatie**

ir. F.I.H.M. Oesterholt  
T 0621507897  
E [frank.oesterholt@kwrwater.nl](mailto:frank.oesterholt@kwrwater.nl)

**Keywords**

PO Box 1072  
3430 BB Nieuwegein  
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511  
F +31 (0)30 60 61 165  
E [info@kwrwater.nl](mailto:info@kwrwater.nl)  
I [www.kwrwater.nl](http://www.kwrwater.nl)

**KWR**

*Watercycle  
Research  
Institute*

**BTO 2016.086 | Februari 2017 © KWR**

Alle rechten voorbehouden.

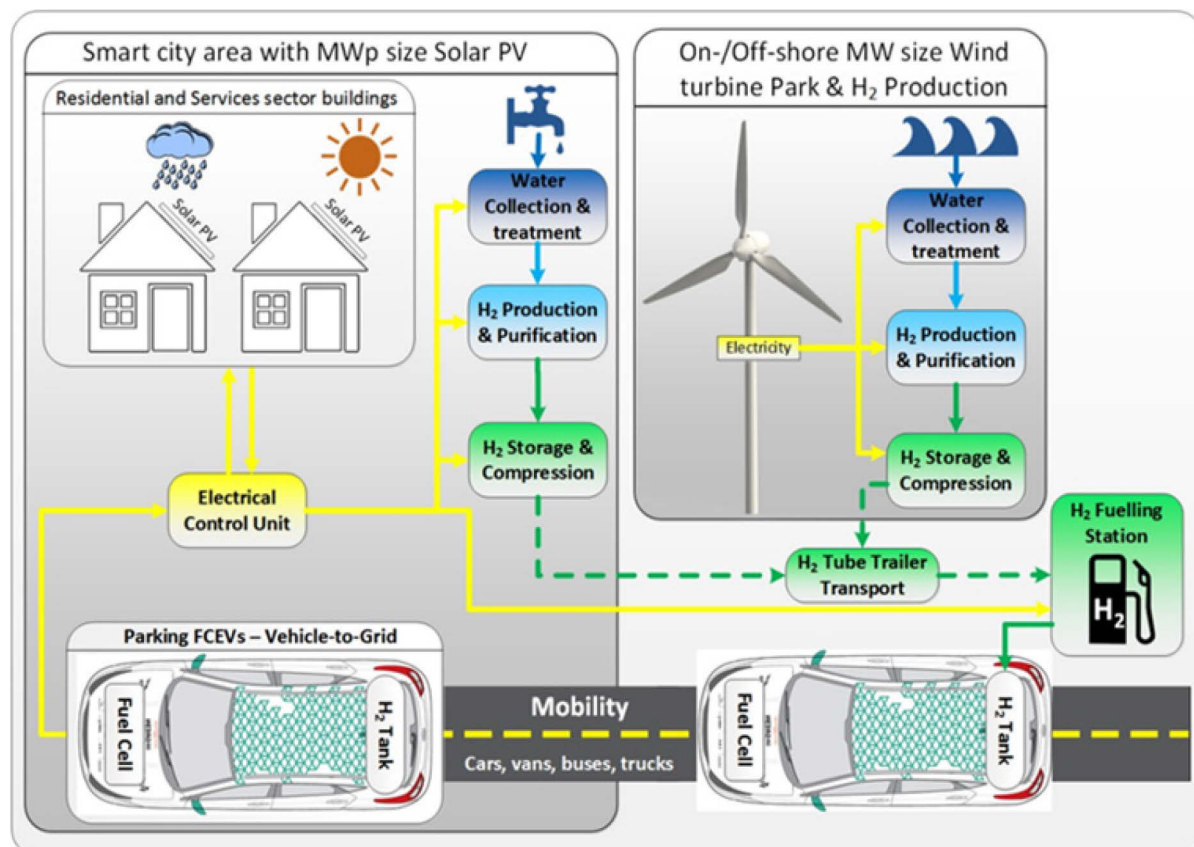
Niets uit deze uitgave mag worden veelevoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

# BTO Managementsamenvatting

## Toekomstige waterstofeconomie biedt kansen voor de drinkwatersector

**Auteurs** Ir. F.I.H.M. Oosterholt, Ir. H.J. van Alphen, Dr. Ir. N. Koeman-Stein

Een vergaande integratie van hernieuwbare energiebronnen in onze samenleving zal in de toekomst naar verwachting leiden tot een *all electric* samenleving, waarin waterstof - naast elektriciteit - de belangrijkste en dominante energiedrager zal zijn. Een waterstofeconomie kenmerkt zich door een sterk variërende schaalgrootte, een wijde vertakking van toepassingen en vooral door een cruciale rol voor water: voor de productie van waterstof via elektrolyse is immers zeer zuiver water als grondstof nodig. Uit dit verkennend onderzoek blijkt in de eerste plaats dat in de autarkische woonwijken van de toekomst drinkwater een logische bron vormt voor de lokale productie van waterstof. Uit berekeningen blijkt dat de toename van de drinkwaterconsumptie als gevolg hiervan beperkt blijft tot 2,2 % ten opzichte van het niveau in 2014. Dit biedt kansen voor drinkwaterbedrijven: in het verlengde van hun drinkwaterlevering kunnen zij lokaal in de wijken op kleine schaal zeer zuiver water gaan produceren voor de waterstofproductie.



Conceptueel overzicht van het concept 'Car as Power Plant' (TU Delft, Oldenbroek 2016)

### Belang: toekomstige rol van drinkwaterbedrijven in een 'all electric' samenleving

Waterbedrijven willen zich ook voor de langere termijn oriënteren op hun rol in onze veranderende samenleving. Door de nauwe interactie (nexus) tussen de energie- en watercyclus is het daarvoor ook van belang dat drinkwaterbedrijven inzicht krijgen in mogelijke toekomstige ontwikkelingen op energiegebied. Op die manier kunnen ze bewust anticiperen op die ontwikkelingen, daar waar mogelijk kansen benutten en bedreigingen voortijdig onderkennen. Daarom is in deze studie onderzocht wat het effect van toenemend gebruik van hernieuwbare energiebronnen kan zijn.

### Aanpak: schatting van de gevolgen van een waterstof-economie met 'Car as power plant'

In een intensieve samenwerking met de TU Delft is met het daar ontwikkelde 'Car as Power Plant'-model een schatting gemaakt voor het (drink)waterverbruik in een toekomstige waterstofeconomie. Hiervoor zijn vijf case-beschrijvingen opgesteld en doorgerekend. Vervolgens is de mogelijke rol voor de drinkwatersector in beeld gebracht. Parallel daaraan is een visie geschreven op de voorwaarden voor het ontstaan van een waterstofeconomie.

### Resultaten: in waterstofeconomie neemt drinkwaterverbruik minder dan 2,2 % toe

In een toekomstige waterstofeconomie zal in woonwijken demiwater worden gebruikt voor lokale productie van waterstof uit surplus elektriciteit van zonnepanelen in de wijken. Voor de productie van het benodigde demiwater ligt drinkwater het meest voor de hand als bron. Dit resulteert in een groot aantal kleinschalige productie-units voor demiwater in de woonwijken (1 tot 5 m<sup>3</sup>/uur). Deze demiwaterproductie zou resulteren in een toename van de drinkwaterconsumptie van nog geen 2,2 % ten opzichte van de consumptie in 2014. Waterbedrijven zouden in het verlengde van hun drinkwaterlevering ook demiwater kunnen gaan produceren en leveren.

Het deel van de elektriciteit dat niet via de zonnepanelen in woonwijken kan worden opgewekt, is afkomstig van grootschalige windparken langs de kust of op zee. Die energie wordt door brandstofcelauto's (fuel cell electric vehicles of FCEVs) als waterstof in de wijk gebracht. Volgens het 'Car as Power Plant'-principe zullen de in de wijk geparkeerde FCEVs met de in hun brandstofcellen uit waterstof geproduceerde elektriciteit het lokale net voeden.

Voor de grootschalige productie van demiwater op deze afgelegen windparken ligt het gebruik van oppervlaktewater of zeewater meer voor de hand. Dat biedt kansen voor commerciële dochters van drinkwaterbedrijven om, op een vergelijkbare wijze als nu voor de industrie, demiwaterplants te bouwen en te exploiteren. Het demiwaterverbruik in een waterstofeconomie wordt geschat op 60 miljoen m<sup>3</sup> per jaar.

### Implementatie: waterstofeconomie biedt kansen voor de drinkwatersector, geen bedreigingen

De waterstofeconomie is een langetermijnvisie op hoe onze samenleving zich op energiegebied zou kunnen ontwikkelen. Het gebruik van hernieuwbare energiebronnen zal uiteindelijk onvermijdelijk zijn, maar de snelheid van de energietransitie en de resulterende energiemix zijn nu nog onzeker. Uit dit onderzoek blijkt dat de drinkwatersector in het transitieproces vooral moet nadenken over de kansen en zich minder zorgen hoeft te maken over bedreigingen.

### Rapport

Dit onderzoek is beschreven in het rapport *De vraag naar water in een waterstofeconomie* (BTO-2016.086).

Voor het 'Car as Power Plant'-principe wordt verwezen naar het openbaar toegankelijke ebook: Van Wijk, A. en L. Verhoef. *Our Car as Power Plant*. The Authors and IOS Press, Delft, 2014. via <http://www.iospress.nl/book/our-car-as-power-plant/>.

# Samenvatting

Deze studie is gebaseerd op het uitgangspunt van vergaande integratie van hernieuwbare energiebronnen in de energievoorziening in Nederland die leiden tot een 'all electric' samenleving. Naast elektriciteit zal waterstof de belangrijkste en dominante energiedrager zijn. Dat betekent in essentie ook een dominantie voor het gebruik van brandstofcellen ten opzichte van batterij- en hybridesystemen. De waterstofeconomie laat zich in algemene zin kenmerken door een cruciale rol voor water, een sterk variërende schaalgrootte en een wijde vertakking van toepassingen. Voor de productie van waterstof via elektrolyse is demiwater nodig van hoge kwaliteit ( $EC < 1 \mu S/cm$ ), in dit rapport ultrapuur water genoemd.

Het doel van deze studie is om een verkenning uit te voeren gericht op de rol van water in een waterstofeconomie. De volgende onderzoeksvragen stonden daarbij centraal:

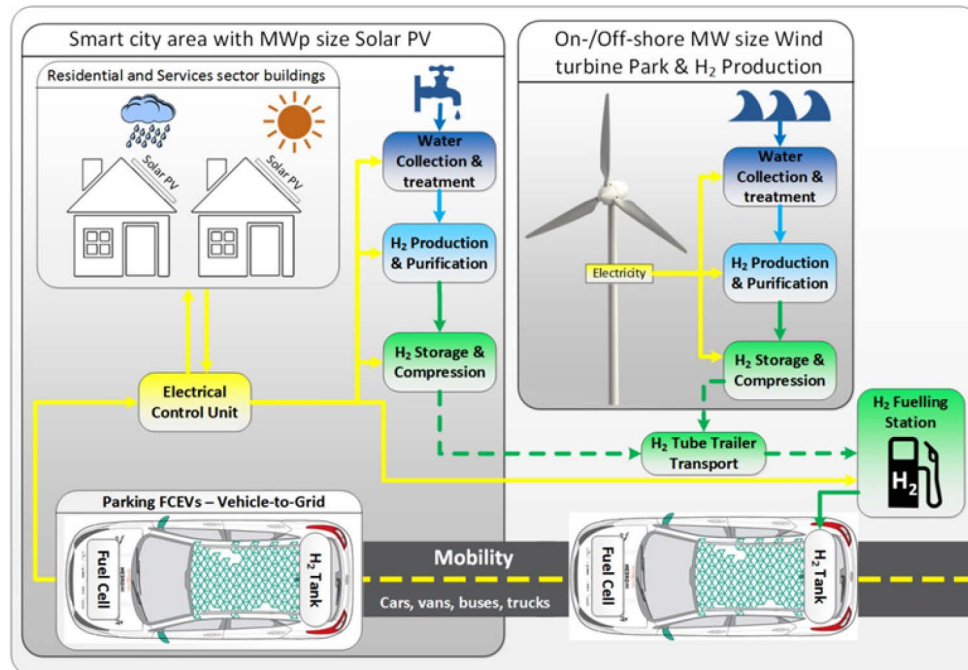
- Hoe kan de watervraag in een waterstofeconomie worden gekwantificeerd rekening houdend met schaalgrootte?
- Wat zijn mogelijke waterbronnen en welke zuiveringstechnologie is noodzakelijk om te voldoen aan de vereiste kwaliteit?
- Welke rol zou de drinkwatersector, dat wil zeggen de drinkwaterbedrijven en KWR als onderzoeksinstituut, kunnen spelen in de waterstofeconomie?
- Wat zijn de onderzoeksvragen die daartoe in het transitieproces moeten worden beantwoord?
- Waar moet de productie van water en waterstof plaatsvinden? Wat is het gevolg van de transitie van centrale naar decentrale stroomopwekking voor de watervraag.
- Kan het water dat vrijkomt bij de omzetting van waterstof in brandstofcellen weer worden ingezet voor de productie van waterstof? Wat is daarvoor nodig?

In de visie van Ad van Wijk, bijzonder hoogleraar future energy systems aan de TU Delft, zullen auto's met brandstofcellen (fuel cell electric vehicles of FCEVs) een belangrijke rol gaan spelen bij het balanceren van elektriciteitsoverschotten en -tekorten in een toekomstige 'all electric' samenleving volgens het 'Car as Power Plant principe'. Eerste berekeningen die door de TU Delft zijn uitgevoerd voor Denemarken tonen aan dat dit al kan worden bereikt met slechts 10 % van de totale toekomstige autovloot in het land. Uitgaande van deze Denemarken casus is in deze studie voor de Nederlandse situatie een eerste globale schatting gemaakt voor de jaarlijkse benodigde waterhoeveelheid benodigd voor mobiliteit én het balanceren van het elektriciteitsnet met FCEVs en waterstof. Hierbij is uitgegaan van drinkwater als bron voor de productie van ultrapuur water. De berekening laat zien dat jaarlijks 38 Mm<sup>3</sup> drinkwater nodig is, ongeveer 3,5 % ten opzichte van het drinkwaterverbruik in Nederland in 2014. Deze schatting houdt alleen rekening met wegtransport, het balanceren van het net en het elektriciteitsverbruik in de bebouwde omgeving.

Binnen het principe 'Car as Power Plant' zijn door de TU Delft verschillende casebeschrijvingen geformuleerd waaronder de 'Car as Home Power Plant'-casus waarbij FCEVs in een autarkische wijk een centrale rol spelen bij het transport van energie naar en productie van elektriciteit in de wijk (zie figuur M.1). Volledig autarkisch betekent dat binnen de wijk zelf wordt voorzien in alle benodigde energie voor mobiliteit, het balanceren van het elektriciteitsnet en verwarming van de gebouwen via warmtepompen. Deze casus is gebruikt om bovenstaande schatting verder te verfijnen. De energievoorziening van de gemodelleerde wijk komt enerzijds van zonnepanelen op de gebouwen in de wijk aangevuld met energie afkomstig van buiten de wijk gelegen

grootschalige windparken (bijvoorbeeld aan of op zee). Die energie wordt door FCEVs als waterstof binnen de wijk gebracht en daar omgezet naar elektriciteit voor het lokale net.

FIGUUR M.1 CONCEPTUEEL OVERZICHT VAN DE CASUS “CAR AS HOME POWER PLANT”.



In de toekomstige praktijk resulteert dit in een groot aantal kleinschalige ultrapuur water productie plants in de volledig autarkische woonwijken met typische productiecapaciteiten tussen 0,1 en 5 m<sup>3</sup>/uur waarmee surplus aan zonne-energie lokaal wordt omgezet in waterstof. Voor deze kleinschalige units is drinkwater een voor de hand liggende bron door de continue beschikbaarheid en de goed gedefinieerde kwaliteit. Door extrapolatie naar heel Nederland wordt het totaal jaarlijks drinkwaterverbruik voor lokale productie van waterstof geschat op 24 Mm<sup>3</sup> waardoor de drinkwaterconsumptie in de wijken toeneemt met 2,2 % ten opzichte van het drinkwaterverbruik in 2014. Hier ligt mogelijk een kans voor drinkwaterbedrijven om in het verlengde van hun drinkwaterlevering lokaal in de wijken op kleine schaal ultrapuur water te gaan produceren en leveren.

Voor de grootschalige windparken is in deze studie een aparte casus uitgewerkt, uitgaande van 100 MW opgesteld vermogen. In dat geval is een productiecapaciteit voor ultrapuur water nodig van 25 m<sup>3</sup>/uur. Oppervlaktewater of zeewater is dan een meer voor de hand liggende bron. Extrapolatie naar heel Nederland resulteert in deze situatie in een hoeveelheid benodigd oppervlaktewater van 62 Mm<sup>3</sup>/jaar. Hier ligt mogelijk een kans voor de commerciële dochters van drinkwaterbedrijven om hun bestaande activiteiten gericht op demiwaterlevering aan de industrie uit te breiden (of te verplaatsen) naar het leveren van ultrapuur water ten behoeve van de grootschalige waterstofproductie bij wind- en zonneparken.

Het water dat vrijkomt uit de re-elektrificatie van waterstof in brandstofcellen kan in principe in de woonwijken worden gebruikt als basis voor drinkwater of (na een extra polishing stap) worden hergebruikt als ultrapuur water voor elektrolyse. Uitgaande van literatuurgegevens die wijzen op maximaal 60 % recovery van het in de brandstofcel gevormde water, betekent dit dat maximaal 50 % op het totale waterverbruik kan worden bespaard.

In bovengenoemde schattingen voor het waterverbruik in een waterstofeconomie zijn de scheepvaart, de luchtvaart en de industrie in Nederland niet meegenomen. Voor deze sectoren zijn in deze studie ook schattingen gemaakt voor het waterverbruik maar die zijn met veel onzekerheden omkleed. Opgeteld voor alle sectoren (bebouwde omgeving, wegverkeer, luchtvaart, scheepvaart, industrie) is het geschatte verbruik van ultrapuur water in 2050 in een waterstofeconomie ongeveer 60 Mm<sup>3</sup>/jaar. Dit kan worden afgezet tegen de productie van 54 Mm<sup>3</sup> demiwater per jaar in 2014 zoals geïnventariseerd voor (alleen) de grootste demiwaterproductie units in Nederland (Tabel 1-1). In dat opzicht lijkt het er dus op dat in absolute zin de overgang naar een waterstofeconomie niet leidt tot een grote toename van de benodigde waterhoeveelheden.

Uit een seminar met vertegenwoordigers van een aantal drinkwaterbedrijven dat op 19 september 2016 is gehouden blijkt overigens dat de bedrijven vooral ook kansen zien bij de integratie van het 'all electric' principe en de waterstofeconomie in hun eigen bedrijfsvoering. Daarbij moet worden gedacht aan het produceren van hernieuwbare energie op hun eigen terreinen, het gebruik van waterstof voor het eigen wagenpark en voor de noodstroomvoorziening op de pompstations (nu nog dieselaggregaten). De productie van ultrapuur water op kleine of grote schaal beschouwen de bedrijven als vooral interessant voor hun commerciële dochterbedrijven.

# Inhoud

<b>Samenvatting</b>	<b>1</b>
<b>Inhoud</b>	<b>4</b>
<b>1 Energy and Water Wise World</b>	<b>6</b>
1.1 Inleiding	6
1.2 De traditionele waterstofeconomie	8
1.3 Uitgangspunten voor deze studie	11
1.4 Doel en opzet van de studie	14
1.5 Car as power plant casebeschrijvingen	15
1.6 Leeswijzer	18
<b>2 Technologie-overzicht</b>	<b>19</b>
2.1 Productie van waterstof	19
2.2 Omzetting van waterstof in elektriciteit	23
<b>3 Globale schatting waterverbruik in een waterstofeconomie</b>	<b>25</b>
3.1 Mobiliteit en energiebalans als uitgangspunt	25
3.2 Resultaten berekeningen	25
3.3 Rol van de industrie	28
3.4 Waterverbruik in een fossiele economie	29
<b>4 Waterverbruik per casus</b>	<b>30</b>
4.1 [NPP] Auto als energiecentrale woonwijk voor back-up:	30
4.2 [CPP] Parkeergarage als energiecentrale voor het balanceren van het elektriciteitsnet	32
4.3 [HPP] Auto als ziekenhuis-energiecentrale voor piekopvang en noodstroomvoorziening	32
4.4 [HFS] Waterstof tankstation langs de snelweg met lokale kleinschalige waterstofproductie	33
4.5 [CWP] Windpark van 100 MW langs de kust met grootschalige waterstofproductie	34
4.6 Overzicht resultaten berekeningen case beschrijvingen	34
4.7 Totale drinkwaterwatervraag	35
<b>5 Technologiekeuze en kostenschatting</b>	<b>36</b>
5.1 Technologiekeuze	36
5.2 Kostenschatting	41
<b>6 Discussie en conclusies</b>	<b>44</b>
6.1 Waterverbruik in een waterstofeconomie	44
6.2 Hergebruik van water uit fuel cells	45
6.3 Rol drinkwaterbedrijven	46
6.4 Conclusies	47



<b>7</b>	<b>Visie op de waterstofeconomie</b>	<b>49</b>
7.1	Inleiding	49
7.2	Voorwaarden voor een waterstofeconomie	49
7.3	Verdere toepassing in de transportsector en visionaire ideeën	56
<b>8</b>	<b>Referenties</b>	<b>59</b>
8.1	Literatuur referenties	59
8.2	Geraadpleegde websites:	60
<b>9</b>	<b>Gebruikte afkortingen</b>	<b>62</b>
	<b>Bijlage I Mobiliteit Nederlandse voertuigen</b>	<b>63</b>

# 1 Energy and Water Wise World

## 1.1 Inleiding

In het debat rond de energievoorziening van de toekomst volgen de ontwikkelingen elkaar in hoog tempo op. De liberalisering van de elektriciteit- en aardgasmarkten in Europa is in volle gang. De Europese Unie heeft voor 2020 de doelstellingen 20/20/20 (20% reductie van CO<sub>2</sub>-emissie, 20% energie-efficiënter en 20% hernieuwbare energie) geformuleerd. In de komende decennia zal de energievoorziening geleidelijk transformeren naar een steeds groter aandeel aan duurzame energie. Dit gaat ten koste van de inzet van fossiele brandstoffen. Leidende principes daarbij zijn volgens Van Wijk (2015):

- All electric: zowel in de industrie als in huishoudens.
- Lokaal: maak gebruik van lokaal beschikbare energiebronnen.
- Opslag: bij meeraanbod (off peak), zorg voor geschikte mogelijkheden om energie (tijdelijk) op te slaan voor een tijdstip dat er te weinig is of voor gebruik in een andere sector.
- Conversie: indien opslag niet mogelijk is, zet de energie om in een vorm die op andere wijze of later bruikbaar is.

Op termijn wordt nagestreefd om louter hernieuwbare bronnen (zon, wind, getijde, hydropower etc.) in te zetten voor de opwekking van energie. Daarbij zal behoefte ontstaan aan een mogelijkheid om het tijdelijk overschot aan elektriciteit op te slaan. In deze context zal in de toekomst naar verwachting waterstof als energiedrager een belangrijke rol gaan innemen. Een uniek aspect van waterstof naast opslagmedium voor elektriciteit is zijn veelzijdigheid met betrekking tot eindapplicaties. Daarbij gaat het niet alleen om her-elektrificatie (terug omzetten in elektriciteit) maar ook om het gebruik als brandstof voor voertuigen, als grondstof voor de industrie of als basis voor de productie van methaan ten behoeve van het aardgasnet (power-to-gas). Dit biedt de mogelijkheid om hernieuwbare energiebronnen te integreren in het energiesysteem achter het elektriciteitsnetwerk waarbij bruggen worden gevormd naar de transport- en industriële sector. Dit wordt kernachtig samengevat met de term waterstofeconomie. Het gedachtegoed van de waterstofeconomie is in de afgelopen decennia ontwikkeld (Rifkin, 2004), en lijkt in de komende decennia in de praktijk te gaan worden gerealiseerd. De transportsector gaat daarbij naar verwachting een cruciale rol spelen omdat juist daar waterstof een effectieve oplossing kan vormen voor het terugdringen van luchtmissies en voor leveringszekerheid. De eerste waterstofauto's met bijbehorende infrastructuur zijn al op de markt in bijvoorbeeld Californië, Zuid-Korea, Japan, Denemarken, UK en Duitsland. In Duitsland kan al op meer dan 16 locaties waterstof worden getankt en zijn nog ruim 350 waterstof tankstations in voorbereiding zodat uiteindelijk op elke 90 km 'Autobahn' kan worden getankt. (zie <https://cleanenergypartnership.de/h2Tankstellen/mobile.html>), en ook in Denemarken is er een netwerk van waterstof-tankstations. Dit is nog dichter dan in Duitsland (<http://www.hydrogenlink.net/eng/network.asp>)

Aangezien waterstof geen winbare grondstof is, maar een energiedrager die geproduceerd moet worden, is de duurzaamheid afhankelijk van de wijze waarop de waterstof gemaakt wordt. Waterstof is nu al een belangrijke grondstof voor de industrie en wordt meestal geproduceerd op basis van fossiele brandstoffen via stoomomvorming (steam reforming). Duurzaam waterstof wordt geproduceerd uitgaande van hernieuwbare energie, bijvoorbeeld via elektrolyse van water

met windenergie of zonne-energie. Het beloftevolle perspectief van duurzame waterstof (geen fossiele brandstoffen en geen emissies) is een structurele weg naar een meer duurzame (gedecentraliseerde) energievoorziening.

Met de overgang van fossiele brandstoffen naar een duurzame stroomvoorziening zal ook de transitie ingezet worden van een centrale energieopwekking naar een decentrale, lokale energieopwekking. Het opslaan van energie zal ook lokaal gaan plaatsvinden in batterijen of in een energiedrager als waterstof. Als grondstof voor de productie van waterstof moet water van een voldoende hoge kwaliteit dan ook lokaal beschikbaar zijn.

Naast waterstof als energiedrager (power-to-hydrogen) zijn overigens ook andere (gecombineerde) energiedragers denkbaar zoals methaan (power-to-gas), methanol (power-to-methanol of power-to-liquid), ammoniak (power-to-ammonia) en mierenzuur. Deze scenario's zijn echter allemaal gebaseerd op de productie van waterstof gevolgd door omzettingsreacties naar methaan, methanol, ammoniak of mierenzuur. De argumentatie die daarbij wordt gebruikt is dat deze verbindingen in vergelijking met waterstof eenvoudiger kunnen worden opgeslagen en getransporteerd. Waterstof heeft in dat opzicht als belangrijkste nadeel dat het bij standaard condities een lage energie-inhoud heeft per volume-eenheid. Om voldoende energie in een beperkt volume bijvoorbeeld in een voertuig mee te kunnen nemen, moet waterstof sterk worden gecompriëerd of vloeibaar worden gemaakt. Dit kost uiteraard energie.

Naast het vastleggen van hernieuwbare elektriciteit in waterstof of andere energiedragers kan de elektriciteit ook worden vastgelegd in batterijen. De vraag daarbij is: wordt het waterstof of batterijen? Het meest voor de hand liggende antwoord op die vraag is dat het zowel waterstof als batterijen zal worden. De automobiemarkt is daarvan een goed voorbeeld. Daar wordt massaal ingezet op elektrische motoren, die zowel gevoed kunnen worden door batterijen als door waterstof/brandstofcellen. Voorlopig wordt nog ingezet op hybride systemen (waterstof én batterijen).

Voor de productie van waterstof via zowel stoomomvorming als elektrolyse is water nodig van een hoge kwaliteit (typisch gedemineraliseerd water met een geleidbaarheid van  $< 1 \mu\text{S}/\text{cm}$ ). Indien een waterstofeconomie meer vorm gaat krijgen en een groot deel van onze duurzame energie vastgelegd wordt in waterstof, zal dat leiden tot een substantiële en specifieke watervraag. Vreemd genoeg is er veel beschreven in de literatuur over productie van waterstof en de waterstofeconomie maar opvallend weinig over de rol die water daarbij speelt. Deze studie richt zich daarom vooral op de omgang met water bij de productie van waterstof in de waterstofeconomie en de kansen en gevolgen voor de drinkwatersector.

---

### Waterstof kentallen

1 kg waterstof ( $\text{H}_2$ ) komt overeen met  $11.1 \text{ Nm}^3$

Bovenste verbrandingswarmte (higher heating value<sup>1</sup>, HHV) van 1 kg  $\text{H}_2$  = 39.4 kWh of 142 MJ

Onderste verbrandingswarmte (lower heating value<sup>2</sup>, LHV) van 1 kg  $\text{H}_2$  = 33.3 kWh of 120 MJ

---

<sup>1</sup> De 'higher heating value' van een brandstof is gedefinieerd als de hoeveelheid warmte die vrijkomt bij de verbranding van een specifieke hoeveelheid (initieel bij 25°C) waarbij de producten weer op een temperatuur van 25°C worden gebracht. Hierbij wordt dus rekening gehouden met de latente verdampingswarmte van water in de verbrandingsproducten.

---

Voor het maken van 1 kg waterstof middels elektrolyse is er ca. 50-55 kWh aan stroom nodig en ongeveer 17 L leidingwater.

Voor een auto zou gelden dat 1 kg H<sub>2</sub> overeen komt met 100 km rijden

---

## 1.2 De traditionele waterstofeconomie

In verschillende industrietakken zoals de elektronica-, voedingsmiddelen-, metaal-, (vlak)glas-, chemische- en petrochemische industrie wordt momenteel jaarlijks wereldwijd al ongeveer 700 miljard Nm<sup>3</sup> waterstof (ongeveer 60.000 kton) gebruikt als grondstof (Ball et al., 2015). Volgens de IEA Technology Roadmap uit 2015 wordt jaarlijks wereldwijd ongeveer 7.2 exajoules aan waterstof gebruikt in raffinaderijen en chemische industrie. Dit komt neer op ongeveer 50.700 kton waterstof per jaar. Dat is 2 maal het primaire energieverbruik van Nederland. Daarvan wordt 48 % via steam reforming gevormd uitgaande van aardgas of lichte alkanen, 30 % komt vrij bij raffinage van aardolie, 18 % wordt uit kolen geproduceerd en 4 % via elektrolyse van water. Steam reforming heeft een efficiëntie van 80 % waarbij de productiekosten voor waterstof grofweg 1,0 – 1,5 €/kg H<sub>2</sub> bedragen (de prijs bij interne inzet van waterstof in een (petro)chemisch complex). Bij levering van gecombineerd waterstof aan een tankstation komen daar nog handlingkosten en transportkosten bij en bedraagt de huidige prijs minimaal 5 €/kg H<sub>2</sub>.

Op basis van data van CBS Statline is in 2014 in Nederland ongeveer 2.100 kton waterstof verkocht, ongeveer 4,1 % van de wereldproductie. De haven van Rotterdam is één van de grootste productielocaties van waterstof in Europa. Deze hoeveelheid komt overeen met een energie-inhoud van 298 PJ/jaar, bijna 10 % van het jaarlijkse verbruik van primaire energie in Nederland. Belangrijke producenten wereldwijd zijn Linde AG, Air Products en Air Liquide waarbij de twee laatstgenoemden ook in de Rotterdamse haven actief zijn.

Waterstof komt vrij bij de productie van chloor en bij de chemische processen in hoogovens en raffinaderijen. Veel van deze waterstof wordt direct weer ingezet in processen waardoor de hoeveelheid niet eenduidig bekend is. In de petrochemische industrie wordt waterstof onder andere gebruikt bij het verwerken en raffineren van ruwe olie, om onzuiverheden te verwijderen en om de productkwaliteit van schone brandstoffen (ontzwavelen) en andere producten te verbeteren. Op dit moment wordt waterstof nog vrijwel uitsluitend geproduceerd uit aardgas. Het totale aardgasverbruik in de industrie fluctueert sinds 2006 jaarlijks tussen 300 en 350 petajoule. Een kwart van het aardgas wordt gebruikt als grondstof – het zogenaamde non-energetisch verbruik – voornamelijk voor de productie van waterstof wat gebruikt wordt voor de productie van kunstmest en deels voor de productie van methanol, zie kader (Schoots 2015). Dit komt overeen met een productie van ongeveer 74 PJ waterstof (525 kton) die rechtstreeks aan de chemische industrie kan worden toegeschreven.

---

In Nederland wordt 400 kton aan methanol geproduceerd ([www.sn-gave.nl](http://www.sn-gave.nl)). Dit werd voorheen gedaan uit methaan maar producent BioMCN is overgegaan op de productie van biomethanol op basis van biobrandstoffen. Wanneer methanol, via synthesesegas, uit aardgas wordt geproduceerd, is er een overschot aan waterstof.

---

<sup>2</sup> De 'lower heating value' van een brandstof is gedefinieerd als de hoeveelheid warmte die vrijkomt bij de verbranding van een specifieke hoeveelheid van die brandstof (initieel bij 25°C) waarbij de temperatuur van de verbrandingsproducten wordt teruggebracht naar 150°C. Hierbij wordt dus aangenomen dat de latente verdampingswarmte van water in de verbrandingsproducten niet wordt teruggewonnen.

Echter bij de productie van syngas uit biobrandstoffen, komt minder waterstof vrij. Om methanol te kunnen produceren zal in dat geval een extra waterstofbron nodig zijn, bijvoorbeeld geproduceerd via electrolyse van water met hernieuwbare energie. Methanol kan (in het meest extreme geval) ook geproduceerd worden uit CO<sub>2</sub>. Indien de volledige productiecapaciteit van methanol geproduceerd zou worden uit CO<sub>2</sub>, is sprake van de maximale benodigde hoeveelheid waterstof. Bij 400 kton/jaar aan methanol productie uit CO<sub>2</sub> is dan jaarlijks 50 kton waterstof nodig. Bij de productie via electrolyse is hiervoor jaarlijks 450.000 m<sup>3</sup> demiwater nodig.

---

Het gebruik van in hoofdzaak aardgas (fossiele brandstof) als basis voor de productie van waterstof en de daaraan gekoppelde rendementen en emissies maken dat deze methode niet duurzaam is, hoewel producenten soms andere beweren (zie kader).

---

Air Liquide produceert in Bergen op Zoom (voor SABIC) en Rozenburg (voor Huntsman) ongeveer (30.000 + 150.000) 180.000 Nm<sup>3</sup> waterstof per uur, dat is 16 ton/uur en 140 kton op jaarbasis. De productie, die is gebaseerd op stoomomvorming (steam methane reforming (SMR)) van aardgas, is geoptimaliseerd voor de productie van koolmonoxide ten behoeve van de kunststofproductie. In dat opzicht is waterstof een bijproduct van de dienstverlening. Omdat de reactie wordt gestopt na de reforming van methaan naar koolmonoxide (de conversie van CO naar CO<sub>2</sub> met stoom heeft niet plaats) en de koolmonoxide volledig wordt benut door de industrie, beschouwt Air Liquide dit als een duurzame manier van waterstof produceren, dat wil zeggen met een lage carbon footprint. (Niet helemaal terecht, want in werkelijkheid komt het uiteindelijk toch weer vrij in de atmosfeer als CO<sub>2</sub>). De waterstof gaat in een netwerk van Air Liquide, dat loopt van Duinkerken tot de Tweede Maasvlakte en Chemelot in het oosten. De stoom omvorming is als proces vaak gekoppeld aan de industriële stoomproductie (Rankine cycle) zodat aan het water dezelfde (strikte) kwaliteitseisen worden gesteld. In werkelijkheid is de vereiste stoomkwaliteit voor de stoomomvorming van methaan minder van belang omdat het proces minder gevoelig is voor bepaalde organische vervuilingen dan een stoom-water-cyclus. In de chemische industrie wordt wel eens 'vervuilde' stoom gebruikt voor stoomomvorming waarbij bedoeld wordt dat een met koolwaterstoffen verontreinigde stoom wordt benut. De verwijdering van zouten is wel van groot belang om ongewenste afzettingen op de katalysator te voorkomen. Het benodigde demiwater wordt in Bergen op Zoom geleverd door de klant en in Rozenburg door Evides vanuit de Demiwaterplant Botlek (Mondelinge informatie Air Liquide, 2016).

Linde AG bouwt en exploiteert wereldwijd waterstofproductie-units ten behoeve van de (petro)chemische voedingsmiddelen en metaalindustrie. Daarbij gaat het om plants in de orde van grootte van 20.000 tot 120.000 Nm<sup>3</sup> waterstof/uur. In Nederland produceert Linde waterstof voor onder andere Tata Steel in IJmuiden via SMR. Wereldwijd is SMR het meest gebruikte productiesysteem. Bij de (petro)chemische industrie wordt vaak gesproken over hyco-plants waarbij na de steamreforming de watershift reactie niet plaatsvindt. Op die manier wordt synthesesgas (CO + H<sub>2</sub>) geproduceerd en geleverd (zie par. 2.1.2). Omdat de oliekwaliteit wereldwijd afneemt is sprake van een groeiemarkt voor waterstof. Dat houdt verband met de noodzaak tot kraken van complexere oliemengsels en de noodzaak tot meer ontzavelen van de olie. Daarnaast worden ook steeds hogere eisen gesteld aan brandstoffen. Linde AG investeert veel in de waterstofeconomie van de toekomst onder andere door de technologie te ontwikkelen voor het opzetten en bedienen van waterstoftankstations. Het is

complex om in drie minuten 5 kg waterstof bij 700 bar in een auto te brengen. De vereiste waterkwaliteit voor de bestaande SMR-productie-units komt overeen met de waterkwaliteit die is vereist voor de industriële stoom-water cyclus, dat wil zeggen demiwaterkwaliteit (RO/RO/mengbed IX of kation/anion IX/mengbed). Verder wordt ook door Linde steeds vaker lokaal en op kleinere schaal elektrolyse ingezet (< 1.000 Nm<sup>3</sup>/uur via alkalische en PEM-electrolyse) waarbij waterstof uit water wordt geproduceerd met behulp van elektriciteit. Hiervoor worden over het algemeen installaties ingekocht bij gespecialiseerde bedrijven zoals Hydrogenics of Siemens. Hierbij maakt de waterbereiding via 'deionisation units' vaak integraal onderdeel uit van de levering. Belangrijk aspect is dat bij elektrolyse ook koelwater benodigd is (mondeline informatie Linde AG, 2016).

De toekomstige energievoorziening zal ook consequenties hebben voor de traditionele waterstofeconomie die, zoals hier is geschetst, voornamelijk industriegebonden is. In een 'all electric' scenario gebaseerd op hernieuwbare energiebronnen zijn er geen raffinaderijen meer die waterstof gebruiken en is het de vraag of in de metaalindustrie nog waterstof vrijkomt als ook het smelten van erts 'all electric' wordt. Mogelijk zijn de traditionele raffinaderijen vervangen door biobrandstofraffinaderijen, die de basis vormen voor de chemische industrie. De ontwikkeling van het energieverbruik door de industrie is daarmee een hoogst onzekere factor. In deze studie zal om die reden vooral de focus liggen op mobiliteit, verwarming van gebouwen en het balanceren van de elektriciteitsnet. Voor het toekomstig waterstofverbruik in de industrie zal een jaarlijkse hoeveelheid van 525 kton als voorlopig beste schatting worden gehanteerd. Zoals hierboven is toegelicht is deze waarde volledig gebaseerd op het huidige gasverbruik ten behoeve van de waterstofproductie.

Bij alle beschouwingen in deze studie hoort het besef dat ook voor de productie van elektriciteit op conventionele wijze in energiecentrales veel water wordt gebruikt. Voor een deel is dat ook demiwater voor de productie van ketelvoedingwater voor stoomketels. De stoom achter de turbine wordt gecondenseerd en het condensaat wordt grotendeels hergebruikt. Daarnaast wordt koelwater gebruikt, bij centrales meestal in een once-through koeling. Overigens moet op basis van verminderde waterbeschikbaarheid en verhoogde watertemperatuur ten gevolge van klimaatverandering uitgaande van de huidige, grotendeels op thermoelectric power gebaseerde energievoorziening rekening worden gehouden met een teruggang in bruikbare capaciteit van conventionele energiecentrales in 2050 (ten opzichte van 2016) met 7,0 tot 12 % (Van Vliet et al, 2016).

#### *Huidige demiwaterproductie en verbruik in Nederland.*

In Nederland wordt ten behoeve van de industrie op grote schaal gedemineraliseerd water (demiwater of gedeïoniseerd water) geproduceerd. De industrie gebruikt het vooral als ketelvoedingwater ten behoeve van de stoomproductie en in een aantal gevallen als proceswater. Veel bedrijven hebben een eigen, relatief klein, waterbehandelingssysteem voor de demiwaterproductie. Er zijn echter ook een aantal grote installaties die vaak een centrale leveringsfunctie hebben. Tabel 1-1 geeft een niet uitputtend overzicht van de grootste productielocaties voor demiwater in Nederland.

TABEL 1-1: OVERZICHT VAN GROTE DEMI-WATER PRODUCTIE LOCATIES IN NEDERLAND<sup>3</sup>

Bedrijf/ locatie	locatie	exploitant	Capaciteit (m <sup>3</sup> /h)
DWP Botlek	Botlek	Evides Industriewater	1.400

<sup>3</sup> Exclusief productiefaciliteiten voor demiwater in Emmen (Emmtec) en Delfzijl (Evides).

DWP Maasvlakte	Maasvlakte (v.a.2017)	Evides Industrierwater	800
Demi-S, Chemelot	Geleen	USG	1.200
Yara	Sluiskil	Evides Industrierwater	715
Air Liquide Pergen	Rotterdam	Evides Industrierwater	1.055
Dow	Terneuzen	Evides Industrierwater	750
Kisuma Chemicals	Veendam	North Water	180
<b>Totaal</b>			<b>6.100</b>

De gezamenlijke capaciteit van deze installaties is 6.100 m<sup>3</sup>/h, ongeveer 54,5 Mm<sup>3</sup>/jaar. De totale demiwater productiecapaciteit in Nederland ligt echter een stuk hoger aangezien er veel bedrijven zijn met een eigen demi-waterproductie.

Wat verandert er in de waterstofeconomie? Aangezien de opwekking van hernieuwbare energie veel meer decentraal en op kleine schaal zal plaatsvinden, zal ook decentraal water van hoge kwaliteit nodig zijn voor de productie van waterstof en die productie zal op veel kleinere schaal plaatsvinden.

### 1.3 Uitgangspunten voor deze studie

In deze studie wordt als uitgangspunt gehanteerd een vergaande integratie van hernieuwbare energiebronnen in de energievoorziening in Nederland waarbij elektriciteit en waterstof de belangrijkste energiedragers zijn. Bij hernieuwbare energiebronnen moet vooral worden gedacht aan zonne-energie via PV-panelen (61 %) en windenergie (31 %). Daarnaast in beperkte mate (8 %) aan energie uit biomassa, geothermische energie, getijde-energie, golfenergie en blue-energy<sup>4</sup>. Het balanceren van het elektriciteitsnet zal in deze situatie een van de grootste uitdaging vormen. Dit uitgangspunt sluit overigens aan bij het eind 2013, onder regie van de Sociaal Economische Raad (SER), getekende Energieakkoord voor duurzame groei waarbij partijen de basis hebben gelegd voor een breed gedragen en toekomstgericht energie- en klimaatbeleid. Een van de afspraken van het akkoord is dat partijen een gezamenlijke visie ontwikkelen op de toekomstige energiemix voor de verkeersector. Die visie is eind 2014 gepresenteerd als Visie Duurzame Brandstofmix waarbij in het Deelrapport Brandstofafel Duurzaam Waterstof volledig wordt aangestuurd op elektrificatie van het wegvervoer met waterstof als energiedrager (zie kader).

---

Op maandag 30 juni 2014 is het rapport "de Duurzame brandstofvisie met LEF" aangeboden aan staatssecretaris Wilma Mansveld van IenM en voorzitter Pieter van Geel van de Mobiliteitstafel van de Borgingscommissie Energieakkoord. De visie is een vervolg op het Energieakkoord voor duurzame groei waarin ambitieuze langetermijndoelen voor vervoer in Nederland zijn opgenomen om de uitstoot van schadelijke broeikasgassen te verminderen. In het deelrapport "Brandstofafel Duurzaam Waterstof" is de visie dat de toekomstige energievoorziening (2050) sterk gebaseerd zal zijn op zon en wind met technieken die elektriciteit opleveren waarin het wegverkeer meegaat. Verbrandingsmotoren worden uitgefaseerd. Geadviseerd wordt in te zetten op elektrificatie van het wegverkeer met behulp van batterijen en brandstofcellen waarbij de inzet van plug-in hybrides moet worden gezien als een transitieoptie. Ook de inzet van op biomassa gebaseerde brandstoffen en synthetische brandstoffen in verbrandingsmotoren moet worden

<sup>4</sup> Met blue energy wordt bedoeld de energie die beschikbaar komt door verschillen in zoutconcentratie tussen waterstromen zoals zeewater en rivierwater, ook wel osmotische energie of zoutgradiënt energie genoemd. Cijfers afkomstig uit het Klimaatakkoord, omgerekend naar percentages.

beschouwd als een korte termijn optie voor CO<sub>2</sub>-reductie. Het specifieke belang van brandstofcelvoertuigen en waterstof ligt in de volgende aspecten: nulmissie, gelijk comfort van tanken en een goede actieradius, efficiënter dan verbrandingsmotoren, energievoorzieningszekerheid en energieonafhankelijkheid. Daarnaast maken brandstofcelvoertuigen groene groei mogelijk voor het wegverkeer omdat de factor milieuspect vervalt als randvoorwaarde voor economisch groei.

De dynamiek van het transitieproces naar een waterstofeconomie maakt geen onderdeel uit van de studie. Ook politieke, economische en sociale consequenties van de transitie worden niet beschouwd. Het gaat om een technologische beschouwing waarbij het accent ligt op het watergebruik (technologisch scenariostudie). Dit betekent overigens niet dat het transitieproces naar een waterstofeconomie geen uitdagingen kent of de waterstofeconomie zelf niet ter discussie staat. Alleen het feit al dat het gaat om lange termijn processen houdt onvermijdelijk in dat sprake is van onzekerheden, divergerende perspectieven en betwiste prioriteiten. In de literatuur worden potentiële *show stoppers* genoemd die bijvoorbeeld verband houden met het gebruik van grondstoffen in de benodigde technologie voor de productie van elektriciteit via PV-panelen en windmolens, voor de productie van waterstof via elektrolyse van water en voor de verbranding van waterstof in brandstofcellen (Kleijn, Van der Voet, 2010). Daarbij gaat het volgens Kleijn niet alleen om zeldzame elementen (Pt, Cd, Te, Se, Ga, In, Ge, Ru) maar ook om bulkproducten zoals staal, koper en beton waarvan de productie enorm opgevoerd moet worden om aan de vraag te voldoen. In dit type beschouwingen wordt echter nauwelijks rekening gehouden met technologische ontwikkelingen die bijvoorbeeld het gebruik van zeldzame metalen in de toepassing zelf beperken, die alternatieve katalysatoren voortbrengen voor die toepassing of zelfs alternatieve technologie voortbrengen (zie kader).

In PEM (Proton Exchange Membrane) brandstofcellen wordt platina gebruikt als katalysator. Momenteel gaat dat om 60 tot 80 g Pt per auto. Auto-engineers geven echter aan dit terug gebracht kan worden naar 30 g in 2020 en rond 2025 naar 5-10g Pt (Eberle *et al.*, 2012). Verder wordt onderzoek gedaan naar grafeen als mogelijke vervanger van platina in PEM brandstofcellen. Daarnaast leidt technologische ontwikkeling tot nieuwe typen brandstofcellen (alkaline of alkaline membraan brandstofcellen) die helemaal geen platina nodig hebben.  
<http://news.rice.edu/2015/08/20/laser-burned-graphene-gains-metallic-powers/>

Bij deze 'resource constraints' speelt volgens de auteurs ook de beperkte beschikbaarheid van zoet water een rol, juist op plaatsen die een hoge potentie hebben voor PV zonne-energiecentrales. Alleen in woestijngebieden die grenzen aan een oceaan zou gebruik kunnen worden gemaakt van ontzoutingsinstallaties van zeewater, die weliswaar vanuit het oogpunt van (drink)waterproductie een significante energie-input vereisen maar vanuit de energie- en waterstofproductie gezien is dat verbruik niet relevant<sup>5</sup>.

Binnen deze studie wordt verder als uitgangspunt gehanteerd dat waterstof de belangrijkste en dominante energiedrager is met een mix van decentrale kleinschalige waterstofproductie en centrale grootschalige waterstofproductie bij grootschalige opwekking van hernieuwbare energie (bijvoorbeeld windparken). Dat betekent in essentie een dominantie voor het gebruik van brandstofcellen ten opzichte van batterij- en hybridesystemen. Daarbij gaan we uit van het gebruik van waterstof voor mobiliteit in Nederland. McDowall (2014) noemt dit het 'car of the

<sup>5</sup> Als voor 1 kg waterstof, wat overeenkomt met 39 kWh (HHV), 17 liter demiwater nodig is, dan kost de productie van dat water ongeveer 5 kWh/m<sup>3</sup>, ofwel 0,085 kWh. Dat is 0,2 % van de energie-inhoud van 1 kg waterstof.



future'-scenario dat voornamelijk is gebaseerd op een transformatie van het bestaande transportsysteem naar een systeem gebaseerd op brandstofcellen (en waterstof) onder druk van reductie van de uitstoot van koolzuurgas en andere luchtverontreiniging ( $\text{NO}_x$ ; fijnstof). Het scenario wordt verder gekenmerkt door relatief snelle elektrificatie van de samenleving waaronder de warmtevraag, de integratie van hernieuwbare energie via smart grids met management aan de vraagzijde.

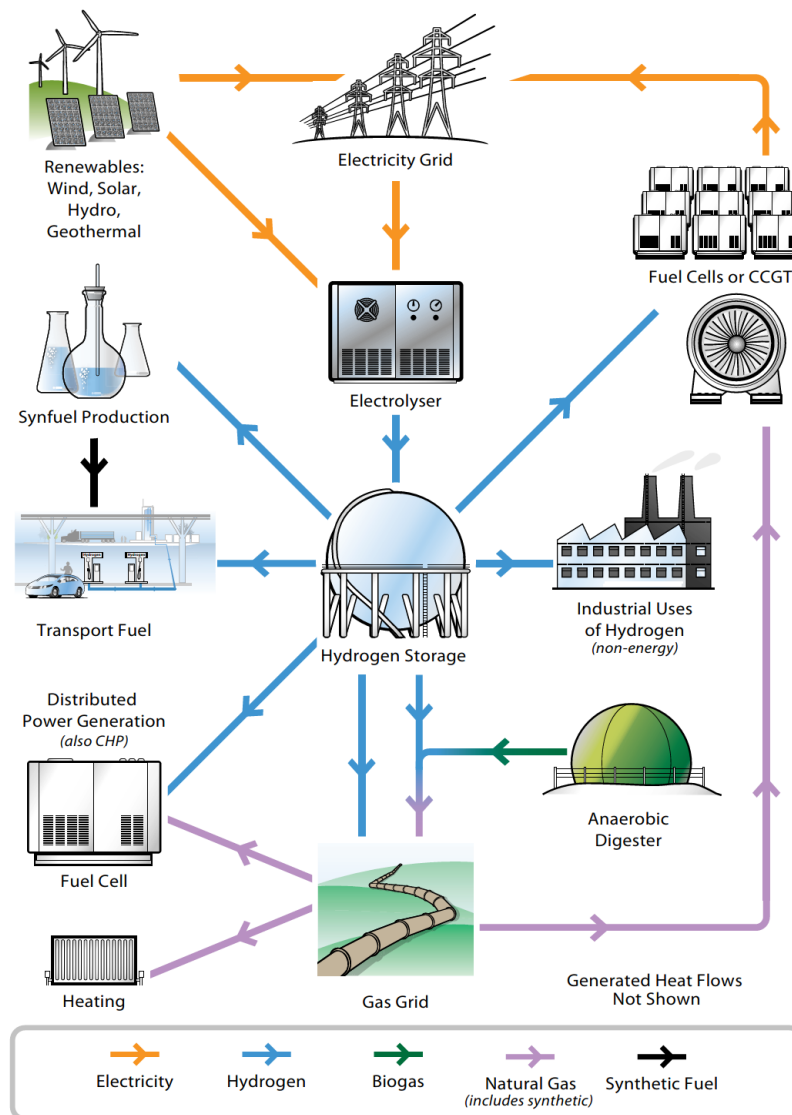
Uitgangspunt in deze studie is ten slotte dat waterstof wordt geproduceerd via elektrolyse van water uitgaande van elektriciteit uit hernieuwbare energiebronnen (zie Figuur 1-1). Elektrolyse technologie is nog volop in ontwikkeling maar globaal kunnen drie hoofdtypen worden onderscheiden (in engels):

- alkaline elektrolyzers (AEC; atmosferisch of hoge druk, unipolar of bipolar)
- protone exchange membrane elektrolyzers (PEMEC)
- solid oxide elektrolyzers (SOEC)

Waterstof kan ook worden geproduceerd uit biogas of biomethaan via het proces van stoomomvorming (steam methane reforming), in feite hetzelfde proces dat nu ook wordt gebruikt voor de waterstofproductie uit aardgas. Daarnaast kan waterstof worden geproduceerd via vergassing van organisch materiaal of biomassa bij hoge temperaturen ( $> 850 \text{ }^\circ\text{C}$ ) waarbij ontleding plaatsvindt in waterstof, CO en koolwaterstoffen. In Figuur 1-1 zijn deze opties niet opgenomen.

Voor het lokale aspect van energieopwekking en opslag, is een belangrijk aspect in deze studie. De centrale stroomopwekking m.b.v. kolen en gascentrales zal grotendeels vervangen worden door een veel kleinschaliger energieopwekking. Deze energie wordt dan ook op kleine schaal en lokaal omgezet naar waterstof. Een van de mogelijke scenario's hiervoor is het gebruik van auto's voor energieopslag m.b.v. batterijen of door het opslaan van waterstof en het terugleveren van stroom aan het net door verbranding van waterstof. Daarvoor is juist op lokaal niveau voldoende water van geschikte kwaliteit nodig.

FIGUUR 1-1 EEN GEINTEGREERD ENERGY NETWERK WAARIN WATERSTOF ALS ENERGIEDRAGER WORDT GEPRODUCEERD VIA ELEKTROLYSE VAN WATER



Bron: Fuel Cell Today. Water Electrolysis & Renewable Energy Systems (2013).

#### 1.4 Doel en opzet van de studie

De waterstofeconomie laat zich kenmerken door een cruciale rol voor water, een sterk variërende schaalgrootte en een wijde vertakking van toepassingen. Het doel van deze studie is om een verkenning uit te voeren gericht op de rol van water in de waterstofeconomie. De volgende onderzoeksvragen staan daarbij centraal:

- Hoe kan de watervraag in een waterstofeconomie worden gekwantificeerd rekening houdend met schaalgrootte?
- Wat zijn mogelijke waterbronnen en welke zuiveringstechnologie is noodzakelijk om te voldoen aan de vereiste kwaliteit?
- Welke rol zou de drinkwatersector, dat wil zeggen de drinkwaterbedrijven en KWR als onderzoeksinstituut, kunnen spelen in de waterstofeconomie?

- Wat zijn de onderzoeksvragen die daartoe in het transitieproces moeten worden beantwoord?
- Waar moet de productie van water en waterstof plaatsvinden? Wat is het gevolg van de transitie van centrale naar decentrale stroomopwekking voor de watervraag.
- Kan het water dat vrijkomt bij de omzetting van waterstof in brandstofcellen weer worden ingezet voor de productie van waterstof? Wat is daarvoor nodig?

### 1.5 Car as power plant casebeschrijvingen

Op dit moment komen de eerste door waterstof aangedreven auto's (Toyota, Honda, Hyundai) op de markt beschikbaar en is in een aantal landen (o.a. Japan, Californie (VS), Duitsland, VK en Denemarken) begonnen met de aanleg van de benodigde waterstof infrastructuur onder andere met waterstoftankstations langs de snelwegen. Waterstofauto's of FCEVs (Fuel Cell Electric Vehicles) gebruiken waterstof in brandstofcellen voor de productie van elektriciteit waarmee de auto elektrisch wordt aangedreven. Dit betekent dat de auto's ook kunnen worden gebruikt voor de productie van elektriciteit die aan een lokaal elektriciteitsnet wordt gevoed. Op deze manier wordt de brandstofcel in de auto benut als een kleine energiecentrale. Met geparkeerde auto's bij gebouwen of in parkeergarages kan een substantiële bijdrage worden geleverd aan het balanceren van het elektriciteitsnet dat grotendeels wordt gevoed met hernieuwbare energiebronnen.

In de visie van Ad van Wijk, bijzonder hoogleraar future energy systems aan de TU Delft, zullen auto's met brandstofcellen een belangrijke rol gaan spelen bij het balanceren van elektriciteitsoverschotten en -tekorten in een toekomstige situatie waarbij de energievoorziening 100 % gebaseerd is op hernieuwbare energiebronnen (van Wijk *et al.*, 2014). Eerste berekeningen voor Denemarken tonen aan dat dit al kan worden bereikt met slechts 10 % van de totale autovloot in het land. Dit concept van 'car as power plant' is door Vincent Oldenbroek, promovendus van Ad van Wijk, verder uitgewerkt. De basis daarbij vormt het principe van 'car as home power plant' (zie Figuur 1-2). Dit principe is gebaseerd op een autarkische woonwijk die bestaat uit 2.000 woningen met 4.600 inwoners die in totaal 2.240 FCEVs rijden. Andere voorzieningen in de wijk zoals kantoren, winkels, publieke voorzieningen en overige gebouwen, net als mobiliteit, sociaal gedrag e.d. zijn gemodelleerd op basis van statistische data. Zo correspondeert het aantal inwoners van de wijk bijvoorbeeld met de aanwezigheid van één supermarkt en één tankstation. In dit opzicht mag de wijk worden beschouwd als een statistische reflectie van een typische toekomstige Europese woonwijk. De energieconsumptie in de gebouwen is 'all electric', wat inhoudt dat ook de verwarming van gebouwen via warmtepompen is geregeld (bijvoorbeeld gekoppeld aan oppervlaktewater, ventilatielucht of buitenlucht). De elektriciteit voor de wijk wordt geproduceerd via zonnepanelen (PV) op de gebouwen en wordt opgeslagen in de vorm van waterstof die lokaal wordt geproduceerd via elektrolyse van water. Een windpark op afstand op het land of op zee zorgt voor voldoende waterstof om het gehele jaar in de energiebehoefte te kunnen voorzien. Op meer detailniveau zijn nog twee caseschrijvingen beschikbaar voor de wijze waarop een ziekenhuis via FCEVs het jaar rond van energie kan worden voorzien, 'car as hospital power plant' (zie Figuur 1-4) en hoe een parkeerplaats een centrale rol kan spelen bij de energieverzorging in een wijk met een centrale waterstofproductie-unit en een lokale afvalvergisting met biogasproductie, 'car park power plant', zie Figuur 1-3 (Oldenbroek et al. 2016b). Voor deze studie zijn de bestaande cases uitgebreid met een casus gericht op het lokaal produceren van waterstof bij een tankstation langs een snelweg en een casus gericht op een windpark van 100 MW.

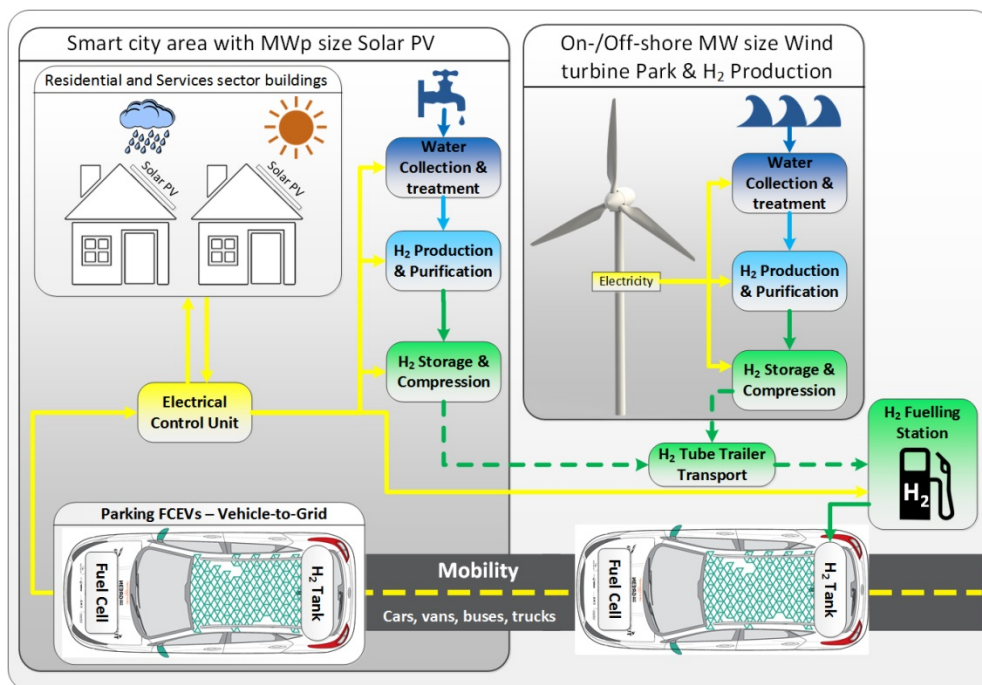
Dit leidt voor deze studie tot de volgende cases voor lokale 100% hernieuwbare energie voor transport en warmte:

- [NPP] Auto als energiecentrale woonwijk voor back-up (*Car as Home Power Plant: Back-up Power for Intermittent Renewables*)

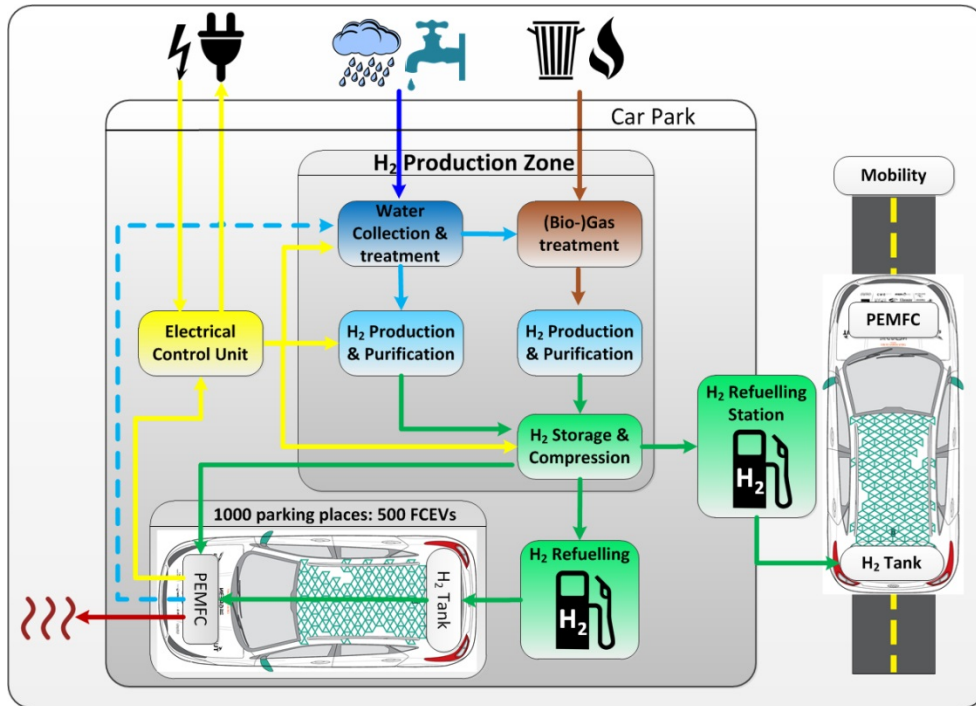
- [CPP] Parkeergarage als energiecentrale voor het balanceren van het elektriciteitsnet (*Car Park Power Plant: Balancing Power grids & H<sub>2</sub> Fuelling station*)
- [HPP] Auto als ziekenhuis energiecentrale voor piekopvang en noodstroomvoorziening (*Car as Hospital Power Plant: Peak & Emergency Power*)
- [HFS] Waterstof tankstation langs de snelweg met lokale kleinschalige waterstofproductie (*Hydrogen Fuel Station along a highway: local hydrogen production on a small scale*)
- [CWP] Windpark van 100 MW langs de kust met grootschalige waterstofproductie (*Coastal Wind Park 100 MW: local production of hydrogen on a large scale*)

Deze cases vormen het uitgangspunt bij het berekenen van de (lokale) watervraag in Nederland in het geval van een waterstofeconomie. Het basisprincipe “car as home power plant” (NPP) wordt daarbij gebruikt voor de extrapolatie naar Nederland als geheel, terwijl de andere cases vooral inzicht geven in de lokale watervraag.

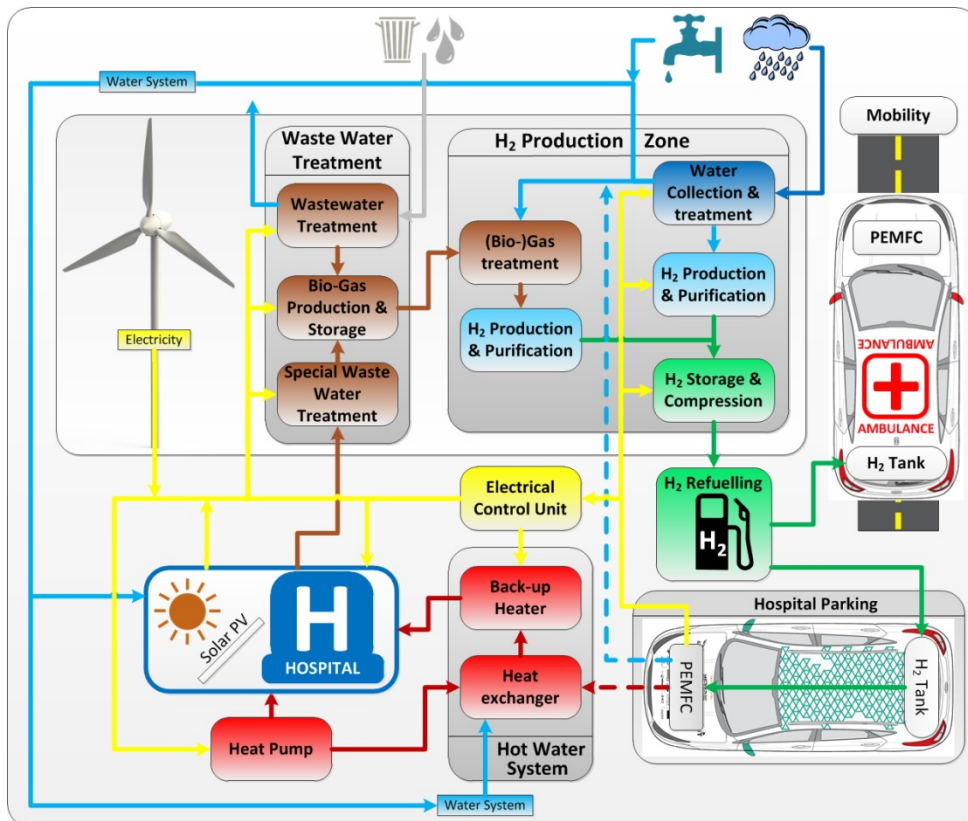
FIGUUR 1-2 CONCEPTUEEL OVERZICHT VAN DE CASUS “CAR AS HOME POWER PLANT”.



FIGUUR 1-3 CONCEPTUEEL OVERZICHT VAN DE CASUS "CAR PARK POWER PLANT".



FIGUUR 1-4 CONCEPTUEEL OVERZICHT VAN DE CASUS "CAR AS HOSPITAL POWER PLANT".



## 1.6 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 is een overzicht gegeven van technologie die gebruikt wordt voor de productie van waterstof en de technologie die beschikbaar is voor de omzetting van waterstof naar elektriciteit en water. De kwaliteitseisen aan het benodigde water zijn hierbij van belang. In hoofdstuk 3 is een inschatting gemaakt voor het toekomstig benodigde waterstof- en waterverbruik in Nederland voor het balanceren van het elektriciteitsnet en mobiliteit uitgaande van een transportsysteem met FCEVs en/of Battery Electric Vehicles (BEVs). In hoofdstuk 4 zijn de verschillende casebeschrijvingen op basis van het 'car as power plant' principe gebruikt voor het vaststellen van de lokale consequenties van een waterstofeconomie met betrekking tot het verbruik van demiwater. Omdat de wijk als autarkisch moet worden beschouwd met betrekking tot het geïntegreerde energieverbruik in huizen en utiliteitsbouw, weg transport en balanceren van het elektriciteitsnet, is voor de NPP-casus tevens een extrapolatie gemaakt naar heel Nederland. Hoofdstuk 5 gaat in op de zuiveringstechnologie die nodig is om per casus water te produceren wat een geschikte kwaliteit heeft voor elektrolyse. Hieraan gekoppeld is een kostenschatting gebaseerd op kapitaals- en exploitatiekosten. De discussie in hoofdstuk 6 richt zich vooral op een samenvatting van het geschatte waterverbruik in een waterstofeconomie, de mogelijkheden voor hergebruik van water geproduceerd in brandstofcellen en de mogelijke rol van de drinkwaterbedrijven in een waterstofeconomie.

Deze studie is gebaseerd op het uitgangspunt van een vergaande integratie van hernieuwbare energiebronnen in de energievoorziening in Nederland waarbij elektriciteit en waterstof de belangrijkste energiedragers zijn. Hoofdstuk 7 gaat in op de vraag hoe vanzelfsprekend dit uitgangspunt is en welke voorwaarden nodig zijn om een waterstofeconomie te realiseren.

## 2 Technologie-overzicht

### 2.1 Productie van waterstof

#### 2.1.1 Inleiding

Holladay heeft in 2009 een uitgebreid overzicht gegeven van alle methoden om waterstof te produceren uit fossiele en hernieuwbare bronnen (Holladay *et al.*, 2009). Hierbij kan een onderscheid worden gemaakt in globaal drie technologiegroepen:

- Thermische omvormingstechnieken waarbij veelal fossiele brandstoffen (koolwaterstoffen) worden omgezet in waterstof (engels: reforming technologies). Meest gebruikelijk is omvorming met stoom (steam reforming) van koolwaterstoffen zoals, biogas, aardgas of lichte alkanen (fossiel).
- Vergassingstechnieken waarbij biomassa of kolen via gedeeltelijke oxidatie worden omgezet in een mengsel van gassen waaronder waterstof, methaan, koolstofmonoxide, koolstofdioxide en stikstof.
- Watersplitsing waarbij waterstof wordt geproduceerd door het splitsen van water via elektrochemische weg (elektrolyse)
  - lage T elektrolyse (op basis van hernieuwbare energiebronnen) eventueel onder hoge druk
  - hoge T elektrolyse (in combinatie met zonnearmtecentrales of kernenergie) of via fotokatalytische weg (foto-elektrochemische en fotobiologische watersplitsing). Deze directe omzetting van zonlicht in waterstof bevindt zich nog in de onderzoeksfase, wordt nog vooral op bench scale toegepast en kampt nog met lage efficiëntie en andere praktische problemen. Datzelfde geldt voor fotobiologische watersplitsing.

Op dit moment zijn de volgende technieken voor waterstofproductie commercieel beschikbaar (Holladay *et al.*, 2009):

- Stoomomvorming (steam reforming) van koolwaterstoffen voornamelijk aardgas (steam methane reforming of SMR) met een efficiëntie van 70 - 85 % (gebaseerd op higher heating value HHV van waterstof).
- Elektrolyse met alkaline elektrolyzers (AEC) met een efficiëntie van 59 - 71 % (HHV/elektriciteitsinput in de cel).
- Elektrolyse met proton exchange membrane elektrolyzers (PEMEC) met een efficiëntie van 65 - 83 % (HHV/E-input).

#### 2.1.2 Stoomomvorming of steam methane reforming.

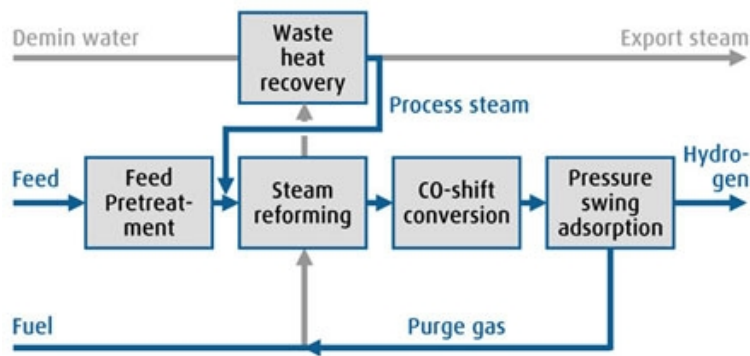
Bij stoomomvorming of steam methane reforming van methaan (SMR) wordt een mengsel van methaan en stoom omgezet in waterstof en koolmonoxide onder invloed van een katalysator in een reactor bij typische drukken rond 10 bar en temperaturen boven 500 °C. In een vervolgreactie reageert koolmonoxide met de stoom tot kooldioxide en waterstof eveneens onder invloed van een katalysator (water CO shift reactor). Afhankelijk van de kwaliteit van het methaan is een voorbehandeling nodig (ontzwaveling). Het geproduceerde gas moet worden opgewerkt bijvoorbeeld door middel van pressure swing adsorptie (PSA).

SMR is wereldwijd de meest toegepaste methode voor de productie van waterstof. Het is tevens de economisch gezien best beschikbare techniek. De productie van waterstof uit een fossiele



brandstof als aardgas is geen aantrekkelijke route voor een duurzame en volwassen waterstofeconomie omdat het afhankelijk is van de beschikbaarheid van aardgas. Daarnaast wordt bij het proces net zoveel kooldioxide gevormd als bij de directe verbranding van aardgas. De technologie kan wel duurzaam worden ingezet voor biogas.

FIGUUR 2-1 BASISSCHEMA VOOR DE PRODUCTIE VAN WATERSTOF VIA STEAM METHANE REFORMING (SMR)



Bron: [www.linde-engineering.com](http://www.linde-engineering.com)

Omdat een deel van de voeding gebruikt moet worden voor het verhogen van de temperatuur in de omvormingsreactor blijft de efficiëntie van het proces beperkt tot maximaal 85 %. Over de benodigde waterkwaliteit voor de productie van stoom ten behoeve van het SMR-proces wordt in de literatuur niets genoemd. Een Nederlandse leverancier van een kleinschalige productie-unit van waterstof (42 Nm<sup>3</sup>/uur) op basis van SMR past in zijn systeem de volgende behandeling toe: sediment filter voor de verwijdering van deeltjes, actieve kool filter (typisch carbon block filter) voor de verwijdering van organische verbindingen, omgekeerde osmose (RO) gevolgd door ionenwisseling (deionizer, 'mixed bed' of 'dual bed' is niet bekend) voor de verwijdering van zouten. Dit wijst op een vereiste waterkwaliteit die overeenkomt met die voor de productie van stoom (< 0,1 µS/cm). Dit is begrijpelijk vanuit het oogpunt van de leverancier die absoluut geen kalkafzetting in de reactor of op de katalysator wil en om die reden kiest voor een stuk veiligheid. Door verliezen in de RO-unit (recovery rate van slechts 40%) en verliezen in de ionenwisseling is de "waterefficiëntie" volgens de leverancier slechts ongeveer 5%, dat wil zeggen 160 kg water per kg waterstof (stoichiometrisch is dat 4,5 kg water/kg waterstof). Ook hier lijkt de leverancier vooral veel veiligheid in te bouwen, want op basis van de huidige stand van de techniek zou de recovery aanzienlijk hoger kunnen zijn.

### 2.1.3 Elektrolyse van water

Elektrolyse technologie is nog volop in ontwikkeling maar globaal kunnen drie hoofdtypen worden onderscheiden (in engels):

- alkaline electrolyzers (AEC; atmosferisch of hoge druk, unipolar of bipolar)
- proton exchange membrane electrolyzers (PEMEC)
- solid oxide electrolyzers (SOEC) of high temperature electrolyzers (HTEC).

De laatste categorie elektrolyzers is nog in ontwikkeling en blijft hier verder buiten beschouwing.

In algemene zin zijn elektrolyzers modulair opgebouwd en omdat ze gevoed worden met elektriciteit, kunnen ze in principe uit hernieuwbare energiebronnen duurzame waterstof produceren. Naar de verre toekomst toe moet elektrolyse dan ook worden gezien als voorkeurstechologie voor de productie van waterstof (Ball and Weeda, 2015).



### Alkaline Elektrolyzers

In dit type elektrolyser zijn kathode en anode van elkaar gescheiden door een gasscheidingsmembraan zodat waterstof en zuurstof separaat kunnen worden gewonnen. De elektrolyt-oplossing bestaat uit een waterige basische oplossing op basis van natriumhydroxide of kaliumhydroxide en de elektroden bestaan meestal uit met nikkel gecoat staal.

De waterkwaliteit moet hoog zijn om de efficiëntie van de elektrolyser te behouden (Zeng & Zhang, 2009). Onzuiverheden kunnen neerslaan op de elektrodes of in het membraan en daarnaast kunnen calcium, magnesium en chloride nevenreacties veroorzaken. Om een lage weerstand in het elektrolyt te behouden, moet er echter wel ionentransport plaatsvinden. Dit wordt meestal gerealiseerd met een kaliumhydroxide oplossing van 25-30% (Zeng & Zhang, 2009).

Dit type elektrolyzers vormt de huidige standaard voor elektrolyse op grote schaal met productie-units tot 200 Nm<sup>3</sup>/uur waterstof. De techniek kan slechts beperkt inspelen op fluctuaties in de energie-input (7-13% ramp-up rate per seconde), wat met het oog op het gebruik van energie uit hernieuwbare bronnen als een nadeel wordt beschouwd. De zuiverheid van het waterstofgas is lager dan dat geproduceerd via PEMEC-technologie. Om gas onder druk te kunnen produceren moet de hele unit onder druk worden gebracht, wat leidt tot extra kosten.

Alkaline elektrolyzers worden in de praktijk overigens vooral gebruikt voor de productie van chloor uit geconcentreerde zoutoplossingen (brine) waarbij waterstof vrijkomt als bijproduct.

### Proton exchange membrane elektrolyzers (PEM/PEMEC)

In dit type elektrolyser wordt gebruik gemaakt van een uitwisselingsmembraan waar alleen protonen door worden getransporteerd. Uit deze protonen wordt aan de kathode waterstof geproduceerd met een zeer hoge zuiverheid (omdat de kathode niet in contact komt met de elektrolyse-oplossing). De apparaten worden (nog) niet gebouwd op een schaal die interessant is voor opslag van energie in de vorm van waterstof, maar dat is wel een ontwikkeling die op dit moment in de markt gaande is. Bovendien kan het systeem modulair worden opgebouwd en heeft het een compactere design dan alkaline elektrolyzers. De efficiëntie behaald met PEM elektrolyzers is hoger dan die met alkaline elektrolyzers (Zeng & Zhang, 2009).

De apparaten hebben een snelle responstijd op schommelingen in de energie-input en kunnen zonder problemen worden bedreven in het hele gebied tussen 0 en 100 % van de nominale capaciteit (en hoger gedurende korte tijd). Waterstof kan worden geproduceerd onder gedifferentieerde druk, dat wil zeggen bij een hogere druk dan zuurstof. Nadelen zijn de hoge kapitaalskosten als gevolg van de relatief dure membranen en elektrodematerialen (platina/iridium). De levensduur van de membranen wordt snel langer en kan nu al oplopen tot 80000 uur (9 jaar). Net als bij alkaline elektrolyzers zorgt een hoge geleidbaarheid voor een hogere efficiëntie van de waterstofproductie (Carmo et al., 2013). Het waterverbruik van een typische PEM elektrolyser (bijvoorbeeld Siemens Silyzer 200) is ongeveer 1,5 L per Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub> (wat overeenkomt met 17 liter per kg H<sub>2</sub>).

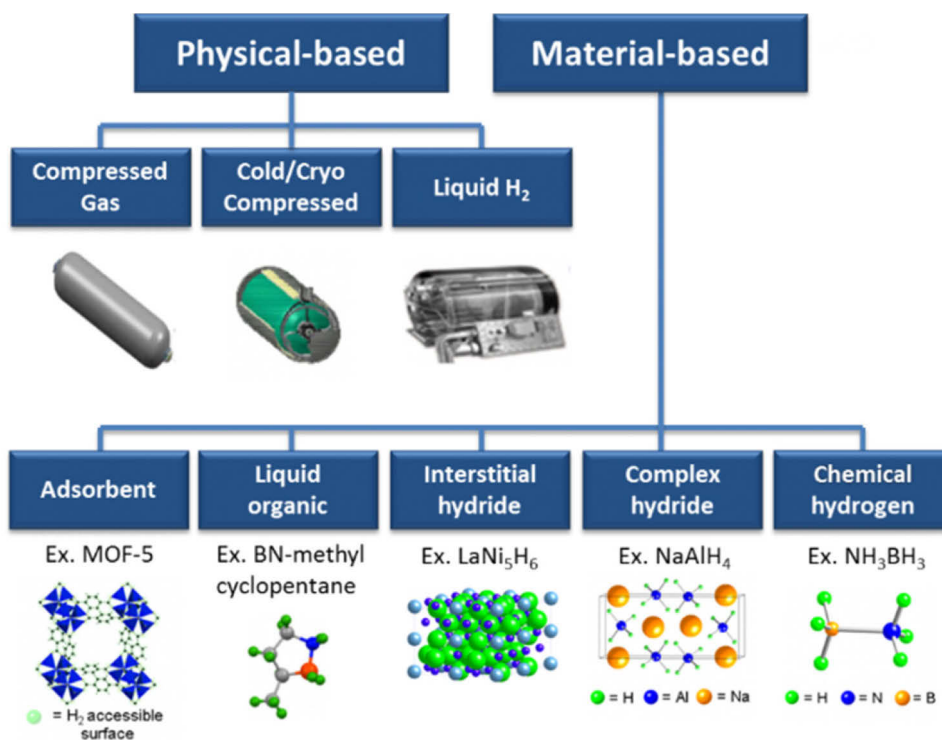
---

Opslag van waterstof gebeurt als gas onder druk of als vloeistof in daarvoor toegeruste tanks. Opslag als vloeistof vereist zeer lage temperaturen (- 253 °C bij 1 bar). Opslag van grote hoeveelheden waterstofgas kan ook plaatsvinden in zoutkoepels. Daarnaast kan waterstof chemisch worden opgeslagen als metaalhydride, in chemische complexen (chemical hydrogen storage materials) of aan specifieke adsorbentia, maar de capaciteiten daarvan zijn vooralsnog laag. Zie Figuur 2-2 voor een overzicht van alle opties.

---

De productie van waterstof onder druk kan daarom voordelen geven in termen van kosten en efficiëntie omdat aparte compressoren niet noodzakelijk zijn. Uiteraard produceren elektrolyzers zowel waterstof als zuurstof. De productie van zuurstof onder druk is problematisch omdat zuurstof onder druk bijzonder reactief is en de ontbrandingstemperatuur van materialen aanzienlijk verlaagt. Het vereist daardoor de toepassing van aangepaste (relatief dure) materialen en hulpmiddelen in de installatie. Bij PEMEC-installaties kan de waterstofzijde onafhankelijk van de zuurstofzijde op druk worden gebracht, wat om die reden als een voordeel kan worden beschouwd.

FIGUUR 2-2 VERSCHILLENDE VORMEN VOOR OPSLAG VAN WATERSTOF (DEPARTMENT OF ENERGY, 2016)



### 2.1.4 Waterverbruik en waterkwaliteitseisen bij waterstofproductie

Op basis van literatuurwaarden kan een idee worden verkregen over de verschillen in watergebruik van een aantal technieken voor de productie van waterstof (zie tabel 1).

TABEL 2-1 WATERCONSUMPTIE VAN VERSCHILLENDE TECHNOLOGIEËN VOOR WATERSTOFPRODUCTIE

Technologie	Waterverbruik in liter per kg H <sub>2</sub>	Waterverbruik in liter per kg H <sub>2</sub> o.b.v. stoichiometrie van de reactie
kolenvergassing	92	n.b.
stoomomvorming van methaan	24	4,5
Elektrolyse (wind + PV)	11	9
	<i>bron: Stephens-Romero et al. 2009</i>	

Uit een inventarisatie van commerciële aanbieders van elektrolyzers is ook een beeld gevormd van het waterverbruik van de verschillende apparaten. In de meeste gevallen is een voorbehandeling van drinkwater geïntegreerd in het apparaat. Wat daarbij opvalt, is dat over het algemeen niet heel efficiënt met water wordt omgegaan. Dat komt enerzijds omdat de kosten van water veelal laag zijn en anderzijds omdat men geen enkel risico wil lopen met de waterkwaliteit richting elektrolyser. Dit betekent dat in de praktijk het waterverbruik ongeveer 17 liter per kg geproduceerd waterstof bedraagt, maar er is ook een uitschieter tot 40 l/kg H<sub>2</sub>.

Het waterverbruik in bovengenoemde tabel is de gebruikte hoeveelheid leidingwater. Voor elektrolyse is ultrapuur water<sup>6</sup> nodig en dat wordt vaak geproduceerd in deze apparaten. De productie van ultrapuur water levert afhankelijk van de bron en gebruikte techniek ongeveer 0.5 liter puur water per liter leidingwater. Technologieën voor de productie van ultrapuur water zijn bijvoorbeeld het gebruik van omgekeerde osmose, of van ionenwisseling in combinatie met EDI (elektro deionisatie). In hoofdstuk 5 wordt verder ingegaan op deze technologieën.

Ultrapuur water heeft een geleidbaarheid van minder dan 1 µS/cm. Vaak worden ook eisen gesteld aan het totaal organisch gehalte (TOC) van het water met een concentratie < 0,08 mg/l (communicatie elektrolyzers leveranciers).

## 2.2 Omzetting van waterstof in elektriciteit

Verschillende bedrijven werken aan de ontwikkeling van gasturbines die werken bij een hoog aandeel aan waterstof. In deze studie wordt echter uitgegaan van het gebruik van fuel cells of brandstofcellen voor de omzetting van waterstof naar stroom.

Een brandstofcel produceert elektriciteit via een elektrochemische reactie tussen een brandstof en zuurstof. De meest gebruikte brandstof is waterstof. Het elektrisch rendement ligt dan in de orde van 50 tot 60 procent. De rest van de energie komt vrij in de vorm van warmte op een temperatuur van ongeveer 70 °C. Bij de reactie komen geen emissies vrij; het enige product van de reactie is waterdamp.

Een brandstofcel bestaat uit twee elektrodes, met daartussen een elektrolyt. Aan de elektrodes vindt de elektrochemische reactie plaats. Vaak is een katalysator aanwezig op de elektrodes om de reactie sneller te laten verlopen. Er bestaan verschillende type brandstofcellen en deze zijn meestal vernoemd naar het type elektrolyt wat aanwezig is. Deze kan vloeibaar of vast zijn. Tabel

<sup>6</sup> In deze studie wordt het begrip ultrapuur water gehanteerd voor water met een geleidbaarheid van minder dan 1 µS/cm.

2-2 geeft een overzicht van verschillende typen brandstofcellen die veel gebruikt worden in stationaire toepassingen of bij transport.

TABEL 2-2 OVERZICHT VAN VERSCHILLENDE TYPEN BRANDSTOFCELLEN

<b>Applicatie type</b>	<b>stationair</b>	<b>transport</b>
<b>Definitie</b>	Units die elektriciteit leveren en soms ook warmte	Units die de voortstuwende kracht leveren voor voertuigen
<b>typisch vermogensbereik</b>	0,5 - 400 kW	1 - 100 kW
<b>typische technologie</b>	PEMFC MCFC AFC SOFC PAFC	PEMFC DMFC
<b>voorbeelden</b>	WKK FC = grote stationaire gecombineerde warmte en kracht (heat & power)  UPS = uninterruptible power supplies, noodvoedingen	FCEV = fuel cell electric vehicle, auto's met brandstofcellen  Vrachtwagens, bussen, treinen en schepen.
<b>toelichting</b>	<b>Engelse omschrijving</b>	<b>marktpositie</b>
PEMFC	proton exchange membrane fuel cells	dominant
DMFC	direct methanol fuel cells	
PAFC	phosphoric acid fuel cells	
MCFC	molten carbonate fuel cells	dominant
SOFC	solid oxide fuel cells	dominant
AFC	alkaline fuel cells	
WKK	Warmte kracht koppeling	

Gebaseerd op *The Fuel Cell Industry review (2015)*

## 3 Globale schatting waterverbruik in een waterstofeconomie

### 3.1 Mobiliteit en energiebalans als uitgangspunt

Oldenbroek *et al.* hebben de vraag onderzocht of het mogelijk is om in een maatschappij met een elektriciteitsvoorziening en transportsysteem die voor 100 % zijn gebaseerd op hernieuwbare energie, alle elektriciteitsoverschotten en -tekorten te balanceren met FCEVs en waterstof (Oldenbroek *et al.*, 2016a). In een dergelijk toekomstig scenario is het balanceren van het elektriciteitsnetwerk een grote uitdaging. Denemarken is gebruikt als voorbeeld in de studie vanwege het hoge aandeel in hernieuwbare energie uit wind, de netto import van energie en de intensieve uitwisseling van elektriciteit met de buurlanden. Daarnaast zijn de noodzakelijke data in Denemarken relatief goed beschikbaar. De resultaten van de studie tonen aan dat dit met 10 % van het Deense wagenpark kan worden gerealiseerd.

Verondersteld mag worden dat de mix van bronnen van hernieuwbare energie net als de productieprofielen voor Denemarken en Nederland redelijk goed overeenkomen, waarbij hoofdzakelijk gebruik wordt gemaakt van windenergie. Om die reden is het vereiste percentage waterstof voor het balanceren van het elektriciteitsnet in vergelijking met het waterstofverbruik voor mobiliteit uit de Deense situatie gebruikt om een schatting te maken van de benodigde waterstof- en waterhoeveelheden voor de Nederlandse situatie. Voor alle duidelijkheid gaat het hierbij om de benodigde waterstofhoeveelheden berekend voor wegtransport en voor het balanceren van het elektriciteitsnet.

### 3.2 Resultaten berekeningen

Voor het wegvervoer is als uitgangspunt gehanteerd het totaal aantal gereden kilometers van alle motorvoertuigen in Nederland in 2014. Op basis daarvan zijn 4 scenario's doorgerekend (zie Tabel 3-1):

1. FCEV 100 % 2015 scenario: met 100 % FCEVs werkend met een efficiëntie van de brandstofcellen uitgaande van in 2015 bekende data (km/kg H<sub>2</sub> per type voertuig)
2. FCEV 50% 2015 scenario: met 50 % FCEVs/ 50 % BEVs werkend met een efficiëntie van de brandstofcellen uitgaande van in 2015 bekende data (km/kg H<sub>2</sub> per type voertuig)
3. FCEV 100 % 2050 scenario: met 100 % FCEVs werkend met een verwachte efficiëntie van de brandstofcellen in 2050
4. FCEV 50% 2050 scenario: met 50 % FCEVs/ 50 % BEVs werkend met een verwachte efficiëntie van de brandstofcellen in 2050

De verdeling 50 % FCEV en 50 % BEV is op basis van gemaakte kilometers en geldt alleen voor die voertuigen waarvoor het gebruik van batterijen praktisch mogelijk is (auto's, motorfietsen en een deel van de bussen).

De huidige efficiëntie van waterstofauto's bedraagt rond de 100 km op 1 kg waterstof. Ook voor bijvoorbeeld bussen is die data al bekend (10,4 km/kg). Met andere voertuigtypes zoals motoren, bestelauto's, trekkers en vrachtauto's is nog te weinig of geen ervaring met elektrische motoren zodat voor die voertuigen schattingen zijn gehanteerd. De efficiency van brandstofcellen zal naar de toekomst verder verbeteren. De verwachte efficiëntieverbetering van brandstofcellen zal in

2050 rond de 166 km/kg liggen voor personenauto's en 12,3 km/kg voor bussen (IEA, 2015). De andere voertuigen zijn hierop mee geschaald.

Op basis van de gereden kilometer en het waterstofverbruik per gereden kilometer per voertuigtype kan het totale jaarlijkse waterstofverbruik worden berekend (zie bijlage). Verder moet waterstof worden geproduceerd voor het balanceren van het elektriciteitsnet dat wordt gevoed met hernieuwbare energie. Om dit te kunnen berekenen is gedetailleerde informatie benodigd over de bestaande en verwachte toekomstige verdeling van hernieuwbare energiebronnen. Die informatie is in Nederland niet zonder meer beschikbaar. Om praktische redenen is daarom uitgegaan van berekeningen die zijn gemaakt voor de Deense situatie (Oldenbroek et al. 2016a). Kort samengevat betekent dit het volgende:

- Uitgaande van fuel cell efficiëncies in 2015 en een 100 % FCEV scenario is 13,1 % back-up H<sub>2</sub> nodig ten opzichte van de waterstof nodig voor transport
- Uitgaande van fuel cell efficiëncies in 2050 en een 100 % FCEV scenario is 28,4 % back-up H<sub>2</sub> nodig ten opzichte van de waterstof nodig voor transport.

Op basis van de stoichiometrie van de reactie kan vervolgens worden berekend hoeveel ultrapuur water minimaal benodigd is om door elektrolyse het benodigde waterstof te produceren. Hierbij is aangenomen dat in de elektrolyser zelf geen waterverliezen optreden (het deel dat als vocht terecht komt in de geproduceerde gassen is kleiner dan 1 %). Elektrolyzers moeten worden gevoed met ultrapuur water. In de meeste commerciële toepassingen is hierin voorzien door een waterbehandeling te integreren in het apparaat. Om het watersysteem te voeden zijn regenwater, oppervlaktewater en drinkwater geschikte bronnen. Een belangrijk voordeel van drinkwater boven regenwater is dat het een betrouwbare bron is die het hele jaar rond direct beschikbaar is rond gebouwen en geen opslag vereist. Bovendien is de kwaliteit van drinkwater ten opzichte van regenwater en oppervlaktewater goed, constant en goed gedefinieerd. Bij de berekeningen in deze paragraaf is daarom uitgegaan van drinkwater als bron. De recovery van de systemen bij gebruik van drinkwater is gemiddeld ongeveer 50 % zodat ongeveer 17 liter per kg geproduceerd H<sub>2</sub> nodig is.

TABEL 3-1 GLOBALE BEREKENING BENODIGDE JAARLIJKSE WATERSTOFPRODUCTIE OP BASIS VAN WEGVERVOER EN BALANCEREN VAN HERNIEUWBARE ENERGIE (OPSLAG EN HER-ELEKTRIFICATIE)

Sector	Scenario	FCEV 100 % heden	FCEV 50 % heden	FCEV 100 % 2050	FCEV 50 % 2050
<b>Wegvervoer</b>					
waterstofverbruik	mln kg/jaar	2.000	1.300	1.400	950
demiwaterverbruik	mln m <sup>3</sup> /jaar	17,8	11,6	12,4	8,5
drinkwaterverbruik	mln m <sup>3</sup> /jaar	35,6	23,2	24,8	17
<b>Balanceren net</b>					
waterstofverbruik	mln kg/jaar	512	867	734	1052
demiwaterverbruik	mln m <sup>3</sup> /jaar	4,6	7,7	6,5	9,4
drinkwaterverbruik	mln m <sup>3</sup> /jaar	9,1	15,5	12,9	18,8
<b>Totaal</b>					
drinkwaterverbruik	mln m <sup>3</sup> /jaar	44,7	38,7	37,7	35,8
percentage op totale drinkwaterverbruik 2014	%	4,0	3,4	3,4	3,2

Drinkwaterproductie in Nederland in 2014: 1.124 mln m<sup>3</sup>/jaar (Compendium leefomgeving)

Tabel 3-1 geeft een overzicht van de resultaten van de uitgevoerde berekeningen, waarbij het drinkwaterverbruik is getoetst aan de totale drinkwaterproductie in 2014.

Turner (2004) heeft berekend dat voor een conversie van het 'light duty' voertuigbestand (230 miljoen voertuigen in 2004) in de Verenigde Staten naar FCEVs ongeveer 378 miljoen m<sup>3</sup> water per jaar nodig is voor de waterstofproductie. Op een totaal jaarlijks waterverbruik van huishoudens van 18.170 miljoen m<sup>3</sup> is dit ongeveer 2,1 %. Dat getal komt goed overeen met de berekening in Tabel 3-1 voor de Nederlandse situatie.

Naast het wegvervoer wordt in Nederland veel stookolie verbruikt door de internationale scheepvaart. Nederland heeft op wereldschaal een unieke positie in de scheepvaart. Wanneer Nederland een koppositie wil houden wat betreft de havens, zal er ook een goede voorziening moeten komen voor waterstofproductie ten behoeve van de scheepvaart. Omdat er nog niet veel bekend is over de efficiëntie van waterstofgebruik in schepen, is ervanuit gegaan dat scheepsmotoren minstens even efficiënt waterstof gebruiken als ruwe stookolie in de huidige situatie. Er moet dan een hoeveelheid waterstof geproduceerd worden die een gelijke energie-inhoud heeft als de huidige uitvoer van stookolie. Wel is de verwachting dat scheepsmotoren in de transitieperiode zullen overgaan naar gasturbines met een efficiëntie van 40% (net als de huidige dieselmotoren) en vervolgens naar brandstofcellen met een efficiëntie van 60%. Op dit moment is Nederland een grote haven voor overslag en bunkering van ruwe olie, en vindt er ook veel raffinage van olie plaats. Dat zal in een waterstofeconomie gedeeltelijk vervangen worden door de raffinage en overslag van biobrandstoffen. Daarnaast is het aannemelijk dat in een waterstofeconomie waterstof geproduceerd wordt op locaties die daar meer geschikt voor zijn wegens aanwezigheid van natuurlijke energiebronnen, zoals IJsland of windparken op volle zee, en dat de waterstof dan naar Nederland verscheept wordt en overgeslagen/ gebunkerd wordt. Daarmee zal het watergebruik gekoppeld aan de waterstofproductie ook niet in Nederland maar bij deze andere locaties plaatsvinden. De verwachting is wel dat het totaal aantal vaarbewegingen minder zal worden bij deze aangepaste infrastructuur. Het watergebruik voor waterstofproductie ten behoeve van de scheepvaart is in het licht van de verwachte ontwikkelingen zeer lastig te voorspellen. In de berekeningen is rekening gehouden met een efficiëntieslag van de scheepsmotoren en is het uitgangspunt gehanteerd dat voor de scheepvaart van en naar Nederland 50% van de waterstof in Nederland wordt geproduceerd en de overige 50 % elders.

Ook voor de luchtvaart is de aanname gevolgd dat huidige luchtvaartmotoren even efficiënt zullen zijn als waterstofmotoren. Er wordt op dit moment gewerkt aan het ontwerpen van vliegtuigen die waterstof gebruiken als brandstof. Dat kan zowel via gasturbines (directe verbranding) als via brandstofcellen (elektriciteitsproductie voor elektromotoren). Omdat er echter nog niet veel bekend is over de toekomstig te verwachten efficiëntie, is aangenomen dat die gelijk zal zijn aan de huidige efficiëntie van de kerosinemotoren. Omdat in de praktijk een deel van het waterstof gevormd zal worden via SMR van biogas, er biobrandstoffen en batterijen gebruikt zullen worden, en de efficiëntie waarschijnlijk nog verhoogd zal worden richting 2050, wordt op deze manier het maximaal te verwachten waterstof-, en daarmee watergebruik berekend. Tabel 3-2 geeft een indicatie van het waterstof- en waterverbruik voor de toekomstige energievoorziening van schepen en vliegtuigen.

Uit de resultaten van de berekeningen in Tabel 3-1 en Tabel 3-2 blijkt dat de hoeveelheid drinkwater die nodig is voor de productie van waterstof in een waterstofeconomie voor wegvervoer in Nederland ongeveer 3 - 4 % bedraagt van de huidige drinkwaterproductie. De benodigde hoeveelheid water voor de scheepvaart en luchtvaart is lastig te voorspellen maar bedraagt ongeveer 2 - 10 % volgens de berekeningen. De inname van waterstof door de scheepvaart en luchtvaart zal naar mag worden verwacht maar op een klein aantal plaatsen in Nederland plaatsvinden terwijl de inname van waterstof voor wegvervoer veel lokaler zal zijn. Dit

heeft gevolgen enerzijds voor de keuze van de bron voor de demiwaterproductie en anderzijds voor de schaalgrootte. Bij grootschalige centrale productie van waterstof ligt het gebruik van drinkwater als bron steeds minder voor de hand omdat dit bijvoorbeeld eisen stelt aan de lokale capaciteit van het drinkwaternet en zal de voorkeur verschuiven naar oppervlaktewater.

TABEL 3-2: GLOBALE BEREKENING BENODIGDE JAARLIJKSE WATERSTOFPRODUCTIE OP BASIS VAN WEGVERVOER SCHEEPVAART EN LUCHTVAART

Sector	Scenario	Gasturbine	Gasturbine	FCEV 100 %	FCEV 50 %
		100 % heden	50 % heden	2050	2050
<b>Scheepvaart</b>					
waterstofverbruik	mIn kg/jaar	5300	2650	1760	880
demiwaterverbruik	mIn m <sup>3</sup> /jaar	47.5	23.6	15.8	7.9
drinkwaterverbruik	mIn m <sup>3</sup> /jaar	95	47.5	31.7	15.8
<b>Luchtvaart</b>					
waterstofverbruik	mIn kg/jaar	1200	600	800	400
demiwaterverbruik	mIn m <sup>3</sup> /jaar	10,7	5,4	7,2	3,6
drinkwaterverbruik	mIn m <sup>3</sup> /jaar	21,5	10,8	14,4	7,2
<b>Totaal</b>					
drinkwaterverbruik	mIn m <sup>3</sup> /jaar	117	58	46	23
percentage op totale drinkwaterverbruik 2014	%	10,4	5,2	4,1	2,0

### 3.3 Rol van de industrie

In paragraaf 1.2 is reeds beschreven dat de wijze waarop het energieverbruik van de industrie zich in de toekomst gaat ontwikkelen, hoogst onzeker is. Met betrekking tot zowel de vorming van waterstof als bijproduct (metaalindustrie, chloorindustrie) als de consumptie van waterstof (raffinaderijen, naftakrakers) moet rekening worden gehouden met substantiële wijzigingen. Mogelijk zijn de traditionele raffinaderijen vervangen door biobrandstofraffinaderijen waarin nog steeds met waterstof wordt gekraakt om zo de grondstoffen te bereiden voor een nieuwe biobased industrie.

De Nederlandse energiesector is met 68% van het totale gebruik de grootste waterverbruiker. Het grootste gedeelte daarvan wordt gebruikt voor het koelsysteem in energiecentrales. Dit is in een waterstofeconomie niet meer nodig. De kwaliteit van het ingenomen water is sterk afhankelijk van de toepassing. Voor once-through koeling hoeft de waterkwaliteit minder te zijn dan van water wat voor koeltoren gebruikt wordt. In beide gevallen wordt vooral oppervlaktewater gebruikt. Wanneer wordt overgegaan op een volledige waterstofeconomie, zal er geen water meer nodig zijn voor het koelen bij energiecentrales.

Met het uitgangspunt uit paragraaf 1.2 van een toekomstig verbruik door de industrie van (ten minste) 525 kton waterstof (energie-inhoud van 74PJ) voor de productie van methanol uit biobrandstoffen en de productie van kunstmest, kan worden berekend dat hiervoor ongeveer 5,2 Mm<sup>3</sup> ultrapuur water benodigd is. Dit is slechts 10 % van de huidige demiwaterproductiecapaciteit uitgaande van de grote productiefaciliteiten in Nederland.



### 3.4 Waterverbruik in een fossiele economie

In de waterstofeconomie wordt water gebruikt voor het produceren van waterstof. In theorie kan dat weer volledig teruggewonnen worden bij het omzetten van waterstof naar elektriciteit. In de praktijk zal dat echter niet volledig gebeuren. Daarom wordt vaak gedacht dat de omschakeling naar een waterstofeconomie gepaard gaat met een verhoogd waterverbruik wat vooral een nadeel zou zijn in gebieden van waterschaarste. In de huidige fossiele economie wordt echter ook veel water gebruikt bij zowel de elektriciteitsproductie (koelwater en demiwater) als bij de productie van fossiele brandstoffen (proceswater en demiwater). Dat specifieke waterverbruik zal in een waterstofeconomie wegvallen. Globaal zal er een verschuiving plaatsvinden in het verbruik van water voor de energievoorziening van centraal op grote schaal (bij de industrie) naar decentraal op kleine schaal (in woonwijken en bij productielocaties van hernieuwbare energie). De totale watervraag ten behoeve van de energievoorziening in een maatschappij met 100 % hernieuwbare energiebronnen zal naar verwachting lager zijn dan in een maatschappij met fossiele brandstoffen.

Turner (2004) merkt op dat in de Verenigde staten jaarlijks ongeveer 1.135 miljoen m<sup>3</sup> water wordt gebruikt voor de productie van benzine en 265.000 miljoen m<sup>3</sup> water voor de thermoelektrische energiecentrales. Omdat in een waterstofeconomie bij zon- en windenergie geen water nodig is voor de energieopwekking, leidt een waterstofeconomie aldus Turner niet alleen tot een reductie in carbon footprint maar ook in een reductie in waterverbruik.

Dat laatste wordt bevestigd door Lovins van het Rocky Mountains Institute (VS) bij het ontkrachten van twintig mythes rondom de waterstofeconomie in 'Twenty Hydrogen Myths' uit 2005. In dit geval luidt de mythe dat een waterstofeconomie op grote schaal schade zou toebrengen aan het klimaat op aarde en de waterbalans. Uit zijn beschouwing blijkt dat FCEVs slechts ongeveer half zoveel water per kilometer uitstoten dan de huidige benzine-auto's. Als het uitgangspunt is dat waterstof wordt geproduceerd met hernieuwbare energie via elektrolyse dan weegt de invloed van het uitfaseren van het gebruik van fossiele brandstoffen op het klimaat vele malen zwaarder dan het eventuele effect van de uitstoot van waterdamp door FCEVs. Datzelfde geldt voor de waterconsumptie, waarbij in een waterstofeconomie netto geen water wordt verbruikt.

## 4 Waterverbruik per casus

In paragraaf 1.5 zijn 5 cases geïntroduceerd die passen in een waterstofeconomie gebaseerd op het principe van de auto als energiecentrale van de toekomst. Samengevat zijn deze 5 cases als volgt samen te vatten:

- [NPP] Auto als energiecentrale woonwijk voor back-up (*Car as Home Power Plant: Back-up Power for Intermittent Renewables*)
- [CPP] Parkeergarage als energiecentrale voor het balanceren van het elektriciteitsnet (*Car Park Power Plant: Balancing Power grids & H<sub>2</sub> Fuelling station*)
- [HPP] Auto als ziekenhuis energiecentrale voor piekopvang en noodstroomvoorziening (*Car as Hospital Power Plant: Peak & Emergency Power*)
- [HFS] Waterstof tankstation langs de snelweg met lokale kleinschalige waterstofproductie (*Hydrogen Fuel Station along a highway: local hydrogen production on a small scale*)
- [CWP] Windpark van 100 MW langs de kust met grootschalige waterstofproductie (*Coastal Wind Park 100 MW: local production of hydrogen on a large scale*)

In dit hoofdstuk is per casus het lokale waterverbruik berekend. Daarnaast is voor de basis casus NPP het waterverbruik uitgerekend voor extrapolatie van het concept naar heel Nederland.

*De in dit hoofdstuk opgenomen getallen zijn het directe resultaat van de uitgevoerde berekeningen waarbij geen afronding heeft plaatsgevonden. Dit suggereert ten onrechte een grote nauwkeurigheid.*

Afhankelijk van de bron die gebruikt wordt voor energieopwekking, kan er gedurende een maximaal aantal uur per jaar waterstof geproduceerd worden uit water en stroom. De tijd waarin de waterstof geproduceerd wordt, bepaalt ook de ontwerpcapaciteit van de waterinstallatie. Hoewel het mogelijk is om een waterbuffer te installeren waardoor continue productie mogelijk is, is dit niet altijd wenselijk. Dat zou namelijk betekenen dat er op sommige momenten waterstof verbruikt moet worden voor de stroomproductie die nodig is voor het produceren van ultrapuur water. Aangezien de omzetting van water naar waterstof en vervolgens van waterstof naar stroom energetische verliezen oplevert, is dat energetisch gezien onlogisch en is de ontwerpcapaciteit zo gekozen dat er ultrapuur water wordt geproduceerd op momenten dat er een overschot aan stroom is.

### 4.1 [NPP] Auto als energiecentrale woonwijk voor back-up:

Het uitgangspunt van deze casus is het 'car as power plant' principe in een op waterstof gebaseerde maatschappij. Het principe is gebaseerd op een model woonwijk die bestaat uit 2.000 woningen met in totaal 4.600 bewoners die 2.240 FCEVs (100 %) gebruiken. Aannames voor wat betreft publieke voorzieningen, kantoren winkels en andere utiliteitsgebouwen alsmede voor mobiliteit en sociaal gedrag zijn gebenchmarkt op basis van statistische data. Zo correspondeert de omvang van de wijk ongeveer met de aanwezigheid van één tankstation en één supermarkt in de wijk. In dit opzicht kan de wijk worden gezien als een statistische weergave van een Europese wijk in 2050. Elektriciteit wordt primair geproduceerd door middel van zonnepanelen op de gebouwen in de wijk. Surplus elektriciteit (overdag en voornamelijk in de zomer) wordt lokaal opgeslagen in de vorm van waterstof geproduceerd via elektrolyse van water. Een op afstand gelegen windpark (onshore of offshore) produceert precies de hoeveelheid waterstof die nodig is

om de wijk het hele jaar rond van energie te voorzien. De wijk is autarkisch waarbij de FCEVs zorgen voor de lokale elektriciteitsproductie en het balanceren van het net. Belangrijk is dat elektriciteit ook wordt gebruikt voor het verwarmen van gebouwen in de winter via warmtepompen aangesloten op verschillende warmtebronnen. Daar waar waterstof wordt gebruikt voor re-electrificatie in brandstofcellen, wordt in principe ook weer water geproduceerd.

Het geïnstalleerde vermogen aan zonnepanelen in de woonwijk is 13.6 MWp. Op basis van de efficiëntie van de zonnepanelen (heden 22.8 % en in 2050 35 %), de productie aan elektriciteit en het autonome elektriciteitsverbruik in de wijk tijdens productie is berekend welke hoeveelheid elektriciteit moet worden omgezet naar waterstof. Dit is vervolgens als basis gehanteerd voor de berekening van de benodigde capaciteit van de ultrapuur water productie, waarbij tevens rekening is gehouden met de elektriciteit die nodig is voor de productie van waterstof via elektrolyse, de compressie van waterstof en de productie van ultrapuur water. Uit de resultaten in Tabel 4-1 blijkt dat installaties nodig zijn met een capaciteit van 2 m<sup>3</sup>/h (heden) en 3,5 m<sup>3</sup>/h in 2050.

De windturbines die energie voor de wijk leveren, kunnen vlakbij staan of op enige afstand van de wijk. Essentieel is dat ze niet zijn gekoppeld aan het (lokale) elektriciteitsnet. De windturbines maken logischerwijs onderdeel uit van een groter windpark dat meerdere wijken bedient. Om die reden is in paragraaf 4.5 als aparte casus de vraag naar ultrapuur water van een 100 MW windpark berekend. Ter indicatie: het ultrapuur water verbruik in het windpark ten behoeve van één wijk bedraagt jaarlijks 22.000 (heden) respectievelijk 5.500 m<sup>3</sup> (2050).

TABEL 4-1: ONTWERPCAPACITEIT VOOR ULTRAPUUR WATER PRODUCTIE BIJ CASUS NPP

	heden	2050	
Geïnstalleerd vermogen aan zonnepanelen	13.63	13.63	MWp
Zonnepaneel efficiëntie	22.8	35	%
Totale waterstof productie wind en zonne-energie	2.600	930	ton/jaar
Aandeel afkomstig van zonnepanelen	165	316	ton/jaar
Aandeel vanuit windpark	2.435	914	ton/jaar
Waterverbruik voor elektrolyse - zon	1.498	2.823	m <sup>3</sup> /jaar
<b>Ontwerp capaciteit</b>	<b>1,9 (zon)</b>	<b>3,4 (zon)</b>	<b>m<sup>3</sup>/uur</b>
Specifiek waterverbruik voor elektrolyse vanuit wind ten behoeve van de wijk	21.766	5.487	m <sup>3</sup> /jaar

Re-electrificatie heeft plaats in de wijk op momenten dat sprake is van een stroomtekort. Hierbij komt in principe weer water vrij zoals weergegeven in Tabel 4-2. Aangezien de elektriciteits- en waterproductie in de geparkeerde auto's zeer diffuus over de wijk is verdeeld, is centrale opvang en hergebruik van het water op voorhand lastig te organiseren.

TABEL 4-2: ONTWERPCAPACITEIT VOOR WATEROPVANG BIJ RE-ELECTRIFICATIE BIJ CASUS NPP

	heden	2050	
Waterstof nodig voor re-electrificatie	2,04*10 <sup>6</sup>	0,84*10 <sup>6</sup>	kg/jaar
Waterproductie bij re-electrificatie	18.393	7.524	m <sup>3</sup> /jaar
Levering in	1.600	1.600	uur/jaar
<b>Ontwerp capaciteit voor opvang</b>	<b>11,50</b>	<b>4,70</b>	<b>m<sup>3</sup>/uur</b>

#### 4.2 [CPP] Parkeergarage als energiecentrale voor het balanceren van het elektriciteitsnet

Bij deze casus is uitgegaan van een parkeergarage met 1000 parkeerplaatsen, waarvan de helft bezet zal zijn door FCEVs. Deze voertuigen zullen dus kunnen fungeren als opslag en levering van stroom via waterstof. Daarnaast zal er waterstof geproduceerd worden via steam methane reforming van lokaal geproduceerd biogas.

TABEL 4-3: ONTWERPCAPACITEIT VOOR ULTRAPUUR WATER PRODUCTIE BIJ CASUS CPP

	heden	2050	
Totale waterstof productie electrolyse en SRM	1.470	1.470	ton/jaar
Waterverbruik	14.640	13.164	m <sup>3</sup> /jaar
Levering in	4.500 (elektrolyse)	4.500 (elektrolyse)	uur/jaar
	4.260 (SMR)	4.260 (SMR)	uur/jaar
<b>Ontwerp capaciteit</b>	<b>3,35</b>	<b>3,01</b>	<b>m<sup>3</sup>/uur</b>

Ongeveer de helft van het geproduceerde waterstof zal worden gebruikt voor mobiliteit, de andere helft zal lokaal weer worden omgezet naar elektriciteit voor het balanceren van het lokale elektriciteitsnet. In deze situatie is de waterproductie gecentraliseerd in de parkeergarage en wellicht is het mogelijk om het water op te vangen en her te gebruiken. In Tabel 4-4 is de daarvoor benodigde opvangcapaciteit berekend.

TABEL 4-4: ONTWERPCAPACITEIT VOOR WATEROPVANG BIJ RE-ELECTRIFICATIE BIJ CASUS CPP

	heden	2050	
Waterstof nodig voor re-electrificatie	735	735	ton/jaar
Waterproductie bij re-electrificatie	6.652	6.652	m <sup>3</sup> /jaar
Levering in	3.380	3.380	uur/jaar
<b>Ontwerp capaciteit voor opvang</b>	<b>1,97</b>	<b>1,97</b>	<b>m<sup>3</sup>/uur</b>

#### 4.3 [HPP] Auto als ziekenhuis-energiecentrale voor piekopvang en noodstroomvoorziening

Deze casus gaat uit van een ziekenhuis met 500 bedden per 100.000 inwoners. Hier wordt waterstof geleverd via elektrolyse van water bij een stroomoverschot en via SMR uit de vergistingsinstallatie van het ziekenhuis. Hier wordt verondersteld dat de lokale windmolen maximaal 3066 (heden) of 3329 (2050) uur per jaar op zijn maximale capaciteit draait. Een SMR

installatie zal continu draaien aangezien er ook een continue aanvoer van afval uit het ziekenhuis zal zijn. Hoewel er wel enige fluctuatie zal zijn in het aanbod van ziekenhuisafval, zal dit weinig invloed hebben op de dagelijkse biogasproductie en daarmee op de SMR-installatie.

TABEL 4-5: ONTWERPCAPACITEIT VOOR ULTRAPUUR WATER PRODUCTIE BIJ CASUS HPP

	heden	2050	
Totale waterstof productie electrolyse en SRM	110	120	ton/jaar
Waterverbruik	1.190	1.077	m <sup>3</sup> /jaar
Levering in	3.066 (electrolyse) 8.760 (SMR)	3.329 (electrolyse) 8.760 (SMR)	uur/jaar
<b>Ontwerp capaciteit</b>	<b>0,17</b>	<b>0,15</b>	<b>m<sup>3</sup>/uur</b>

Doordat de SMR installatie continu biogas levert, zijn er maar weinig momenten dat er een stroom-tekort is wat opgevangen moet worden door re-elektrificatie van waterstof uit de geparkeerde auto's bij het ziekenhuis. Daarom zal maar gedurende 600 uur/jaar re-elektrificatie plaatsvinden. In Tabel 4-6 is berekend welke capaciteit de opvangvoorziening voor water moet hebben om het water te kunnen hergebruiken.

TABEL 4-6: ONTWERPCAPACITEIT VOOR WATEROPVANG BIJ RE-ELECTRIFICATIE BIJ CASUS CPP

	heden	2050	
Waterstof nodig voor re-electrificatie	104	116	ton/jaar
Waterproductie bij re-electrificatie	936	1.044	m <sup>3</sup> /jaar
Levering in	600	600	uur/jaar
<b>Ontwerp capaciteit voor opvang</b>	<b>1,56</b>	<b>1,74</b>	<b>m<sup>3</sup>/uur</b>

#### 4.4 [HFS] Waterstof tankstation langs de snelweg met lokale kleinschalige waterstofproductie

Een deel van de waterstoftankstations zal in de toekomst naar alle waarschijnlijkheid ter plekke waterstof maken uit het elektriciteitsnet. Er zal een dag-nacht ritme zijn in het gebruik van waterstof vergelijkbaar met dat van fossiele brandstoffen tegenwoordig. Het ligt voor de hand om te kiezen voor een continue productie van ultrapuur water waarbij een voorraadvat tijdens de dal gebruiksuren wordt gevuld en waaruit tijdens de piekuren water wordt gebruikt. Dat betekent echter dat ten tijde van een tekort aan surplus elektriciteit, waterstof gebruikt zal moeten worden om elektriciteit te leveren voor de productie van ultrapuur water. Dit is niet wenselijk. Er is daarom vanuit gegaan dat de productie van ultrapuur water alleen plaatsvindt tijdens de uren waarin een windmolen op piekvermogen draait. Dan is de kans op een surplus aan elektriciteit in het net het grootst. Met dit uitgangspunt moet rekening worden gehouden met de aanwezigheid van een voorraadvat voor ultrapuur water.

Een waterstoftankstation zal gemiddeld 1.500 kg waterstof per dag moeten produceren (US Department of energy). Bij het tankstation zelf zal geen sprake zijn van waterstofverbruik voor re-elektrificatie. Het waterverbruik voor de waterstofproductie is dus direct het netto waterverbruik.

Gegeven de hoeveelheid waterstof die nodig is voor wegvervoer zoals weergegeven in Tabel 3-1, zouden 3760 tankstations van deze omvang nodig zijn (100% FCEV, heden) terwijl dat aantal in 2050 daalt naar 1785 (50% FCEV 2050) tot 2630 (100% FCEV 2050).

TABEL 4-7: ONTWERPCAPACITEIT VOOR ULTRAPUUR WATER PRODUCTIE BIJ CASUS HFS

	heden	2050	
Totale waterstof productie electrolyse	540	540	ton/jaar
Waterverbruik	4.800	4.800	m <sup>3</sup> /jaar
Levering in	3.066	3.329	uur/jaar
<b>Ontwerp capaciteit</b>	<b>1,6</b>	<b>1,4</b>	<b>m<sup>3</sup>/uur</b>

Bij de tankstations zelf zal geen waterstof gebruikt worden voor re-elektrificatie en daarom zal er ook geen water terug geleverd worden. Alle waterstof die getankt wordt, wordt gebruikt voor vervoer of voor het balanceren van de energievraag bij bijvoorbeeld een woonwijk, parkeerplaats of ziekenhuis.

#### 4.5 [CWP] Windpark van 100 MW langs de kust met grootschalige waterstofproductie

Bij deze casus produceert een windpark langs de kust stroom die niet rechtstreeks geleverd wordt aan het elektriciteitsnet maar maximaal wordt omgezet naar waterstof. Bij een 100 MW windpark zullen er ongeveer 3.066 (heden) tot 3.329 (2050) vollast uren zijn, wat betekent dat 306.600 tot 332.900 MWh per jaar aan stroom geproduceerd wordt, wat omgezet kan worden naar waterstof. Een deel van de opgewekte stroom wordt ook gebruikt voor de waterbehandeling, waterstofproductie en -compressie en zuivering. Wanneer de molens op vol vermogen draaien, wordt er vanuit gegaan dat er 76 MW (heden) tot 89 MW (2050) beschikbaar is voor waterstofproductie. Om zonder waterbuffer de maximale waterstofproductie te kunnen bereiken, moet de productiecapaciteit van de ultrapuurwater installatie hier dan op afgestemd zijn.

TABEL 4-8: ONTWERPCAPACITEIT VOOR ULTRAPUUR WATER PRODUCTIE BIJ CASUS CWP

	heden	2050	
Totale waterstof productie elektrolyse	5.800	7.400	ton/jaar
Uitgaande van	76	89	MW
in	3066	3329	Vollast uur/jaar
Waterverbruik	52.4*10 <sup>3</sup>	66.4*10 <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /jaar
<b>Ontwerp capaciteit</b>	<b>17.1</b>	<b>20</b>	<b>m<sup>3</sup>/uur</b>

Bij deze casus is geen sprake van re-elektrificatie in de buurt van het windpark. Het waterstof wordt getransporteerd naar een andere locatie, bijvoorbeeld een waterstoftank station en kan dan gebruikt worden als brandstof voor voertuigen, of voor re-elektrificatie van het lokale elektriciteitsnet in een woonwijk.

#### 4.6 Overzicht resultaten berekeningen case beschrijvingen

In dit hoofdstuk zijn 5 cases besproken. Bij 3 ervan (NPP, CPP en HPP) vindt zowel productie van waterstof plaats als productie van water door re-elektrificatie. Bij de HFS-casus (waterstof pompstation) en CWP-casus (coastal wind park) vindt slechts waterstofproductie plaats.

Het netto waterverbruik per casus bij uitrol naar heel Nederland en de productiecapaciteit van de waterbehandelingsunits is weergegeven in Tabel 4-9.

TABEL 4-9: OVERZICHT VAN DE (BRUTO) PRODUCTIECAPACITEIT VAN ULTRAPUUR WATER VOOR DE 5 CASES

casus	Productie capaciteit ultrapuur water (m <sup>3</sup> /h)	
	heden	2050
NPP (zon)	1,9	3,4
CPP	3,3	3,0
HPP	0,17	0,15
HFS (100% FCEV)	1,6	1,4
CWP	17	20

Een belangrijkste conclusie die uit Tabel 4-9 kan worden afgeleid, is dat de introductie van een waterstofeconomie met een centrale rol voor FCEVs, lokaal in woonwijken leidt tot veel kleinschalige productie-units voor ultrapuur water (NPP, CPP, HPP en HFS-cases). Hierbij ligt het gebruik van drinkwater als bron voor die productie voor de hand. Belangrijke voordelen van drinkwater boven bijvoorbeeld regenwater of oppervlaktewater zijn dat het vrijwel altijd beschikbaar is (geen opslag nodig) en een goede, tevens goed gedefinieerde kwaliteit heeft. De windmolens binnen de NPP-casus zullen in werkelijkheid gecombineerd worden tot grotere windparken zoals beschreven in de CWP-casus. Bij deze casus is een veel grotere productiecapaciteit voor ultrapuur water noodzakelijk. Hier ligt het meer voor de hand om oppervlaktewater in algemene zin of zeewater in het bijzonder te gebruiken als bron.

#### 4.7 Totale drinkwaterwatervraag

Omdat in de NPP-casus de modelwijk kan worden beschouwd als autarkisch met betrekking tot het energieverbruik in huizen en utiliteitsgebouwen (voor elektriciteitsverbruik en verwarming), het energieverbruik voor wegtransport en de energieconversie voor het balanceren van het lokale elektriciteitsnet, kunnen de getallen uit Tabel 4-1 worden gebruikt om een schatting te maken van het waterverbruik in 2050 voor heel Nederland. Op basis van gegevens van het Planbureau voor de Leefomgeving is uitgegaan van een inwonersaantal in Nederland in 2050 van 17.6 miljoen inwoners. Met deze getallen is in onderstaande tabel berekend wat de totale waterbehoefte is per casus in Nederland

TABEL 4-10: GESCHAT WATERVERBRUIK VOOR HEEL NEDERLAND IN 2050 DOOR EXTRAPOLATIE VAN DE NPP-CASUS

	2050	
Aantal woonwijken	3826	
Waterverbruik voor elektrolyse - zon	11*10 <sup>6</sup>	m <sup>3</sup> /jaar
Waterverbruik voor elektrolyse - wind	21*10 <sup>6</sup>	m <sup>3</sup> /jaar

De Nederlandse watersector zal in 2050 rekening moeten houden met een productie van 32 miljoen m<sup>3</sup> per jaar ultrapuur water. Voor de elektrolyse in de wijk met surplus aan zonne-energie is drinkwater een logische bron terwijl voor de elektrolyse met windenergie veeleer gebruik zal worden gemaakt van oppervlaktewater/zeewater. In beide gevallen gaat de productie gepaard met verliezen waardoor de totale watervraag groter is (zie hoofdstuk 5).

## 5 Technologiekeuze en kostenschatting

### 5.1 Technologiekeuze

Voor de verschillende cases is in hoofdstuk 4 gekeken naar de benodigde watervraag en de beschikbare bron. Dit vormt de basis voor de verschillende technologiekeuzes in dit hoofdstuk. In alle gevallen moet ultrapuur water ( $EC < 1 \mu S/cm$ ) worden bereid voor elektrolyse. De werkingsprincipes van de afzonderlijke technologieën zijn beschreven in de inzet.

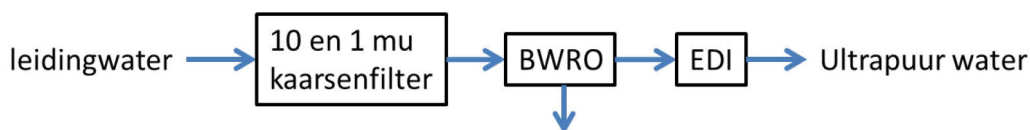
Zoals in paragraaf 4.6 beschreven wordt voor de kleine productie-units in de bebouwde omgeving uitgegaan van drinkwater als bron en voor de grotere productie-units bij bijvoorbeeld windparken van oppervlaktewater, in dit geval zeewater. Voor de kleine productie-units worden twee schaalgroottes onderscheiden conform tabel 5-1.

TABEL 5-1: OVERZICHT VAN DE SCHAALGROOTTES EN BRONNEN VAN DE PRODUCTIE-UNITS VOOR ULTRAPUUR WATER PER CASUS.

Technologietrein	casus	schaalgrootte	Bron
1	NPP, CPP	2-10 m <sup>3</sup> /h	Leidingwater
	HPP, HFS	0-2 m <sup>3</sup> /h	Leidingwater
2	CWP	25 m <sup>3</sup> /h	zeewater

#### Technologie trein 1 ( NPP, CPP, 2-10 m<sup>3</sup>/h en HPP, HFS, 0-2 m<sup>3</sup>/h)

Ondanks het verschil in schaalgrootte is bij deze 4 cases gekozen voor eenzelfde waterbehandeling. Hierbij is als uitgangspunt genomen dat alles op locatie gebeurt, onderhoudsarm moet zijn en er weinig tot geen chemie aan te pas mag komen. Om deze reden is gekozen voor de volgende stappen:



Leidingwater is al relatief schoon water en in de meeste gevallen is de hardheid beperkt. Wanneer wordt gekozen voor een BWRO (= brak water reverse osmosis) met een lage recovery zal de concentraatstroom niet zo geconcentreerd zijn dat er potentie voor scaling ontstaat. Door het toepassen van de kaarsenfilters wordt zwevend stof verwijderd zodat dit de BWRO niet zal vervuilen. Dit heeft tot gevolg dat de BWRO minimaal gereinigd hoeft te worden en mechanische reiniging waarschijnlijk voldoende is. Dit heeft als voordeel dat er op locatie geen chemie aanwezig hoeft te zijn. De concentraatstroom van de BWRO is nog steeds van zulke goede kwaliteit dat hij voor veel doeleinden, vaak zelfs als drinkwater, gebruikt kan worden. Na de BWRO volgt nog een EDI (=electrodeionisatie). Dit is een technologie die geen chemicaliën verbruikt. Mochten er lekken ontstaan in een van de systemen is het water te allen tijde van zulke kwaliteit dat dit ongevaarlijk is.



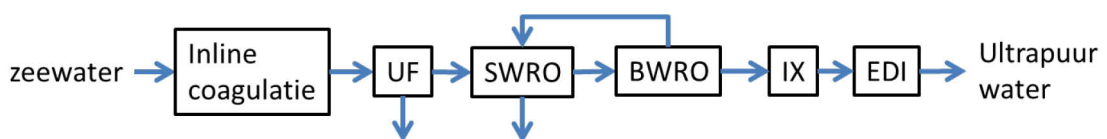
De nadelen van dit systeem zijn dat een BWRO onderhouden moet worden en dat de membranen na verloop van tijd vervangen moet worden. Ook is het een systeem dat op hoge druk werkt (ongeveer 5 bar) en bij een lek komt er met grote kracht water vrij. Door te kiezen voor een lage recovery (50%) moet twee keer zoveel water worden behandeld als de watervraag. Dit brengt extra kosten met zich mee voor zowel investeringen (installatie 2x zo groot) als exploitatie, die vooral in de energiekosten zullen zitten. Een kleinschalig systeem zoals hier (0-2 of 2-10 m<sup>3</sup>/h vraagt relatief veel energie (1 kWh/m<sup>3</sup> tegenover 0.3 kWh/m<sup>3</sup> voor een grootschalig systeem).

TABEL 5-2: TECHNOLOGIE TREIN VAN CASES MET LEIDINGWATER ALS BRON, MET BIJBEHORENDE DEBIETEN VOOR 2 SCHAALGROOTTES (2 EN 10 M<sup>3</sup>/H PRODUCTIE).

	Recovery (%)	Technologie trein 1, NPP, CPP Ingaand debiet (m <sup>3</sup> /h)	Technologie trein 1 HPP, HFS Ingaand debiet (m <sup>3</sup> /h)
Benodigd leidingwater			
Kaarsenfilter	99	22,45	4,49
BWRO	50	22,22	4,44
EDI	90	11,11	2,22
Productie ultrapuur water	<b>overall 44,6</b>	10	2

#### Technologietrein 2 (CWP, 25 m<sup>3</sup>/h)

Bij een coastal wind park zijn er verschillende bronnen aanwezig. Waarschijnlijk is het mogelijk om leidingwater te gebruiken maar dit is misschien niet wenselijk wanneer de waterstofeconomie op grote schaal in Nederland wordt toegepast. Een 2<sup>e</sup> mogelijkheid is om direct zeewater te gebruiken. Dit is volop aanwezig maar is -chemisch gezien- erg vervuild. Het bevat veel zwevend stof, veel opgelost organisch materiaal en dit leidt samen tot een grote potentie voor vervuiling van technologieën/ apparatuur. Een derde mogelijkheid is om beach wells aan te leggen. Dit zijn boringen op het strand/ de kust die zeewater via de ondergrond onttrekken. Het gevolg is dat de bodem als een zandfilter optreedt en het zwevend stof en een deel van het organisch materiaal verwijdert. Dit maakt de voorzuivering een stuk makkelijker en zal leiden tot een langere levensduur van de apparatuur en minder chemie gebruik. Vooralsnog is uitgegaan van een 'worst case' waarbij zeewater wordt gebruikt. Ook wordt er rekening mee gehouden dat dit toegepast kan worden bij windparken op zee zodat geen stroom maar waterstof getransporteerd zal worden naar land. Bij een windpark op zee is een klein oppervlak van de installatie van belang.



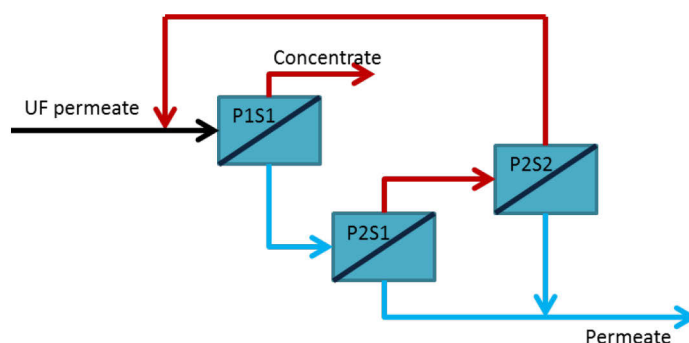
Bij dit systeem wordt inline coagulatie toegepast waarna de ultrafiltratie (UF) optreedt als filter voor de gecoaguleerde stof. Het voordeel van het toevoegen van een coagulant is dat hierdoor ook een deel van het opgelost organisch materiaal wordt verwijderd. De UF heeft een recovery van 85% en daarmee een waterverlies van ongeveer 15%. Het systeem werkt bij licht verhoogde druk (0,6-1 bar overdruk). Vervolgens wordt een SWRO (seawater reverse osmosis) toegepast. Dit systeem werkt onder hoge druk (70 bar) en heeft een lage recovery. Wel kan de concentraatstroom uit de volgende stap, de BWRO, weer teruggevoerd worden naar de SWRO. Dit brengt de totale recovery iets omhoog en zorgt ook voor een iets hogere flux doordat het zoutgehalte lager is dan bij gebruik van alleen zeewater. Het kan zijn dat het nodig is om de SWRO regelmatig chemisch te reinigen. Het permeaat van de BWRO is nog niet van voldoende

kwaliteit zoals bij de hierboven beschreven technologietreinen, om het direct naar de EDI te voeren. Daarom is ervoor gekozen om er nog een IX (ionenwisselaar) tussen te zetten. Dit is een systeem wat zonder druk en zonder bewegende delen werkt en is daardoor relatief simpel in onderhoud. Nadeel is dat na de eerste ionenwisseling (cationenwisseling) er zuur water ontstaat met een pH van 3. Dit is erg laag en bij een lek zal hier rekening mee gehouden moeten worden. Dit water wordt weer neutraal na de tweede - anion- wissel stap. Een ionenwisselaar zal wel regelmatig geregenereerd moeten worden. Wanneer het mogelijk is om de regeneratievloeistof weer te regenereren, hoeft er niet continu nieuwe chemie aangevoerd te worden maar het is wel aanwezig op locatie. De laatste stap is weer een EDI om de benodigde waterkwaliteit te bereiken voor het naar de elektrolyse gaat.

TABEL 5-3: TECHNOLOGIETREIN VAN CASUS CWP MET ZEEWATER ALS BRON, MET BIJBEHORENDE DEBIETEN.

	Recovery (%)	Ingaand debiet (m <sup>3</sup> /h)
Benodigd zeewater		
Inline coagulatie	100	74.1
UF	85	74.1
SWRO	50	63.0
BWRO	80 (concentraat wordt weer teruggevoerd naar SWRO)	35.0
IX	99	28.0
EDI	90	27.8
Productie ultrapuur water	<b>overall 30,3</b>	25

De benodigde druk in de RO om dit systeem te laten werken is 73 bar. Hierbij is uitgegaan van een 2 pass systeem, waarbij de 2<sup>e</sup> pass 2 stages heeft. De eerste RO is een single stage RO met een beperkte recovery (order grootte 50%). Het permeaat van deze RO wordt verder behandeld in de tweede RO. De tweede RO is een tweetraps systeem om het product van de eerste RO verder te ontzouten (zie Figuur 5-1: *P1S1* betekent Pass 1 Stage 1, *P2S1* betekent Pass 2 Stage 1 en *P2S2* betekent Pass 2 Stage 2). De gekozen druk is de bepalende factor voor het energieverbruik. Er zijn verschillende systemen op de markt die energie kunnen terugwinnen. Deze hebben een efficiëntie van 70-94%, afhankelijk van het type systeem dat wordt gekozen.



FIGUUR 5-1: SYSTEEM CONFIGURATIE VAN HET RO SYSTEEM. HET PERMEAAT GAAT NAAR DE IONENWISSELAAR

TABEL 5-4: OPZET VAN RO SYSTEEM VOOR WATERPRODUCTIE IN DE CWP-CASUS.

Pass	stage	# drukvaten	# elementen	Voedings debiet (m <sup>3</sup> /h)	Permeaat debiet (m <sup>3</sup> /h)	Concentraat debiet (m <sup>3</sup> /h)
1 SWRO	1	7	7	70	35	35
2 BWRO	1	3	5	35	20	15
	2	1	7	15	8	7

Het debiet van het UF permeaat is in dit ontwerp 63 m<sup>3</sup>/h. Dit gaat naar het RO systeem. Vanuit de RO gaat nu 28 m<sup>3</sup>/h naar de ionenwisselaar. De totale recovery van het RO systeem is 44%. Er is in dit ontwerp gekozen voor de volgende membranen: SW30XHR-440i en ECO-440i. Het is misschien nodig om een antiscalant toe te passen aangezien er in potentie CaF<sub>2</sub> scaling kan ontstaan. Het permeaat van de RO heeft nog een verwacht zoutgehalte van 3.11 mg/l (factor 10.000 afname t.o.v. zeewater).

Het permeaat van de RO gaat nu naar de ionenwisselaar. Er is verondersteld dat er iedere 120 uur een regeneratie van het bed plaatsvindt. Het RO permeaat heeft een concentratie van 3.11 mg/l (voornamelijk NaCl). Bij een veronderstelde ionenwisselcapaciteit van de hars van 1 meq/ml, is een bed van 180-200 liter benodigd. Er kan gekozen worden om dit te splitsen in 2 bedden van 100L zodat de bedden om en om geregenereerd kunnen worden terwijl het andere bed dan nog kan ontzouten. Voor het regenereren van het bed zijn ongeveer 2 bedvolumes regeneratievloeistof (een sterk zuur of sterke base) nodig, waarna de vloeistof eraf gespoeld moet worden met minimaal 2 bedvolumes behandeld water. Er zal vervolgens gekeken moeten worden of de regeneratievloeistof weer geregenereerd kan worden. Dit is misschien mogelijk door het naar de RO installatie te voeren.

Na de ionenwisselaar gaat het water naar een EDI installatie waar de geleidbaarheid kan worden teruggebracht naar <0,1 µS/cm. Dit systeem gebruikt stroom als drijvende kracht en gebruikt geen chemicaliën. Er zijn systemen te verkrijgen met verschillende capaciteiten en met verschillende eisen aan het voedingswater. Sommige systemen kunnen al direct een voedingsstroom met 3.1 mg/l NaCl (het RO permeaat) behandelen. Dit zou de IX achterwege kunnen laten. Echter zal het stroomgebruik dan wel toenemen. Dit is echter te verkiezen boven een systeem waarbij chemicaliën gebruikt moeten worden wanneer het voor een off-shore toepassing is.

---

## Beschrijving van technologieën

### Kaarsenfilter

Een kaarsenfilter wordt vooral gebruikt voor de filtratie van zwevende deeltjes. Een kaarsenfilter is een fijn filter die bestaat uit filterkaarsen (ook wel cartridges genaamd). Een waterstroom komt de filter binnen en loopt doorheen de filterkaarsen waardoor de ongewenste materialen achterblijven. Als de filterkaarsen verzadigd zijn, kunnen deze eenvoudig uitgewisseld worden zonder speciaal gereedschap. Kaarsenfilters zijn beschikbaar voor verschillende groottes van af te vangen deeltjes, van 0,2 tot 300 µm.

### Ultrafiltratie

---

---

Ultrafiltratie is een membraanfiltratiemethode waarbij water onder druk door het membraan wordt geperst. Zowel zwevend stof als opgelost organisch materiaal met een moleculair gewicht van >1000 g/mol, zoals eiwitten, worden verwijderd. Ultrafiltratie werkt bij een druk van 0,6 tot 1 bar en heeft een water recovery van rond de 85%.

### **Omgekeerde osmose: SWRO/ BWRO**

SWRO (seawater reverse osmosis) en BWRO (brackish water reverse osmosis) zijn beide omgekeerde osmose technologieën. Bij omgekeerde osmose wordt water onder hoge druk door een membraan gepest. De druk moet hoger zijn dan het te overkomen osmotisch druk verschil tussen de concentraat stroom en de permeaat stroom. SWRO is gericht op oplossingen met een hoog zoutgehalte terwijl BWRO vloeistoffen met een lager zoutgehalte kan behandelen. SWRO werkt bij een druk van 50 - 75 bar en heeft een water recovery van 40-50%. BWRO werkt bij 15 - 25 bar en heeft een water recovery van 65-80%. Beide hebben een zout retentie van 95-99%.

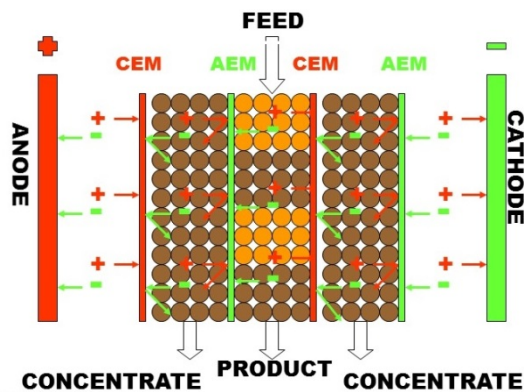
### **Ionenwisselaar (IX)**

In een ionenwisselaar zijn in een gepakt bed kunstharsbolletjes aanwezig. Deze kunstharsen zijn geladen met uitwisselbare ionen. Als toepassing voor ontzouten wordt meestal eerst een cationwisselaar toegepast. De vloeistof stroomt door het bed waarbij de positief geladen ionen in het water uitwisselen met de protonen van de ionwisselaar. Vervolgens stroomt het water, wat nu erg zuur is door de toename van het aantal protonen, naar de anionwisselaar. De negatief geladen zouten wisselen nu uit met de hydroxylionen van de hars. Die vormen nu samen met de protonen weer een neutrale, ontzoutte oplossing. Water kan ontzout worden tot een geleidbaarheid van 0,2-4  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

### **Elektro-deïonisatie (EDI)**

Elektro-deïonisatie (EDI) (zie Figuur 5-2) is gebaseerd op de het werkingsprincipe van elektrolyse. De drijvende kracht is een elektrisch veld tussen kathode en anode. Tussen de elektrodes zijn om en om anionwissel membranen (AEM) en kationwissel membranen (CEM) geplaatst. Onder invloed van het elektrisch veld bewegen de anionen richting de anode en de kationen richting de kathode. Doordat de ionen maar door 1 membraan kunnen bewegen naar het volgende compartiment, ontstaat hier een geconcentreerde stroom terwijl er in het andere compartiment een verdunde stroom ontstaat (het diluaat). Omdat het water een zeer lage zoutconcentratie heeft, is de elektrische weerstand in de vloeistof zeer hoog. Om het proces te versnellen, wordt er een ionen uitwissel hars tussen de membranen geplaatst. Hierdoor blijft de elektrische geleidbaarheid hoger en kunnen de ionen zich makkelijker verplaatsen en wordt een lagere zoutconcentratie in het diluaat bereikt. Bij EDI wordt een geleidbaarheid van < 0,1  $\mu\text{S}/\text{cm}$  bereikt

---



FIGUUR 5-2: SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN EEN EDI INSTALLATIE (BRON: BESA WATER)

## 5.2 Kostenschatting

Er is bij een leverancier een kostenopgave gevraagd van de gekozen systemen in de benodigde grootte (Jan Arie de Ruijter, Hatendoer Water en Jerrie Hager, Pure Water Group).

De investeringskosten voor de verschillende technologie-treinen zijn hieronder gegeven.

TABEL 5-5: GESCHATTE KOSTEN (ORDE GROOTTE) VAN DE VERSCHILLENDE WATERBEHANDELINGS TECHNOLOGIETREINEN VOOR DE PRODUCTIE VAN ULTRAPUUR WATER VOOR ELECTROLYSE.

	Technologie trein 1 2-10 m <sup>3</sup> /h Kosten (€)	Technologie trein 1 0-2 m <sup>3</sup> /h Kosten (€)	Technologie trein 2 Kosten (€)
Kaarsenfilter	10.000	5000	-
Inline coagulatie	-	-	-
UF	-	-	350.000
SWRO	-	-	700.000
BWRO	100.000	25.000	100.000
IX	-	-	75.000
EDI	40.000	30.000	75.000
Totale kosten	150.000	60.000	1.300.000

De exploitatiekosten zijn berekend op basis van de volgende aannames:

- Totale investering is een factor 1,5 hoger dan de kosten voor apparatuur. Dit omdat er ook infrastructuur aangelegd moet worden bestaande uit pompen, leidingen, etc.
- Rente: 8%
- Economische levensduur: 15 jaar voor de installaties en 5 jaar voor de ionenwisselaar harsen. De kosten van de ionenwisselaar harsen zullen zeer laag uitkomen vanwege de kleine benodigde installatie. Kosten van 100 €/jaar zijn aangenomen maar dat is waarschijnlijk ruim geschat.
- Onderhoudskosten 2,5% per jaar van de totale investering voor apparatuur.
- Waterkosten: uitgaande van leidingwater: 0,5 €/m<sup>3</sup>, zeewaterkosten zijn geschat op 0.01€/m<sup>3</sup>.
- Energiekosten: 25 €/ MWh. Voor de kaarsenfilter wordt aangenomen dat de energiekosten verwaarloosbaar zijn. Voor het RO systeem is het, zeker bij zeewater ontzouting, een zeer significante bijdrage. Er wordt uitgegaan van 1 kWh/m<sup>3</sup> voor een klein systeem (NPP, CPP, HPP, HFS) en 0,3 kWh/m<sup>3</sup> voor een grootschalig systeem (CWP). Voor IX worden de

energiekosten ook verwaarloosbaar verondersteld. Voor EDI wordt uitgegaan van 0,25 kWh/m<sup>3</sup>.

- Er is vanuit gegaan dat het systeem gedurende de tijd dat het aan staat op de maximale capaciteit draait. Dit betekent dat er meer water geproduceerd wordt dan noodzakelijk voor de elektrolyse. De kosten per m<sup>3</sup> worden berekend op de totale productie en niet op de benodigde productie.
- Bij de NPP-casus wordt een deel van de benodigde energie in de wijk opgewekt via zonnepanelen (NPP) en een deel moet worden aangevoerd (als waterstof) van een buiten de wijk gelegen windpark (CWP).

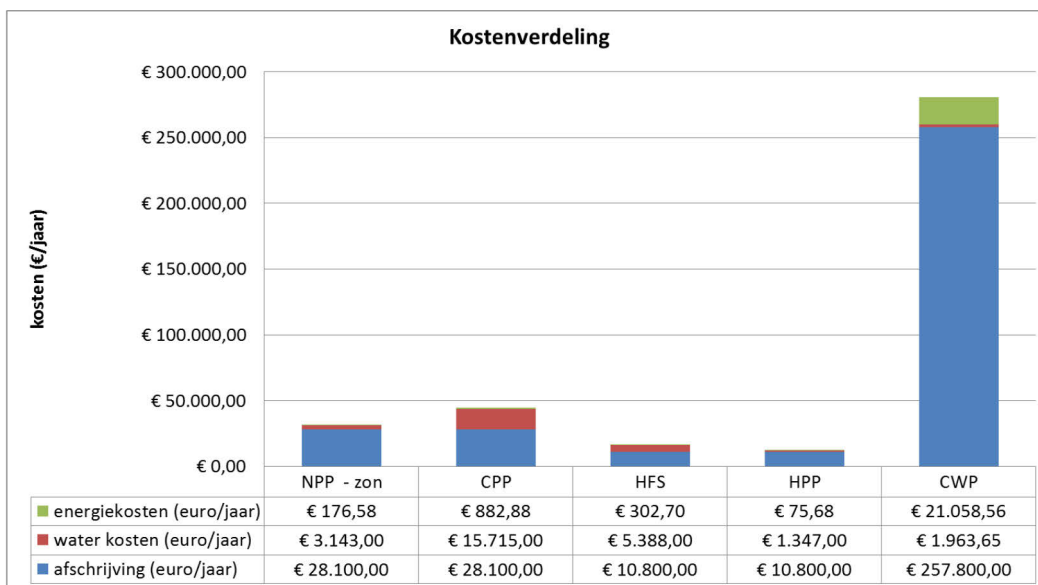
De exploitatiekosten voor de verschillende casebeschrijvingen zijn als volgt berekend:

- NPP (tot 10 m<sup>3</sup>/uur): 31.500 €/ jaar
- CPP (tot 10 m<sup>3</sup>/uur): 45.000 €/ jaar
- HFS (tot 2 m<sup>3</sup>/uur): 16.500 €/ jaar
- HPP (tot 2 m<sup>3</sup>/uur): 12.500 €/ jaar
- CWP (25 m<sup>3</sup>/uur) : 280.000 €/ jaar

Gebaseerd op de werkelijke benodigde aantal draaiuren van de zuivering leidt dit tot de volgende prijzen per m<sup>3</sup>. Met het werkelijk benodigde aantal draaiuren wordt de exacte hoeveelheid ultrapuur water geproduceerd die jaarlijks nodig is (zie tabellen 4.1, 4.3, 4.5, 4.7 en 4.8; cijfers 2050 zijn als uitgangspunt genomen).

- NPP (tot 10 m<sup>3</sup>/uur): 11,20 €/m<sup>3</sup>
- CPP (tot 10 m<sup>3</sup>/uur): 3,20 €/ m<sup>3</sup>
- HFS (tot 2 m<sup>3</sup>/uur): 3,40 €/ m<sup>3</sup>
- HPP (tot 2 m<sup>3</sup>/uur): 10,20 €/ m<sup>3</sup>
- CWP (tot 25 m<sup>3</sup>/uur) : 4,20 €/m<sup>3</sup>

De hoge kosten per m<sup>3</sup> bij de NPP- en HPP-cases ontstaan door de relatief grote overdimensionering van de zuivering. Voor de NPP-variant zou bijvoorbeeld op dit moment een systeem van 2 m<sup>3</sup>/uur ook nog voldoen. Dat zou leiden tot exploitatiekosten van 12.600 €/ jaar en een prijs van 8,40 €/m<sup>3</sup>.



FIGUUR 5-3: KOSTENVERDELING VAN DE EXPLOITATIEKOSTEN VAN DE 5 CASES

In Figuur 5-3 is de verdeling van de exploitatiekosten weergegeven. Hieruit blijkt dat bij alle cases de afschrijvingskosten op basis van de investering bepalend zijn. Een juiste keuze van de systeemgrootte voor dit soort systemen is dus van belang waarbij de systemen bij voorkeur zoveel mogelijk draaiuren maken. Door te kiezen voor modulaire systemen kan flexibiliteit worden ingebouwd naar de toekomst toe. Op die manier lijkt ook de conclusie gerechtvaardigd dat voor de productie van ultrapuur water rekening moet worden gehouden met een kostenniveau van 3 tot 5 €/m<sup>3</sup>.

## 6 Discussie en conclusies

### 6.1 Waterverbruik in een waterstofeconomie

Uit de resultaten zoals gepresenteerd in Tabel 3-1 waarbij een globale schatting is gemaakt van de toename van het waterverbruik in een waterstofeconomie, uitgaande van drinkwater als bron voor de productie van waterstof, kan worden vastgesteld dat de toename van de drinkwatervraag beperkt blijft tot maximaal 4 %. Het is belangrijk te beseffen dat het hierbij alleen gaat om de productie van waterstof ten behoeve van wegtransport en het balanceren van het elektriciteitsnet. Met de resultaten van de extrapolatie van de NPP-casus (auto als energiecentrale woonwijk voor back-up) naar heel Nederland uit Tabel 4-10 gecombineerd met de zuiveringsscenario's en overall recovery's uit Tabel 5-2 en Tabel 5-3 kan die schatting verder worden aangescherpt. Op basis van deze data kan worden berekend dat jaarlijks 86 Mm<sup>3</sup> water benodigd is voor de productie van 32 Mm<sup>3</sup> ultrapuur water (Tabel 4-10), te verdelen over 24 Mm<sup>3</sup> drinkwater (zonnepanelen in de wijk) en 62 Mm<sup>3</sup> zeewater bij het windpark. Dit leidt tot een aangepaste schatting van een toename van het drinkwaterverbruik met 2,2 %.

Het verschil met de eerste schatting wordt veroorzaakt door het feit dat bij de extrapolatie van de NPP-casus bewust de keuze is gemaakt voor oppervlaktewater/zeewater als bron voor de productie van ultrapuur water bij het windpark. Het windpark in deze casus is qua omvang afgestemd op de omvang van de wijk. In werkelijkheid zullen de windparken van meerdere woonwijken gecombineerd zijn in aanzienlijk grotere windparken bijvoorbeeld aan of op zee. Dat rechtvaardigt de gemaakte keuze voor oppervlaktewater als bron.

Een tweede verschil is dat bij de tweede schatting naast mobiliteit in de wijk en het balanceren van het elektriciteitsnet ook de warmtevraag van de gebouwen in de wijk is meegenomen. Om die reden is bij de eerste schatting op basis van Tabel 3-1 in 2050 tussen de 17,9 en 18,9 Mm<sup>3</sup>/jaar ultrapuur water nodig en bij de tweede schatting 32 Mm<sup>3</sup>/jaar.

In deze schatting zijn niet opgenomen het energieverbruik voor de scheepvaart en de luchtvaart en het energieverbruik voor de industrie. In Tabel 3-2 is een globale schatting gemaakt van het waterverbruik voor de scheepvaart en de luchtvaart in een waterstofeconomie, maar die schatting is met veel onzekerheden omkleed. Die onzekerheden houden zowel verband met de technologische ontwikkelingen van de gebruikte motoren als met de veranderingen in de omvang van de scheepvaart en luchtvaart in Nederland in 2050. Een groot aandeel van de huidige scheepvaart houdt immers verband met het transport van olie en gas (LNG), die in een waterstofeconomie zal zijn verdwenen. Daarvoor in de plaats komt transport van waterstof of daarvan afgeleide producten zoals ammoniak, methanol of methaan.

Hoe de industrie zich exact ontwikkelt in een waterstofeconomie met 100 % hernieuwbare energiebronnen is op voorhand lastig te voorspellen, zoals ook is geschetst in paragraaf 1.2. De productie van waterstof in olieraffinaderijen en hoogovens zal bijvoorbeeld verdwijnen, maar het verbruik van waterstof in de chemische industrie voor de productie van onder andere kunstmest en methanol zal waarschijnlijk blijven bestaan. Dat gebeurt nu nog voornamelijk met aardgas en vertegenwoordigt een energie-inhoud van ongeveer 74 PJ energie per jaar. Dit komt overeen met 525 kton waterstof per jaar. Dit getal kan dus ook als uitgangspunt worden gehanteerd voor het waterstofverbruik door de industrie in 2050. De hoeveelheid ultrapuur water die benodigd is voor de productie van die hoeveelheid waterstof bedraagt 5,2 Mm<sup>3</sup>/jaar.

Opgeteld is het geschatte verbruik van ultrapuur water in 2050 in een waterstofeconomie (gebalanceerd met 100 % FCEVs) ongeveer 60 Mm<sup>3</sup>/jaar. Dit is gebaseerd op 32 Mm<sup>3</sup>/jaar voor de bebouwde omgeving inclusief mobiliteit en balanceren van het net, plus 23 Mm<sup>3</sup>/jaar voor



scheepvaart/luchtvaart, plus 5 Mm<sup>3</sup>/jaar voor de industrie. Dit getal kan worden afgezet tegen de productie van 54 Mm<sup>3</sup> demiwater per jaar in 2014 zoals geïnventariseerd voor de grootste demiwaterproductie units in Nederland (Tabel 1-1). Deze bestaande demiwater-productie is voornamelijk bedoeld voor de productie van stoom als energiedrager binnen de (petro)chemische industrie ten behoeve van de levering van warmte aan processen. In een 'all electric' future zal de verwarming van industriële processen echter grotendeel elektrisch gaan plaatsvinden. Op grond hiervan mag voorzichtig worden geconcludeerd dat de toekomstige vereiste productiecapaciteit voor ultrapuur water in dezelfde orde van grootte ligt als de bestaande demiwaterproductiecapaciteit met dien verstande dat in de toekomst de productie van ultrapuur water veel diffuser zal zijn.

Aangezien zowel de scheepvaart, de luchtvaart als de (chemische) industrie in Nederland worden gekenmerkt door een sterke centralisatie, ligt het voor de hand om voor de productie van ultrapuur water uit te gaan van oppervlaktewater als bron. Dat betekent dat deze activiteiten naar verwachting geen invloed zullen hebben op het drinkwaterverbruik.

## 6.2 Hergebruik van water uit fuel cells

In deze studie zijn schattingen gemaakt voor het waterverbruik ten behoeve van de productie van waterstof via elektrolyse. Bij deze berekeningen is geen rekening gehouden met het feit dat het water dat vrijkomt bij de omzetting van waterstof in brandstofcellen in principe gedeeltelijk kan worden opgevangen en hergebruikt. In dat opzicht kan water worden beschouwd als een bijproduct van de toepassing van brandstofcellen in een waterstofeconomie. Omdat de reactie bij hoge temperatuur plaatsheeft, zal het water als waterdamp vrijkomen en condenseren in de uitlaat afhankelijk van de buitentemperatuur en relatieve vochtigheid. Zonder actieve koeling zal de gemiddelde opbrengst beperkt zijn en zo'n 8 % bedragen (Tibaquirá *et al.*, 2011).

In theorie kan waterstof dus niet alleen worden beschouwd als een 'energiedrager' maar ook als een 'waterdrager'. In landen met veel waterstress zou om die reden een waterstofeconomie op lokaal niveau soelaas kunnen bieden. Stel dat bijvoorbeeld vanuit windparken op zee waterstof wordt aangevoerd naar het vaste land en daar in de woonwijken wordt gebruikt voor de levering van elektriciteit dan komt daarbij ook water vrij. Zeker bij stationair opgestelde brandstofcellen of geparkeerde FCEVs moet het mogelijke zijn om de opvang van het geproduceerde water en de optimalisatie van de wateropbrengst te organiseren.

In theorie is het water uit een brandstofcel puur. In de praktijk zal de waterkwaliteit vooral worden beïnvloed door de gebruikte lucht die worden aangevoerd naar de elektroden in de brandstofcel. Daarnaast kan sprake zijn van slijtage van materialen die in de brandstofcel worden toegepast en die in het geproduceerde water terecht komen. Ten slotte vereisen sommige brandstofcellen een externe waterbron voor het bevochtigen van de waterstof en de lucht. Dat houdt verband met de noodzaak om polymere membranen in de brandstofcellen (PEMFC) gehydrateerd te houden in verband met de geleiding van protonen. Die externe waterbron kan ook verontreinigingen introduceren in het geproduceerde water.

De Universiteit van Arizona heeft vrij recent onderzoek uitgevoerd naar de recovery en de kwaliteit van water geproduceerd in commercieel beschikbare brandstofcellen (Tibaquirá *et al.*, 2011) (Hristovski *et al.*, 2009). Hun onderzoekshypothese was dat de kwaliteit van water uit brandstofcellen beter is dan die van drinkwater en voldoet aan USEPA richtlijnen. Voor PEMFC-brandstofcellen (zie Tabel 2-2), die kunnen worden beschouwd als meest gangbaar op dit moment, kan die hypothese worden bevestigd. Het water wordt in algemene zin wel gekenmerkt door een lage geleidbaarheid (2 - 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) en een relatief lage pH (4 - 6), wat gebruikelijk is voor water met een hoge zuiverheid en lage alkaliniteit. Anionen die licht verhoogd (maar onder de EPA-normering) worden aangetroffen in het water zijn fluoride en sulfaat, meest waarschijnlijk afkomstig van de PFSA (perfluor-sulfonzuur) membranen die in PEMFC brandstofcellen worden toegepast. Slijtage aan de membranen kan waarschijnlijk ook de licht verhoogde TOC-gehalten verklaren die bij een nieuwe brandstofcel aanvankelijk nog relatief hoog zijn (tot 2 mg/l) maar

relatief snel afnemen tot onder 0,5 mg/l. Dit suggereert dat het verstandig is om water uit brandstofcellen pas na verloop van tijd te gaan verzamelen. Van de kationen zijn de concentraties van aluminium en nikkel licht verhoogd en liggen rond het niveau van de EPA- en WHO-normering.

Kort samengevat betekent dit dat op het geproduceerde water uit brandstofcellen van het type PEMFC een correctie moet plaatsvinden voor nikkel en aluminium en voor alkaliteit (bijvoorbeeld door middel van een calcielfilter).

Naast drinkwater kan het in brandstofcellen geproduceerde water uiteraard ook worden hergebruikt ten behoeve van de elektrolyse. Op basis van de in de literatuur geschetste kwaliteit zal wel een polishing stap nodig zijn op basis van ionenwisseling (mengbed) of EDI om een voldoende kwaliteit voor de elektrolyse te kunnen garanderen.

In hoofdstuk 4 van dit rapport is voor de verschillende casebeschrijvingen berekend welke hoeveelheid water wordt geproduceerd bij re-elektrificatie van waterstof en welke opvang capaciteit benodigd is. Hierbij is uitgegaan van 100 % recovery van het water, wat in de praktijk niet haalbaar is. Op basis van literatuurgegevens is maximaal 60 % recovery mogelijk zonder gebruik te maken van substantiële koelsystemen (Tibaquirá *et al.*, 2011). Uit de berekeningen in hoofdstuk 4 blijkt hoe dan ook dat in de autarkische woonwijk binnen de NPP-casus in potentie veel water vrijkomt als gevolg van re-elektrificatie (zie Tabel 4-2 in relatie tot Tabel 4-1). Dat is ongeveer 80 tot 90 % op basis van de huidige respectievelijk toekomstige efficiëntie van elektrolyzers en fuel cells. Dit is te verklaren uit het feit dat vanuit de windparken veel waterstof moet worden aangevoerd ten behoeve van de energievoorziening van de woonwijken. Indien in de toekomst 60 % van het water dat wordt gevormd in brandstofcellen kan worden teruggewonnen, betekent dit dat gemiddeld tot 50 % op het waterverbruik kan worden bespaard.

### 6.3 Rol drinkwaterbedrijven

Uit deze studie blijkt dat de productie van waterstof voor een groot deel lokaal in de bebouwde omgeving zal plaatsvinden door middel van kleinschalige elektrolyse units. Hiervoor moet ook op kleine schaal ultrapuur water worden geproduceerd. Op grond van beschikbaarheid, betrouwbaarheid en kwaliteit ligt het voor de hand om gebruik te maken van het lokale drinkwater als bron voor de productie van ultrapuur water. Hier ligt een belangrijke kans voor drinkwaterbedrijven om - in het verlengde van de drinkwaterlevering - ultrapuur water te gaan produceren en leveren. Hierbij kan worden gedacht aan het investeren in de units, het uitvoeren van het beheer en onderhoud en het doen van de benodigde monitoring van de units. Een aantal commerciële dochters van drinkwaterbedrijven hebben deze ervaring al bij de levering van demiwater bij de industrie. Ook zij kunnen hun werkterrein uitbreiden/verplaatsen met het bouwen, beheren en onderhouden van grotere productie-units voor ultrapuur water bij (onshore) windparken, zonneparken of eventueel biogasproductielocaties.

De toename van het drinkwaterverbruik in de woonwijken wordt op basis van deze studie geschat op 2,2 %. Daarnaast kan verwacht worden dat het huidige drinkwaterverbruik in huishoudens gaat dalen door waterbesparende maatregelen in en om huis. Het lijkt dus goed mogelijk om de extra waterbehoefte voor de productie van waterstof op te vangen met de huidige productie capaciteit.

Op 19 september 2016 is in Nieuwegein een seminar gehouden waarbij de volgende vragen centraal stonden:

- Ligt er een kans bij de drinkwatersector voor de productie van ultrapuur water door middel van kleine lokale productie-units in de wijken ten behoeve van een waterstofeconomie?
- Hoe zou de sector dat vorm kunnen geven?

Op basis van de resultaten van het seminar kan het volgende worden geconcludeerd:

- De drinkwater bedrijven zien het onderhouden van de installaties vooral als een uitbreiding van het asset management en dit het beste passen bij hun commerciële dochters.
- Drinkwaterbedrijven zijn van rechtswege verplicht om een brandstofvoorraad te hebben die een pompstation gedurende 10 dagen van energie kan voorzien in geval van nood. De bedrijven zien de waterstof economie en het gebruik van waterstof als een goede mogelijkheid ter vervanging van de huidige dieselvoorraad voor noodstroom.
- Een aantal bedrijven zien hun activiteiten graag uitbreiden met het opwekken van duurzame stroom. De overschotten kunnen worden opgeslagen als waterstof. Een waterstof pompstation voor de brandstof voorziening van het eigen voertuigpark wordt ook als mogelijkheid genoemd.
- Op wijkniveau zien de drinkwaterbedrijven weinig uitdagingen aangezien ze de toegenomen watervraag vrij gemakkelijk kunnen opvangen. De productie van ultrapuur water biedt vooral kansen voor hun commerciële dochterbedrijven.
- Het water wat vrij komt bij re-elektrificatie is te goed van kwaliteit om ingezet te worden als drinkwater. Hergebruik voor de productie van waterstof, of als demi-water lijkt logischer. In principe is het teruggewonnen water erg schoon maar de kwaliteit is een aandachtspunt. Voor de bedrijven is dit (op afstand) lastig om te monitoren en te garanderen. Wel zou het toegevoegd kunnen worden aan de het (bron)water wat de drinkwaterbedrijven opwerken tot drinkwater.
- Er liggen kansen voor afgelegen gebieden zoals landelijke gebieden en eilanden waar de zoetwatervoorziening lastig is of onder druk staat wegens tekorten.
- In nieuwe wijken zou geïntegreerd gekeken moeten worden naar de energie, water en afvalwatervoorzieningen waarbij ook waterstof een belangrijke rol kan spelen.

#### 6.4 Conclusies

De resultaten van deze studie kunnen als volgt worden samengevat:

- Een waterstofeconomie zal resulteren in een groot aantal kleinschalige ultrapuur water productie plants in de volledig autarkische woonwijken met productiecapaciteiten tussen 0,1 en 5 m<sup>3</sup>/uur ten behoeve van de lokale productie van waterstof uit surplus hernieuwbare elektriciteit (zie Tabel 4-9).
- Voor deze kleinschalige units in de wijk is drinkwater een voor de hand liggende bron door de continue beschikbaarheid en de goed gedefinieerde kwaliteit. Het kostenniveau voor de productie van ultrapuur water op deze schaal is 3 tot 5 €/m<sup>3</sup>, rekening houdend met slim ontworpen, modulair opgebouwde systemen.
- Hier ligt een kans voor drinkwaterbedrijven om in het verlengde van hun drinkwaterlevering lokaal op kleine schaal ultrapuur water te gaan produceren en leveren.
- Daarnaast zal sprake zijn van grootschalige productielocaties voor ultrapuur water bijvoorbeeld bij de on- en offshore windparken. In die situatie is de keuze voor drinkwater minder voor de hand liggend en zal in de praktijk vooral gebruik worden gemaakt van oppervlaktewater, bijvoorbeeld zeewater.
- Ook hier ligt een kans voor de commerciële dochters van drinkwaterbedrijven om hun bestaande activiteiten gericht op demiwaterlevering aan de industrie uit te breiden naar het leveren van ultrapuur water ten behoeve van de grootschalige waterstofproductie bij wind- en zonneparken.
- Dit resulteert in een totaal geschat waterverbruik van 86 Mm<sup>3</sup>/jaar, te verdelen in 24 Mm<sup>3</sup>/jaar drinkwater in de wijken en 62 Mm<sup>3</sup>/jaar oppervlaktewater bij de windparken. Dit zijn de waterhoeveelheden die nodig zijn voor balanceren van het net, wegtransport (mobiliteit), elektriciteitsverbruik in de bebouwde omgeving en verwarming van gebouwen.
- De drinkwaterconsumptie in de wijken neemt hierdoor toe met 2,2 % ten opzichte van het drinkwaterverbruik in 2014.

- Het water dat vrijkomt uit de re-elektrificatie van waterstof in brandstofcellen kan in principe in de woonwijken worden gebruikt als basis voor drinkwater of (na een extra polishing stap) worden hergebruikt als ultrapuur water voor elektrolyse. Uitgaande van maximaal 60 % recovery van het in de brandstofcel gevormde water, betekent dit dat ongeveer 50 % op het totale waterverbruik kan worden bespaard.
- Uitgaande van een studie voor Denemarken gericht op het balanceren van het elektriciteitsnet met FCEVs en waterstof als energiedrager in een maatschappij die voor 100 % is gebaseerd op hernieuwbare energiebronnen, is een schatting gemaakt voor een jaarlijkse benodigde (drink)waterhoeveelheid van 38 Mm<sup>3</sup>/jaar, ongeveer 3,5 % ten opzichte van het drinkwaterverbruik in 2014. Deze schatting houdt alleen verband met wegtransport, het balanceren van het net en het elektriciteitsverbruik in de bebouwde omgeving.
- In beide bovenstaande rekenmethoden zijn het energieverbruik voor de scheepvaart, de luchtvaart en de industrie in Nederland niet meegenomen.
- Voor de scheepvaart en luchtvaart is een globale inschatting gemaakt die resulteert in een benodigd verbruik van ultrapuur water in 2050 van 12 tot 23 Mm<sup>3</sup>/jaar.
- Hoe de industrie zich exact ontwikkelt in een waterstofeconomie met 100 % hernieuwbare energiebronnen is op voorhand lastig te voorspellen. De productie van waterstof in olieraffinaderijen en hoogovens zal verdwijnen. Het verbruik van waterstof in de chemische industrie voor de productie van kunstmest en methanol zal gehandhaafd blijven. De hoeveelheid ultrapuur water die benodigd is voor de productie van die waterstof is geschat op 5,2 Mm<sup>3</sup>/jaar.
- Opgeteld is het geschatte verbruik van ultrapuur water in 2050 in een waterstofeconomie ongeveer 60 Mm<sup>3</sup>/jaar. Dit kan worden afgezet tegen de productie van 54 Mm<sup>3</sup> demiwater per jaar in 2014 zoals geïnventariseerd voor (alleen) de grootste demiwaterproductie units in Nederland (Tabel 1-1).
- Het lijkt er dus op dat in absolute zin de overgang naar een waterstofeconomie niet leidt tot een substantiële toename van de benodigde waterhoeveelheden, maar wel naar een differentiatie in kwaliteit van levering.

## 7 Visie op de waterstofeconomie

### 7.1 Inleiding

In hoofdstuk 1 van dit rapport is aangegeven dat voor deze studie het volgende uitgangspunt is gehanteerd: *“een vergaande integratie van hernieuwbare energiebronnen in de energievoorziening in Nederland waarbij elektriciteit en waterstof de belangrijkste energiedragers zijn”*. In dit hoofdstuk wordt antwoord gegeven op de vraag hoe vanzelfsprekend dit uitgangspunt is en welke voorwaarden nodig zijn om te komen tot een waterstofeconomie.

### 7.2 Voorwaarden voor een waterstofeconomie

Ontwikkeling op het gebied van waterstof vinden plaats in twee, vrijwel gescheiden, werelden. Ten eerste is er de bestaande waterstofproductie op basis van fossiele brandstoffen ten behoeve van de chemische industrie en olieraffinage. Ten tweede is er de mogelijkheid van het gebruik van waterstof op het snijvlak van brandstof voor voertuigen en de opwekking van elektriciteit uit hernieuwbare bronnen. Op dit moment wordt de waterstofeconomie gedomineerd door de industriële toepassingen, maar krijgt de potentie van waterstof als opslagmedium voor duurzame elektriciteit het meeste aandacht van beleidsmakers en onderzoekers (Nuttall, 2016).

De ontwikkeling van het tweede domein van de waterstofeconomie hangt sterk samen met de transitie naar een energiesysteem dat hoofdzakelijk is gebaseerd op uit wind en zon opgewekte elektriciteit. Een dergelijk “all electric” scenario is het uitgangspunt geweest voor deze studie. De onregelmatige productie van windmolens en zonnecellen zorgt voor afwisselende tekorten en overschotten van elektriciteit. In de 24-uurscyclus zijn er overschotten in de ochtend en tekorten in de vroege avond. Deze zijn relatief eenvoudig op te lossen met batterijen. Op jaarbasis zijn er echter ook overschotten in de zomer en tekorten in de winter. Deze zijn niet met de huidige accutechnologie te overbruggen. Waterstof als opslagmedium kan dan een belangrijke rol hebben in het opslaan van energie bij overschotten en het leveren van energie bij tekorten (Nuttall, 2016).

Hoewel een “all electric” scenario een interessant denkmodel is, benadrukken Zhang et al. (2015) het belang van “system-of-system thinking”. Zij zien de ontwikkeling van bijvoorbeeld ‘smart grids’ bestaande uit een elektriciteitsnet, een brandstofnet (waterstof) en een warmtenet. Waterstofproductie en fuel cell technologie maken het mogelijk om energie te schakelen tussen deze netten.

#### *Energietransitie*

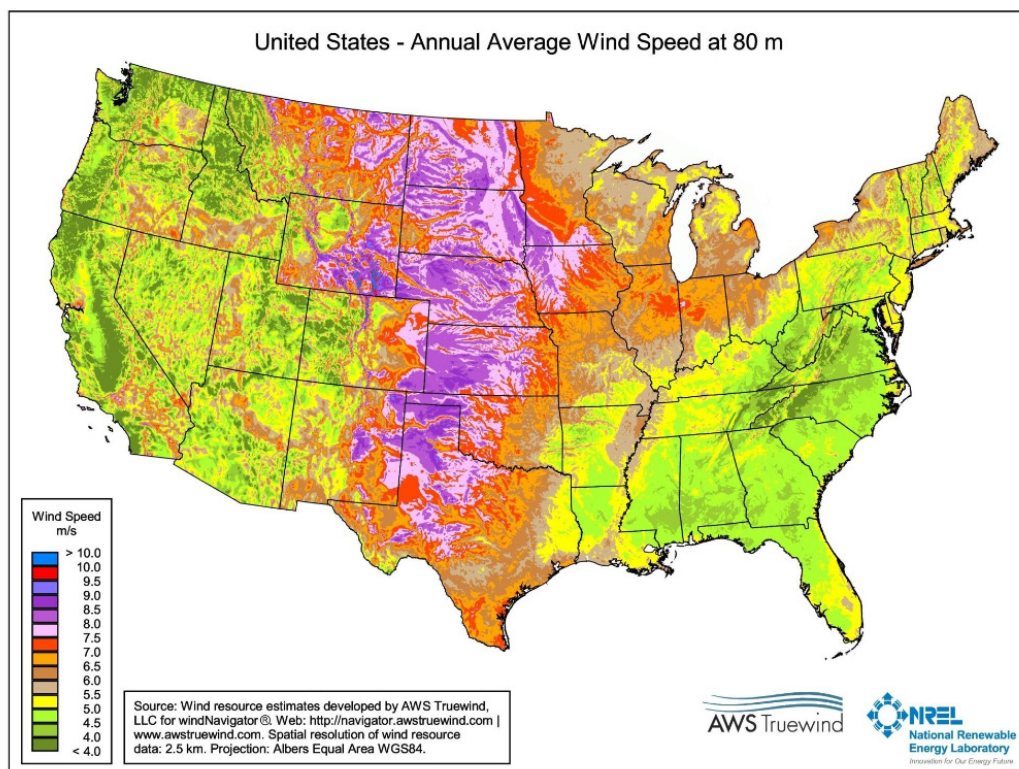
De snelheid van de energietransitie en de resulterende energiemix zijn dus van invloed op de rol die waterstof in de toekomstige gaat krijgen. Beide zijn op dit moment onzeker. Die onzekerheid wordt veroorzaakt door de politiek-economische dynamiek in de energiesector. De energiemarkt wordt gedomineerd door prijzen van verschillende energiebronnen, maar die komen niet ‘spontaan’ tot stand. Investerings en subsidies door overheden zijn daarvoor zeer bepalend. Zo hebben Duitsland en Denemarken door aanpassing van de tariefstructuren (feed-in-tarief) de prijs van windenergie sterk verlaagd. Ook geopolitieke verhoudingen hebben een belangrijke invloed. De prijs van olie en gas wordt dikwijls als politiek middel ingezet.

Er zijn evenwel duidelijke aanwijzingen dat de er een wereldwijde transitie naar duurzame energie plaatsvindt. In 2015 is er wereldwijd voor ruim 300 miljard dollar in duurzame elektriciteitsproductie geïnvesteerd, ruim twee keer zoveel als de investeringen in fossiele opwekcapaciteit. Ook op het gebied van prijsniveaus worden records gebroken. In 2016 is aan de

bouw van een windpark in Marokko en een zonnecentrale in Dubai begonnen, waar elektriciteit voor slechts 3 dollarcent per kWh geproduceerd kan worden.

Hoewel voor veel mensen duurzame energie geassocieerd wordt met zonnepanelen op het dak en windmolens op de dijk, zal dat vanwege de hoge kosten niet de hoofdmoet van de elektriciteitsproductie zijn. Die zal hoofdzakelijk plaatsvinden in afgelegen gebieden, waar tegen zeer lage kosten geproduceerd kan worden. Die energie moet dan worden verplaatst naar waar deze het best gebruikt kan worden. Figuur 7.4 geeft de verhoudingen weer voor de VS.

FIGUUR 7.4: IN DE PAARSE GEBIEDEN IS WINDENERGIE HET MEEST RENDABEL, MAAR HET VERBRUIK VINDT JUIST AAN DE OOST- EN WESTKUST PLAATS.

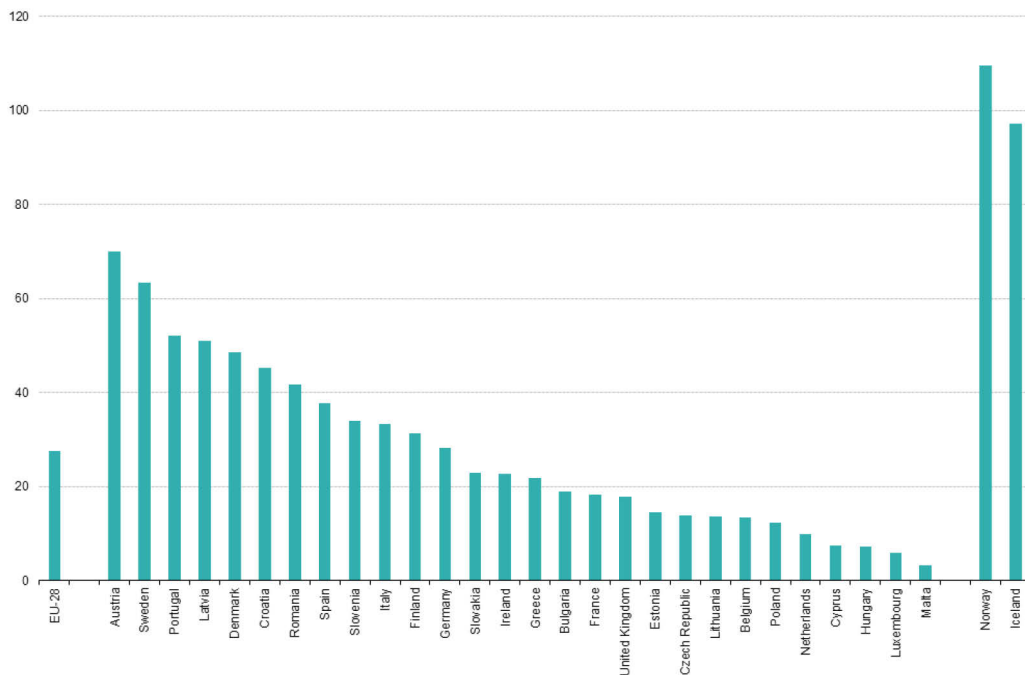


Voor het transport van elektriciteit worden nu meestal kabels gebruikt, maar die zijn duur en inflexibel. Omzetting van de geproduceerde elektriciteit in waterstof (en vervolgens naar bijvoorbeeld ammonia of methanol) maakt opslag en transport van grote hoeveelheden energie mogelijk.

In Nederland wordt ongeveer 11% van de elektriciteit duurzaam opgewekt, waarvan ongeveer de helft door windmolens (CBS, 2015). In het energieakkoord is afgesproken dat dat in 2023 16% moet zijn, gecombineerd met een ambitieuze energiebesparing. Dat moet bestaan uit ongeveer 6.000 MW wind op land en 4.450 MW wind op zee (Energieakkoord 2016). Hoewel dit positieve ontwikkelingen zijn, vallen deze cijfers in het niet bij wat er bijvoorbeeld in Zweden en Duitsland aan duurzame opwekking is en wordt gerealiseerd (zie Figuur 7.5). De Nederlandse doelstellingen na 2023 zijn nog onzeker. Wel geldt er de Europese doelstelling om in 2050 80% minder broeikasgassen uit te stoten.



FIGUUR 7.5: AANDEEL ELEKTRICITEIT UIT DUURZAME BRONNEN IN PROCENTEN



Source: Eurostat (online data code: tsdcc330)

Uit het Energieakkoord blijkt ook het voornemen om fossiele brandstoffen tot 2050 een belangrijke rol te laten spelen in de energievoorziening. Om toch de 80% reductie van broeikasgassen te realiseren, wordt het afvangen van CO<sub>2</sub> bij kolen- en gascentrales in het Energieakkoord als onvermijdelijke optie gezien. Uit recente pogingen van het kabinet om dit in Barendrecht te realiseren weten we echter dat dit op weinig publiek draagvlak kan rekenen. Het gebruik van meer afgelegen gasvelden behoort wellicht wel tot de mogelijkheden.

Het Nederlandse beleid lijkt te leunen op twee gedachten: het nakomen van (internationale) klimaatafspraken en het zolang mogelijk in stand houden van de fossiele economie. Dat is enerzijds niet verwonderlijk gezien de grote afhankelijkheid van de Nederlandse economie van het transport en de verwerking van fossiele grondstoffen en de grote invloed die de “fossiele reuzen” hebben op het Nederlandse energiebeleid. Anderzijds is dat wel verwonderlijk gezien de kwetsbare geografische positie van Nederland en de grote invloed die klimaatverandering kan hebben.

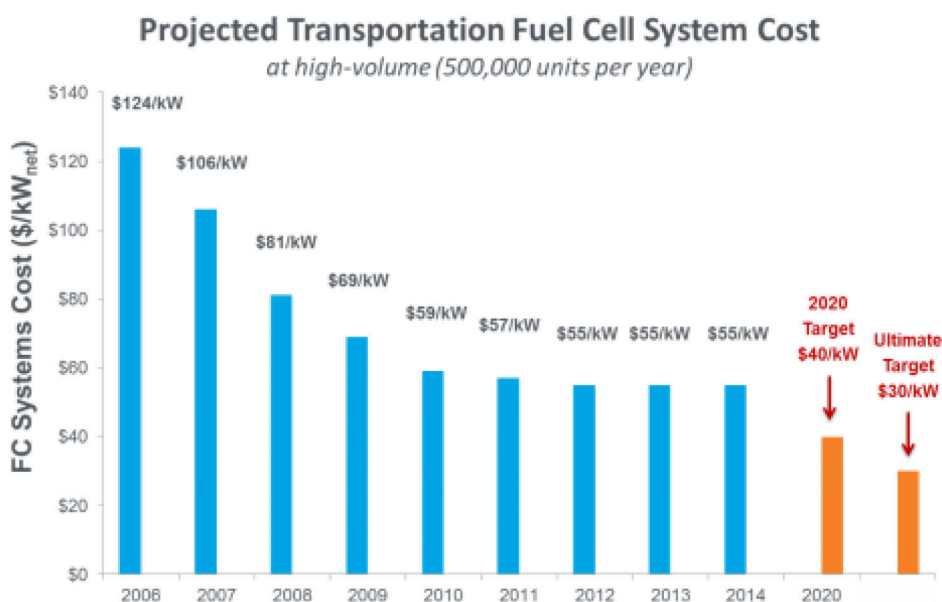
De ontwikkelingen van de laatste twee jaar laten zien dat dit beleid echter achterhaald is: het klimaatakkoord in Parijs dwingt tot een versnelde afbouw van het gebruik van fossiele brandstoffen; een Nederlandse rechter heeft op 2 september 2016 bepaald dat de overheid twee gloednieuwe kolencentrales moet sluiten om de klimaatafspraken voor 2020 te halen; gaswinning in Groningen moet drastisch worden teruggeschroefd vanwege maatschappelijk verzet. Ook zien we de grote fossiele bedrijven in beweging komen. Nuon en Shell bouwden samen het eerste (proef) offshore windpark met een vermogen van 350MW en verder is Shell betrokken bij de ontwikkeling van offshore windparken Borssele 3 en 4.

Uiteindelijk is wat in Nederland gebeurt nauwelijks relevant voor de mondiale energietransitie. Nederland zal vanzelf worden ingehaald door de grootschalige wereldwijde investeringen en prijsverlagingen die dit tot gevolg zal hebben. Nederland zal dus hoe dan ook zijn beleid moeten gaan aanpassen om de mondiale transitie bij te kunnen houden.

### Transitie in de mobiliteitssector

De drijvende kracht achter de toepassing van waterstof in de transportsector is de ontwikkeling van de fuel cell. Hierbij zien we een sterke prijsverlaging door toenemende innovatie en productie. Figuur 7.6 toont de prijsontwikkeling van brandstofcellen en de geschatte toekomstige kosten. Figuur 7.7 en Figuur 7.8 laten de groei zien van de wereldmarkt voor brandstofcellen en elektrische bussen. Hier is ook duidelijk te zien dat Azië de grootste volumes laat zien. Met andere woorden: de transitie vindt niet in Nederland plaats en zelfs niet in Europa. Om te zien hoe de toekomst zich ontwikkelt moeten we de blik naar buiten werpen.

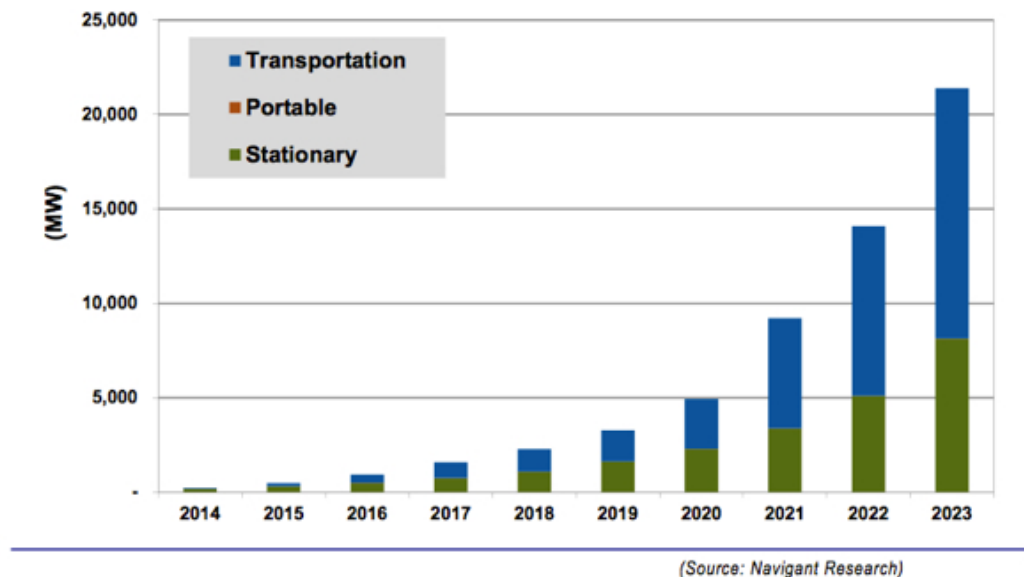
FIGUUR 7.6: GEPROJECTEERDE KOSTEN VAN BRANDSTOFCELLEN VOOR DE TRANSPORTSECTOR



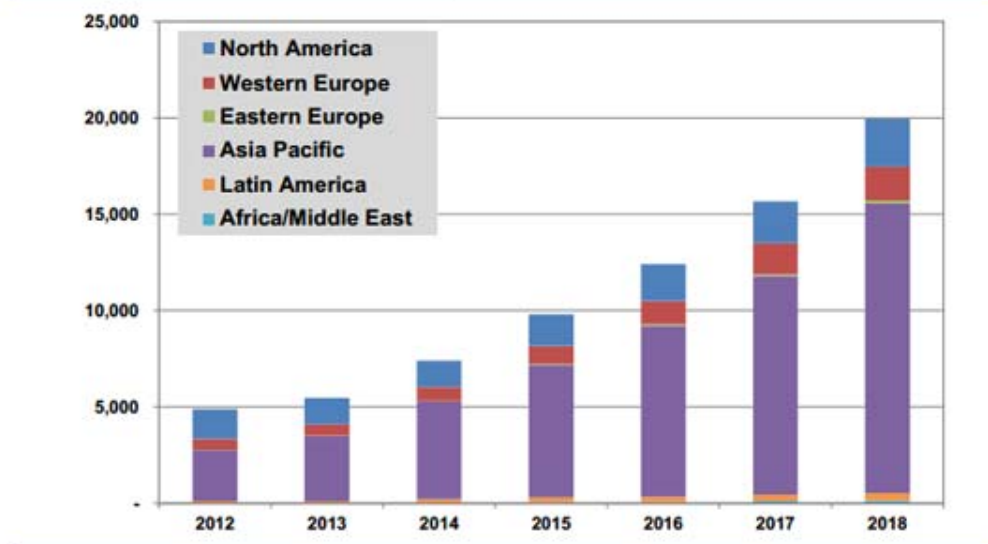
De Nederlandse mobiliteits- en transportsector wordt geacht in 2030 17% uitstootreductie te realiseren ten opzichte van 1990. Met het huidige vastgestelde beleid zal echter een stijging van 12% worden gerealiseerd. Hoewel in het Energieakkoord zelf waterstof niet met name genoemd, gaat een visietraject van de SER, 'Een duurzame brandstofvisie met LEF' hier wel verder op in (zie paragraaf 1.3). Het rapport spreekt een voorkeur uit voor elektrisch rijden, waarbij het zowel kansen ziet voor rijden op batterij, als op brandstofcellen.



FIGUUR 7.7: CAPACITEIT VAN VERKOCHTE BRANDSTOFCELSYSTEMEN

**Chart 1.1 Fuel Cell System Capacity Shipped by Market Sector, World Markets: 2014-2023**

FIGUUR 7.8: VERKOOP VAN ELEKTRISCHE BUSSEN

**Chart 1.1 Annual Electric Drive Bus Sales by Region, World Markets: 2012-2018**

Uit het rapport blijkt ook dat de toekomst wat betreft verduurzaming van de energievoorziening nog open ligt. Nederland beoogt volgens de auteurs koploper te zijn op het gebied van gas, biobrandstoffen, elektrisch (smart grids, batterijen) en waterstof.

Elektrisch vervoer op basis van batterijen wordt als grote concurrent van de fuel cell gezien, maar er kleven een aantal belangrijke nadelen aan. Batterijen zijn relatief groot en zwaar, zeker naarmate er meer en langduriger energie geleverd moet worden. Met batterijen is het weliswaar

mogelijk om voor een korte periode energie op te slaan, maar dat is niet relevant voor de seizoensgebonden variatie die een rol speelt bij zonne-energie. Het Britse Institute of Physics maakt de volgende systematische vergelijking tussen biofuels, batterijen en waterstofcellen:

	Biobrandstoffen	Elektrische voertuigen (batterij; BEV)	Elektrische voertuigen (brandstofcel; FCEV)
Positieve eigenschappen	Technologie toegepast en in gebruik	Technologie toegepast en in gebruik	Technologie gedemonstreerd
	Gebruik van bestaande fossiele ketens en infrastructuur	Grote investeringen door autofabrikanten	Evolutionaire transitie mogelijkheid voor oliebedrijven
	Geen aanpassing nodig van voertuigen of rijgedrag	Mogelijke synergie met 'smart grids' en 'smart homes'	Geen aanpassing nodig van voertuigen of rijgedrag  Geschikt voor middellange afstand (350km+) en snel bij te tanken.
		Geen uitstoot	Alleen water als uitstoot
			Brandstofcel is betrouwbaar en gaat lang mee
Negatieve eigenschappen	Relatief beperkte klimaatwinst	Afhankelijk van schaarse grondstoffen	Economische barrières voor implementatie, voor infrastructuur en aanvoerketens
	Meestal menging met fossiele brandstoffen nodig	Zo schoon als de elektriciteit die wordt gebruikt	Zo schoon als de waterstof die wordt gebruikt
	Bezorgdheid over impact op landbouw, voedselveiligheid en landgebruik	Beperkt bereik	
		Lastig om de auto warm te houden bij lage omgevingstemperaturen	
		Lage oplaadsnelheid en dus aanpassing in gedrag van bestuurder nodig. Snel-laders vereisen zware infrastructuur.	
		Risico van batterijbrand	Veiligheidsperceptie waterstof

Op basis van Nuttall et al, (2016) *Next Steps for Hydrogen: Physics, Technology and The Future*, pp.9

De afspraken in het energieakkoord zijn van groot belang voor de toekomst van waterstof (en in het bijzonder het concept "car as power plant"), omdat uit The Fuel Cell Industry Review 2015 blijkt dat groei in het gebruik van brandstofcellen sterk afhankelijk is van privaat/publieke

investerings in de bijbehorende infrastructuur. Het meest concrete voornemen uit de 'brandstofvisie', naast het "stimuleren" van bedrijven en het "prikkelend" van sectoren, is het opzetten van een "publiek-privaat infrastructuurfonds voor oplaadpunten voor batterij-elektrische voertuigen, waterstoftankstations en voor hernieuwbaar gas, en LNG-bunker-tankstations". Hoewel er dus in toekomstvisies aandacht is voor de verduurzaming van de energiesector ontbreekt het aan een duidelijke keuze in welke richting die verduurzaming moet plaatsvinden en een harde toezegging om daarin (publiek) te investeren. Het is daarnaast onduidelijk of er maatschappelijk draagvlak bestaat voor dergelijke investeringen.

Zoals er binnen de energietransitie verschillende routes en uitkomsten zijn, zo zijn die er ook binnen de waterstofeconomie. Nuttall et al. (2016) wijzen op de volgende dilemma's:

- Lokale kleinschalige vs centrale grootschalige opwekking;
- Ondersteunend aan of concurrerend met de huidige fossiele producenten;
- Gebaseerd op gasvormige waterstof of cryogene (zeer sterk gekoelde) vloeibare waterstof

Het feit dat Nederland een hoogwaardige en vrijwel geheel dekkende gasinfrastructuur heeft, biedt kansen voor het gebruik van gasvormige waterstof. Binnen het TKI Gas wordt overwogen om te onderzoeken hoe de bestaande infrastructuur kan worden ingezet, mocht het tot een transitie naar gasvormige waterstof komen. Echter, de inzet van cryogeen waterstof wordt door de natuurkundigen van het Britse Institute of Physics als kansrijk gezien, omdat die het meest toegankelijk is in een business-as-usual scenario en dus het minste beleidsinterventies behoeft. Een cryogeen-waterstof scenario past het beste bij grootschalige opwek en distributie met tankwagens. Het zal zich in de grootschalige scenario's moeten meten met een waterstofgasscenario waarbij vooral pijpleidingen worden gebruikt (Nuttall, 2016).

### *Veiligheid*

Waterstof heeft bij consumenten een slechte reputatie op het gebied van veiligheid, maar deze reputatie lijkt grotendeels gebaseerd op gebrek aan kennis en een mythische anekdote. De mythische anekdote betreft de brand in de Hindenburg, een zeppelin die met waterstof was gevuld in plaats van met helium. Uit onderzoek blijkt echter dat vooral de verf van de zeppelin verantwoordelijk is voor de brand, aangezien deze uit dezelfde chemische componenten bestond als raketbrandstof (Hydrogen Safety Factsheet). Verder maken mensen wellicht de associatie met de 'waterstofbom', wat vooral in de koude oorlog een beladen begrip was, dat echter geen enkele verband houdt met het onderwerp hier.

Waterstof is niet toxisch en niet explosief maar wel brandbaar evenals andere 'brandstoffen'. Tegelijkertijd heeft het ook een aantal eigenschappen die het brandgevaar en de gevolgen ervan reduceren. Waterstof is veel lichter dan 'lucht' en vervliegt razendsnel omhoog. Dat verkleint de kans op ontbranding aanzienlijk. Een waterstofbrand heeft een kleine hitteradius, dus de kans op overslaan is kleiner dan bij koolstofhoudende brandstoffen. Een tank die volledig is gevuld met waterstof, kan niet exploderen vanwege het tekort aan zuurstof. En ten slotte, de waterstof geproduceerd in de waterstofeconomie is van een ander isotoop, dan die gebruikt wordt in de waterstofbom. De ontwikkeling van de waterstofeconomie heeft dus geen invloed op de proliferatie van waterstofbommen.

Pilotprojecten en publicaties kunnen de zorgen over de veiligheid bij het publiek grotendeels wegnemen. In Noorwegen is een netwerk van lokale elektrolyse-apparaten en compressoren ontwikkeld die waterstof produceren en transporteren onder een druk van 700 bar. Dit initiatief laat zien dat waterstof ook onder hoge druk veilig gebruikt kan worden. Hoewel dit soort voorbeelden in de toekomst zal groeien, blijft (on)veiligheid een belangrijk wapen voor partijen die de ontwikkeling van de waterstofeconomie willen frustreren.

### 7.3 Verdere toepassing in de transportsector en visionaire ideeën

De in dit onderzoek besproken “car as powerplant” is slechts een van de vele toepassingsmogelijkheden van waterstof als energiedrager. In deze paragraaf bespreken we enkele andere, soms visionaire, toepassingen.

#### *Verder toepassing waterstof in transportsector*

Het bedrijf Alstom gaat in de komende 10 jaar 200 treinmotoren op waterstof ontwikkelen ter vervanging van bestaande dieseltreinen. Het tekende hiervoor een contract met Hydrogenics, een fabrikant op het gebied van waterstofmotoren. Het potentieel hiervan is erg groot: in Duitsland alleen al rijdt 40% van de treinen op diesel. In het noorden en oosten van Nederland rijden ook dieseltreinen die in potentie op waterstof kunnen overgaan.

Wagenparken van bedrijven zijn een goede kandidaat voor de toepassing van waterstof. Ze worden vaak intensief gebruikt en er kan centraal worden besloten tot de transitie naar een nieuwe type voertuig. Stadsbussen zijn een interessant optie. Vorkheftrucks zijn ook een interessante kandidaat. IKEA in Frankrijk heeft in zijn 100.000 m<sup>2</sup> distributiecentrum heftrucks op waterstof ingezet waarbij het tankstation wordt verzorgd door Air Liquide.

In 2015 is een pilot gestart om bussen op ‘afvalwaterstof’ van AKZO te laten rijden. De bussen zullen rijden in Assen, Groningen en Delfzijl. Dit kan ook interessant zijn voor taxi’s en boten.

Luchtvaartmaatschappijen onderzoeken de mogelijkheid om vliegtuigen te laten taxiën op waterstof of waterstof te gebruiken voor elektriciteitsproductie in vliegtuigen.

In de toekomst kunnen ook drones en robots gebruik maken van waterstof. Naarmate deze groter en zwaarder worden en de actieradius groter moet zijn, is waterstof te prefereren boven batterijen.

#### *Power-to -X*

Power-to-X is een verzamelnaam voor toepassingen waarbij elektriciteit wordt opgeslagen als warmte of in een chemische verbinding, bijvoorbeeld gas, vloeistof of eiwit. Bij deze omzetting speelt waterstof een sleutelrol. Hieronder worden enkele voorbeelden genoemd.

Elektriciteit kan via waterstof eenvoudig worden omgezet in ammoniak of methanol. Dat maakt toepassing en transport aanmerkelijk eenvoudiger. Dit is al praktijk bij de huidige gasvelden. De koolstof die nodig is voor methanolproductie kan gewonnen worden uit CO<sub>2</sub>. Dit proces kan ook bijdragen aan de vergroening van de chemiesector.

De chemiesector zou in theorie helemaal over kunnen gaan op een combinatie van biomassa en waterstof. Bij elektrolyse van water komt zuurstof vrij. Deze zuurstof kan worden gebruikt bij de vergassing van biomassa. Met de toevoeging van extra waterstof kan er een groot aantal verbindingen gecreëerd worden die toepassingen hebben in de chemische of de kunststofindustrie.

Netbeheerder Stedin experimenteert met de omzetting van elektriciteit in gas. Op Ameland liep van 2007 tot 2012 een proef waarbij uit water door middel van elektrolyse waterstof en zuurstof werd geproduceerd. Sinds herfst 2015 worden dertig woningen in een appartementencomplex in de Rotterdamse wijk Rozenburg zelfs voorzien van synthetisch – en voor de bewoners gratis – methaan, verkregen door waterstof uit elektrolyse in een vervolgstap met CO<sub>2</sub> te methaniseren. In dit project werkt Stedin samen met energiekennisbedrijf DNV GL, de corporatie Ressor Wonen en gemeente Rotterdam. (<https://tijdivanderzee.com>)

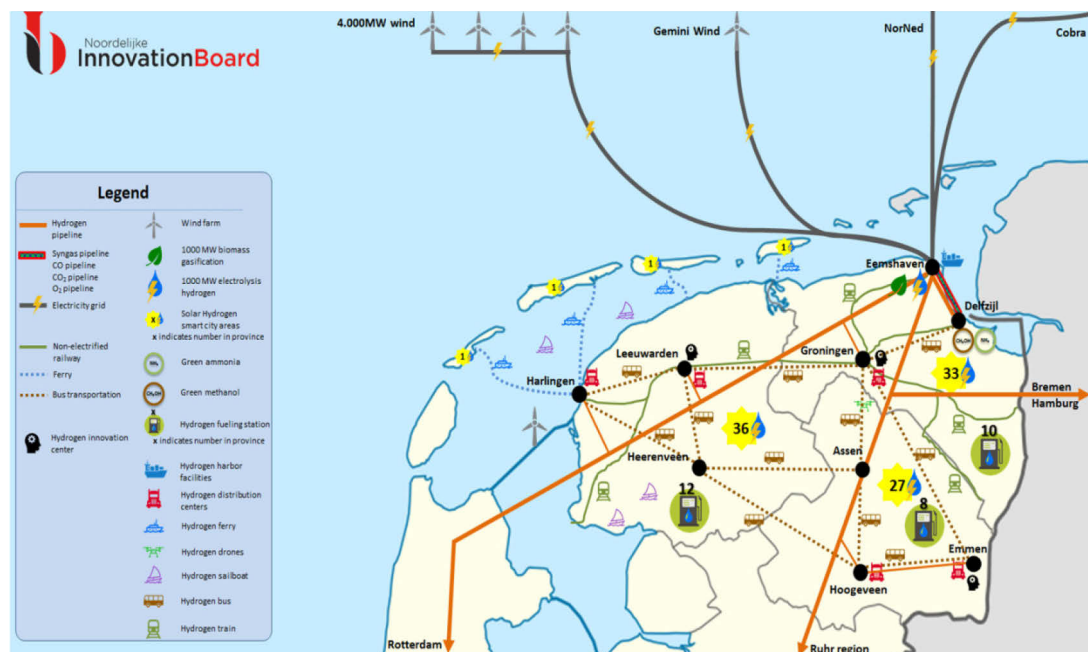
In Denemarken wordt een 1 MW power-to-gas demonstratieproject ontwikkeld. (Duurzame) elektriciteit wordt omgezet in waterstofgas, dat vervolgens door micro-organismen in methaan wordt omgezet. Het gas wordt vervolgens via het gasnet aan consumenten in Kopenhagen gedistribueerd (Nuttall et al, 2016).

In het power-to-protein concept worden ammonium en koolzuurgas, allebei afkomstig uit de afvalwaterketen, door middel van aerobe waterstofoxiderende bacteriën met hoge efficiëntie geassembleerd tot microbiel eiwit of single cell protein (SCP). Waterstof wordt daarbij door de bacteriën gebruikt als energiebron. Het concept is ontwikkeld aan de Universiteit van Gent en bij het bedrijf Avecom in Gent draait een reactor op laboratoriumschaal. KWR heeft met Avecom de potentie onderzocht van het concept voor een stad als Amsterdam. Die potentie is hoog. Alleen al met het ammonium uit het digestaat van de slibvergisting van de gemeente Amsterdam kan in 36 % van de netto eiwitbehoefte van de bevolking worden voorzien. Het concept biedt daarmee in potentie een oplossing voor het wereldvoedselprobleem. KWR en Avecom zijn inmiddels gestart met de bouw van een pilotinstallatie voor een demonstratieproject. Door het gebruik van waterstof past het concept binnen een waterstofeconomie waarbij in feite surplus elektriciteit na conversie naar waterstof gebruikt wordt voor de productie van eiwitten via microbiële omzetting.

#### Groene waterstofeconomie in Noord-Nederland

De Noordelijke Innovation Board heeft een roadmap opgesteld voor de ontwikkeling van een groene waterstofeconomie in Noord Nederland in de periode van 2016 tot 2030 (NIB, 2017). De plannen bestaan uit de realisatie van 4.000 MW offshore windparken, 1.000 MW elektrolyse-capaciteit voor waterstofproductie, een installatie voor vergassing van biomassa met een capaciteit van 1.000 MW en 100 lokale zonne-energiecentrales met waterstofproductie in steden. Verder de realisatie van de benodigde infrastructuur, waaronder waterstof tankstations en pijpleidingen met de Eemshaven als centrum, en koppeling aan bestaande chemische productiefaciliteiten in Delfzijl (methanol, ammonia).

FIGUUR 7.9: PLANNEN VOOR EEN GROENE WATERSTOFECONOMIE IN NOORD NEDERLAND



#### Combinatie van waterstof- en watertransport

Het 'transporteren van water' door er waterstof van te maken kan energie- en waterproductie

combineren. Voorbeeld is een groot (hypothetisch) windpark aan de kust van Zuid India. De opgewekte elektriciteit kan worden omgezet in waterstof en naar droge gebieden getransporteerd bijvoorbeeld in vloeibare vorm in schepen. Daarmee kan dan elektriciteit worden opgewekt via stationaire of mobiele fuel cells, waarbij het restwater de basis kan zijn voor een lokale drinkwaterproductie. Dit heeft vele voordelen ten opzichte van het transporten van de elektriciteit via een kabel, want dat is duurder en inflexibel. Zeker gezien het feit dat in die gebieden de seizoensvariatie in windkracht erg groot is vanwege de passaatwinden. Een kabel zou dan 4 maanden per jaar veel minder gebruikt worden.

#### *Mobiele en decentrale energievoorziening*

Waterstof is heel geschikt als basis voor een decentrale en mobiele energievoorziening. Bijvoorbeeld bij festivals en grote evenementen. Ook hier zou het gecombineerd kunnen worden met het leveren van water. Ook voor de noodstroomvoorziening van de waterbedrijven biedt dit een kans, aangezien het de dieselaggregaten kan vervangen. Hiermee wordt het risico op bodem- en luchtverontreiniging gereduceerd.

#### *Cryogeen vloeibaar waterstof*

Om waterstof vloeibaar te houden bij normale atmosferische druk, moet het afgekoeld worden tot 20,3 Kelvin (-252,7 °C). In die toestand is het uitermate geschikt als cryogeen koelmiddel, ook in vergelijking met helium en neon. In deze toestand is waterstof zowel koelmiddel als energiedrager. De toepassing van vloeibaar waterstof in voertuigen, biedt de mogelijkheid om supergeleiders in voertuigen toe te passen, bijvoorbeeld voor navigatiesystemen en energieopslag met supergeleidende vliegwheels.

Met vloeibaar waterstof kunnen ook grote supergeleidende elektriciteitsnetten worden gekoeld. Dit kan een substantiële invloed hebben op ons elektriciteitssysteem. Duurzame elektriciteit kan efficiënt over grote afstanden worden vervoerd in supergeleidende netten en lokaal worden verdeeld door smart grids. Ook de lokale netten kunnen gebruik maken van supergeleidingstechnologie.

## 8 Referenties

### 8.1 Literatuur referenties

- Ball, M. and M. Weeda, The hydrogen economy - Vision or reality?, *International Journal of Hydrogen Energy* 40 (2015) 7903 - 7919.
- Barbir, PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources, *Solar Energy* 78 (2005) 661-669.
- Carmo, Fritz, Mergel, Stolten, A comprehensive review on PEM water electrolysis, *international journal of hydrogen energy* 38 (2013) 4901 - 4934.
- Fuel Cell Industry Review 2015, [www.FuelCellIndustryReview.com](http://www.FuelCellIndustryReview.com)
- J.D. Holladay, J. Hu, D.L. King, Y. Wang, An overview of hydrogen production technologies, *Catalysis Today* 139 (2009) 244-260.
- Hristovski, K.D., B. Dhanasekaran, J.E. Tibaquirá, J.D. Posner, P.K. Westerhoff. Producing drinking water from hydrogen fuel cells. *Journal of Water Supply: Research and Technology -AQUA* 58(5) (2009), pp327 - 335.
- IEA (2015). OECD/IEA. *Technology Roadmap: Hydrogen and fuel cells*. Uitgave 2015.
- Kleijn, van der Voet, Resource constraints in a hydrogen economy based on renewable energy sources: An exploration, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 2784-2795.
- Lovins, A.B., Williams, B.D., 1999. A strategy for the Hydrogen Transition. Rocky Mountain Institute. RMI Publication T99-07, presented to the 10th Annual US Hydrogen Meeting, National Hydrogen Association, Vienna, Virginia, 7-9 April 1999.
- Mondelinge informatie Jaco Reijerkerk Linde AG. 15 februari 2016.
- Mondelinge informatie Jaap Oldenzijl Air Liquide. 19 januari 2016.
- McDowall, W., Exploring possible transition pathways for hydrogen energy: A hybrid approach using socio-technical scenarios and energy system modelling, *Futures* 63 (2014) 1-14.
- NIB, Noordelijke Innovation Board. *Green Hydrogen Economy in the Northern Netherlands*. Ad van Wijk, Februari 2017.
- Nutall et al. (2016) *Next Steps for Hydrogen: Physics, Technology and The Future*, British Institute of Physics.
- Oldenbroek, V. , A.J.M. van Wijk en L.A. Verhoef (2016a). Balancing national electricity and transport systems with Fuel Cell Cars and Hydrogen. 21st World Hydrogen Energy Conference 2016. Zaragoza, Spain. 13-16th June, 2016.

Oldenbroek, van Wijk, Verhoef, (2016b) Car as Power Plant: integrated transport and electricity system designs, 21st World Hydrogen Energy Conference 2016. Zaragoza, Spain. 13-16th June, 2016.

PBL/ECN (2011), Naar een schone economie in 2050: routes verkend. Hoe Nederland klimaatneutraal kan worden, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

<http://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/PBL-2011-Routekaart-energie-2050-500083014.pdf>

Ruijter, Hatendoer Water, email communicatie 14-4-2016.

Schoots, K en P. Hammingh (2015), Nationale Energieverkenning 2015. ECN-O--15-033. Petten: Energieonderzoek Centrum Nederland.

SER (2013) *Energieakkoord voor duurzame groei*

SER (2014) *Een duurzame brandstofvisie met LEF*

Tibaquirá, J.E., K.D. Hristovski, P. Westerhoff and J.D. Posner. Recovery and quality of water produced by commercial fuel cells. *Int. Journal of Hydrogen Energy* 36 (2011), 4022 – 4028.

Turner. Sustainable hydrogen production. *Science* 305, 972–973. U.S. Department of Energy (2004) Hydrogen posture plan. An integrated research, development and demonstration plan. U.S. Department of Energy; 2004.

Van Wijk, A. en L. Verhoef. *Our Car as Power Plant*. The Authors and IOS Press, Delft, 2014.

Zeng, Zhang, Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications, *Progress in Energy and Combustion Science* 36 (2010) 307–326.

Zhang et al. (2015) *Towards a smart energy network: The roles of fuel/electrolysis cells and technological perspectives*, *International Journal of Hydrogen Energy* (40), pp. 6899-6919.

## 8.2 Geraadpleegde websites:

Compendium voor de leefomgeving:

<http://www.compendiumvoordeleefomgeving.nl/indicatoren/nl0057-Waterwinning-en-waterverbruik-in-Nederland.html?i=3-126>

Planbureau voor de leefomgeving:

<http://www.pbl.nl/dossiers/bevolking/content/DemografieBevolking> (04-04-2016)

Centraal bureau voor de statistiek: <https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2007/29/internationale-handel-stuwt-stookolieverbruik-zeevaart-op>

sn-gave: [http://www.sn-gave.nl/voorbeeld\\_project.asp?projectid=202](http://www.sn-gave.nl/voorbeeld_project.asp?projectid=202)

<https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2016/09/wind-steeds-belangrijker-voor-productie-van-hernieuwbare-elektriciteit>



Hydrogen Safety Factsheet: [http://www.arhab.org/pdfs/h2\\_safety\\_fsheet.pdf](http://www.arhab.org/pdfs/h2_safety_fsheet.pdf)

<https://www.nrc.nl/nieuws/2016/05/12/shell-in-de-race-voor-windenergie-op-zee-1617990-a515061>

<https://tijdo Vanderzee.com>

[http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/images/0/00/Proportion\\_of\\_electricity\\_generated\\_from\\_renewable\\_sources%2C\\_2014\\_%28%25\\_of\\_gross\\_electricity\\_consumption%29\\_YB16.png](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/images/0/00/Proportion_of_electricity_generated_from_renewable_sources%2C_2014_%28%25_of_gross_electricity_consumption%29_YB16.png)

DOE, Department of Energy. <https://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>

Energieakkoord SER 2016. <http://www.energieakkoordser.nl/energieakkoord.aspx>

## 9 Gebruikte afkortingen

FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle, elektrisch aangedreven voertuig met brandstofcel
FC	Fuel Cell
BEV	Battery Electric Vehicle, elektrisch aangedreven voertuig met batterij
PV-cellen	Fotovoltaïsche cellen
SMR	Steam Methane Reforming
HHV	Higher Heating Value
LHV	Lower Heating Value
PEM	Proton Exchange Membrane
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
SO	Solid Oxide
EC	Electrolyzer
PSA	Pressure Swing Absorption
UF	Ultrafiltratie
RO	Reverse osmosis
SWRO	Sea water reverse osmosis
BWRO	Brackish water reverse osmosis
IX	Ion exchange
EDI	Electro-deionization

## Bijlage I Mobiliteit Nederlandse voertuigen

Gebaseerd op het aantal gereden kilometers en de efficiëntie van een brandstofcel kan worden geschat hoeveel brandstof nodig is op dit moment of in 2050 wanneer 50% of alle voertuigen een brandstofcel gebruiken.

Bij wegvervoer is uitgegaan van lokale opwekking bij tankstations zoals in scenario HFS, terwijl voor scheepvaart en luchtvaart wordt verondersteld dat er centrale productie van waterstof zal plaatsvinden.

TABEL 9-1: AANTAL KILOMETERS GEREDEN DOOR NEDERLANDSE VOERTUIGEN EN DE BENODIGDE HOEVEELHEID WATERSTOF EN GEDEMINERALISEERD WATER IN HET 'HEDEN' SCENARIO.

heden scenario (gebaseerd op kilometers gereden in 2014)								
	Kilometers door Nederlandse voertuigen	FCEV - 2015 Efficiency	100% FCEV scenario			50-50% FCEV-BEV scenario		
			% FCEV-km	Waterstof jaar-verbruik	Ultrapuur water voor electrolyse	% FCEV-km	Waterstof jaarverbruik	Ultrapuur water voor electrolyse
	x mln km (2014 data)	km/kg H <sub>2</sub>	%	10 <sup>6</sup> kg	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	%	10 <sup>6</sup> kg	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
Totaal motorvoertuigen	140,947.50							
Personenauto	114,016.20	100.00	100%	1,140.16	10.20	50%	570.08	5.10
Bestelauto	16,412.30	79.99	100%	205.17	1.84	50%	102.59	0.92
Vrachtauto (excl. trekker voor oplegger)	2,625.00	21.50	100%	122.07	1.09	100%	122.07	.09
Trekker voor oplegger	6,498.80	14.34	100%	453.34	4.05	100%	453.34	4.05
Speciaal voertuig	716.10							
Bus	679.20	10.42	100%	65.18	0.58	75%	48.89	0.44
Totaal motorfietsen	2,489.49	266.64	100%	9.34	0.08	50%	4.67	0.04
			Total	1,995.27	17.85	Total	1,301.63	11.64

TABEL 9-2: AANTAL KILOMETERS GEREDEN DOOR NEDERLANDSE VOERTUIGEN EN DE GESCHATTE HOEVEELHEID WATERSTOF EN GEDEMINERALISEERD WATER IN HET '2050' SCENARIO GEBASEERD OP VERWACHTTE EFFICIENTIES VAN FCEVS.

2050 scenario (gebaseerd op gereden kilometers in 2014)								
	Kilometers door Nederlandse	FCEV - 2050 Efficiency	100% FCEV scenario			50-50% FCEV-BEV scenario		
			% FCEV-km	Waterstof jaar-verbruik	Ultrapuur water voor	% FCEV-	Waterstof jaarverbruik	Ultrapuur water voor electrolyse

	voertuigen x mln km (2014 data)	km/kg H <sub>2</sub>	%	10 <sup>6</sup> kg	electrolyse 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	km %	10 <sup>6</sup> kg	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
<b>Totaal</b>								
<b>motorvoertuigen</b>	140,947.50							
Personenauto	114,016.20	166.66	100%	684.12	6.12	50%	342.06	3.06
Bestelauto	16,412.30	106.66	100%	153.88	1.38	50%	76.94	0.69
Vrachtauto (excl. trekker voor oplegger)	2,625.00	25.30	100%	103.76	0.93	100%	103.76	0.93
Trekker voor oplegger	6,498.80	16.87	100%	385.34	3.45	100%	385.34	3.45
Speciaal voertuig	716.10							
Bus	679.20	12.25	100%	55.43	0.50	75%	41.57	0.37
<b>Totaal motorfietsen</b>	2,489.49	355.52	100%	7.00	0.06	50%	3.50	0.03
			<b>Total</b>	<b>1,389.54</b>	<b>12.43</b>	<b>Total</b>	<b>953.17</b>	<b>8.53</b>

Voor de scheepvaart en luchtvaart zal er een grootschaliger en meer centrale productie van waterstof plaatsvinden. Voor de berekeningen is er vanuit gegaan dat een huidige waterstof brandstofcel even efficiënt is als een huidige brandstofmotor (ongeveer 40% voor grote schepen). Voor 2050 wordt verondersteld dat 50% van de waterstofproductie elders plaatsvindt. Zo is een mogelijke verwachting dat waterstof daar wordt geproduceerd waar de energievoorziening m.b.v. natuurlijke bronnen grootschalig aanwezig is. Daarnaast zal er een efficiëntieslag plaatsvinden van de efficiëntie van een brandstofcel. Deze wordt verwacht te stijgen van 40 naar 60%.

In 2007 is in Nederland 18 miljoen ton stookolie gebruikt en 4 miljoen ton kerosine.

TABEL 9-3: VERWACHT WATERSTOFVERBRUIK EN BENODIGD WATER VOOR DE PRODUCTIE HIERVAN BINNEN DE SCHEEPVAART EN LUCHTVAART IN NEDERLAND.

		2015		2050	
		100% gasturbines	50% gasturbines	100% FCEV	50% FCEV
<b>scheepvaart (2007: 18 miljoen stookolie)</b>					
benodigde waterstof	10 <sup>6</sup> kg H <sub>2</sub>	5282.7	2641.4	1760.9	880.5
benodigd puurwater	miljoen m <sup>3</sup>	47.5	23.8	15.8	7.9
benodigd leidingwater	miljoen m <sup>3</sup>	95.1	47.5	31.7	15.8
<b>Luchtvaart (2007: 4 miljoen ton kerosine)</b>					
benodigde waterstof	kg H <sub>2</sub>	1197.2	598.6	798.1	399.1
benodigd puurwater	miljoen m <sup>3</sup>	10.8	5.4	7.2	3.6
benodigd leidingwater	miljoen m <sup>3</sup>	21.6	10.8	14.4	7.2

