



# OVERZICHT WATERSTOF OP DE BOUWPLAATS

Diewertje Doeglas

10 november 2022

## Inhoud

1	Inleiding .....	2
2	De opties in een oogopslag .....	3
3	In het kort .....	4
3.1	Een aantal praktische zaken op een rijtje .....	7
3.2	Conversieverliezen .....	8
3.3	De tijdlijn .....	9
4	Leeswijzer .....	10
5	Algemene basiskennis over waterstof .....	11
6	Productie .....	13
6.1	Grijze waterstof .....	13
6.2	Blauwe waterstof .....	13
6.3	Groene waterstof .....	14
6.3.1	Alkaline elektrolyser .....	15
6.3.2	PEM elektrolyser .....	15
6.3.3	Verschillen tussen Alkaline en PEM Elektrolyzers .....	15
6.3.4	Andere elektrolyzers .....	16
6.3.5	Andere methoden om waterstof te produceren .....	17
7	Opslag .....	19
7.1	Compressed waterstof (CH <sub>2</sub> ) 350 bar .....	19
7.2	Compressed waterstof (CH <sub>2</sub> ) 700 bar .....	19
7.3	Vloeibare waterstof (LH <sub>2</sub> ) .....	20
7.4	Mierenzuur (Hydrozine) .....	20
7.5	Ondergrondse opslag .....	21
7.6	Andere ontwikkelingen .....	21
8	Transport .....	23
8.1	Tube trailers .....	23
8.2	Vervoer door flessen .....	23
8.3	Vloeibaar transport .....	24
8.4	Pijpleidingen .....	24
9	Tanken .....	26
10	Gebruik .....	29
10.1	Waterstof als brandstof .....	29
10.2	Toepassing in een brandstofcel .....	29
10.2.1	Proton exchange membrane brandstofcel (PEMFC) .....	30
10.2.2	Andere brandstofcellen .....	30
11	Afsluiting .....	33
	Appendix A: Technology Readiness Level (TRL) .....	34

# 1 Inleiding

Op de bouwplaats moeten emissies radicaal worden teruggedrongen. Daarom wordt het gebruik van emissieloos bouwmaterieel bevorderd, mede door overheidsregelgeving. Als energiedrager op de bouwplaats kan waterstof hierbij een belangrijke rol spelen, zeker voor bouwmaterieel dat hoge vermogens vereist. Dit document bevat een overzicht van de huidige status en ontwikkelingen van waterstof met betrekking tot de bouwplaats.

Dit document bestaat uit drie onderdelen, die volgordeijk steeds gedetailleerder van aard zijn.

- In het eerste deel presenteren we de verschillende opties die we kennen en die in ontwikkeling zijn wat betreft waterstof en laten we zien welke opties relevant zijn voor op de bouwplaats (*De opties in een oogopslag*).
- Daarna wordt er over deze onderwerpen iets meer uitgeweid en wordt er een samenvatting gegeven van de relevante informatie (*In het kort*).
- Het derde deel is een uitgebreid naslagwerk (*Algemene basiskennis over waterstof*).

## Rectificatie

In een eerdere gepubliceerde versie van dit document stond in hoofdstuk 10.1 Waterstof als brandstof de opmerking dat bij het gebruik van waterstof in een verbrandingsmotor sprake is van fijnstofuitstoot, maar dat is niet het geval. In deze versie is dat gecorrigeerd.

## 2 De opties in een oogopslag

Hieronder is in tabelvorm een samenvatting opgenomen van wat er op het vlak van waterstof op de bouwplaats allemaal bestaat, of in ontwikkeling is. De groene cellen in de tabel zijn nu volledig emissievrij beschikbaar of toepasbaar voor op de bouwplaats en passen in de scope van ENI. De cellen met de grijze tekst (nog) niet.

Gebruik	Tanken	Transport	Opslag	Productie
Brandstofcel	Gas	Tube trailers	Gas 350 bar	Groen
Verbranding	Vloeibaar	Flessen op trailer	Gas 700 bar	Blauw
		Flessen op rekken	Vloeibaar	Grijs
		Vloeibaar	Mierenzuur	
		Pijpleidingen	Ondergronds	

## 3 In het kort

Deze samenvatting omvat een verzameling van concrete handvatten en praktische informatie van de verschillende beschikbare opties voor het gebruik van waterstof (H<sub>2</sub>) op de bouwplaats. Deze samenvatting pretendeert niet volledig te zijn. De daadwerkelijke toepassing van waterstof is complex en behoeft nuance. Hierdoor is het gewenst om meer (achtergrond)informatie op te halen uit de rest van dit document of bij experts.

### **Waterstof toepassen**

Over het algemeen geldt dat waterstof een goed idee is wanneer het gevraagde vermogen voor bouwmaterieel niet direct elektrisch te leveren is. Wanneer het mogelijk is om de energie voor de werkzaamheden direct elektrisch te leveren, is dit vrijwel altijd een betere optie. Dit komt door de verschillen in efficiëntie van de verschillende methoden.

In de bouwsector is waterstof emissieloos te gebruiken via een brandstofcel. Hierbij worden geen broeikasgassen, stikstofoxiden of fijnstof uitgestoten. In een brandstofcel wordt pure waterstof gecombineerd met pure zuurstof. Hierbij ontstaan water, warmte én elektriciteit. Deze elektriciteit kan gebruikt worden in bouwmaterieel met een elektromotor. Momenteel zijn er nog nadelen bij het gebruik van een brandstofcel, namelijk:

- De brandstofcellen zijn nog erg duur;
- Het tanken van waterstof kan momenteel nog op weinig plaatsen en hieraan zijn specifieke randvoorwaarden verbonden;
- Het rendement is lager dan van een batterij-elektrisch materieel; en
- De brandstofcel opereert niet optimaal bij grote verschillen in vermogensvraag.

Waterstof is een gevaarlijke stof. Het is van groot belang dat er zorgvuldig aandacht wordt besteed aan de veiligheid wanneer er met waterstof wordt gewerkt. Het is namelijk niet alleen licht ontvlambaar, het is ook moeilijk waar te nemen. Waterstof is een vluchtig, geurloos en kleurloos gas. Wanneer waterstof brandt, is de vlam ook vrijwel onzichtbaar. Hierdoor zijn er specifieke maatregelen nodig om het te kunnen gebruiken, bijvoorbeeld om lekkage en ontsteking te voorkomen.

De enige brandstofcel die op dit moment goed toepasbaar is voor de bouwsector, is de *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC). Voordelen van de PEMFC zijn: hij is relatief compact en kan gemakkelijk op- en afgeschakeld kan worden. De PEMFC heeft een vermogensrange van 500 W – 400 kW.

Voor het gebruik van waterstof is veel verschillende wet- en regelgeving van toepassing. Het is belangrijk dat hier voldoende aandacht aan besteed wordt. Projecten waarin waterstof een rol speelt, zijn over het algemeen vergunning plichtig. Vanwege de relatieve onbekendheid van waterstof voor organisaties en instanties, moet rekening gehouden worden met extra doorlooptijd bij het verkrijgen van vergunningen. Ook voor het ombouwen van machines voor de toepassing van waterstof dient rekening gehouden te worden in de planning.

De overheid trekt tot 2030 270 miljoen euro uit voor subsidies voor emissieloze bouwmachines. Ondernemers kunnen tot 40% van de meerkosten bij aanschaf terugkrijgen. Het kabinet wil MKB-bedrijven extra tegemoetkomen, zij kunnen daarom tot 50% subsidie krijgen.

### **Tanken**

Het tanken van waterstof gebeurt in de meeste gevallen in gasvorm. Hiervoor zijn opslagvaten, compressoren en een elektrische voeding nodig. Afhankelijk van de gewenste tanksnelheid is er ook een koelinstallatie nodig. Hoe hoger de tanksnelheid, hoe meer koeling noodzakelijk is. Om de waterstof daadwerkelijk in het voertuig te laden is er een pomp nodig. Er zijn mobiele waterstoftankstations ontwikkeld die op de bouwlocatie neergezet kunnen worden. Is er niet

voldoende elektriciteit beschikbaar op de bouwplaats dan kan het tanken van vloeibare waterstof overwogen worden. Deze hoeft niet gecomprimeerd te worden. Wel is een uitstekende isolatie dan essentieel, aangezien vloeibare waterstof heel koud is (-253°C). Het tanken van vloeibare waterstof is momenteel nog niet commercieel beschikbaar. Het algemene uitgangspunt bij vloeibare waterstof is dat er maximaal eens per dag getankt moet worden. Dit is wel afhankelijk van het gevraagde vermogen en de grootte van de tank.

### **Transport**

Waterstof kan in gasvorm of in vloeibare vorm getransporteerd worden. Relevante eigenschappen van de waterstof zijn de temperatuur, de druk en de effectieve hoeveelheid die verplaatst wordt. Momenteel zijn de meest gangbare opties om gasvormige waterstof in tube trailers (omgevingstemperatuur, 200 bar – 300 bar, max 500 kg H<sub>2</sub> per trailer), in gasflessen vast gemonteerd op trailers (omgevingstemperatuur, 300 bar, max 900 kg H<sub>2</sub> per trailer) of in traditionele gasflessen op rekken (omgevingstemperatuur, 200 bar – 300 bar, max 500 kg H<sub>2</sub> per trailer) via de weg te verplaatsen. Vloeibare waterstof (-253°C, 1 bar, max 3.500 kg H<sub>2</sub> per trailer) heeft een hogere energiedichtheid. Een nadeel van het gebruik van vloeibare waterstof is dat het veel energie kost om waterstof dusdanig koud te maken en te houden.

### **Opslag**

Waterstof wordt standaard in gasvorm, in vloeibare vorm of gebonden aan andere stoffen opgeslagen. In gasvorm wordt waterstof onder een druk van 350 bar of 700 bar getankt. 350 bar is de standaard tankdruk voor bussen en vrachtauto's, 700 bar is de standaard bij personenauto's. Door het comprimeren van waterstof gaat 10% à 15% van de energie verloren. Vloeibare waterstof wordt opgeslagen bij atmosferische druk maar bij een temperatuur van -253°C. Een voordeel van het opslaan van waterstof in vloeibare vorm is dat er grote hoeveelheden in één tank opgeslagen kunnen worden. Nadelen zijn de complexe technische installaties die nodig zijn en dat er veel energie benodigd is voor het koelen. Wanneer waterstof wordt gecombineerd met koolstofdioxide, ontstaat de vloeistof 'mierenzuur'. Voordelen van mierenzuur zijn o.a. dat het niet brandbaar of explosief is en hierdoor relatief veilig om mee te werken. Daarnaast is het qua inpassing in de infrastructuur redelijk vergelijkbaar met dieselgebruik. Nadelen van mierenzuur zijn dat het andere materialen aantast, het een lage energiedichtheid heeft vergeleken met andere vloeibare brandstoffen en dat het lokaal niet emissievrij is (maar netto wel).

### **Productie**

Waterstof komt van nature niet in pure vorm voor op de aarde. Het moet uit chemische verbindingen losgemaakt worden. Dit kan door middel van elektrolyse van water gedaan worden. Hierbij wordt water door middel van elektriciteit gesplitst in waterstof en zuurstof. Alleen het gebruik van elektriciteit afkomstig uit duurzame bronnen zorgt voor groene en emissieloze waterstof. De meest gangbare elektrolyzers op de markt zijn de alkaline elektrolyser en PEM elektrolyser. De belangrijkste eigenschappen van beide soorten elektrolyzers staan in de tabel op de volgende pagina samengevat.

	<b>Alkaline</b>	<b>PEM</b>
Operationele temperatuur	70°C – 90°C	60°C – 80°C
Aankoopprijs	€	€€€
Materiaalkosten	€	€€€
Stack efficiëntie	80%	73% → 80+ %
Flexibiliteit (ten opzichte van stroomtoevoer)	-	+
Stack grootte	Groot	Kleiner
Druk geproduceerd H <sub>2</sub>	Atmosferisch	30 bar
Energietoevoer	Lage stroomdichtheid	Grote stroomdichtheid
Puurheid demiwater benodigd	5 µS/cm	<1 µS/cm
Puurheid waterstof geproduceerd	-	+
Minimale systeembelasting	15%	5% – 10%, maximaal 120% (voor een korte tijd)
Operationele kosten	+	-

### 3.1 Een aantal praktische zaken op een rijtje

Gebruik	Tanken	Levering	Opslag apparaat	Opslag op locatie	Productie
PEM Brandstofcel	Gas	Tube trailers	Gas 350 bar	Voorraadtank	Groen (elektrolyse)
€: ~1.000 per kW* TRL**: 9 jaar: n.v.t. Leveranciers: <ul style="list-style-type: none"> <li>Ballard</li> <li>Cummins</li> <li>Holthausen</li> <li>Hymove</li> <li>Nedstack</li> <li>Nuvera</li> <li>Plug Power</li> </ul>	€: > 300.000 (slow fill) TRL: 9 jaar: n.v.t. Leveranciers vaste stations: <ul style="list-style-type: none"> <li>Maximato</li> <li>McPhy</li> <li>NEL</li> <li>Resato</li> </ul> Leveranciers mobiele stations: <ul style="list-style-type: none"> <li>H2storage</li> <li>TotalEnergies</li> </ul>	€: ~7 per kg TRL: 9 jaar: n.v.t. Leveranciers: <ul style="list-style-type: none"> <li>Air Liquide</li> <li>Air Products</li> <li>HyGear</li> <li>Linde</li> <li>Rijngas</li> </ul>	TRL: 9 jaar: n.v.t. Leveranciers: <ul style="list-style-type: none"> <li>H2 storage</li> <li>Hexagon</li> <li>Holthausen</li> <li>Nprox</li> </ul>	(50 m <sup>3</sup> , 80 bar: 250 kg H <sub>2</sub> -effectief) €: ~175.000 TRL: 9 jaar: n.v.t. Leveranciers: <ul style="list-style-type: none"> <li>Ellimetal</li> <li>Reuther</li> <li>Rootselaar</li> <li>Etc.</li> </ul>	TRL: 9 jaar: n.v.t. Leveranciers groen geproduceerd: <ul style="list-style-type: none"> <li>HyStock</li> </ul> Leveranciers groen gecertificeerd: <ul style="list-style-type: none"> <li>HyGear/Rijngas</li> <li>Nobian</li> </ul>
PEM Brandstofcel aggregaat	Vloeibaar	Flessen op trailer	Gas 700 bar	Cilinders	
€: ~100.000 TRL: 9 jaar: n.v.t. Leveranciers: <ul style="list-style-type: none"> <li>Aggreko</li> <li>Bredenoord</li> <li>Nedstack</li> </ul>	€: onbekend TRL: 7 jaar: 2025 Leveranciers: <ul style="list-style-type: none"> <li>Linde</li> <li>TotalEnergies</li> </ul>	€: ~7 per kg TRL: 9 jaar: n.v.t. Leveranciers: <ul style="list-style-type: none"> <li>Air Liquide</li> <li>Air Products</li> <li>Holthausen</li> <li>HyGear</li> <li>Linde</li> <li>Rijngas</li> </ul>	TRL: 9 jaar: n.v.t. Leveranciers: <ul style="list-style-type: none"> <li>H2 storage</li> <li>Hexagon</li> <li>Holthausen</li> <li>Nprox</li> </ul>	(500 bar ; 1 m <sup>3</sup> = ~25 kg) €: > 25.000 per m <sup>3</sup> TRL: 9 jaar: n.v.t. Leveranciers: <ul style="list-style-type: none"> <li>Calvera</li> <li>Chesterfield</li> <li>Tenaris</li> <li>Etc.</li> </ul>	
Mierenzuur aggregaat		Flessen op rekken	Vloeibaar		
€: ~375.000 TRL: 7/8 jaar: 2022 Leveranciers: <ul style="list-style-type: none"> <li>DENS</li> </ul>		€: ~16 per kg TRL: 9 jaar: n.v.t. Leveranciers: <ul style="list-style-type: none"> <li>Air Liquide</li> <li>Air Products</li> <li>Holthausen</li> <li>HyGear</li> <li>IJsfabriek Strombeek</li> <li>Linde</li> <li>Rijngas</li> <li>Westfalen</li> <li>Etc.</li> </ul>	TRL: 8 jaar: 2025 Leveranciers: <ul style="list-style-type: none"> <li>Capgemini</li> </ul>		
		Vloeibaar op trailer	Mierenzuur		
		€: ~12 per kg TRL: 9 jaar: n.v.t. Leveranciers: <ul style="list-style-type: none"> <li>Air Liquide</li> <li>Air Products</li> <li>Linde</li> </ul>	€: ~0,795 per liter, excl. BTW TRL: 7/8 jaar: 2022 Leveranciers: <ul style="list-style-type: none"> <li>DENS</li> </ul>		

\* Prijzen zijn indicatief en gebaseerd op het vooruitzicht in 2022. De prijzen voor levering zijn sterk afhankelijk van de gewenste hoeveelheid, druk, ed. De prijzen van groene waterstof zijn sterk afhankelijk van de huidige energieprijzen, mede beïnvloed door de huidige ontwikkelingen in Europa.

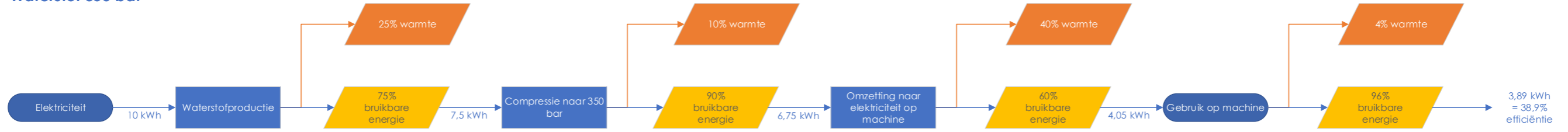
\*\* Zie voor meer informatie over TRL 'Appendix A: Technology Readiness Level (TRL)'

Partijen die bouwmaterieel kunnen ombouwen zijn onder andere: UMS, Holthausen en Capgemini Engineering en New Electric.

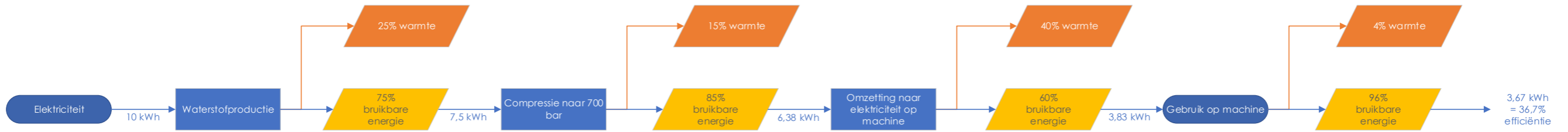


### 3.2 Conversiever verliezen

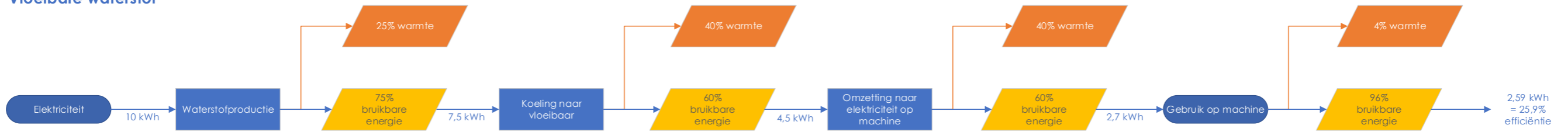
#### Waterstof 350 bar



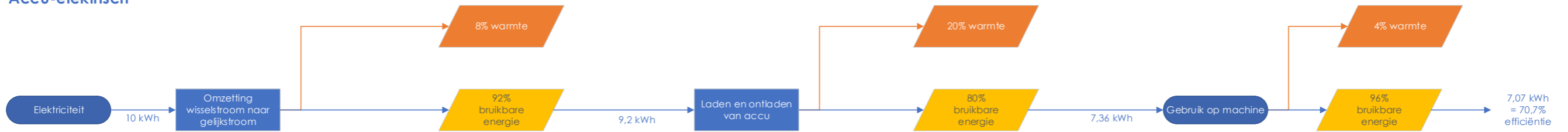
#### Waterstof 700 bar



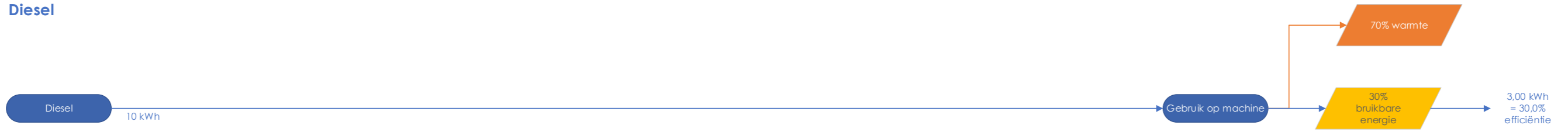
#### Vloeibare waterstof



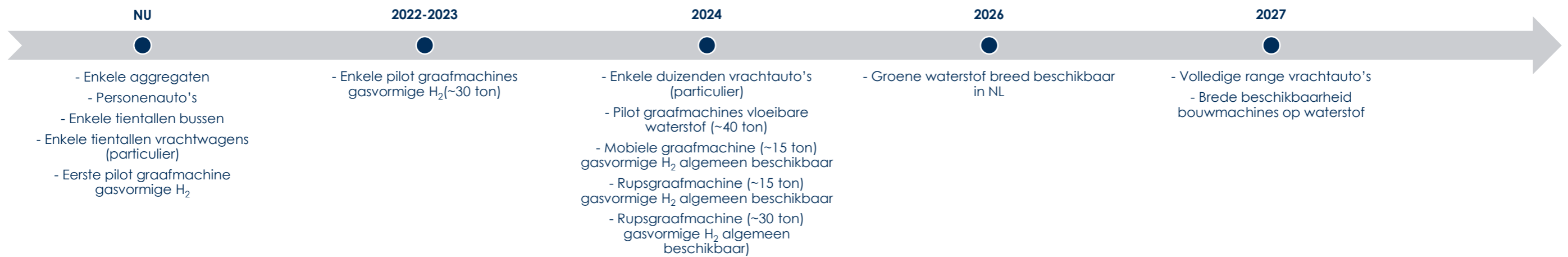
#### Accu-elektrisch



#### Diesel



### 3.3 De tijdlijn



## 4 Leeswijzer

De wereld van waterstof kan overweldigend zijn door de grote hoeveelheid aan beschikbare (veelal technische) informatie. Om u als lezer hierin wegwijs te maken is dit overzicht opgesteld. Door de complexiteit van het onderwerp én het tempo waarin deze sector zich aan het ontwikkelen is, kunnen er geen garanties gegeven worden op volledigheid en actuele status van dit document.

Wel biedt dit document de basiskennis en worden de nodige handvatten aangereikt om aan de slag te gaan met waterstof op de bouwplaats. Er worden een aantal kentallen genoemd die tijdens het schrijven relevant waren. Met geluk zijn de genoemde indicatieve prijzen gunstiger geworden wanneer u dit leest; met pech juist niet.

Het document is opgebouwd in dezelfde volgorde als de waterstofketen en kent dan ook de volgende indeling:

- Algemene basiskennis over waterstof
- Productie
- Opslag
- Transport
- Tanken
- Gebruik

Wij wensen u veel leesplezier en bovenal veel wijsheid als het gaat om het toepassen van waterstof op de bouwplaats.

## 5 Algemene basiskennis over waterstof

### Algemene kenmerken waterstof

Groene waterstof ( $H_2$ ) is een duurzaam alternatief voor het gebruik van fossiele brandstoffen op de bouwplaats. Wanneer waterstof gebruikt wordt in combinatie met een brandstofcel, is er namelijk lokaal geen uitstoot van schadelijke emissies.

Waterstof komt in de natuur onder normale omstandigheden niet voor als losse atoom (losse "H'tjes"). Doordat waterstofatomen zich makkelijk binden, kunnen waterstofatomen in veel chemische samenstellingen gevonden worden. Om gebruik te maken van waterstof moet het geproduceerd worden door de moleculen (2 "H'tjes", oftewel het welbekende " $H_2$ ") los te trekken uit andere verbindingen, zoals water ( $H_2O$ ).

Waterstof is een vluchtig, geurloos en kleurloos gas. Het is hierdoor voor het blote oog niet waarneembaar. Omdat waterstof licht ontvlambaar is (net als diesel), is het een gevaarlijke stof. Als waterstof brandt is de vlam ook vrijwel onzichtbaar, behalve met thermische camera's en door de vervorming van de lucht. Het is echter nauwelijks gevaarlijker dan de gangbare brandstoffen, zoals LPG of benzine, die ook licht ontvlambaar zijn. De veiligheidsrisico's verschillen per toepassingssituatie. Deze zijn af te wegen met behulp van een risicomatrix. Hierin wordt de kans op een onveilige situatie afgewogen tegen de gevolgen van die bewuste situatie. Zie ook de risicomatrix van ENI, waarin de algemene risico's van de inzet van waterstof staan omschreven. Waterstof is niet giftig, maar het kan (net als de meeste andere gassen) in hoge concentraties wel verstikkingsgevaar veroorzaken.

De energiedichtheid van waterstof is in onbewerkte vorm zeer laag in vergelijking met fossiele brandstoffen. Om waterstof op een bruikbare manier op te slaan en te vervoeren, moet het eerst bewerkt worden. Dit kan op verschillende manieren, bijvoorbeeld door het te comprimeren, vloeibaar te maken of te binden aan andere materialen.

Als we het hebben over het gebruik van waterstof op de Nederlandse bouwplaats, dan gaat het altijd over het gebruik van waterstof in een brandstofcel. In een brandstofcel worden waterstof en zuurstof rechtstreeks omgezet in waterdamp, warmte en elektriciteit. Dit proces vindt plaats zonder andere uitstoot. Het gaat niet over het verbranden van waterstof, omdat hierbij stikstofoxiden ( $NO_x$ ) vrijkomen. Door het stikstofprobleem in Nederland is dit ongewenst. Ook is fijnstof een ongewenst bijproduct.

### Efficiëntie waterstof

Een nadeel van het gebruik van waterstof is dat het rendement over de gehele keten (elektriciteit → waterstof → elektriciteit) niet heel hoog is. Bij de elektrolyse gaat grofweg 25% van de elektrische energie verloren en bij de toepassing van de brandstofcel nog eens 40%. Het totale rendement is hierdoor tussen de 25% en 40%. Dit betekent dat ongeveer 3 keer zoveel duurzame energie opgewekt moet worden dan aan het eind nodig is. Ter vergelijking: het rendement van een elektriciteitscentrale is zo'n 40% en bij het transport van elektriciteit over het net gaat zo'n 4% - 10% verloren.

Ondanks de lage efficiëntie ten opzichte van batterij-elektrisch materieel (deze heeft een efficiëntie van 70%) is waterstof een goed alternatief voor fossiele brandstoffen. Bijvoorbeeld wanneer er sprake is van netcongestie, anders gaat de elektrische energie opgewekt met duurzame bronnen volledig verloren. Of wanneer de directe inzet van elektriciteit vanuit het net of accu's praktisch niet haalbaar is. Over het algemeen geldt dat waterstof goed toepasbaar is wanneer het gevraagde vermogen niet direct elektrisch te leveren is vanuit een accu of via een kabel. Wanneer het wel mogelijk is om de energie voor de werkzaamheden direct elektrisch te leveren, is dit vrijwel altijd een betere optie vanwege de efficiëntie.

## Vergunningen en regelgeving

Bij de uitvoering van een project met waterstof op de bouwplaats is het belangrijk om te weten dat de doorlooptijd van de relevante vergunningstrajecten en de ombouw van de machines lang kan zijn. Doordat het gebruik van waterstof nog relatief nieuw is, is er sprake van veelal onontgonnen terrein. Hierdoor kan de aanvraag van bijvoorbeeld vergunningen lang duren. Dit geldt al helemaal wanneer het project zich afspeelt in meerdere gemeenten, omdat het papierwerk voor elke gemeente dan op orde moet zijn.

Het is wat betreft opslag en gebruik van waterstof op de bouwplaats belangrijk te kijken naar de inpassing in de beschikbare ruimte, mede in verband met voorgeschreven veiligheidsafstanden en -regels. Zo houdt de commissie [ISO/TC 197](#) zich bezig met de ontwikkeling van normen op het gebied van systemen en apparatuur voor de productie, opslag, transport, meting en het gebruik van waterstof. Zij hebben tot nu toe [18 ISO-normen](#) met betrekking tot waterstof ontwikkeld en zijn nog met [17 ISO-normen](#) bezig.

Bij het gebruik, opslaan en tanken van waterstof moet men rekening houden met o.a.:

- de [PGS 15](#) voor de opslag van waterstof en boven een bepaalde hoeveelheid (5.000 kg) ook met de BRZO-richtlijnen.
- de [PGS 35](#) voor de opslag van waterstof op het tankstation en het tanken van waterstof.

Momenteel zijn er veel ontwikkelingen gaande op het gebied van waterstof en verandert zowel het aanbod op de markt, als ook de regelgeving die hierop van toepassing is snel.

## 6 Productie

Waterstof wordt gepresenteerd als een duurzaam alternatief voor het gebruik van fossiele brandstoffen, maar dan moet de waterstof wel op een hernieuwbare manier geproduceerd zijn. Alleen dan is er sprake van *groene* waterstof. Helaas is lang niet alle waterstof groen. Waterstof kan ook op een *grijze* of *blauwe* manier geproduceerd worden.

### 6.1 Grijze waterstof

Grijze waterstof is waterstof die geproduceerd wordt mét CO<sub>2</sub>-emissies. Deze waterstof wordt gewonnen uit fossiele brandstoffen: kolen, olie of aardgas worden verhit naar een temperatuur tussen de 700°C en 900°C. Hierbij ontstaan waterstof en schadelijke emissies. Bij processen die plaatsvinden bij deze temperaturen en met omgevingslucht als oxidant, komen ook stikstofoxiden vrij. Verreweg het grootste deel (99%) van de geproduceerde waterstof in Nederland is op dit moment grijs. De productie van alle grijze waterstof veroorzaakt ongeveer 8% procent van de totale CO<sub>2</sub>-uitstoot in Nederland. Omdat Gronings aardgas voor meer dan 80% uit methaan (CH<sub>4</sub>) bestaat, leent het zich goed voor het produceren van grijze waterstof. De indicatieve kostprijs van grijze waterstof is tussen de €1,50 - €2,50 per kilo.



Aandelen van grondstoffen voor wereldwijde waterstofproductie

Momenteel is de belangrijkste methode om waterstof te maken door middel van *Steam Methane Reforming (SMR)*. Hierbij wordt aardgas omgezet in waterstof en koolstofdioxide. Een andere manier is *Partial Oxidation (POX)*, waarbij koolstofketens onvolledig worden verbrand. Een derde methode is *Autothermal Reforming (ATR)*, wat een combinatie is van SMR en POX. POX en ATR worden minder gebruikt vanwege de hogere kosten in vergelijking met SMR. Als laatste kan vaste koolstof vergast worden om grijze waterstof te maken.

### 6.2 Blauwe waterstof

De grondstoffen voor blauwe waterstof zijn eveneens van fossiele afkomst. Het verschil met grijze waterstof is dat hierbij de gevormde CO<sub>2</sub> (voor 80% – 90%) wordt afgevangen en opgeslagen. Dit kan bijvoorbeeld in lege gasvelden op zee. Dit heet *Carbon Capture and Storage (CCS)*. Het overgrote deel van de geproduceerde CO<sub>2</sub> komt bij blauwe waterstof dus niet in de atmosfeer en is daardoor dus vrijwel CO<sub>2</sub>-neutraal. Er zijn maar een aantal plekken op de wereld waar CCS momenteel op grote schaal wordt toegepast. Op een gegeven moment zal de prijs van het uitstoten van CO<sub>2</sub> dusdanig hoog worden door het ETS (waarmee CO<sub>2</sub>-uitstoot wordt belast) dat CCS wel rendabel wordt. De indicatieve kostprijs van blauwe waterstof is tussen de €2,25 - €3,25 per kilo.

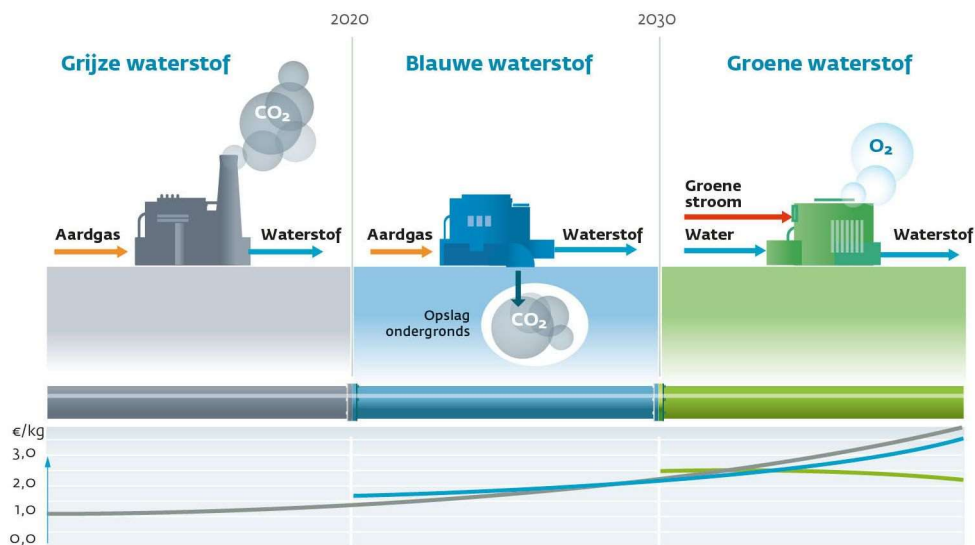
#### **Wat betekent dit voor de bouw?**

Zowel *grijze als blauwe waterstof veroorzaken lokaal (dus op de bouwplaats) geen uitstoot. Om lokale emissiedoelen te behalen kunnen grijze en blauwe waterstof dus prima ingezet worden. Over de gehele keten gezien is het daarentegen niet duurzaam te noemen en is het in veel gevallen zelfs minder duurzaam dan werken met dieselmachines.*

### 6.3 Groene waterstof

Groene waterstof wordt gemaakt met energie uit hernieuwbare bronnen. Denk hierbij aan zonne- of windenergie. De opgewekte elektriciteit wordt gebruikt om van water, door middel van *elektrolyse* (ontleding), waterstof en zuurstof te maken. Dit kan door middel van verschillende elektrolysers, waarvan de alkaline en *Proton Exchange Membrane* (beter bekend als PEM) het bekendste en meest ontwikkelde zijn. De prijs van groene waterstof door elektrolyse wordt voor een groot gedeelte bepaald door de prijs van elektriciteit. Momenteel is de indicatieve kostprijs van groene waterstof tussen de €3,00 - €6,00 per kilo, waarbij de verwachting is dat de prijs de komende jaren gaat dalen door opschaling, maar ook dat is sterk afhankelijk van de elektriciteitsprijs.

	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>
	Waterstof	Blauwe Waterstof	Hernieuwbare ('Groene') Waterstof
Energiebron	Fossiel (Aardgas)	Fossiel (Aardgas)	Hernieuwbaar (Elektriciteit)
Voorbeeld productiemethodes	Methaan reforming	Methaan reforming met CCUS	Electrolyse
Emissies in productie	Relatief hoog	Relatief laag dankzij CCUS	Te verwaarlozen
Indicatieve kostprijs H <sub>2</sub> *	1,50 – 2,50 € / kg	2,25 – 3,25 € / kg	3,00 – 6,00 € / kg



Elektrolyse van water is een chemisch proces waarbij water door middel van een elektrische stroom gesplitst wordt in zuurstof en waterstof. Er zijn verschillende soorten elektrolysers die dit proces kunnen veroorzaken, deze verschillen bijvoorbeeld door de materialen die gebruikt worden. Meerdere elektrolysecellen kunnen 'gestapeld' worden om zo een groter vermogen te behalen, dit wordt ook wel een *elektrolyser stack* genoemd.

### 6.3.1 Alkaline elektrolyser

Alkaline elektrolyzers hebben een vloeibare elektrolyt als kern. Het (gedemineraliseerde) water uit deze kern wordt gebruikt voor de elektrolyse. Aan de ene kant komt er waterstofgas uit en aan de andere kant zuurstofgas. Een membraan scheidt deze gassen van elkaar, want samen vormen deze een explosief mengsel.

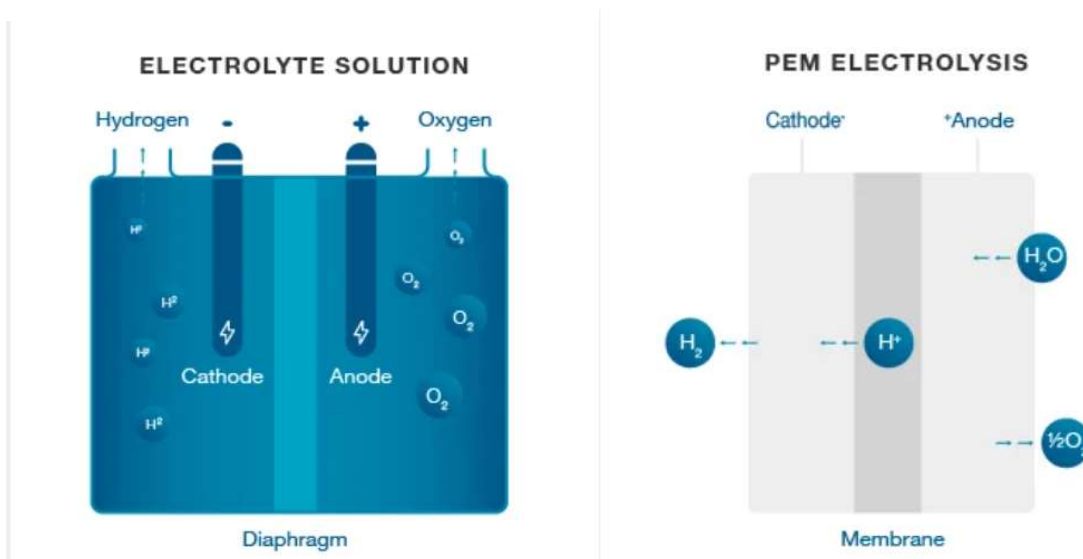
De geproduceerde waterstof kan worden opgeslagen voor gebruik. De huidige industriële elektrolyzers opereren bij een atmosferische druk van 1 bar. Kleine particuliere elektrolyzers kunnen waterstof produceren op hogere druk tot 30 bar. Dit is efficiënter omdat er minder compressie nodig is (zie ook de sectie 'Opslag'). De grote uitdaging is de elektrolyser lek dicht te krijgen en te houden onder druk. Er zijn ontwikkelingen gaande om industriële elektrolyzers ook waterstof op druk te laten produceren, zodat de standaard in de toekomst zal liggen rond de 30 bar.

### 6.3.2 PEM elektrolyser

De PEM elektrolyser gebruikt een zogenaamd *Proton Exchange Membrane*. Dit is een vast membraan dat  $H^+$  (protonen) doorlaat, maar niet de geproduceerde gassen of water. Deze waterstof is al onder een druk van 10 bar – 50 bar (gemiddeld ~40 bar). In de toekomst zal de standaard 50 bar worden.

De huidige efficiëntie van de PEM elektrolyser stack ligt rond de 73%, maar binnen een aantal jaren zal dit naar verwachting verbeterd worden naar rond de 85%. De efficiëntie van het volledige elektrolyser systeem (met alle *utilities*, erbij) ligt lager, zo rond de 60%, wat vergelijkbaar is met een alkaline elektrolyser.

### 6.3.3 Verschillen tussen Alkaline en PEM Elektrolyzers





	<b>Alkaline</b>	<b>PEM</b>
Operationele temperatuur	70°C – 90°C	60°C – 80°C
Aankoopprijs	€	€€€
Materiaalkosten	€	€€€
Stack efficiëntie	80%	73% → 80+ %
Flexibiliteit (ten opzichte van stroomtoevoer)	-	+
Stack size	Groter	Kleiner
Druk geproduceerd H <sub>2</sub>	Atmosferisch	30 bar
Energietoevoer	Lage stroomdichtheid	Grote stroomdichtheid
Puurheid demiwater benodigd	5 µS/cm	<1 µS/cm
Puurheid geproduceerd H <sub>2</sub>	-	+
Minimale systeembelasting	15%	5% – 10 %, maximaal 120% (voor een korte tijd)
Operationele kosten	+	-

De verschillen in operationele inzetbaarheid tussen de alkaline en PEM elektrolyser worden steeds kleiner. Zo zijn er recente ontwikkelingen waardoor de alkaline elektrolyser veel beter tegen fluctuerende stroomtoevoer kan en de alkaline elektrolyser ook waterstof op druk kan produceren. Wel is het zo dat waterstof geproduceerd door middel van PEM elektrolyse geen nabehandeling behoeft (zoals filtering) voor de toepassing in brandstofcellen. Dit in tegenstelling tot waterstof geproduceerd door middel van alkaline elektrolyse.

#### **Wat betekent dit voor de bouw?**

*De kans dat er zelf waterstof geproduceerd gaat worden op bouwlocaties is klein. Wanneer dat wel gebeurt zullen de kosten en baten goed afgewogen moeten worden, afhankelijk van de inzet van waterstof. Groene waterstof is duidelijk de meest duurzame optie om voor te kiezen, maar helaas ook nog de duurste.*

### **6.3.4 Andere elektrolyzers**

#### **Anion exchange membrane (AEM) elektrolyser**

Deze elektrolyser bevindt zich in de laatste ontwikkelingsstadia en heeft zich daardoor nog niet grootschalig op de markt kunnen vestigen. De AEM elektrolyser combineert de voordelen van de PEM en alkaline elektrolyser, door geen dure materialen te gebruiken voor de katalysatoren en door de hoge efficiëntie. AEM is makkelijk te combineren als stack tot het gewenste vermogen van kW tot MW. Ook tolereert de AEM gewoon kraanwater voor de elektrolyse (in plaats van gedemineraliseerd water) en is hij weinig gevoelig voor CO<sub>2</sub>. Doordat de basische oplossing iets verdund is ten opzichte van de alkaline elektrolyser is hij iets veiliger. De verwachting is dat de AEM zich als sterke marktpeler zal ontwikkelen.

#### **Solid Oxide Elektrolyser (SOE)**

SOE is nog in een vergevorderd R&D stadium (TRL 6) en nog niet commercieel beschikbaar. Het betreft in grote lijnen de SOFC (bij de paragraaf 'Andere brandstofcellen' omschreven) maar dan omgekeerd ingezet. Er wordt een solid oxide (keramiek) als elektrolyt gebruikt. Hij heeft hoge operationele temperaturen, tussen de 500°C – 850°C. Water wordt toegevoegd in de vorm van stoom. Door de hoge temperaturen kent het proces een hoge efficiëntie.

Hieronder staat een samenvatting van een aantal eigenschappen van de beschreven elektrolyzers.

	Temperature °C	Electrolyte	Plant size		Efficiency	Purity H <sub>2</sub>	System costs	Lifespan	Maturity level
Alkaline Electrolysis (AE)	60 - 80	Potassium-hydroxid	0.25 - 760 Nm <sup>3</sup> H <sub>2</sub> /h	1.8 - 5,300 kW	65 - 82%	99.5% - 99.9998%	1,000 - 1,200 €/kW	60,000 - 90,000 h	Commercially used in industry for the last 100 years
Proton Exchange Membrane Electrolysis (PEM)	60 - 80	Solid state membrane	0.01 - 240 Nm <sup>3</sup> H <sub>2</sub> /h	0.2 - 1,150 kW	65 - 78%	99.9% - 99.9999%	1,900 - 2,300 €/kW	20,000 - 60,000 h	Commercially used for medium and small applications (<300 kW)
Anion Exchange Membrane Electrolysis (AEM)	60 - 80	Polymer membrane	0.1 - 1 Nm <sup>3</sup> H <sub>2</sub> /h	0.7 - 4.5 kW	N/A	99.4%	N/A	N/A	Commercially available for limited applications
Solid Oxide Electrolysis (SOE)	700 - 900	Oxide ceramic	Until now at experimental stage in laboratories		85% (lab)	N/A	N/A	approx 1,000 h	Experimental stage

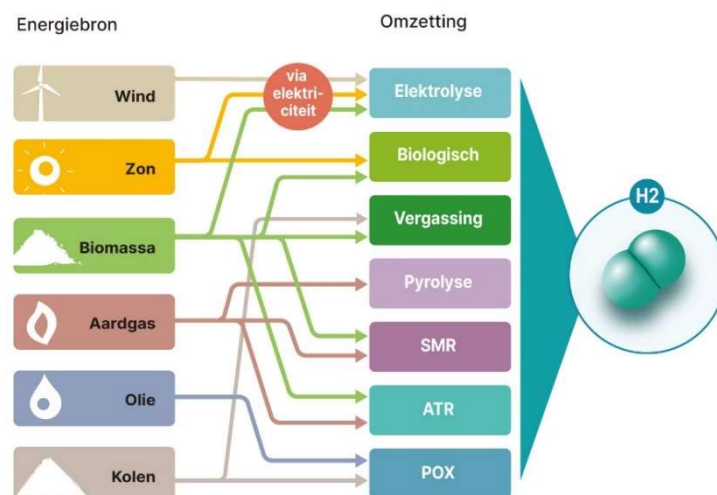
E4tech 2014; IEA 2015b; own diagram

### 6.3.5 Andere methoden om waterstof te produceren

Er zijn nog andere methoden om waterstof te produceren. De 'kleur' van deze soorten waterstof is discutabel, gezien er bij sommige productiewijzen wel CO<sub>2</sub> vrijkomt, maar het maken van waterstof is hierbij niet het hoofddoel. Ook kan de CO<sub>2</sub> van productie eerst uit de lucht gefilterd worden.

Een voorbeeld hiervan is de waterstof die bij chemische processen als restproduct wordt geproduceerd, maar wel wordt opgevangen om vervolgens ingezet te worden als energievoorziening door middel van een brandstofcel. Het doel van deze processen is niet het produceren van waterstof, maar als waterstof een bijproduct is, gaat het in ieder geval niet verloren.

Ook is het mogelijk om waterstof te maken via de biochemische of thermochemische omzetting van biomassa. Dit bestaat echter alleen nog in laboratoriumomstandigheden. De verwachting is dat thermochemische omzetting in de toekomst wel een prominere rol kan gaan spelen.



**Wat betekent dit voor de bouw?**

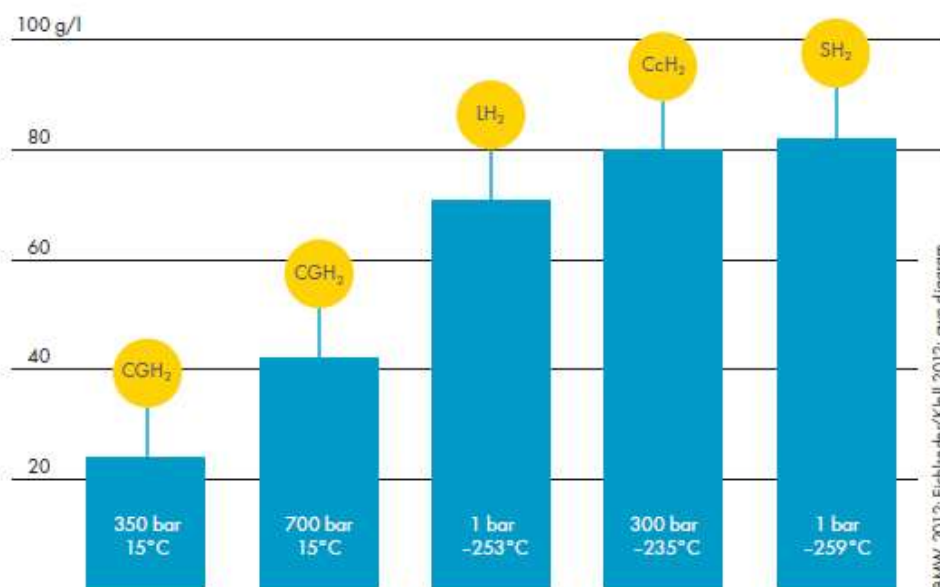
Doordat er veel onderzoek en ontwikkeling plaatsvindt op het gebied van nieuwe productiemethodes volgen de ontwikkelingen elkaar snel op. Wanneer de schaalgrootte toeneemt en er andere productiemethodes, zoals AEM, beschikbaar komen, zal de prijs per kg waterstof ook dalen bij gelijkblijvende elektriciteitsprijzen.

Grijze en (in mindere mate) blauwe waterstof gaan daarmee ook een minder belangrijke rol spelen. Wanneer het mogelijk is om te investeren in groene waterstof is het aan te raden dit te doen, omdat daarmee de ontwikkeling ook gestimuleerd wordt. Hierdoor kan er dan een versnelling van de toepassingsmogelijkheden op de bouwplaats plaatsvinden.

## 7 Opslag

Waterstof heeft een erg lage energiedichtheid van 0,011 MJ/l bij atmosferische druk en kamertemperatuur. De energiedichtheid van diesel is vele malen hoger: bijna 36 MJ/l. Dit is een probleem bij het gebruik van H<sub>2</sub> als energievoorziening voor bijvoorbeeld bouwmachines. Het betekent dat er een heel groot volume aan waterstof nodig is om een vergelijkbare hoeveelheid energie als een liter diesel te leveren. Zo'n groot volume is in de praktijk niet beschikbaar. Om toch genoeg waterstof op een bruikbare manier op te slaan, moet het eerst bewerkt worden.

Het bewerken van waterstof heeft als doel om de energiedichtheid te vergroten en daardoor het opslagvolume te verkleinen. Dit kan onder andere door de waterstof te comprimeren (samendrukken), door het te koelen (eventueel totdat het vloeibaar wordt) of door het in andere materialen op te slaan. Deze bewerkingen kosten echter wel weer extra energie.



### 7.1 Compressed waterstof (CH<sub>2</sub>) 350 bar

De energiedichtheid van waterstof op deze druk is ~3 MJ/l. Dit is de standaard druk waarop waterstof nu in bijvoorbeeld autobussen wordt opgeslagen. Bussen hebben flink meer ruimte voor brandstof dan personenauto's, waardoor het niet essentieel is dat de energiedichtheid heel hoog is.

### 7.2 Compressed waterstof (CH<sub>2</sub>) 700 bar

De energiedichtheid van waterstof op deze druk is ~5 MJ/l. Dit is de standaard druk waarop waterstof nu in bijvoorbeeld personenauto's wordt opgeslagen. De actieradius van een gemiddelde waterstofauto is ongeveer 500 km. Dit is vergelijkbaar met benzineauto's. Door het comprimeren gaat er 10% à 15% van de energie verloren. Het precieze percentage is afhankelijk van de gewenste druk en efficiëntie van de gebruikte compressor.

Waterstof heeft de eigenschap dat wanneer het uitzet (van bijvoorbeeld 700 bar naar de atmosferische druk van 1 bar) het opwarmt. Om deze opwarming tegen te gaan wordt de waterstof soms ook nog gekoeld.

Gecomprimeerde waterstof kan worden opgeslagen in flessen (cilinders), met een gemiddelde inhoud van ~150 liter. Deze flessen worden dikwijls gebundeld in 'kaders' of 'secties', dit zijn vaak bundels van 12 flessen. Een andere opslagmogelijkheid voor samengedrukte waterstof zijn 'tubes'. De inhoud van één tube is zo'n 1.500 liter. Op een zogeheten tube trailer kunnen typisch 10 tubes geladen worden. Meer informatie hierover is opgenomen in de sectie 'Transport'.

### 7.3 Vloeibare waterstof (LH<sub>2</sub>)

Om waterstof vloeibaar te maken moet het zeer koud zijn, namelijk -253°C. Het kost behoorlijk wat energie (40% van het geheel) om waterstof tot deze temperatuur te koelen. De energiedichtheid van vloeibare waterstof is wel redelijk hoog: 8,5 MJ/l, alleen is dit nog steeds een veel lagere energiedichtheid dan bijvoorbeeld LPG of LNG (respectievelijk 25,3 MJ/l en 21 MJ/l). Een ander nadeel van vloeibare waterstof is dat het een complexe technische installatie nodig heeft (voor het koelen en gekoeld houden). Wel is vloeibare waterstof ontzettend puur, doordat het vriespunt van de meeste soorten vervuilingen vele malen lager ligt dan het kookpunt van waterstof.

Vloeibare waterstof wordt normaliter opgeslagen in een tank. Deze tanks hebben gemiddeld volumes tot een paar duizend liter, maar de allergrootste tanks kunnen een inhoud hebben van een paar honderdduizend liter. Voor de opslag van vloeibare waterstof wordt gebruik gemaakt van dewarvaten.



Vloeibare waterstof wordt op dit moment voornamelijk in de ruimtevaart en enkele industriële processen toegepast.

### 7.4 Mierenzuur (Hydrozine)

Mierenzuur wordt geproduceerd door CO<sub>2</sub> en H<sub>2</sub> te binden. Daarbij wordt veel elektriciteit gebruikt. Met behulp van een katalysator kan de binding weer omgekeerd worden naar CO<sub>2</sub> en H<sub>2</sub>. De hele cyclus is daarmee CO<sub>2</sub>-neutraal.

Mierenzuur is ontvlambaar, maar niet brandbaar of explosief, waardoor het een relatief veilig goedje is om mee te werken. Hierdoor zijn er ook geen limieten in hoeveelheid die je op een

locatie mag opslaan. Een ander voordeel van mierenzuur is dat het makkelijk inpasbaar is in de huidige infrastructuur. De bestaande leidingen en tankstations van fossiele brandstoffen zijn goed te gebruiken voor mierenzuur. Er hoeft alleen een beschermende coating aangebracht te worden. Een nadeel is dat het wel corrosief is (wanneer het verdund is met water); het is namelijk erg zuur. Dit betekent dat het andere materialen makkelijk beschadigt.

De energiedichtheid van mierenzuur is in vergelijking met andere vloeibare brandstoffen wederom laag. De dichtheid is 6,750 MJ/l (de energiedichtheid van diesel is bijna zes keer zo hoog). Dit is wel hoger dan de energiedichtheid van een accu. Het is lastig om mierenzuur op grote schaal op een efficiënte en duurzame manier te produceren. Ook is de levensduur van de meest efficiënte katalysatoren nog niet lang. De efficiëntie van de omzetting van elektriciteit naar mierenzuur is ongeveer 45%.

### Overzicht van brandstoffen

Brandstof	Energie-inhoud per liter
Diesel	36,00 MJ/l
Waterstof onbewerkt	0,011 MJ/l
Compressed waterstof (CH <sub>2</sub> ) 350 bar	2,90 MJ/l
Compressed waterstof (CH <sub>2</sub> ) 700 bar	4,80 MJ/l
Vloeibare waterstof (LH <sub>2</sub> )	8,50 MJ/l
Mierenzuur (Hydrozine)	6,75 MJ/l

#### **Wat betekent dit voor de bouw?**

*De vergelijking met diesel ziet er niet rooskleurig uit qua energie-inhoud, maar vanwege de klimaatproblematiek kunnen we constateren dat diesel als brandstof moet verdwijnen. Dat betekent dat er gekeken moet worden naar alternatieven, zoals waterstof. Welke opslagvorm dan het meest geschikt is voor de bouw verschilt per toepassing. Hoe hoger de energiedichtheid, hoe hoger de kosten, maar ook hoe langer er doorgewerkt kan worden na een vulbeurt en hoe minder transportbewegingen nodig zijn. Alle opslagvormen, behalve onbewerkte waterstof, zullen een plek krijgen op de bouw. Welke wanneer ingezet wordt verschilt per situatie.*

## 7.5 Ondergrondse opslag

Als waterstof voor een langere tijd voor bijvoorbeeld de industrie wordt opgeslagen dan zijn er ook andere opties. Men kan de waterstof dan bijvoorbeeld opslaan in zoutcavernes. Deze cavernes worden speciaal voor de opslag van waterstof gemaakt. Ook deze vorm van waterstofopslag is onder druk. De testen voor de opslag bij Hystock, Zuidwending zijn succesvol afgerond tot een druk van 200 bar. Ook zijn lege olie- en gasvelden mogelijk een goede optie. Hier wordt nog onderzoek naar gedaan, gezien het een probleem zou kunnen zijn dat de waterstof in deze lege velden mogelijk reageert met de resten van fossiele brandstoffen, waardoor er andere producten worden gevormd. Het is dus niet zeker of alle waterstof die in het veld opgeslagen wordt er ook weer als waterstof wordt uitgehaald. De ondergrondse opslagmogelijkheden kunnen enorme volumes bevatten. Ook zijn deze velden van nature lekdicht. Deze manier van het opslaan van waterstof heeft veel potentie voor de toekomst.

## 7.6 Andere ontwikkelingen

Er wordt veel onderzoek gedaan naar andere manieren om waterstof op te slaan. De volgende methoden zijn echter nog niet klaar om in gebruik te worden genomen.

### **Cold/Cryocompressed H<sub>2</sub>**

Deze methode combineert in zekere zin de technieken van vloeibare waterstof en gecompriëerde waterstof. Er wordt simpelweg een beetje van beide gedaan. De waterstof

wordt op een druk van 300 bar gebracht en gekoeld tot  $-235^{\circ}\text{C}$ . Waterstof in deze staat is nog wel gasvormig.

### **Slush $\text{H}_2$**

Slush waterstof wordt gemaakt van vloeibare waterstof. Hierbij wordt de vloeibare waterstof nog verder gekoeld tot het vriespunt. Zo ontstaat er, voordat het een volledig vaste substantie wordt, een combinatie van vloeibare en vaste stukjes. Een soort gel. De energiedichtheid hiervan is 16% hoger dan van vloeibare waterstof. Het kost wel veel energie om deze fase toestand te bereiken.

### **Methanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ )**

Een alternatief voor mierenzuur is de waterstofopslag in methanol. Methanol heeft een verdubbelde energiedichtheid vergeleken met mierenzuur. Deze methanol kan als een  $\text{CO}_2$ -neutrale energievoorziening gebruikt worden, om dezelfde redenen als het gebruik van mierenzuur  $\text{CO}_2$ -neutraal is. Nadelen ten opzichte van mierenzuur zijn dat methanol wel brandbaar en giftig is. Een voordeel is dat methanol niet corrosief is.

### **Ammoniak ( $\text{NH}_3$ )**

Waterstof kan ook opgeslagen worden in ammoniak. De geproduceerde waterstof kan onder druk reageren met de stikstof uit de lucht, om zo ammoniak te vormen. De energiedichtheid van ammoniak is redelijk hoog, ongeveer 60% van dat van diesel. Wanneer ammoniak onder de juiste omstandigheden wordt verbrand (met niet te veel zuurstof en de juiste katalysatoren), komen er alleen stikstof en water vrij. Dit proces is dus  $\text{CO}_2$ -neutraal. Ammoniak is een giftig en brandbaar gas.

Naast methanol en ammoniak zijn er ook nog andere *Liquid Organic Hydrogen Carriers* (LOHC's) en worden er *Solid Organic Hydrogen Carriers* (SOHC's) ontwikkeld zoals natriumbooroxide.

## 8 Transport

Voor transport gelden andere limieten dan voor de algemene opslag van waterstof. Deze limieten hebben o.a. betrekking op de gewenste temperatuur, druk en hoeveelheid. Om genoeg energie per keer te kunnen verplaatsen moet de waterstof altijd bewerkt (gekoeld of gecomprimeerd) zijn. Waterstoftransport over de weg moet voldoen aan de ADR (overeenkomst voor het transport van gevaarlijke goederen over de weg).

### 8.1 Tube trailers

Waterstof wordt vaak vervoerd via een zogenaamde tube trailer. Hierin kunnen kleine tot gemiddelde hoeveelheden waterstofgas samengeperst worden tot 200 bar of 300 bar in bundels van tubes. Deze drukken zijn de huidige standaard in de markt. Bij 200 bar kan er 15.6 kg H<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> vervoerd worden. Deze buizen zijn vaak gemaakt van staal en hierdoor dus zwaar. Tube trailers kunnen zo'n 500 kg waterstof vervoeren, verdeeld over 10 tubes.



### 8.2 Vervoer door flessen

Als men van flessen gebruik maakt om waterstof te vervoeren zijn er twee verschillende opties. Als traditioneel gasvervoer kunnen de flessen in rekken op trailers geladen worden, net zoals met andere gassen gebeurt. Zo kunnen de rekken op locatie afgeladen worden en bij de klant neergezet.

Een andere optie is een container met vaste flessen op een trailer. Deze flessen zitten gemonteerd in de container. Het materiaal van deze flessen kan verschillen. Ze kunnen net zoals de tubes en traditionele flessen van staal zijn, maar er worden ook lichtere varianten ontwikkeld. Door lichtere materialen voor de flessen te gebruiken kan er meer waterstof per trailer vervoerd worden (dit heeft te maken met massarestricties van de vrachtwagens).

Op een vrachtwagen van 40 ft kan bij gebruik van de lichtst beschikbare geïntegreerde flessen zo'n 900 kg waterstof vervoerd worden. Dit is momenteel het maximum aan waterstof wat er in de praktijk in gasvorm per trailer getransporteerd wordt. Vaak wordt er echter minder



vervoerd. Dit hangt af van de gebruikte materialen, de grootte van de vrachtwagen en de kosten die men bereid is te maken.

In de toekomst kan waterstof ook op een druk van 500 bar vervoerd worden. Op deze druk heeft waterstof een dichtheid van 33 kg H<sub>2</sub> /m<sup>3</sup>. In theorie zou dan meer dan 1.100 kg H<sub>2</sub> per trailer verplaatst kunnen worden. Dit staat gelijk aan ~12.000 m<sup>3</sup> H<sub>2</sub> bij atmosferische druk. Momenteel is deze optie echter nog dusdanig duur dat deze optie nog niet in gebruik is.

### 8.3 Vloeibaar transport

Doordat de dichtheid van vloeibare waterstof veel hoger is dan van waterstof in gasvorm, kan er veel meer energie worden vervoerd in een vloeibare waterstof trailer. Hierbij wordt een tank voor vloeibare waterstof op een vrachtwagen geladen. De dichtheid van vloeibare waterstof is 71 kg H<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>. In een vrachtwagen kan ongeveer 3.500 kg vloeibare waterstof vervoerd worden in een volume van 50 m<sup>3</sup>. Dit staat gelijk aan 40.000 m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>.

Over lange afstanden is het vaak voordelig om waterstof in vloeibare vorm te vervoeren, omdat er een significant grotere hoeveelheid meegenomen kan worden in deze vorm. Over korte afstanden is het daarentegen meestal te duur om waterstof vloeibaar te maken en kan het beter in gasvorm verplaatst worden. Wel ligt dit aan de situatie: op moeilijk bereikbare plekken (zoals bouwplaatsen) kan het voordeliger en logistiek simpelweg eenvoudiger zijn om waterstof in vloeibare vorm naar locatie te brengen. Dit omdat er dan bijvoorbeeld maar één trailer hoeft te rijden in plaats van meerdere.

Het is ook mogelijk om (vloeibare) waterstof via schepen of treinen te transporteren.

### 8.4 Pijpleidingen

Voor een uitgekristalliseerd stabiel waterstofnetwerk zijn pijpleidingen de beste optie wat betreft het transport van H<sub>2</sub>. De waterstof in pijpleidingen van een regionaal netwerk zal onder een voorziene druk van 6 bar – 9 bar gehouden worden; in het landelijke net op een druk van 30 bar – 50 bar. Omdat Nederland al een uitgebreid gasnetwerk heeft, hoeven er maar relatief weinig initiële kosten gemaakt te worden. Er moet rekening worden gehouden met de specifieke eigenschappen van waterstof in combinatie met de leidingen, maar dat lijkt geen grote problemen op te gaan leveren. Voor nieuwe leidingen zijn de investeringskosten wel relatief groot. Zo'n leidingnetwerk kan alleen rendabel worden wanneer er grote hoeveelheden waterstof doorheen gaan. Toch zijn de kosten voor een gasleidingnetwerk een stuk lager per hoeveelheid energie die verplaatst kan worden dan voor bijvoorbeeld kabels om diezelfde hoeveelheid energie in de vorm van elektriciteit te verplaatsen.

#### BritNed Interconnector



#### Bacton-Balgzand Gas Pipeline



Length	260 km
Investment	600 MEUR
Capacity	1 GW
Specific investment	€ 230 per kW/100 km

Length	230 km
Investment	600 MEUR
Capacity	20 GW capacity
Specific investment	11 EUR per kW/100 km

Een mogelijk gebruik van waterstof is ook om het toe te voegen aan het bestaande aardgasnetwerk (bijmengen). In Duitsland is het bijvoorbeeld voor het pijpleidingnetwerk goedgekeurd om het aardgas met 10% waterstof te verrijken zonder dat dit negatieve impact heeft. In Nederland zijn er testen uitgevoerd met 15% waterstof.

Ook zou het leidingnetwerk als alternatieve opslag kunnen bieden. Het zou dan tijdelijk gemixt kunnen worden met het aardgas en op een later moment weer teruggewonnen worden. Wel

kost dit in alle gevallen weer extra energie en investeringen in technische installaties om de waterstof weer te scheiden van het aardgas.

**Wat betekent dit voor de bouw?**

*In principe zijn alle bovengenoemde transportmogelijkheden geschikt om waterstof op de bouwplaatsen te krijgen. Welke optie wanneer het meest geschikt is, is wederom van veel factoren afhankelijk. De benodigde druk en vorm, de afstand van productielocatie naar de bouwplaats en hoe bereikbaar de bouwplaats is, speelt allemaal mee in welke optie het meest rendabel is.*

## 9 Tanken

Het uitgangspunt van werken met bouwmaterieel op waterstof is dat er maximaal één keer per dag getankt hoeft te worden. Dit is wel afhankelijk van de gevraagde hoeveelheid energie en de grootte van de waterstoftank. Mocht de gevraagde energie de opslagcapaciteit overschrijden, kan het voorkomen dat er vaker op een dag getankt moet worden.



Om waterstof te tanken zijn verschillende componenten nodig. De eerste omvat opslagtanks, die waterstof ter plekke opslaan en in verhouding staan met de vraag naar waterstof op die locatie. De waterstof wordt op locatie bewaard onder een (lage) druk van tussen de 20 bar – 200 bar. Voordat het getankt wordt, wordt het onder gemiddelde of hoge druk opgeslagen. Deze druk is respectievelijk tussen de 200 bar – 450 bar en 800 bar – 1.000 bar. Deze overdruk is nodig om de waterstof daadwerkelijk te tanken. Het tanken mag ook niet te lang duren. Daarom is de druk flink wat hoger dan in het voertuig. Daarom zijn er ook compressoren nodig bij een waterstoftankstation. Deze compressoren verbruiken veel elektriciteit. Afhankelijk van de tanksnelheid moet de waterstof voor het tanken gekoeld worden. Dit komt doordat waterstof uitzet bij het tanken en hierdoor opwarmt. Het koelen voorkomt dat de temperatuur in de tank van het voertuig te hoog wordt.

Als men gecomprimeerde waterstof op de bouwplaats wil tanken, is er een elektrische netaansluiting nodig met voldoende capaciteit. De compressoren en eventuele koeling verbruiken veel stroom. Is er geen of niet voldoende elektriciteit beschikbaar op een bouwplaats dan kan als alternatief vloeibare waterstof overwogen worden, omdat deze niet meer gecomprimeerd hoeft te worden.

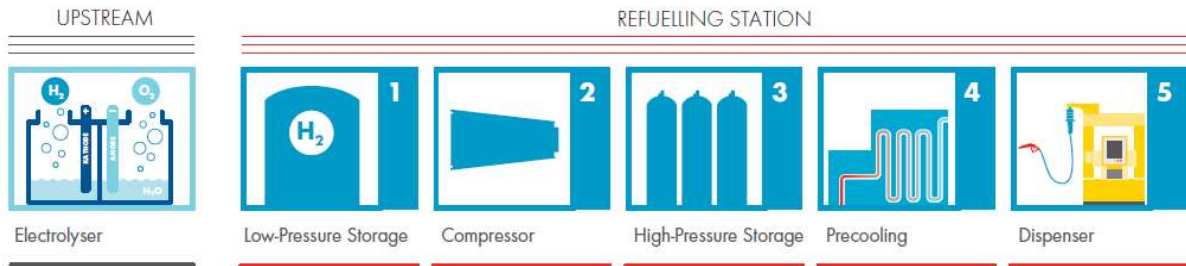
Als het tankstation waterstof in vloeibare vorm opslaat, hoeft het niet gekoeld te worden voor het tanken. Het hoeft ook niet gecomprimeerd te worden als het voertuig de waterstof in vloeibare vorm kan opslaan. Het wordt dan verdampt in het voertuig en meteen aan de brandstofcel gevoed. Een andere optie is om de vloeibare waterstof te verdampen voordat het getankt wordt. Dan moet het nog wel gecomprimeerd worden voordat het daadwerkelijk in het voertuig kan worden getankt.

Goede isolatie is erg belangrijk in het geval van vloeibare waterstof. De vloeibare waterstof wordt door middel van vacuïmisolatie koud gehouden. De uitdaging van vloeibare waterstof

is zo'n klein mogelijke *boil-off* (het verdampen van vloeibare waterstof) te hebben. Hierdoor is het van belang dat er veel waterstof wordt gebruikt op de bouwplaats, zodat er relatief weinig verdampt en verdwijnt. Idealiter wordt er eens per week vloeibare waterstof aangeleverd; zoveel moet er dan dus ook verbruikt worden.

De laatste benodigde component is de pomp die de waterstof daadwerkelijk in het voertuig laadt. Deze zijn ontworpen voor drukken van 350 bar of 700 bar.

Doordat de brandstofcellen een hoge puurheid waterstof nodig hebben is het van groot belang dat elk onderdeel van het tankstation volledig lekdicht is, zodat het pure gas niet vervuild kan worden.



Op dit moment is er nog geen commerciële tankinrichting om vloeibare waterstof te tanken in de mobiliteitssector. Deze wordt momenteel wel ontwikkeld door de combinatie Linde en Daimler. De technologie die ze ontwikkelen heet 'subcooled' liquid hydrogen en zal gebruik maken van een hogere omgevingsdruk en een speciale temperatuurregeling om te tanken. Ook TotalEnergies houdt zich bezig de ontwikkeling van een tankvoorziening voor vloeibare waterstof.

Er is ook een mobiel waterstoftankstation ontwikkeld. Deze zou op de bouwlocatie neergezet kunnen worden. Dit station is 6 meter bij 4 meter groot. De waterstof wordt buiten het station bewaard in cilinders (flessen op rekken). De waterstof wordt in het tankstation gecomprimeerd naar 450 bar en opgeslagen tot het getankt moet worden.



Om te mogen tanken bij een openbaar tankstation heeft het voertuig een kenteken nodig. Zwaar bouw materieel heeft dit vaak niet, waardoor tanken bij een tankstation verboden is.

Deze voertuigen worden vaak op locatie met een alternatieve tankfaciliteit van brandstof voorzien. Ook is er de mogelijkheid voor een kleinschalige test-tankopstelling waar cilinders met flinke overdruk worden geplaatst en er een enkele machine van kleine hoeveelheden waterstof op relatief lage druk voorzien kan worden. Het doel van deze opstelling is het testen of de machines op waterstof goed werken. Bij alle tankvoorzieningen is het van belang te voldoen aan de *Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen 35* (PGS 35).

**Wat betekent dit voor de bouw?**

*Het inpassen van een tankvoorziening op de bouwplaats kent de nodige uitdagingen. Wanneer er gebruik gemaakt wordt van een tankvoorziening met waterstof op druk zijn er veelal grote netaansluitingen nodig voor de compressoren en koeling; netaansluitingen die regelmatig lastig te verkrijgen zijn. Testopstellingen hebben dat probleem minder of niet, maar kunnen dan weer geen grote hoeveelheden en hoge tanksnelheden aan. Vloeibare waterstof is kansrijk, maar nog niet ver genoeg uitgekristalliseerd om al grootschalig toegepast te worden. Ook vergunningsverleners weten nog niet goed hoe om te gaan met tankvoorzieningen voor waterstof op de bouwplaats. Het is dan ook van belang hen vroegtijdig te betrekken om dit proces zoveel mogelijk te stroomlijnen.*

## 10 Gebruik

Het gebruik van waterstof als energiedrager kan op verschillende manieren. Waterstof kan verbrand worden in een verbrandingsmotor, maar ook toegepast worden in een brandstofcel.

### 10.1 Waterstof als brandstof

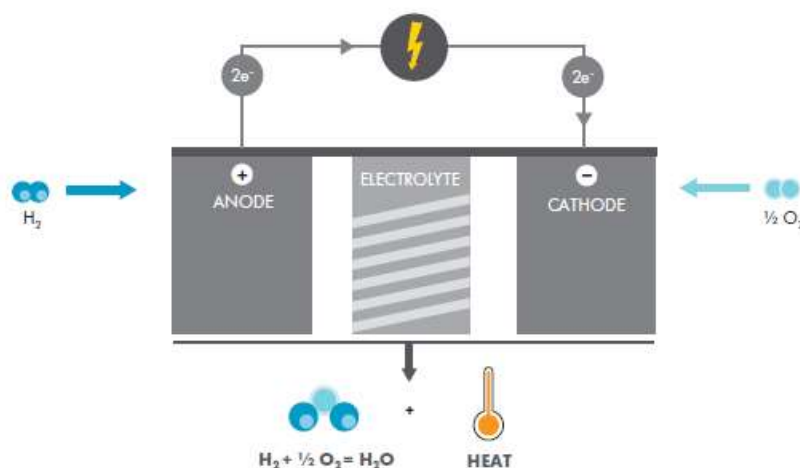
Wanneer waterstof gebruikt wordt als brandstof, kunnen er zeer hoge temperaturen bereikt worden. Deze kunnen oplopen tot tussen de 2.000°C – 3.000°C. Het probleem is dat als er bij dit proces zuurstof (O<sub>2</sub>) uit de lucht gebruikt wordt, dat er dan ook stikstofoxiden (NO<sub>x</sub>) worden geproduceerd. Gezien het huidige stikstofprobleem in Nederland is dit ongewenst en is het verbranden van waterstof dus geen wenselijke oplossing.

### 10.2 Toepassing in een brandstofcel

Een alternatieve manier om de energie van waterstof in te zetten is door middel van de brandstofcel. Een brandstofcel gebruikt waterstof in gasvorm en hierbij ontstaat elektriciteit. Bij deze methode worden er geen broeikasgassen, stikstofoxiden of fijnstof uitgestoten. Deze reactie vindt namelijk plaats bij temperaturen tussen de 60°C en 1.000°C (stikstofoxiden ontstaan bij temperaturen van boven de 1.500°C). Deze grote spreiding in operationele temperaturen wordt bepaald door het type brandstofcel dat gebruikt wordt. De enige reactieproducten van deze methode zijn water en (rest)warmte, welke eventueel ook nog nuttig ingezet kunnen worden, zoals voor het verwarmen van de cabine. Deze reactieproducten zijn allebei niet schadelijk voor het klimaat of de omgeving. Dit is dus dé duurzame manier om waterstof toe te passen, en dus de manier van toepassen waarover het meest gesproken wordt. Wel is het goed om te realiseren dat een brandstofcel in een voertuig altijd gecombineerd wordt met een accu-pack en een elektromotor, waarbij waterstof de energiedrager is die via de brandstofcel de accu-pack laadt. De voertuigen zijn dus in feite elektrisch aangedreven. Elektromotoren (bouwmachines met een brandstofcel gebruiken immers ook een elektromotor) zijn veel energie-efficiënter dan verbrandingsmotoren. Dit betekent dat deze bouwmachines minder energie verbruiken voor dezelfde werkzaamheden. Een brandstofcel opereert niet goed bij grote verschillen in vermogensvraag, terwijl een accu daar minder moeite mee heeft.

De brandstofcel kan gezien worden als omgekeerde elektrolyse. Er wordt elektriciteit opgewekt in plaats van verbruikt, door het combineren van waterstof en zuurstof tot water.

Het principe van de brandstofcel is uitgebeeld in de afbeelding hieronder.



In de praktijk worden er meerdere cellen zoals hierboven in serie geschakeld. Zo ontstaat er een stack met een veel groter vermogen.

Nadelen van het toepassen van waterstof zijn onder andere dat de brandstofcellen nog erg duur zijn en dat het tanken van waterstof momenteel nog maar op weinig plaatsen kan. Ook is het rendement van een brandstofcel lager dan van een batterij-elektrisch aangedreven voertuig.

Net als dat er verschillende soorten elektrolyzers zijn, zijn er ook verschillende soorten brandstofcellen. Ook deze verschillen van elkaar door de soort elektrolyt en membraan waarvan gebruik gemaakt wordt. In het algemeen geldt: hoe lager de temperatuur van operatie, hoe hoger de zuiverheid van de gebruikte waterstof moet zijn. Voor de meeste brandstofcellen is de benodigde zuiverheid meer dan 99.97%. Meer details voor de gewenste zuiverheid voor de PEM-brandstofcellen is te vinden in de norm ISO 17124.

Aan waterstof wordt geen geurstof toegevoegd, ondanks dat het van zichzelf een gevaarlijk geurloos gas is. De reden hiervoor is dat brandstofcellen een dusdanig hoge zuiverheid vereisen dat geurstoffen een te grote vervuiling zijn. Wanneer waterstof voor een bepaalde toepassing verbrand wordt, zou dit wel kunnen.

### 10.2.1 Proton exchange membrane brandstofcel (PEMFC)

De PEMFC opereert bij temperaturen van ongeveer 80°C. De PEMFC heeft momenteel een vermogensrange van grofweg 500 W – 400 kW) en een relatief klein formaat. Ook kan de PEMFC makkelijk op- en afgeschakeld worden. Dit zorgt ervoor dat deze brandstofcel goed past binnen de mobiliteitssector. De efficiëntie van de PEMFC is ongeveer 40%.

De katalysator in de PEMFC is gemaakt van platina, wat een duur en schaars materiaal is. Hierdoor zijn de investeringskosten vrij hoog. Deze brandstofcel is de huidige marktleider.

Er is momenteel klein materieel beschikbaar dat waterstof via de PEMFC gebruikt, zoals heftrucks. Ook zijn de eerste (pilot) graafmachines op waterstof in gebruik en zullen er vanaf 2022 meer volgen.

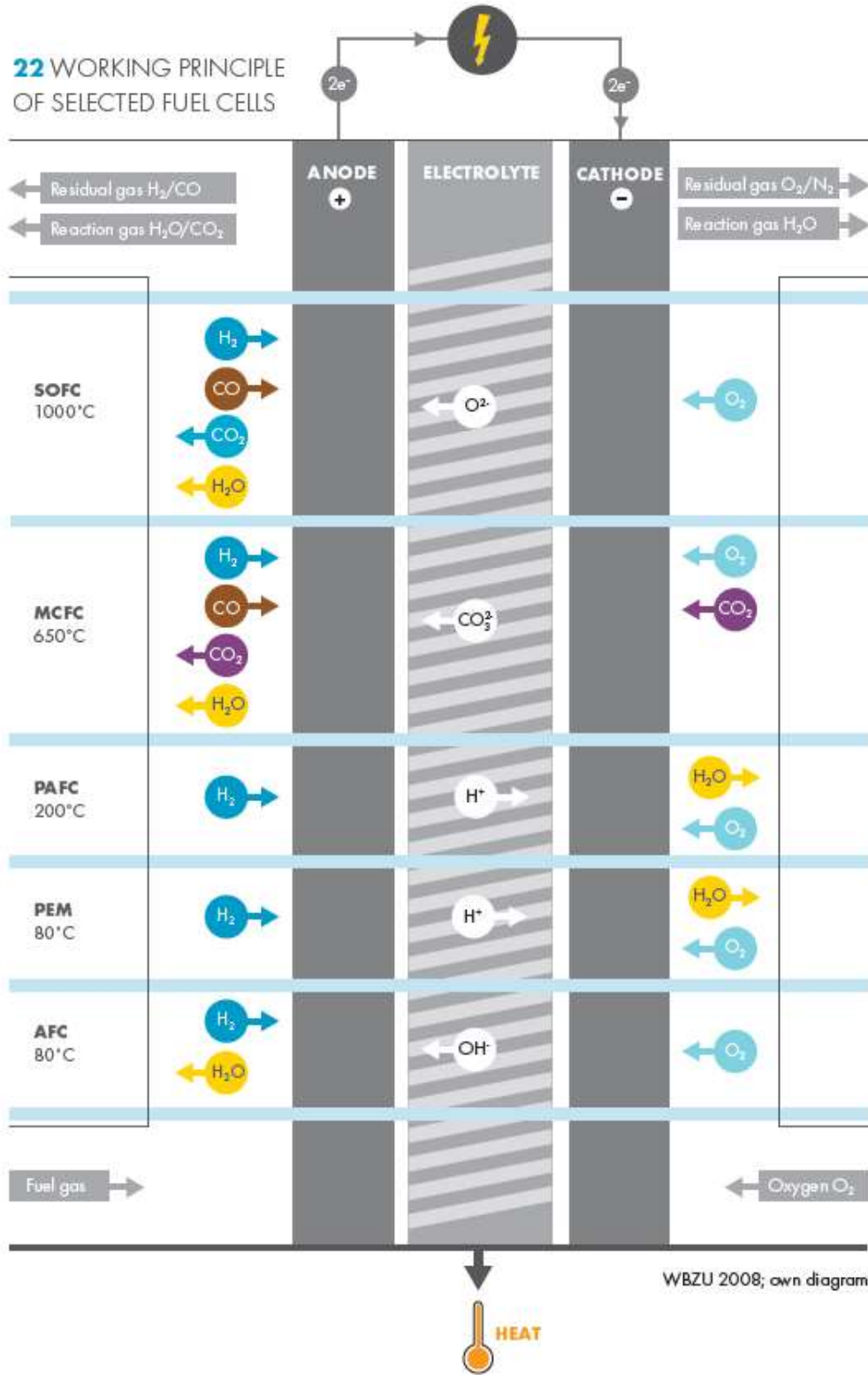
Bouwmaterieel op waterstof behoeft minder onderhoud dan dieselveertuigen (momenteel zo'n 10% minder). Dit komt doordat een brandstofcel veel minder bewegende onderdelen heeft dan een dieselmotor. De verwachting is dat dit verschil in de toekomst steeds groter zal worden. Kijk voor meer informatie ook eens naar de TCO-tool van ENI.

Over de betrouwbaarheid van bouwmaterieel op waterstof is momenteel nog veel onbekend. Gezien veel materieel nog in de ontwikkelfase zit, is het aannemelijk dat het op dit moment nog minder betrouwbaar is dan dieselmaterieel. De verwachting is echter wel dat in de nabije toekomst de betrouwbaarheid minstens vergelijkbaar zal zijn met diesel of batterij-elektrisch materieel.

### 10.2.2 Andere brandstofcellen

Een overzicht van de andere brandstofcellen staan samengevat in de volgende afbeelding en tabel. De Alkaline en Solid Oxide brandstofcel hebben zich al gevestigd op de markt, de andere zijn nog in de R&D fase of hebben maar een heel klein marktaandeel.

22 WORKING PRINCIPLE OF SELECTED FUEL CELLS





Fuel cell type	Temperature range °C	Electrolyte	Electrical performance	Fuel	Oxidant	Efficiency $\eta_{el}$ ( $H_2$ )	Investment costs USD/kW <sub>el</sub>	Life expectancy (h)	Market development	Application
<b>AFC</b>	60 - 90	Potassium hydroxide	Up to 250 kW	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> (pure)	50 - 60%	200 to 700	5,000 to 8,000	Established for decades, but limited to specialised applications	Space travel, submarines
<b>PEMFC</b>	50 - 90 (LT) up to 180 (HT)	Polymer membrane	From 500 W to 400 kW	H <sub>2</sub> , gas, syngas, biogas, methanol (external reforming)	O <sub>2</sub>	30 - 60% (depending on size and application)	3,000 to 4,000 (stationary) ~ 500 (mobile)	60,000 (stationary) 5,000 (mobile)	Early market / mature leading fuel cell type	Vehicle drivetrains, space travel, micro + block-type CHP, backup power
<b>PAFC</b>	160 - 220	Phosphoric acid	Up to several 10 MW	H <sub>2</sub> , gas, syngas, biogas, methanol (external reforming)	O <sub>2</sub>	30 - 40%	4,000 to 5,000	30,000 to 60,000	Mature (low volume)	Decentralised power generation, block-type CHP
<b>MCFC</b>	600 - 700	Carbonate melt	From a couple of 100 kW to several MW	H <sub>2</sub> , gas, syngas, biogas, methanol (internal reforming)	O <sub>2</sub>	55 - 60%	4,000 to 6,000	20,000 to 40,000	Early market / market introduction (especially for bigger plants)	Power plants (base load), CHP (process heat/ steam)
<b>SOFC</b>	700 - 1,000	Solid ceramic oxide	From a couple of kW to several MW	H <sub>2</sub> , gas, syngas, biogas, methanol (internal reforming)	O <sub>2</sub>	50 - 70%	3,000 to 4,000	up to 90,000	Mature (volumes rising)	Power plants, CHP (process heat/ steam), micro + block-type CHP

Wagner 1996; Drenkhahn/Hasmann 1993, updated with IEA 2015b; EA NRW 2017 ([www.brennstoffzelle-nrw.de](http://www.brennstoffzelle-nrw.de)) and own additions

## 11 Afsluiting

De ontwikkelingen op het gebied van waterstof volgen elkaar snel op. De mogelijkheden omtrent het gebruik van waterstof worden steeds grootschaliger, steeds efficiënter en steeds goedkoper. Daarmee wordt waterstof een steeds kansrijkere energievoorziening voor op de bouwplaats. De kanttekening lijkt te zijn dat het gebruik van waterstof alleen rendabel wordt wanneer het rechtstreeks gebruiken van elektriciteit niet mogelijk is. Dat is immers nog steeds de meest efficiënte manier van het gebruiken van onze (nu nog) schaarse hoeveelheid groene elektriciteit. De praktijk zal moeten uitwijzen of deze verwachting realiteit wordt.

De overheid trekt de komende jaren (tot 2030) 270 miljoen euro uit in de vorm van subsidies voor emissieloze bouwmachines (SEB). Ondernemers kunnen tot 40% van de meerkosten bij aanschaf terugkrijgen. Het kabinet wil MKB-bedrijven extra tegemoetkomen, zij kunnen daarom tot 50% subsidie krijgen. Investeren in machines op waterstof wordt daarmee een stuk aantrekkelijker. De boodschap is dan ook: doen!

Door deze eerste stap te zetten en machines op waterstof te ontwikkelen en in gebruik te nemen, doe je waardevolle ervaring op. Voor nu, én voor de toekomst. Hoe meer machines op waterstof er komen, hoe makkelijker en sneller de ontwikkelings- en vergunningsprocessen zullen worden doorlopen. Het is dan ook een kwestie van tijd voor bouwmachines op waterstof gemeengoed zijn.

Heb je na het lezen van het document nog vragen over waterstof, het gebruik ervan op de bouwplaats en/of op bouwmachines? Neem dan vooral contact op met Emissieloos Netwerk Infra en Summit Engineering. Wij helpen je graag.

## Appendix A: Technology Readiness Level (TRL)

De Technology Readiness Level oftewel *TRL* is een systeem om te toetsen in welke fase de ontwikkeling van een nieuwe technologie zit. Hierdoor wordt niet alleen inzichtelijk in welk stadium van ontwikkeling een technologie zich bevindt, maar kan ook een inschatting worden gemaakt over de vervolgstappen en de daaraan verbonden inspanningen. De TRL schaal loopt van 1 tot en met 9 met de volgende betekenis:

Ontdekkingsfase	TRL 1:	De basisprincipes zijn geobserveerd en gerapporteerd
	TRL 2:	Het technologisch concept en het mogelijke toepassingsgebied zijn geformuleerd
	TRL 3:	Het technologisch concept is experimenteel aangetoond ( <i>proof-of-concept</i> )
Ontwikkelingsfase	TRL 4:	Het <i>proof-of-concept</i> (prototype) wordt in laboratoriumomgeving getest
	TRL 5:	Het <i>proof-of-concept</i> (prototype) wordt in relevante omgeving getest
	TRL 6:	Een prototype presteert in relevante omgeving
Vertoningsfase	TRL 7:	Een prototype wordt getest in operationele omstandigheden
	TRL 8:	De technologie presteert in operationele omstandigheden
Uitvoeringsfase	TRL 9:	De technologie is technisch en commercieel gereed

## Bronnen van de afbeeldingen

De afbeeldingen zijn uit onderstaande bronnen.

Shell hydrogen study, Energy of the future?, 2017

<https://www.dewereldvanwaterstof.nl/gasunie/wat-is-waterstof/>

EDI, Waterstof Masterclass, 2021

<https://www.cummins.com/news/2020/11/16/electrolyzers-101-what-they-are-how-they-work-and-where-they-fit-green-economy>

[https://www.sintef.no/globalassets/project/hyper/presentations-day-2/day2\\_1105\\_decker\\_liquid-hydrogen-distribution-technology\\_linde.pdf](https://www.sintef.no/globalassets/project/hyper/presentations-day-2/day2_1105_decker_liquid-hydrogen-distribution-technology_linde.pdf)

<https://www.npex.nl/effectenbeurs/hygear/>

<https://www.mooinoord-holland.nl/mooinoord-holland-inzendingen/nxt-tankstation-boekelermeer-alkmaar/>

<https://www.waterstofnet.eu/nl/projecten/voertuigen>