

# Waterstof als brandstof voor voertuigen: aandachtspunten voor incidentbestrijding



Instituut Fysieke Veiligheid  
Postbus 7010  
6801 HA Arnhem  
Kemperbergerweg 783, Arnhem  
www.ifv.nl  
info@ifv.nl  
026 355 24 00

## Colofon

Instituut Fysieke Veiligheid (2018). *Waterstof als brandstof voor voertuigen: aandachtspunten voor incidentbestrijding*. Arnhem.

Titel:	Waterstof als brandstof voor voertuigen: aandachtspunten voor incidentbestrijding.
Datum:	12 juni 2018
Status:	Definitief
Versie:	1.0
Auteurs:	Régis Flohr en Nils Rosmuller
Foto voorblad	De eigenaar van deze foto is niet gevonden. Als de fotograaf ervan deze foto herkend, mag hij of zij zich bij ons melden
Projectleider:	Régis Flohr
Review:	Ricardo Weewer, Manon Oude Wolbers, Ruud Struijk, Jetty Middelkoop, Hans Spobeck
Eindverantwoordelijk:	Wim Beckmann

# Inhoud

	<b>Inleiding</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Waterstof: introductie</b>	<b>6</b>
1.1	Bronnen van waterstof	6
1.2	Opslag en transport van waterstof	7
1.3	Energieopwekking uit waterstof	7
1.4	Toename van waterstof als alternatieve brandstof	7
<b>2</b>	<b>Eigenschappen en gevaren van waterstof</b>	<b>11</b>
2.1	Gasvormig waterstof	11
2.2	Gasvormig waterstof onder hoge druk	12
<b>3</b>	<b>Aandachtspunten voor de brandweer</b>	<b>20</b>
3.1	Geen eenduidigheid	20
3.2	Achterhaalde aannames/technieken	21
<b>4</b>	<b>Conclusie en aanbevelingen</b>	<b>22</b>
	<b>Literatuur</b>	<b>25</b>
	<b>Bijlage 1: betrokken instanties rondom waterstof als brandstof</b>	<b>29</b>

# Inleiding

Vanwege het toenemend gebruik van waterstof (gasvormig onder hoge druk) als alternatieve brandstof voor voertuigen in Nederland, neemt de kans op incidenten waarbij waterstof betrokken is toe. Waterstof, en het gebruik als brandstof voor voertuigen, kent andere gevaarsaspecten dan (het gebruik van) traditionele brandstoffen als benzine en diesel. De hulpverleningsdiensten moeten zich mogelijk daarom anders voorbereiden op een inzet bij incidenten met waterstof. Het is van groot belang voor de publieke veiligheid en de veiligheid van de hulpverleners zelf, dat hulpdiensten kennis hebben van de gevaarsaspecten van waterstof en weten hoe op te treden, het liefst zo spoedig mogelijk. Het lectoraat Transportveiligheid van het IFV heeft daarom opdracht gegeven om een verkenning uit te voeren naar de gevaarsaspecten van waterstof en de inzetmogelijkheden bij waterstofincidenten.

## Doel

Het onderzoek heeft als doel de veiligheidsaspecten, met name gericht op incidentbestrijding, te verkennen rondom het gebruik van waterstof als brandstof in voertuigen. Op basis van die verkenning zullen aandachtspunten worden benoemd. De veiligheidsaspecten hebben betrekking op zowel eigenschappen van waterstof (al dan niet in toegepaste vorm) als handelingsperspectieven voor de brandweer. Deze publicatie kan fungeren als kennisdocument (anno 2018) voor hulpverleners. Het kan tevens dienen als signaal in het grotere geheel van de energietransitie waar Nederland voor staat: alternatieve energiebronnen vragen niet alleen om goed doordachte ontwerpen, maar even zo zeer om goed doordachte risicobeheersing en incidentbestrijding.

## Hoofdvraag

De onderzoeksvraag die centraal staat in deze publicatie is: welke veiligheid-gerelateerde aandachtspunten zijn er rondom het gebruik van waterstof als brandstof voor voertuigen? Om deze vraag te beantwoorden zijn verschillende deelonderwerpen onderzocht. Meer specifiek gaat het om de gevaarsaspecten van waterstof (al dan niet in toegepaste vorm) en handelingsperspectieven voor de brandweer.

## Onderzoeksmethode

De benodigde informatie ter beantwoording van de hoofdvraag is voornamelijk verkregen aan de hand van een korte literatuurstudie, aangevuld met informatie van diverse experts. Online (onderzoeks)rapporten, wetenschappelijke artikelen en ander materiaal, zoals nieuwsberichten, zijn bestudeerd om tot een onderbouwd beeld te komen van de waterstofontwikkelingen en veiligheidsaspecten. De mogelijkheid bestaat echter dat aanvullingen bij behandelde onderwerpen mogelijk zijn, bijvoorbeeld doordat

kennisdocumenten niet geraadpleegd zijn vanwege onbekendheid of het niet beschikbaar zijn. Deze rapportage is daarom een ‘groei’-document, dat regelmatig geactualiseerd moet worden op basis van nieuwe kennis over en praktijkervaringen met waterstof.

## Leeswijzer

De lezer die geïnteresseerd is in de brede beweging die gaande is in Nederland op het gebied van waterstof, wordt verwezen naar hoofdstuk 1. Diegene die met name geïnteresseerd is in de veiligheidsaspecten en incidentbestrijding van waterstofincidenten wordt verwezen naar hoofdstuk 2 en 3. In hoofdstuk 4 wordt antwoord gegeven op de hoofdvraag en worden conclusies en aanbevelingen gegeven.

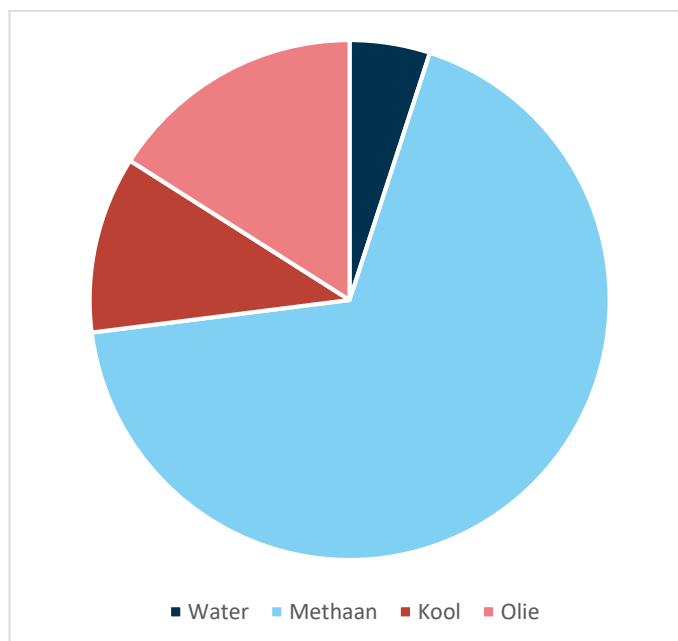
Grote dank gaat uit naar de volgende personen die bij hebben gedragen aan de beantwoording van vragen waar de literatuur geen uitsluitend gaf en waar zij aanvullende informatie over hebben verstrekt: Rens Braat (Toyota), Peter van Casteren (Toyota), Sander Heideman (Toyota), Marco de Vos (Hyundai), Bart Marcelis (Hyundai), Stefan Neis (Waterstofnet), Vladimir Molokov (Ulster University), Laurent Lecomte (Ecole Nationale Supérieure des Officiers de Sapeurs-Pompiers [ENSOSP]).

# 1 Waterstof: introductie

Waterstof is anno 2018 geen brandstof waar Nederlandse hulpverleners dagelijks mee te maken krijgen. In dit hoofdstuk volgt eerst een korte introductie van waterstof. Achtereenvolgens wordt beschreven waar waterstof vandaan komt, hoe waterstof opgeslagen kan worden en hoe waterstof als energiebron kan dienen.

## 1.1 Bronnen van waterstof

Wanneer er over waterstof wordt gesproken in relatie tot energie, gaat het over de moleculaire vorm  $H_2$ . Deze moleculaire vorm bestaat uit twee waterstof (H) atomen en komt niet veel voor in de natuur. Er is dus een chemisch/technische handeling nodig om moleculaire waterstof te verkrijgen. Waterstofatomen komen voornamelijk voor in chemische verbindingen. De meest voorkomende bron van waterstof op aarde is water ( $H_2O$ ), wat bestaat uit twee waterstofatomen en één zuurstofatoom. Door splitsing van water door middel van elektrolyse, waarbij elektriciteit door water stroomt, kan waterstof verkregen worden tezamen met zuurstof. Anno 2018 is deze manier van het genereren van waterstof echter niet op grote schaal beschikbaar (ongeveer 5 procent van alle waterstof; figuur 1.1), vanwege de kosten van zowel elektriciteit als de benodigde materialen. Het meeste waterstof wordt op dit moment gegenereerd door *steam reforming* (68 procent van alle waterstof): het verhitten van methaan ( $CH_4$ , wat het grootste bestanddeel is van aardgas) met zeer hete waterdamp. Ook andere methoden zijn mogelijk om waterstof te verkrijgen, zoals via kool (11 procent) en olie (16 procent) (Shell, 2017).



**Figuur 1.1 Bronnen van waterstof anno 2018.** De grootte van taartpunten is representatief voor het relatieve percentage.

## 1.2 Opslag en transport van waterstof

Wanneer waterstof gevormd is en niet ter plaatse wordt gebruikt om energie op te wekken, moet het opgeslagen worden ten behoeve van gebruik. Een positieve eigenschap van waterstof is dat het in grote hoeveelheden en voor langere tijd opgeslagen kan worden als gecompriemd gas (gas onder hoge druk; vanaf 200 bar) of als sterk gekoelde vloeistof (-253 °C) (Shell, 2017). Ook kan waterstof redelijk gemakkelijk getransporteerd worden als gecompriemd gas of sterk gekoelde vloeistof, waardoor de opwekcentrales ook op achteraf-locaties kunnen staan waar veel duurzame energie gewonnen kan worden. Verder kunnen bestaande pijpleidingen, zoals bijvoorbeeld voor aardgas, gebruikt worden voor transport van gasvormig waterstof, wat goedkoper is dan het aanleggen van nieuwe elektriciteitskabels (Shell, 2017). Het opslaan van waterstof onder hoge druk of lage temperatuur kost echter wel veel energie, waardoor ook andere methoden van opslag worden onderzocht. Voorbeelden hiervan zijn materiaal-gebaseerde vormen van opslag, zoals mierenzuur (Op weg met waterstof, 2017d), of in metalen (Shell, 2017).

## 1.3 Energieopwekking uit waterstof

Waterstof kan op twee manieren worden gebruikt om energie op te wekken:

1. Door waterstof te verbranden, bijvoorbeeld in een verbrandingsmotor (net zoals dat bij fossiele brandstoffen gebeurt in voertuigen). Bij dit proces komt de energie vrij als warmte.
2. Door waterstof te splitsen in waterstofatomen en vervolgens samen te voegen met zuurstof tot water, bijvoorbeeld in een brandstofcel (fuel cell). Bij dit proces komt energie vrij in de vorm van elektriciteit.

Met name de laatste manier van energieopwekking wordt momenteel gebruikt (en zal ook in de toekomst gebruikt gaan worden) in de transportsector. Er bestaan verschillende soorten brandstofcellen om elektriciteit op te wekken uit gasvormig waterstof. Voor transporttoepassingen heeft de Proton-Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) waarschijnlijk de toekomst. PEMFC heeft namelijk een hoge energiedichtheid, klein volume, relatief lage werktemperatuur (50 tot 90 °C), en gebruikt omgevingslucht als bron van zuurstof. PEMFCs hebben echter het nadeel dat de kosten hoog zijn door het gebruik van platina, maar verschillende ontwikkelingen vinden plaats om de kosten te verminderen. Zo kan het platina onder andere mogelijk vervangen worden door ruthenium en stikstof-gecoate grafeen (ACS Nano, 2017). Voor energieopslag in woonruimten en energiecentrales zijn Solid-Oxide Fuel Cells (SOFC) meer geschikt vanwege gunstige investeringskosten, lange levensduur, hoge efficiëntie en het feit dat niet de meest pure waterstof nodig is door de hoge werktemperatuur (1000 °C) (Shell, 2017).

## 1.4 Toename van waterstof als alternatieve brandstof

Sinds enkele jaren wordt wereldwijd een flinke impuls gegeven aan de ontwikkeling van schonere vormen van energie dan de thans veel gebruikte fossiele brandstoffen. Deze impuls is te danken aan het Klimaatakkoord van Parijs (European Commission, 2015) en voor Nederland de doorvertaling ervan in de Nederlandse Energieagenda (Rijksoverheid,



2016). Het doel van de Energieagenda is om de CO<sub>2</sub>-uitstoot vóór 2050 drastisch te reduceren om de temperatuur op aarde niet verder te laten stijgen dan 2 °C ten opzichte van 1990. In dit hoofdstuk wordt een beeld geschetst van ontwikkelingen op het gebied van waterstof als brandstof. Er wordt teruggeblikt op de afgelopen jaren, maar ook vooruit gekeken om te duiden wat er in de maatschappij kan veranderen en dus ook wat er voor hulpverleners kan veranderen in werkzaamheden. Een overzicht van thans betrokken ministeries bij de invoer van waterstof als alternatieve brandstof en organisaties met kennis van waterstof is opgenomen in de bijlage.

### 1.4.1 Ontwikkelingen afgelopen jaren

Op het gebied van transport is er naast de opkomst van elektrische voertuigen op batterijen (Battery Electric Vehicles; BEVs), de afgelopen jaren ook veel beweging op het gebied van waterstof-aangedreven elektrische voertuigen (Fuel Cell Electric Vehicles; FCEVs) vanwege enkele voordelen van waterstof ten opzichte van batterijen.<sup>1</sup> Ondanks dat de automobielindustrie al decennia bezig is met de ontwikkeling van waterstofauto's<sup>2</sup> en waterstofbussen al sinds 2001 op de weg rijden in Europa (AREVA Energy Storage, 2014), komt toetreding tot de markt de laatste jaren steeds meer op gang. Waar eerst voornamelijk veel gebeurde in Japan en de Verenigde Staten, is er nu ook steeds meer activiteit in Europa. Niet in de laatste plaats komt dit door vele Europese subsidies (Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, n.d.) voor onder andere waterstofbussen (Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, 2016) en waterstoftankstations (European Commission, 2017; Op weg met waterstof, 2017b). Eind 2017 werden 139 waterstofbussen gedemonstreerd in 5 Europese landen en stonden er 80 waterstoftankstations in 10 Europese landen. Tevens hebben oliebedrijven als Shell en Total aangegeven met diverse autoproducenten (waaronder Toyota, BMW, Daimler<sup>3</sup>, Honda en Hyundai) en industriële concerns te gaan werken aan de ontwikkeling van waterstof als brandstof (Waterstofautos.nl, 2017).

### 1.4.2 Toekomstbeeld Nederland op gebied van transport

Begin 2017 reden er wereldwijd ongeveer 4000 waterstofvoertuigen rond (The Drive, 2017), waarvan 645 in Europa en 49 in Nederland. In Nederland betrof het 39 personenvoertuigen (28 keer Hyundai ix35 en 11 keer Toyota Mirai), 5 bussen en 5 LCVs (Light Commercial Vehicles; voertuigen tot 3500 kg voor goederenvervoer). Het toekomstbeeld van waterstofvoertuigen in Nederland is lastig te bepalen. In Tabel 1.1 is de ambitie van het Ministerie van Infrastructuur en Milieu weergegeven (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2017).

---

<sup>1</sup> Anno 2018 zijn voordelen onder andere een groter bereik (voor waterstof > 500 km, voor batterijen gemiddeld 180 km (ANWB, 2017)) en sneller tanken (3 tot 10 minuten in plaats van 40 minuten met een snellader of 4,5 uur aan een normale laadpaal). Ook voor zwaardere vormen van vervoer is waterstof op dit moment meer geschikt dan batterijen, vanwege het feit dat waterstof een hogere energiedichtheid heeft (NPO Radio1, 2017).

<sup>2</sup> Bijvoorbeeld General Motors sinds 1966 (General Motors, 2016) en Toyota sinds 1992 (Ars Technica, 2015).

<sup>3</sup> Daimler, een pionier op het gebied van waterstof, is na drie maanden uit de Hydrogen Council gestapt (Watisduurzaam, 2017).



**Tabel 1.1 Ambitie ministerie I&M van waterstofvoertuigen en -tankstations in Nederland tot 2050 (2017)**

	2017-2020	2020-2025	2025-2030	2030-2050
Personenauto's	1.500 tot 2.000	15.000	100.000 tot 200.000	2,5 tot 3 miljoen
OV bussen	50 tot 100	250 tot 500	1.000 tot 2.000	
Tankstations	15 tot 20	20 tot 80	50 tot 200	

Om bovenstaande tabel in perspectief te plaatsen: wereldwijd (Verenigde Staten, Japan en deel Europa - Italië, Frankrijk, Duitsland en Groot Brittannië) wordt er een grote toename verwacht van waterstofvoertuigen van zo'n 10 miljoen waterstofvoertuigen rond 2030 en 100 miljoen rond 2050 (Shell, 2017).

Onderstaand is in een beknopt (niet volledig) overzicht weergegeven van wat er in Nederland gaat gebeuren op het gebied van waterstof en transport:

- > Vanaf september 2017 rijdt er één waterstofbus in Rotterdam (RET) en komt er snel een tweede bij (RTV Rijnmond, 2017).
- > Per 10 december 2017 rijden er twee waterstofbussen tussen Delfzijl en Groningen (QBUZZ). Het openen van een tankstation in Delfzijl heeft vertraging opgelopen (RTV Noord, 2017).
- > In de zomer van 2018 gaan er vier waterstofbussen op de Veluwe rijden (Syntus) (OV Magazine, 2017).
- > Eind zomer 2017 waren er twee vaste waterstoftankstations in Nederland (Rhooen en Helmond) en één mobiel vulstation (Groningen). Verder zijn er meerdere tankstations in aanbouw of op de planning: Den Haag, Schiphol, Rotterdam-Den Haag Airport, Utrecht, Apeldoorn/Deventer, Oude Tonge, Delfzijl, Utrecht, Venlo, Leeuwarden (Op weg met waterstof, 2017c; Waterstof werkt, n.d.).
- > Binnen enkele jaren moet een netwerk van negen nieuwe waterstoftankstations worden aangelegd in het Noorden van Nederland. Dit is een plan van de Holthausen Groep, GreenPlanet en de GasUnie (Gasunie New Energy, Hystock, Holthausen, & Green Planet, 2017). Een netwerk van totaal van 20 waterstoftankstations zou noodzakelijk zijn om 2.000 personenauto's in 2020 in Nederland te laten rijden op waterstof.
- > In 2018 kunnen vrachtwagens in Noord-Nederland op waterstof gaan rijden. Het waterstof wordt door middel van elektrolyse direct opgewekt in *onshore* windturbines (project 'Duwaal'). Deze implementatie is het resultaat van een onderzoek naar de haalbaarheid van de inzet van *offshore* windturbines, welke positief resultaat had (Energieonderzoek Centrum Nederland, 2017).
- > VDL werkt aan een truck op waterstof (Groen7, 2017a).
- > In 2018 zal er een proef worden gehouden met een trein op waterstof (in navolging van Duitsland; zie hieronder), rijdend tussen Leeuwarden en Groningen (de Volkskrant, 2017).

### 1.4.3 Toekomstbeeld buitenland op gebied van transport

Een beknopt (niet volledig) overzicht van wat er in het buitenland gaat gebeuren of reeds gebeurt op het gebied van waterstof en transport is hieronder weergegeven:

- > Een Chinees bedrijf wil zich toeleggen op de ontwikkeling van waterstof als nieuwe energietechnologie. Hiervoor heeft het een investering van € 400 miljoen gedaan bij HyMove in Arnhem. Het Chinese bedrijf wil zich voornamelijk toeleggen op bestelauto's, vrachtauto's en speciaal ontworpen taxi's en vuilniswagens (HyMove, 2017).
- > In Duitsland waren er in juli 2017 in totaal 32 waterstoftankstations. De planning is om dit uit te breiden naar 100 in 2018/2019 en 400 in 2023 (Groen7, 2017b).
- > Waterstof kan ook in andere modaliteiten dan wegverkeer gebruikt gaan worden, zoals bijvoorbeeld de trein, tram of scheepvaart. Recente voorbeelden komen uit Duitsland, waar de eerste trein ter wereld op waterstof is getest (SpoorPro, 2017). Een ander voorbeeld is afkomstig uit China, waar inmiddels een tram op waterstof rijdt (Op weg met waterstof, 2017a). Waterstof zou voor niet-geëlektrificeerde delen van het spoor goedkoper zijn dan het aanleggen van de benodigde elektrische infrastructuur.
- > Japan wil 40.000 waterstofauto's op de weg hebben in 2020, 200.000 in 2025 en 800.000 in 2030. Ter ondersteuning zouden er dan 900 waterstoftankstations moeten zijn (Shell, 2017).
- > Er is een plan opgezet voor een pan-Europees netwerk van 49 tankstations (Hydrogen Mobility Europe, 2017).

### 1.4.4 Ontwikkelingen in Nederland in andere sectoren dan transport

Waterstof kan in verschillende sectoren een grote rol gaan spelen in de energietransitie. Eén daarvan is de transportsector en is hierboven beschreven. Andere sectoren betreffen de industrie en gebouwde omgeving. Zonder de pretentie te hebben om volledig te zijn, volgen onderstaand enkele ontwikkelingen in Nederland met betrekking tot waterstof naast ontwikkelingen in de transportsector:

- > Een pilot wordt in Groningen gestart om duurzame energie op te slaan als waterstof (Topsector Energie, 2017a). Ook wordt bekeken of de Magnum-centrale in de Groningse Eemshaven per 2023 kan omschakelen naar waterstof (en compleet overschakelen in 2030) (Dagblad van het Noorden, 2017; Gasunie New Energy, 2017; Topsector Energie, 2017b).
- > De duurzame productie van waterstof zou voor Noord-Nederland een belangrijke pijler van de economie kunnen zijn in 2030, een zogenaamde waterstofeconomie (Flux Energie, 2017a). In Eemshaven gaat mogelijk veel waterstof geproduceerd worden om de chemische industrie te vergroenen (Financieel Dagblad, 2017)
- > Gekeken wordt naar de haalbaarheid van woningen in een nieuwbouwwijk in Hoogeveen die voorzien worden van waterstof. Met het onderzoek wordt gestart 2018 (Stork, 2017).
- > Zuid-Holland gaat zich ook richten op een waterstofeconomie (Op weg met waterstof, 2017e).

Concluderend laat paragraaf 1.4 zien dat er nu en in de nabije toekomst veel staat te gebeuren op het gebied van waterstof als bron van energie, zowel in Nederland als daarbuiten. En als dit gebeurt, dan zal de Nederlandse hulpverlener ook veel meer met waterstof te maken krijgen. Hoe meer gebruik, hoe frequenter er iets mee mis zal gaan en hulp verleend zal moeten worden. Kennis(opbouw) van waterstof bij de hulpverleningsdiensten is dus belangrijk om zo goed mogelijk voorbereid te zijn. Dit is in het belang van de publieke veiligheid en van de hulpverleners zelf. In het volgende hoofdstuk zal daarom ingegaan worden op eigenschappen en gevaren van waterstof.

## 2 Eigenschappen en gevaren van waterstof

Waterstof is een brandstof met eigenschappen en gevaarsaspecten die anders zijn dan bij traditionele fossiele brandstoffen. In dit hoofdstuk zal daarom worden ingegaan worden op de gevaarsaspecten van waterstof. Dit om aan te geven welke verschillen er zoal zijn en waar hulpverleners dus mee te maken kunnen krijgen.

### 2.1 Gasvormig waterstof

In tabel 2.1 zijn enkele eigenschappen van gasvormig waterstof en andere brandstoffen weergegeven, welke van belang kunnen zijn tijdens incidentbeheersing (bron energetische waarde: (World Nuclear Association, 2016) , bron overige waarden: chemiekaarten). De eigenschappen en gevaren die voortkomen uit de toepassing in voertuigen (dat wil zeggen waterstof onder hoge druk opgeslagen) worden behandeld in paragraaf 2.2.

**Tabel 2.1 Enkele relevante eigenschappen van waterstof en andere brandstoffen voor incidentbeheersing**

	Waterstof (gas)	CNG (gas)	LPG (gas)	Benzine (vloeibaar)	Diesel (vloeibaar)
<b>Kleur</b>	Kleurloos	Kleurloos	Kleurloos	Kleurloos of gekleurd	Kleurloos of gekleurd
<b>Geur</b>	Geurloos	Geurend	Geurend	Geurend	Geurend
<b>Dichtheid gas/damp t.o.v. lucht (1 atm, 20°C)</b>	Lichter (0,07)	Lichter (0,60)	Zwaarder (1,7)	Zwaarder (1,15)	Gelijk (1,00)
<b>Ontvlambaarheidsrange (% in lucht)</b>	4-77	5-16	1,5-10	0,6-8	0,6-6,5
<b>Ontstekings-energie gas/damp (mJ)</b>	0,011	0,28	0,25	> 0,6	Niet bekend
<b>Temperatuur zelfontbranding gas/damp (°C)</b>	500	670	400	>220	>225
<b>Energetische waarde (MJ/kg)</b>	120-142	38-39	49	44-46	45

Waterstof is geur-, kleur- en smaakloos, niet toxisch en niet corrosief. De dichtheid is 14 keer lager dan de dichtheid van lucht, waardoor het snel opstijgt. Tevens is de dichtheid lager dan de dichtheid van andere brandstoffen. Waterstof heeft een ontstekingsenergie bij een optimale verhouding van waterstof en lucht (29 procent) die ruim 20 keer lager is dan de ontstekingsenergie van andere brandstoffen<sup>4</sup>. Bij andere concentraties is de ontstekingsenergie hoger, maar voor de range 10 tot 60 procent ligt de ontstekingsenergie lager dan voor andere brandstoffen (Hydrogen Tools, n.d.-c; HyResponse, 2016d). De ontvlambaarheidsrange voor waterstof is groter dan voor andere brandstoffen, met een explosierange van 15-59 procent bij standaard druk (College of the Desert, 2010). De zelfontbrandingstemperatuur is lager dan voor CNG, maar hoger dan voor LPG, benzine of diesel. Waterstof heeft een hogere energetische waarde per eenheid van gewicht. Het gevolg hiervan is dat explosies van waterstof per eenheid van gewicht krachtiger zijn dan van andere brandstoffen.

Samenvattend zijn de eigenschappen en gevaren van waterstof, in vergelijking met andere brandstoffen, in onderstaand overzicht weergegeven:

- > Niet waar te nemen met zintuigen. Waterstof kan ongemerkt ophopen in gesloten ruimten en op die manier voor gevaar zorgen zonder dat men dit doorheeft.
- > Stijgt (sneller) op. Dit kan voor veiligheid zorgen in open ruimten, maar kan gevaar opleveren in gesloten ruimten.
- > Grotere ontvlambaarheidsrange. Dit leidt tot een grotere kans op ontbranding bij vrijkomen.
- > Lagere of gelijke ontstekingsenergie. Waterstof heeft een lage ontstekingsenergie. Een puntontlading kan 0,03 mJ bedragen (Kiekens, 2017), terwijl veel andere elektrostatische ontladingen al snel 10mJ kunnen opleveren (Shell, 2017). Afhankelijk van het type ontlading en de concentratie waterstof, kan waterstof dus gemakkelijker tot ontsteking komen dan andere brandstoffen.
- > Hogere of lagere zelfontbrandingstemperatuur. Waterstof kan gemakkelijker spontaan tot ontbranding komen in vergelijking met andere brandstoffen, maar dat hoeft niet zo te zijn.
- > Hogere energetische waarde per eenheid van gewicht. Dit kan leiden tot een krachtiger explosie bij gelijke massa.

## 2.2 Gasvormig waterstof onder hoge druk

FCEVs maken gebruik van gasvormig waterstof onder hoge druk. Deze druk is 700 bar (70 MPa) in personenvoertuigen of 350 bar (35 MPa) in grotere voertuigen zoals bussen (mogelijk wordt dit ook 700 bar in de toekomst). Tijdens transport van waterstof in tubetrailers wordt er vaak 200 bar gebruikt.<sup>5</sup> In deze paragraaf worden gevaarsaspecten onderzocht van de toegepaste vorm van waterstof onder hoge druk, dus gevaarsaspecten aanvullend op paragraaf 2.1.

---

<sup>4</sup> In andere bronnen, waaronder (Hydrogen Tools, n.d.-c), worden andere waarden weergegeven. Waterstof: 0,02 mJ, natuurlijk gas (=LNG/CNG): 0,29 mJ, benzine: 0,24 mJ. Ondanks deze andere waarden (uitgezocht zal moeten worden wat nu de correcte waarden zijn) blijft overeind dat de ontstekingsenergie van waterstof veel lager is dan de ontstekingsenergie van andere brandstoffen.

<sup>5</sup> Voor bulktransport (en ook in de chemische industrie) wordt tevens vloeibaar waterstof gebruikt. Omdat vloeibaar waterstof niet nieuw is, wordt deze vorm van waterstof niet behandeld in deze publicatie.

### 2.2.1 Opslag in tanks

Voor de opslag van waterstof onder drukken van 350 en 700 bar worden in voertuigen carbon fiber reinforced polymer (CFRP) tanks gebruikt. Er zijn meerdere typen CFRP-tanks op de markt, waarbij er momenteel voornamelijk Type III (aluminium liner aan binnenkant tank) en Type IV (polymeer liner aan binnenkant tank) worden gebruikt. De CFRP-tanks worden onder verschillende omstandigheden getest op stevigheid, waaronder vele vulcycli, overdruk, vallen van hoogte, beschieting met vuurwapen en een kampvuurtest.<sup>6</sup>

Op dit moment zijn er twee waterstofauto's op de markt in Nederland, de Hyundai ix35 en de Toyota Mirai. Bij beide modellen zijn de twee tanks onder de achterbank en onder de bodem van de kofferbak geplaatst. Bij bussen zijn de tanks op het dak geplaatst. Om ontsnapping van waterstof tijdens incidenten met personenauto's en bussen te voorkomen, zijn er meerdere veiligheidssystemen aanwezig, onder andere elektromagnetische afsluiters, druk regulatoren en druksensoren. Al deze mechanismen zijn erop gericht om waterstof in de tanks te houden in het geval van abnormale omstandigheden (bijvoorbeeld een ongeval of lekkage). Om ontploffing van de tanks te voorkomen is er, naast de enorme stevigheid van de tanks, ook een overdrukbeveiliging (Thermally-activated Pressure Relief Device: TPRD) aangebracht om de interne druk niet teveel te laten oplopen bij extreme externe verwarming (zie paragraaf 3.2.2 voor details). Een andere maatregel om waterstof (kortstondig) af te blazen is de Pressure Relief Valve (PRV). De PRV is geïnstalleerd op de regulator tussen de tank en de fuel cell stack en zal in werking treden wanneer de druk in de lagedrukleidingen tussen de regulator en fuel cell stack te hoog oploopt. De druk is normaal ongeveer 10 tot 15 bar en de PRV zal opengaan wanneer de druk hoger is dan 22,5 bar (bij Toyota Mirai). Op dat moment zullen alle leidingen en de fuel cell stack worden leeggeblazen, maar de tankinhoud niet. De PRV sluit weer wanneer de druk onder een bepaalde waarde komt, waardoor er slechts een geringe hoeveelheid waterstof vrijkomt.

### 2.2.2 Thermally-activated Pressure Relief Device

De TPRD is een veiligheidsmechanisme, welke erop gericht is om waterstof niet in de tank te houden. Een TPRD is thermisch gereguleerd, wat wil zeggen dat waterstof gecontroleerd wordt afgeblazen als de temperatuur rondom de TPRD (als gevolg van een brand) te ver oploopt. Bij de huidige TPRDs is de kritische temperatuur 110 °C. Wanneer de TPRD in werking treedt, zal deze niet meer sluiten en dus afblazen totdat de tank leeg is.<sup>7</sup> Bij zowel de Hyundai ix35 als de Toyota Mirai zitten de TPRD op de kop van de tank, aan de linkerkant van het voertuig (chauffeurszijde) en zijn de openingen naar beneden gericht. Bij de Toyota Mirai is de hoek 45 graden naar achteren gericht. De buitendiameter van het pijpje is 7 mm, met aan de binnenzijde nog 2 mm dik rubber en een taps toelopend binnenpijpje. In totaal is de uitstroomopening dus < 3 mm. Bij de Hyundai ix35 is de hoek loodrecht naar beneden gericht, de buitendiameter van het pijpje is 8 mm. Waterstof zal dus bij beide voertuigen onder grote druk (uitgaande van een compleet gevulde tank) naar beneden worden afgeblazen. Bij bussen (RET, Qbuzz en busjes Holthausen) is de richting van afblazen recht omhoog (diameter niet bekend<sup>8</sup>).

<sup>6</sup> De Japan Automobile Research Institute (JARI) heeft geconcludeerd dat kampvuurtesten geen goede representatie van de werkelijkheid zijn. De Motor Vehicle Fire Research Institute (MVFRI) heeft daarom aangeraden om de testen aan te passen aan de praktijk, dus met auto.

<sup>7</sup> Bij de huidige TPRD smelt er een 'zekering' door die vervolgens niet meer kan sluiten. Hierdoor stroomt de gehele tank leeg. Eerdere versies van de TPRD hanteerden een ander mechanisme, waarbij de afsluiting zou smelten bij hoge temperaturen. Deze sluiting kon echter ook weer dichtgaan door stolling wanneer de temperatuur daalde (bijvoorbeeld door snelle uitstroming waterstof).

<sup>8</sup> De diameter van de uitstroomopening is de afgelopen jaren verkleind van 5-6 mm naar 2-3 mm. Voor genoemde voertuigen en bussen zijn exacte diameters niet bij ons bekend.

Het gecontroleerd afblazen van waterstof vindt onder grote druk plaats, waardoor het goed hoorbaar zal zijn. Metingen van Air Liquide hebben aangetoond dat bij 700 bar en een opening van 5 mm geluidsniveaus van 100-140 dB gehaald werden (Baijense, 2016). De veilige grens voor gehoor is 80 dB.

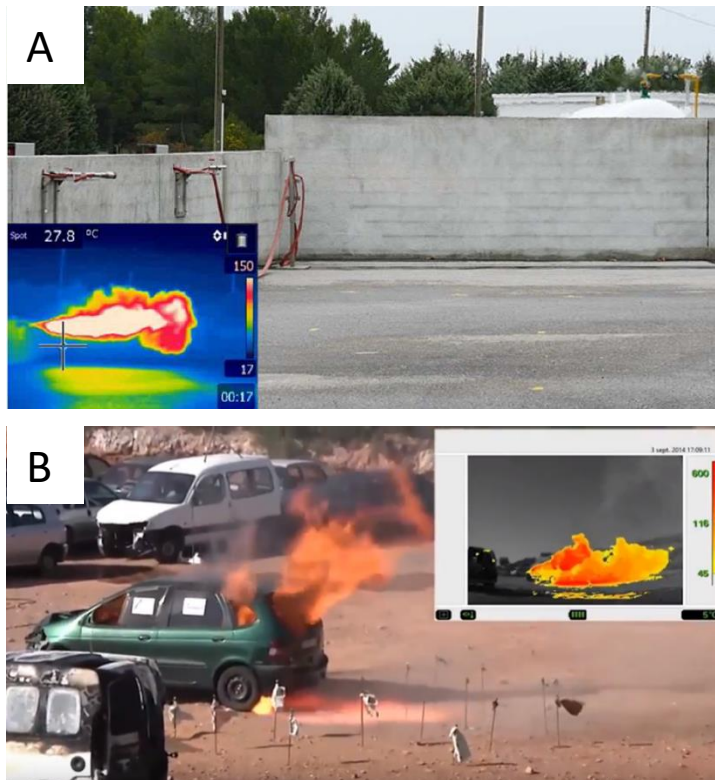
### 2.2.3 Ontbranden van waterstof onder hoge druk: jet flame

Wanneer gasvormig waterstof onder hoge druk uit de tank ontsnapt (via TPRD of door een puntbeschadiging), zal het in veel gevallen ontbranden waarbij er een jet flame (fakkel) ontstaat. Omdat een TPRD geactiveerd zal worden door een externe hitte bron (lees: brand), is een ontstekingsbron in dit geval dus direct aanwezig. Maar ook in gevallen dat er geen hittebron aanwezig is, kan ontsnapping van waterstof onder hoge druk leiden tot een jet flame. Hierbij kan de jet ontbranden als gevolg van de lage ontstekingsenergie van waterstof. In vergelijking met propaan en methaan, kan waterstof bovendien branden bij uitstroomsnelheden (sneller en langzamer) waarbij propaan- en methaanbranden uit zouden gaan (HyResponse, 2016c). Wanneer de jet niet direct ontbrandt, kan er een deflagratie ontstaan van de ontstane waterstof gaswolk. Hierbij ontbrandt de gaswolk explosief, maar wel subsonisch (detonaties ontbranden supersonisch, waarbij er schokgolven ontstaan). In experimenten zijn ontstekingsbronnen tot op 8 m afstand effectief gebleken bij een interne druk in de tank van 205 bar. De gemeten druk van de deflagratie liep in deze experimenten op tot 195 mbar op 2,8 m afstand (HyResponse, 2015), waarbij een kleinere afstand van de ontstekingsbron leidde tot een hogere druk. Bij 195 mbar kan het trommelvlies scheuren en worden mensen omver geblazen (HyResponse, 2016b). Bij ontsteking tussen 6 m en 8 m afstand van de uitstroomopening was de druk niet meer meetbaar. Wanneer de druk in de tank hoger is dan 205 bar, zoals in de huidige voertuigen 350 en 700 bar, dan kan ontsteking ook op grotere afstand plaatsvinden. Door de hogere druk is de jet immers langer.

### 2.2.4 Kleur jet flame

Wanneer pure waterstof brandt in een schone omgeving met lage luchtvochtigheid, dan is de vlam overdag nagenoeg niet zichtbaar (Hydrogen Tools, n.d.-b). Een voorbeeld is weergegeven in afbeelding 2.1 A (maar zie ook afbeelding 2.2). Wanneer de TPRD van een bus geactiveerd wordt en afblaast in de open lucht, of wanneer een personenvoertuig ondersteboven ligt na een incident en dan ook afblaast in de open lucht, dan kan de jet flame dus mogelijk slecht zichtbaar zijn. Omdat bij personenvoertuigen de kans echter groot is dat er rondom het voertuig materialen gaan branden door de jet flame, zoals bijvoorbeeld banden of vuil op de grond, is de vlam uit de TPRD van personenvoertuigen in veel gevallen waarschijnlijk wel zichtbaar (afbeelding 2.1 B). In een ander scenario, waarbij een plas benzine onder een FCEV in brand stond, zorgde activering van de TPRD (36 L tank, 700 bar) voor een vuurbal van > 10 m in diameter (HyResponse, 2016c). In soortgelijke gevallen, welke kunnen voorkomen in een situatie met zowel FCEVs als voertuigen op fossiele brandstoffen op de weg, zal de jet flame indirect zichtbaar zijn.

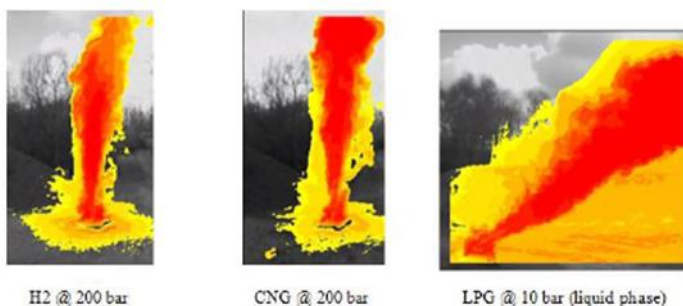




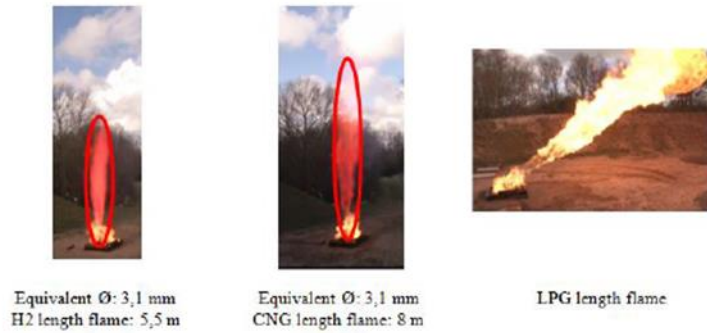
**Afbeelding 2.1 Zichtbaarheid van waterstof jet flames.** A. Pure waterstof brandt in een schone omgeving met lage luchtvochtigheid nagenoeg onzichtbaar (HyResponse, 2016a). B. Wanneer een TPRD naar beneden is gericht op een zanderige grond, dan kan de jet flame wel zichtbaar zijn (HyResponse, 2016c).

### 2.2.5 Temperatuur en stralingswarmte jet flame

Wanneer waterstof tot ontbranding komt, kunnen er hoge vlamtemperaturen behaald worden. De bestudeerde literatuur is echter niet eenduidig in wat deze temperatuur is. Zo werd een temperatuur van meer dan 2000 °C gevonden (Hydrogen Tools, n.d.-a), maar ook veel lager. In (Proust, Jamois, & Studer, 2011), waarbij temperaturen van jet flames werden gemeten, was de temperatuur namelijk rond de 1500 °C. Waar de literatuur wel eenduidig over is, is dat de stralingswarmte van een waterstofvlam veel lager kan zijn in vergelijking met andere brandstoffen. In vergelijking met CNG is er weinig verschil (ook weinig warmtestraling), maar de warmtestraling is wel veel minder in vergelijking met LPG (afbeelding 2.2). Dit komt door het ontbreken van koolwaterstoffen in een waterstofvlam. Een gevaar hiervan is dat een waterstofvlam pas gevoeld wordt op het moment dat men redelijk dichtbij de vlam zelf is. Een voordeel hiervan is dat de kans op schade aan de omgeving door hittestraling kleiner is.







**Afbeelding 2.2 Stralingswarmte van verschillende brandstoffen (HyResponse, 2016c)**

### 2.2.6 Lengte jet flame

Wanneer een TPRD in de vrije ruimte kan afblazen (het afblazen wordt niet geblokkeerd door obstakels), dan kan een (lange) jet flame ontstaan. De lengte van een jet flame is onder andere afhankelijk van de temperatuur en druk in de tank en de diameter van de TPRD (Deimling et al., 2011). Voor drukken van 350 en 700 bar zit de uitstroom van waterstof in het under-expanded regime. Een formule die gebruikt kan worden om de lengte van de jet flame in dit regime te bepalen, is gevalideerd voor drukken van 30 tot 870 bar en openingen van 0,4 tot 10 mm (resultaten van verschillende studies) (HyResponse, 2016c). De lengte van jet flames voor verschillende openingen bij verschillende drukken (temperatuur is niet bekend) is weergegeven in tabel 2.2. De resultaten laten zien dat de lengte kan variëren van 1,6 m bij een druk van 350 bar en een opening van 1 mm tot 8,3 m bij een druk van 700 bar en een opening van 4 mm. Wanneer echter andere experimentele data (Proust et al., 2011) met deze waarden wordt vergeleken, met alle datapunten uit dezelfde studie en met een begin temperatuur van 15 °C (wat de temperatuur is in een waterstoftank gebruikt bij voertuigen), dan zijn de werkelijke lengtes groter dan de berekende lengtes (56 procent groter bij een opening van 1 mm en druk van 350 bar).<sup>9</sup> Voor een TPRD met een diameter van 4 mm betekent dit een berekende lengte van ongeveer 8,3 m bij 700 bar en dus een werkelijke lengte die mogelijk ongeveer 50 procent groter is (12,5 m). De vlamlengte kan bovendien vergroot worden wanneer er wordt afgeblazen parallel langs een wand of de grond (in ieder geval vergroting mogelijk tot 80 procent: hoe kleiner de opening, hoe kleiner de vlam, hoe groter de vergroting percentageel gezien) (HyFacts, 2013). Wanneer de TPRD naar beneden is gericht (bijvoorbeeld loodrecht op de grond of onder een hoek van 45 graden), dan wordt de vlamlengte juist kleiner dan als er in de vrije ruimte wordt afgeblazen. Voor een opening van 4,2 mm en een druk van 700 bar is de lengte 4 m voor loodrecht naar beneden, dus ongeveer 50 tot 70 procent kleiner dan in de vrije ruimte. Voor een opening van < 3 mm en 700 bar (zoals op de Toyota Mirai, welke onder een hoek van 45 graden is geplaatst), zouden de lengtes van de jet flames zijn: < 6,1 m (geëxtrapolerd n.a.v. formule), < 9,2 m (50 procent langer) en tussen de 4,6 m (loodrecht naar beneden uitgaande van 50 procent reductie t.o.v. 9,2 m) en 9,2 m. Afhankelijk van de inhoud en de initiële druk van de tank, kan het afblazen via een TPRD tot enkele minuten duren.

<sup>9</sup> Een lagere temperatuur zou in de gebruikte formule leiden tot een langere lengte, dus het verschil in lengte kan verklaard worden door het verschil in temperatuur.

**Tabel 2.2 Lengte van jet flames als functie van de druk in de tank en diameter van de opening (temperatuur van de tank is niet bekend) (HyResponse, 2015)**

Diameter opening [mm]	Druk in tank [bar]	Lengte jet flame [m]
1	350	1,6
2,3	350	3,8
4	350	6,8
1	700	1,9
2,3	700	4,7
4	700	8,3

### 2.2.7 Grensafstanden bij jet flames

Bij jet flames worden er drie grenzen (in het verlengde van de jet flame) aangehouden, namelijk een veilige grens, een pijngrens en een overlijdensgrens (HyResponse, 2016c):

- > De veilige grens van 3,5 keer de vlamlengte (70 °C: onbepaalde tijd).
- > De pijngrens van 3 keer de vlamlengte (115 °C: maximaal 5 minuten in deze hitte).
- > De overlijdensgrens van 2 keer de vlamlengte (309 °C: maximaal 20 seconden in deze hitte).

Met deze grenzen zouden veilige afstanden variëren van:

- 5,6 m bij een druk van 350 bar en een opening van 1 mm<sup>10</sup> tot
- 29,1 m bij een druk van 700 bar en een opening van 4 mm<sup>11</sup>.

Voor een opening van 3 mm en 700 bar (zoals op de Toyota Mirai) zouden de lengtes zijn:

- 21,4 m (als niet geblokkeerd),
- 32,2 m (50 procent langer) en
- tussen de 32,2 m en 10,5 m (onder hoek van 45 graden).

### 2.2.8 Ontploffingen van CFRP-tanks

Ondanks dat CFRP-tanks zeer sterk zijn en de TPRD een ontploffing van de tank dient te voorkomen, kunnen ontploffingen plaatsvinden als de TPRD niet in werking treedt. Bij CNG tanks heeft analyse heeft namelijk aangetoond dat bij meerdere ontploffingen de TPRD niet (meer) bleek te werken. Hierdoor kon de druk niet gecontroleerd afgevoerd worden. Om de gevolgen van een ontploffing van een CFRP-tank en andere karakteristieken, zoals tijd tot ontploffing te onderzoeken, zijn er meerdere tests uitgevoerd (HyResponse, 2016c) (tabel 2.3).

<sup>10</sup> 8,4 m als een 50 procent langere jet flame wordt aangehouden, 2,8 m als recht naar beneden.

<sup>11</sup> 43,6 m als een 50 procent langere jet flame wordt aangehouden, 14,5 m als recht naar beneden.

**Tabel 2.3 Enkele karakteristieken van testen met ontploffende CFRP-tanks (HyResponse, 2016b)**

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
Type tank	Type IV (met polymeer liner)	Type III (aluminium liner)	Type IV (met polymeer liner)	Type III (aluminium liner)
Interne druk [bar]	343	318	350	350
Volume tank [L]	72,4	88	- <sup>a</sup>	-
TPRD aanwezig	Nee	Nee	-	-
Tijd tot ontploffing [min:sec]	6:03	12:08 <sup>12</sup>	-	-
Diameter vuurbal [m]	7,7	24	-	-
Overdruk	410 mbar op 6,5 m afstand (50 % kans op scheuren trommelvlies en > 50 % kans op dodelijke verwondingen door rondvliegende scherven)	120 mbar op 15 m afstand (kans om omver geblazen te worden)	140 mbar op 15 m afstand (kans op gescheurd trommelvlies en kans om omver geblazen te worden). 70 mbar op 20 m afstand (gebroken ramen)	140 mbar op 15 m afstand (kans op gescheurd trommelvlies en kans om omver geblazen te worden). 70 mbar op 20 m afstand (gebroken ramen)

<sup>a</sup> Een - geeft aan dat er van een test geen informatie bekend is over het betreffende onderwerp.

De resultaten van de hierboven beschreven testen laten zien dat het enige minuten kan duren voordat een CFRP-tank ontploft wanneer de TPRD niet in werking treedt.<sup>13</sup> De gevolgen van een ontploffing van een tank zijn onder andere afhankelijk van de inhoud van de tank, de interne druk en de locatie (bijvoorbeeld vrijstaand of onder een voertuig). Voor een tank van 100 liter op 700 bar is de veilige afstand bij een ontploffing ongeveer 90 m als de tanks onder een voertuig is gemonteerd en ongeveer 100 m als het een vrijstaande tank betreft (HyResponse, 2016a). Tezamen met de informatie uit de testen (tabel 4.5) laat dit zien dat de gevolgen van een ontploffing kunnen verschillen, maar duidelijk is dat een ruime afstand tot de tank noodzakelijk is voor de eigen veiligheid.<sup>14</sup>

<sup>12</sup> In Test 2 betrof het een test met een CFRP tank onder een auto, terwijl in Test 1 alleen een CFRP tank werd gebruikt. Verschillen in tijd tot ontploffing en grootte van de vuurbal kunnen het gevolg zijn van het verschil in test ontwerp.

<sup>13</sup> Bij experimenten van ENSOSP is het nog niet voorgekomen dat de TPRD van een CFRP tank niet in werking trad. Dit betrof experimenten met ongebruikte tanks. (persoonlijke communicatie)

<sup>14</sup> Ulster University is bezig met de ontwikkeling van tanks die niet zullen exploderen wanneer blootgesteld aan vuur. (persoonlijke communicatie)

### 2.2.9 Gevaren van waterstof onder druk

In paragrafen 3.2.1 t/m 3.2.8 zijn verschillende eigenschappen van waterstof onder druk benoemd. Onderstaand is een puntsgewijze samenvatting hiervan gegeven, inclusief mogelijke gevaren:

- > Er kunnen jet flames ontstaan wanneer waterstof onder hoge druk uit de tank ontsnapt. Jet flames hebben de volgende eigenschappen:
  - Hoorbaar: vanwege de hoge druk in de tank zal de uitstroom goed hoorbaar zijn. Dit draagt bij aan de detectie van de uitstroom en dus veiligheid.
  - Tot op grote afstand ontsteking mogelijk: in testen is ontsteking tot op 8 m afstand mogelijk gebleken, wat kan leiden tot vergroot gevaar.
  - Grote lengte en hoge temperatuur: tot op grote afstand van de bron kunnen personen, dieren, voorwerpen met een hete vlam in aanraking komen. Dit levert gevaar op afstand op.
  - Weinig stralingswarmte: waterstof straalt weinig stralingswarmte uit in vergelijking met enkele andere fossiele brandstoffen. Het gevolg hiervan is dat een waterstofvlam minder snel wordt waargenomen op gevoel en dat de kans bestaat om de vlam tot op kleine afstand te naderen. Dit kan gevaarlijke situaties opleveren, want de vlam heeft een temperatuur van 1500 – 2000 °C. Een voordeel van minder stralingswarmte is dat de kans op schade aan de omgeving door hittestraling kleiner is.
  - Kan lastig zichtbaar zijn: in een schone omgeving en overdag kan een jet flame lastig zichtbaar zijn (maar uitstroom is wel hoorbaar). Wanneer de lucht vochtig is, de jet flame naar de grond gericht is of richting andere brandbare materialen, dan is de jet flame wel zichtbaar.
- > TPRD is niet altijd dezelfde kant op gericht (naar beneden onder verschillende hoeken en recht omhoog) → een gevaar kan optreden wanneer een hulpverlener niet weet in welke richting er wordt afgeblazen en in de jet flame komt te staan.
- > Afblazen via een TPRD kan tot enkele minuten duren. De jet flame zal kleiner worden gedurende het afblazen en ook zal de hoorbaarheid minder worden.
- > Als de TPRD verstopt raakt (voor waterstof is dit nog niet aangetoond) en dus niet meer naar behoren functioneert, dan kan de tank bij externe aanstraling ontploffen na enige minuten. Dit kan gevaar opleveren.

# 3 Aandachtspunten voor de brandweer

Om in kaart te brengen wat de handelingsperspectieven zijn voor de brandweer bij incidenten met voertuigen op gasvormig waterstof, zijn verschillende documenten bestudeerd, namelijk:

- > US National Hydrogen and Fuel Cell Emergency Response Training (uit HyResponse, 2016c).
- > Brandweer optreden bij incidenten met moderne voertuigen (Brandweeracademie, 2016).
- > BRAA Handreiking voor optreden tijdens incidenten met waterstoffoepassingen (Brandweer Amsterdam-Amstelland, n.d.).
- > Toyota Mirai Emergency Response Guide (Toyota Motor Corporation, 2015).
- > Hyundai ix35 Fuel Cell Electric Vehicle Emergency Response Guide (Hyundai Motor Company, 2013).

Deze documenten zijn via contacten verkregen of online gevonden. De bedoeling was niet om uitputtend te zijn, maar om te bezien wat er zoal in documenten aangaande waterstof incidentbestrijding te vinden is) en te bezien of er speciale aandachtspunten zijn voor de brandweer. Omdat handelingsperspectieven niet eenduidig beschreven zijn en soms gestoeld bleken op achterhaalde aannames of technieken worden in deze paragraaf geen handelingsperspectieven gegeven, maar ligt de nadruk op de aandachtspunten. Aandachtspunten zijn onderwerpen waarover de gebruikte bronnen een andere invulling/opvatting over hebben.

## 3.1 Geen eenduidigheid

Naast overeenkomsten tussen verschillende documenten bleken er ook verschillen en zelfs tegenstrijdigheden te zijn tussen verschillende documenten. Enkele voorbeelden van gevonden verschillen en tegenstrijdigheden zijn:

- > Het benaderen van het voertuig door hulpdiensten (voor eigen veiligheid in geval het gaan rollen van het voertuig: onder hoek van 45 graden (HyResponse, 2016c), van voren (Toyota Motor Corporation, 2015), van opzij met daarbij de toevoeging nooit van voren of achteren (Hyundai Motor Company, 2013).
- > Het evacueren van de directe omgeving bij een bepaald percentage waterstof: 10 procent LEL (=0,4 procent waterstof) (Brandweer Amsterdam-Amstelland, n.d.), 4 procent waterstof (Toyota Motor Corporation, 2015).
- > Het ontkoppelen van de min pool van de 12V-accu: niet (Brandweeracademie, 2016), wel (Hyundai Motor Company, 2013; Toyota Motor Corporation, 2015).

## 3.2 Achterhaalde aannames/technieken

In twee documenten (Brandweeracademie, 2016; HyResponse, 2016c) werd aangegeven om de waterstraal niet te richten op de TPRD. Deze zou kunnen dichtvriezen waardoor explosie gevaar ontstaat. Experimenten bij ENSOSP hebben dit echter (nog) niet aangetoond. Tevens gaf een expert bij ENSOSP ook aan niet te weten hoe dit wel zou kunnen. Er is namelijk sprake van een hoge uitstroomsnelheid (water kan TPRD mogelijk niet bereiken) en externe hitte door de brand (waardoor de TPRD in eerste instantie open ging). Een expert bij Ulster University geeft aan dat 'dichtvriezen' wel mogelijk was geweest bij oudere designs van de TPRD, waarbij de sluiting weer kon stollen door de daling van temperatuur (bijvoorbeeld door de snelle uitstroming van waterstof). Er bestaat echter wel een andere reden om geen water op de TPRD te spuiten<sup>15</sup>. Koelen van de TPRD voordat het in werking treedt zorgt voor een lagere temperatuur van de TPRD. Als gevolg hiervan zou het mogelijk kunnen zijn dat de TPRD niet in werking treedt, terwijl de interne druk als gevolg van brand wel toeneemt. Hierdoor zou explosiegevaar kunnen optreden.

---

<sup>15</sup> Voor zover dit mogelijk is. Ter bescherming van de tanks zijn composiet platen onder de auto aangebracht, met een kleine opening waardoor de TPRD kan afblazen. Bij een auto die op de wielen staat kan het dus erg lastig zijn om de TPRD te bereiken met een waterstraal.

# 4 Conclusie en aanbevelingen

Als gevolg van de energietransitie is het de verwachting dat in meerdere sectoren, waaronder transport, het gebruik van waterstof als brandstof de komende decennia flink zal toenemen. Hoe snel dit zal verlopen is niet bekend. Waterstof als brandstof in onze maatschappij is redelijk nieuw en kent andere gevaarsaspecten dan traditionele brandstoffen. Dit levert verschillende aandachtspunten op. Enkele van de gevaren zijn dat waterstof (bij 1 atm en 20 °C; ten opzichte van traditionele brandstoffen) niet is te ruiken, zien en proeven, een lagere ontstekingsenergie en grotere ontvlambaarheidsrange heeft, minder stralingswarmte uitzendt en overdag in een schone omgeving brandt met een vrijwel onzichtbare vlam. Op dit moment wordt in de transportsector gasvormig waterstof op 350 of 700 bar gebruikt, opgeslagen in stevige tanks. Het gebruik van gasvormig waterstof onder hoge druk kent verschillende gevaarsaspecten, waaronder jet flames (bijvoorbeeld als gevolg van in werking treden overdrukbeveiliging) tot potentieel meer dan 10 meter in lengte die niet altijd in dezelfde richting zijn afgesteld en temperaturen kunnen bereiken van 1500 – 2000 °C. Tevens kan ontploffing van de tank plaatsvinden als de overdrukbeveiliging niet in werking treedt. Analyse van beschreven handelingsperspectieven van de brandweer heeft aangetoond dat deze momenteel niet allemaal gelijk zijn en ook tegenstrijdigheden bevatten.

## Conclusie

De onderzoeksvraag die centraal staat in deze publicatie is: welke veiligheid-gerelateerde aandachtspunten zijn er rondom het gebruik van waterstof als brandstof voor voertuigen? Om antwoord te geven op deze vraag is literatuuronderzoek gedaan naar drie onderwerpen: de gevaarsaspecten van waterstof, de gevaarsaspecten van waterstof in toegepaste vorm en beschreven handelingsperspectieven voor de brandweer. De aandachtspunten zijn hieronder benoemd:

1. Waterstof heeft andere eigenschappen ten opzichte van traditionele brandstoffen zoals benzine of diesel, waardoor waterstof zich anders gedraagt bij vrijkomen.
2. Waterstof wordt anders opgeslagen dan traditionele brandstoffen en hierbij worden andere veiligheidsmechanismen gehanteerd. Het gevolg is dat bij incidenten de effecten anders kunnen zijn wanneer waterstof vrij komt.
3. Er zijn verschillende handelingsperspectieven beschreven voor de brandweer bij incidenten bij voertuigen op waterstof, waardoor onduidelijkheid kan ontstaan over de meest veilige en effectieve manier. Ook lijkt de methode van inzet soms gestoeld op achterhaalde technieken.

De resultaten van dit onderzoek laten zien dat er verschillende veiligheid-gerelateerde aandachtspunten zijn rondom waterstof als brandstof voor voertuigen. Door dit te (h)erkennen en actief mee aan de slag te gaan, kunnen veiligheidskwesaties bij de invoer van waterstofvoertuigen beperkt worden.



## Aanbevelingen

### Kennisoverdracht

Om ervoor te zorgen dat de hulpdiensten goed voorbereid zijn om op te treden bij incidenten met voertuigen op waterstof, is het belangrijk dat kennis van gevaarsaspecten van waterstof beschikbaar komt en wordt overgedragen. Met deze kennis kunnen hulpverleners de situatie beter inschatten en op die manier een veiliger inzet doen.

1. Industrie: draag actief bij aan een goede kennisoverdracht van alle veiligheidsaspecten van waterstof naar de hulpverlening. Doe dit zowel voor risicobeheersing als incidentbestrijding. Speel in op de vragen en behoeften van de hulpverlening.
2. H2 Platform: start zo spoedig mogelijk met de uitvoering van het H2 Innovatie Veiligheidsprogramma en zorg dat beschikbare kennis over de eigenschappen en risico's van waterstof goed overgedragen wordt aan de hulpverleningsdiensten. Kennis moet gaan over risicobeheersing en incidentbestrijding.
3. IFV: verzamel kennis over waterstof en zorg dat deze kennis in handzame en praktijkgerichte les- en leerstof, inzetprotocollen en handreikingen beschikbaar komt.
4. Hulpverleningsdiensten: zorg dat de beschikbare kennis van waterstof actief overgedragen wordt aan het eigen personeel dat betrokken is bij risicobeheersing en incidentbestrijding. Verzorg informatiebijeenkomsten en praktijktrainingen.

### Handelingsperspectieven

Om ervoor te zorgen dat de hulpverleningsdiensten veilig en effectief een inzet kunnen plegen, is het belangrijk dat goed onderbouwde en eenduidige handelingsperspectieven worden opgesteld. De gevaarsaspecten van waterstof zijn immers anders dan van traditionele brandstoffen.

1. Industrie en brandweer: creëer gezamenlijk eenduidigheid in handelingsperspectieven voor de brandweer.
2. Brandweer: vertaal deze eenduidige handelingsperspectieven in vakbekwaamheidsprogramma's en oefeningen in de praktijk.
3. Infrabeheerders en bergers: vertaal de handelingsperspectieven voor zover van toepassing naar eigen werkzaamheden ter ondersteuning van hulpdiensten. Een voorbeeld is het benaderen van voertuigen en creëren van veilige afstanden.

### Uitvoeren aanvullend onderzoek en experimenten

Om ervoor te zorgen dat hulpverleningsdiensten zich goed kunnen voorbereiden en veilig en effectief een inzet kunnen plegen, is het belangrijk dat achterliggende fysische waarden en informatie accuraat is.

1. H2 Platform: zorg dat er binnen het H2 Innovatie Veiligheidsprogramma onderzoeksbudget komt voor het uitvoeren van (toegepast) wetenschappelijke onderzoeken. Dit kunnen literatuuronderzoeken of experimentele onderzoeken zijn. Enkele voorbeelden van vragen die uit voorliggende studie kwamen zijn hieronder benoemd:

- a. Wat is de temperatuur van jet flames bij 350 bar (gebruikt op bussen) en 700 bar (gebruikt op personenvoertuigen)? In de literatuur werden verschillende vlamtemperaturen gevonden voor waterstof in de range van 1500 °C tot boven de 2000 °C. Deze verschillen zijn mogelijk afhankelijk van de achterliggende druk: hoe hoger de druk, hoe sneller de uitstroom, hoe lager de temperatuur. Een andere mogelijke verklaring kan zijn dat de temperatuur op verschillende afstanden is gemeten.
  - b. Wat is de maximale lengte van jet flames uit de TPRD (zoals gebruikt op huidige voertuigen) bij 350 bar en 700 bar en de variatie in lengte met uitstroming onder verschillende hoeken? Literatuurwaarden zijn hier niet eenduidig in.
  - c. Welke soorten ontlading (bijvoorbeeld telefoon, portofoon, wrijving) kunnen zorgen voor ontsteking van vrijgekomen waterstof?
2. IFV/hulpverleningsdiensten: vertaal de onderzoeksresultaten in concrete en praktijkgerichte maatregelen voor risicobeheersing en incidentbestrijding.

# Literatuur

- ACS Nano. (2017). Paving the way for hydrogen fuel cells. Ontleend aan [https://www.acs.org/content/acs/en/pressroom/newsreleases/2017/june/paving-the-way-for-hydrogen-fuel-cells.html?\\_ga=2.44549920.566017283.1501596988-2103830431.1501596988](https://www.acs.org/content/acs/en/pressroom/newsreleases/2017/june/paving-the-way-for-hydrogen-fuel-cells.html?_ga=2.44549920.566017283.1501596988-2103830431.1501596988)
- ANWB. (2017). Elektrisch rijden. Ontleend aan <https://www.anwb.nl/auto/themas/elektrisch-rijden/top10-elektrische-autos>
- AREVA Energy Storage. (2014). Fuel Cell Bus and Hydrogen Safety Training for First Responders. Ontleend aan [https://www.cob.nl/fileadmin/kennisbank/Bussen op waterstof.pdf](https://www.cob.nl/fileadmin/kennisbank/Bussen_op_waterstof.pdf)
- Ars Technica. (2015). Toyota Mirai review: A futuristic, super-smooth hydrogen fuel cell car. Ontleend aan <https://arstechnica.com/cars/2015/11/toyota-mirai-review-the-first-hydrogen-fuel-cell-car-offers-a-glimpse-of-the-future/>
- Baijense, H. (2016). *Moderne brandstof: een moderne aanpak?*
- Brandweer Amsterdam-Amstelland. (n.d.). *Handreiking voor optreden tijdens incidenten met waterstoftoepassingen.*
- Brandweeracademie. (2016). *Brandweeroptreden bij incidenten met moderne voertuigen.* Ontleend aan <https://www.ifv.nl/kennisplein/Documents/20160926-BA-Brandweeroptreden-bij-incidenten-met-moderne-voertuigen.pdf>
- College of the Desert. (2010). Hydrogen properties. Ontleend aan <https://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f12/fcm01r0.pdf>
- Dagblad van het Noorden. (2017). Primeur Eemshaven: Eerste centrale op waterstof. Ontleend aan <http://www.dvhn.nl/economie/Primeur-Eemshaven-Eerste-centrale-op-waterstof-22341493.html>
- de Volkskrant. (2017). Eerste Nederlandse trein op waterstof in aantocht; Friesland en Groningen houden proefrit in 2018. Ontleend aan <https://www.volkskrant.nl/economie/eerste-nederlandse-trein-op-waterstof-in-aantocht-friesland-en-groningen-houden-proefrit-in-2018~a4521310/>
- Deimling, L., Weiser, V., Blanc, A., Eisenreich, N., Billeb, G., & Kessler, A. (2011). Visualisation of jet fires from hydrogen release. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(3), 2360–2366. <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.05.068>
- Energieonderzoek Centrum Nederland. (2017). Vrachtransport op waterstof eind 2018 mogelijk door inzet windmolens. Ontleend aan <https://www.ecn.nl/news/item/vrachtransport-op-waterstof-eind-2018-mogelijk-door-inzet-windmolens/>
- European Commission. (2015). Paris Agreement. Ontleend aan [https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_en)
- European Commission. (2017). Commissioner Moedas tests a fuel cell electric vehicle. Ontleend aan <http://ec.europa.eu/avservices/video/player.cfm?ref=1138359>
- Financieel Dagblad. (2017). Waterstofgas biedt Groningen nieuw economisch perspectief. Ontleend aan <https://fd.nl/ondernemen/1182996/waterstofgas-biedt-groningen-nieuw-economisch-perspectief>
- Flux Energie. (2017a). Ad van Wijk: “Noord-Nederland moet inzetten op waterstof.” Ontleend

- aan <https://www.fluxenergie.nl/ad-wijk-noord-nederland-moet-inzetten-op-waterstof/>
- Flux Energie. (2017b). Nederland is al een grote producent van waterstof. Ontleend aan <https://www.fluxenergie.nl/nederland-is-al-grote-producent-waterstof/>
- Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking. (n.d.). FCH JU Projects. Ontleend aan <http://www.fch.europa.eu/fchju-projects>
- Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking. (2016). Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe. Ontleend aan <http://www.fch.europa.eu/project/joint-initiative-hydrogen-vehicles-across-europe>
- Gasunie New Energy. (2017). Gasunie draagt bij aan de omschakeling van aardgascentrale naar waterstof. Ontleend aan <https://www.gasunienewenergy.nl/nieuws/gasunie-draagt-bij-aan-de-omschakeling-van-aardgascentrale-naar-w/>
- Gasunie New Energy, Hystock, Holthausen, & Green Planet. (2017). *Driven by our number 1 element. Noord-Nederland vooruit op waterstof*. Ontleend aan [https://www.holthausen.nl/sites/default/files/downloads/130x175mm\\_our\\_number\\_1\\_element.pdf](https://www.holthausen.nl/sites/default/files/downloads/130x175mm_our_number_1_element.pdf)
- General Motors. (2016). GM Hydrogen Fuel Cells Mark 50 Years of Development. Ontleend aan <http://www.gm.com/mol/m-2016-oct-1005-hydrogen.html>
- Groen7. (2017a). VDL komt met waterstoftruck. Ontleend aan <https://www.groen7.nl/vdl-komt-met-waterstoftruck/>
- Groen7. (2017b). Zoveel waterstoftankstations heeft Duitsland momenteel. Ontleend aan <https://www.groen7.nl/zoveel-waterstoftankstations-heeft-duitsland-momenteel/>
- Hydrogen Mobility Europe. (2017). Hydrogen Mobility Europe is a flagship project giving fuel cell electric vehicle (FCEV) drivers access to the first truly pan-European network of hydrogen refuelling stations. Ontleend aan <http://h2me.eu/>
- Hydrogen Tools. (n.d.-a). Basic Hydrogen Properties Chart. Ontleend aan <https://h2tools.org/tools>
- Hydrogen Tools. (n.d.-b). Geen titel. Ontleend aan [https://h2tools.org/sites/default/files/Short\\_hydrogen\\_prop\\_v2.mov](https://h2tools.org/sites/default/files/Short_hydrogen_prop_v2.mov)
- Hydrogen Tools. (n.d.-c). Hydrogen Compared with Other Fuels. Ontleend aan <https://h2tools.org/bestpractices/h2properties>
- HyFacts. (2013). *Chapter R. Releases and dispersion*.
- HyMove. (2017). HyMove B.V. tekent overeenkomst met Chinees bedrijf HPI voor de productie van brandstofcellen. Ontleend aan <http://www.nwba.nl/wordpress/wp-content/uploads/2017/06/Hymove-persbericht.pdf>
- HyResponse. (2015). Detailed scenarios of typical accident for selected FCH systems and infrastructures. Deliverable Number D2.2. Ontleend aan [http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/project\\_results\\_and\\_deliverables/D2.2\\_HyResponse\\_DetailedScenariosOfTypicalAccidentForSelectedFCHSystemsAndInfrastructures\\_V7\\_FinalVersion.pdf](http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/project_results_and_deliverables/D2.2_HyResponse_DetailedScenariosOfTypicalAccidentForSelectedFCHSystemsAndInfrastructures_V7_FinalVersion.pdf)
- HyResponse. (2016a). European Emergency Response Guide. Deliverable Number D6.3. Ontleend aan [http://www.hyresponse.eu/public\\_deliverables/D6.3\\_HyResponse\\_EuropeanEmergencyResponseGuide\\_V10-20161031\\_FinalVersion.pdf](http://www.hyresponse.eu/public_deliverables/D6.3_HyResponse_EuropeanEmergencyResponseGuide_V10-20161031_FinalVersion.pdf)
- HyResponse. (2016b). Harm criteria for people and environment, damage criteria for structures and equipment. Ontleend aan [http://www.hyresponse.eu/files/Lectures/Harm\\_criteria\\_for\\_people\\_notes.pdf](http://www.hyresponse.eu/files/Lectures/Harm_criteria_for_people_notes.pdf)
- HyResponse. (2016c). Hydrogen fires. Ontleend aan

[http://www.hyresponse.eu/files/Lectures/Hydrogen\\_fires\\_notes.pdf](http://www.hyresponse.eu/files/Lectures/Hydrogen_fires_notes.pdf)

- HyResponse. (2016d). Hydrogen properties relevant to safety. Ontleend aan [http://www.hyresponse.eu/files/Lectures/Hydrogen\\_properties\\_relevant\\_to\\_safety\\_notes.pdf](http://www.hyresponse.eu/files/Lectures/Hydrogen_properties_relevant_to_safety_notes.pdf)
- Hyundai Motor Company. (2013). *ix35 FCEV: Emergency Response Guide*. Ontleend aan [http://cafcp.org/sites/files/ix35\\_FCEV\\_ERG\\_Eng.pdf](http://cafcp.org/sites/files/ix35_FCEV_ERG_Eng.pdf)
- Kiekens. (2017). Statische elektriciteit in explosieve stofatmosferen. Ontleend aan <http://www.kiekens.com/nieuws/statische-elektriciteit-explosieve-stofatmosferen/>
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2017). Rijden op Waterstof. Op weg naar een waterstofeconomie. Ontleend aan [https://www.han.nl/onderzoek/nieuws/energietransitie-waterstof/\\_attachments/presentatie\\_alexander\\_habl\\_h2\\_11\\_mei\\_2017.pdf](https://www.han.nl/onderzoek/nieuws/energietransitie-waterstof/_attachments/presentatie_alexander_habl_h2_11_mei_2017.pdf)
- NPO Radio1. (2017). De toekomst van de waterstofauto. Ontleend aan <https://www.nporadio1.nl/nos-met-het-oog-op-morgen/onderwerpen/416259-de-toekomst-van-de-waterstofauto>
- Op weg met waterstof. (2017a). Eerste tram op waterstof in China. Ontleend aan <http://opwegmetwaterstof.nl/2017/08/16/eerste-tram-op-waterstof/>
- Op weg met waterstof. (2017b). Europees geld voor 12 nieuwe waterstoftankstations. Ontleend aan <http://opwegmetwaterstof.nl/2017/07/19/12-nieuwe-waterstoftankstations/>
- Op weg met waterstof. (2017c). Hyundai schakelt in hogere versnelling met waterstof. Ontleend aan <http://opwegmetwaterstof.nl/2017/08/18/hyundai-schakelt-in-hogere-versnelling-met-waterstof/>
- Op weg met waterstof. (2017d). Proef met stadsbus op waterstof van mierenzuur. Ontleend aan <http://opwegmetwaterstof.nl/2017/07/10/proef-met-stadsbus-op-waterstof-van-mierenzuur/>
- Op weg met waterstof. (2017e). Waarom groene waterstofeconomie belangrijk is voor Zuid-Holland? Ontleend aan [http://opwegmetwaterstof.nl/2017/10/04/groene-waterstofeconomie/?utm\\_source=nieuwsbrief&utm\\_medium=email&utm\\_campaign=2017-10-11&utm\\_content=Op weg met waterstof – Nieuwsbrief](http://opwegmetwaterstof.nl/2017/10/04/groene-waterstofeconomie/?utm_source=nieuwsbrief&utm_medium=email&utm_campaign=2017-10-11&utm_content=Op%20weg%20met%20waterstof%20-%20Nieuwsbrief)
- OV Magazine. (2017). Syntus gaat vier waterstofbussen leasen. Ontleend aan <https://www.ovmagazine.nl/2017/07/syntus-gaat-vier-waterstofbussen-leasen-1251/>
- Proust, C., Jamois, D., & Studer, E. (2011). High pressure hydrogen fires. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(3), 2367–2373. <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.04.055>
- Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. (n.d.). Subsidie waterstof. Ontleend aan <https://www.rvo.nl/subsidies-regelingen/subsidieregeling-waterstof>
- Rijksoverheid. (2014). Op weg naar duurzame mobiliteit. Ontleend aan <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2014/06/19/op-weg-naar-duurzame-mobiliteit>
- Rijksoverheid. (2016). Energieagenda. Ontleend aan <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/duurzame-energie/uitwerking-energieagenda>
- Rijksoverheid. (2017). Besluit tot het verlenen van subsidie voor de ontwikkeling van groene waterstof economie in Noord-Nederland. Ontleend aan <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/besluiten/2017/10/03/besluit-tot-het-verlenen-van-subsidie-voor-de-ontwikkeling-van-groene-waterstof-economie-in-noord-nederland>
- RTV Noord. (2017). Qbuzz kan waterstofbussen maar beperkt gebruiken. Ontleend aan <https://www.rtvnoord.nl/nieuws/187825/Qbuzz-kan-waterstofbussen-maar-beperkt-gebruiken>

- RTV Rijnmond. (2017). Eerste waterstofbus rijdt door Rotterdam-Zuid. Ontleend aan <https://www.rijnmond.nl/nieuws/159754/Eerste-waterstofbus-rijdt-door-Rotterdam-Zuid>
- Shell. (2017). *Shell Hydrogen Study. Energy of the Future?* Hamburg.
- SpoorPro. (2017). Waterstoffrein Alstom succesvol getest in Duitsland. Ontleend aan <https://www.spoorpro.nl/materieel/2017/03/15/waterstoffrein-alstom-succesvol-getest-in-duitsland/>
- Stork. (2017). Stork in transitie. Ontleend aan [http://www.klimaattopnoord2017.nl/file/f9e74b4aba986438fe9aa1b7ac97880d/STORK in transitie.pdf](http://www.klimaattopnoord2017.nl/file/f9e74b4aba986438fe9aa1b7ac97880d/STORK%20in%20transitie.pdf)
- The Drive. (2017). Japan Is Planning for 200,000 Hydrogen Cars by 2025. Ontleend aan <https://amp-timeinc-net.cdn.ampproject.org/c/amp.timeinc.net/thedrive/tech/9621/japan-is-planning-for-200000-hydrogen-cars-by-2025?source=dam>
- Topsector Energie. (2017a). Gasunie start waterstofpilot in Groningen. Ontleend aan <https://topsectorenergie.nl/nieuws/gasunie-start-waterstofpilot-groningen>
- Topsector Energie. (2017b). Magnum-centrale Nuon zet waterstof in. Ontleend aan <https://topsectorenergie.nl/nieuws/magnum-centrale-nuon-zet-waterstof>
- Toyota Motor Corporation. (2015). *Emergency Response Guide*.
- Waterstofautos.nl. (2017). Grootschalige samenwerking voor realisatie waterstof als brandstof. Ontleend aan <http://www.waterstofautos.nl/grootschalige-samenwerking-voor-realisatie-waterstof-als-brandstof/>
- Waterstof werkt. (n.d.). Het netwerk van tankstations groeit snel en wordt lands dekkend. Ontleend aan <https://www.waterstofwerkt.nl/#tanklocaties>
- Watisduurzaam. (2017). Waarom € 10 mrd de mist in gaat met waterstof voor auto's. Ontleend aan <http://www.wattisduurzaam.nl/10999/energie-besparen/transport/waarom-743-auto-experts-mist-gaan-waterstof/>
- World Nuclear Association. (2016). Heat Values of Various Fuels. Ontleend aan <http://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/heat-values-of-various-fuels.aspx>

# Bijlage 1: betrokken instanties rondom waterstof als brandstof

Om ervoor te kunnen zorgen dat hulpverleningsdiensten veilig kunnen optreden bij incidenten met (voertuigen op) waterstof, is het belangrijk dat de juiste kennis en kunde bij de hulpverleningsdiensten terecht komt. Een overzicht van welke instanties betrokken zijn bij ontwikkelingen rondom waterstof kan helpen om de juiste ondersteuning en input te verkrijgen. In deze bijlage wordt daarom aandacht besteed aan deze instanties.

## Betrokken ministeries

Het rijksbeleid is om de CO<sub>2</sub> uitstoot te reduceren en te streven naar het gebruik van schone brandstoffen. In deze paragraaf wordt besproken welke ministeries een rol spelen bij de implementatie van waterstof in de maatschappij en wat deze rol inhoudt.

Bij de implementatie van waterstof als alternatieve brandstof in Nederland spelen vier ministeries een rol, namelijk Economische Zaken en Klimaat (EZK), Infrastructuur en Waterstaat (IenW), Justitie en Veiligheid (JenV) en Sociale Zaken en Werkgelegenheid (SZW). Hieronder wordt per ministerie de betrokkenheid bij de implementatie van waterstof kort weergegeven.

### Economische Zaken en Klimaat

- > Het Ministerie van EZK is verantwoordelijk voor de energietransitie, stelt beleid op en duidt de doelen.

Het Ministerie van EZK stelt dat waterstof ingevoerd moet worden en zorgt hierbij voor ondersteuning van de invoer van waterstof in de vorm van garantieregelingen en investeringen voor topsectoren (Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, n.d.; Rijksoverheid, 2017).

Het Ministerie van EZK zorgt in het geval van waterstof voor ondersteuning van de introductie van potentiële nieuwe en onbekende gevaren in de maatschappij.

### Infrastructuur en Waterstaat

- > De inspanningen van het Ministerie van IenW met betrekking tot waterstof zijn erop gericht om de juiste randvoorwaarden te scheppen voor de verdere invoering van waterstof als brandstof. Het betreft randvoorwaarden zoals veiligheid, vergunningverlening, fiscaliteit en relatie met EU-richtlijnen. De randvoorwaarden hebben tot doel om bestuurlijke belemmeringen en onzekerheden weg te nemen, om technische veiligheidsvraagstukken te onderzoeken en om te verkennen hoe het verplaatsen met waterstof als brandstof in Nederland vorm kan krijgen (Rijksoverheid, 2014).



- > De Nederlandse marktpartijen moeten zelf aangeven hoe het Ministerie van IenW hen kan helpen bij de marktintroductie van rijden op waterstof. Het Ministerie van IenW moet die input vervolgens vertalen naar beleid en daarmee de juiste randvoorwaarden scheppen.
- > Het Ministerie van IenW legt verbinding naar bredere toepassing van waterstof.

Het Ministerie van IenW zorgt in het geval van waterstof voor de randvoorwaarden voor de feitelijke introductie van potentiële nieuwe en onbekende gevaren in de maatschappij.

#### Justitie en Veiligheid

- > Het Ministerie van JenV is verantwoordelijk voor de adequate invulling van risicobeheersing en incidentbestrijding in Nederland.

Het Ministerie van JenV moet in het geval van waterstof ervoor zorgen dat de hulpdiensten voldoende in staat zijn om adequaat invulling te kunnen geven aan de risicobeheersing en incidentbestrijding.

#### Sociale Zaken en Werkgelegenheid

- > Het Ministerie van SZW is verantwoordelijk voor arbeidsveiligheid van werknemers. De gevaren en handelingsperspectieven moeten bekend zijn, zodat werknemers zo veilig mogelijk hun beroep kunnen uitoefenen.

Het Ministerie van SZW moet in het geval van waterstof ervoor zorgen dat hulpverleners veilig kunnen werken in het kader van arbeidsveiligheid.

#### Aandachtspunt

Op dit moment is niet duidelijk welk ministerie de coördinatie neemt bij veiligheidsvraagstukken rondom waterstof. Wie zorgt er voor dat hulpverleners, die bij een incident met waterstof moeten optreden, kennis hebben van de potentiële gevaren en weten hoe op te treden? Is dat degene die beleid stelt en introductie mogelijk maakt, degene die de maatschappij klaar maakt voor introductie, degene die de hulpverlener vakbekwaam maakt om op te treden bij incidenten of degene die zorgt voor een veilige werkomgeving? Om veilig en efficiënt op te kunnen treden bij incidenten met waterstof is het belangrijk dat het duidelijk is welk ministerie geldt als aanspreekpunt vanuit de Rijksoverheid voor hulpverleningsdiensten rondom veiligheidsvraagstukken.

## Organisaties in Nederland met kennis van waterstof

Al decennia lang wordt met hoeveelheden waterstof gewerkt in de (chemische) industrie; wereldwijd een jaarlijkse productie van ongeveer 500 miljard m<sup>3</sup>, in Nederland 8 miljard m<sup>3</sup> (Flux Energie, 2017b). Zo is het bijvoorbeeld een grondstof voor ammoniak, methanol, ethyleen. Ook is het een bijproduct bij de productie van chloor, cokes en bij naftakraken. Maar ook op andere gebieden is er veel kennis over waterstof in Nederland, bijvoorbeeld op het gebied van techniek en veiligheid. Hieronder wordt in een beknopt overzicht weergegeven welke organisaties in Nederland kennis hebben van (veiligheidsaspecten rondom) waterstof.

### (Chemische) industrie

- > Westfalen Gassen B.V. in Deventer (waterstofgas op 200 bar).
- > Dow Terneuzen (waterstof als bijproduct; gastransport via pijpleiding: Yara en ICL-IP).
- > Air Products in Rotterdam (waterstofgasfabriek voor ExxonMobil raffinaderij; ook opslag en transport van vloeibare waterstof.)
- > Air liquide in Rotterdam (produceert waterstofgas; ook transport van vloeibaar waterstof).
- > GasUnie New Energy, Vattenfall/Nuon, Statoil in Eemshaven (onderzoek naar transport en opslag van waterstof vanuit Noorwegen).
- > Akzo Nobel in Delfzijl (elektriciteitscentrale op waterstof).
- > Linde Gas Benelux (produceert waterstof en transporteert zowel gasvormig als vloeibaar waterstof).
- > Shell Amsterdam (onder andere onderzoek naar waterstof).
- > HyGear/HyMove/Nedstack in Arnhem (leverancier van brandstofcellen (PEMFC) voor transportsector en *on-site* waterstof productie aan industrie).

### Transportsector

- > Holthausen Waterstofcentrum in Hoogezand (producent van waterstof, alsook voertuigen en apparatuur op waterstof).
- > Toyota in Raamsdonksveer (hebben de Mirai op de markt).
- > Hyundai in Sassenheim (hebben de ix35 FCEV op de markt).
- > RET in Rotterdam (hebben bussen op waterstof op de weg).
- > Qbuzz in Groningen (hebben bussen op waterstof op de weg).
- > PitPoint in Nieuwegein (hebben tankstations waar waterstof getankt kan worden).
- > HyTruck in Beverwijk (producent van zero-emission zware voertuigen, pionier op gebied van waterstof).
- > Schenk Transport in Papendrecht (transport gasvormig en vloeibaar waterstof).
- > Den Hartogh Logistics in Rotterdam (transport gasvormig waterstof).

### Overheid (niet zijnde ministeries, gericht op veiligheid)

- > LIOGS (Landelijk Informatiepunt Ongevallen Gevaarlijke Stoffen; chemische kennis van gevaarlijke stoffen).
- > Instituut Fysieke Veiligheid.
- > Werkgroep rondom PGS35 onder de NEN.

### Kennisinstellingen

- > TU Delft (Vakgroep Future Energy Systems).
- > Hogeschool Rotterdam (lectoraat Future Mobility).
- > Hogeschool Arnhem Nijmegen (lectoraat Duurzame energie).
- > Energieonderzoek Centrum Nederland.
- > VoltaChem (onderzoek en innovatie naar energieopslag via waterstof).
- > ADEM (onderzoek naar onder andere fuel cells).
- > TNO (energietransitie, kwantitatieve risico analyses en fysische modellering).

### Platformen

- > Nationaal Waterstof Platform (kennisuitwisselingsplatform en gesprekspartner overheid).
- > Nederlandse Waterstof en Brandstofcel Associatie (vereniging ten behoeve van het hebben van een gesprekspartner richting Den Haag en Brussel).
- > Waterstofnet (Nederland/België).
- > NEN (Nederland Normalisatie Instituut).