

29 september 2011

# Inventarisatie risico's rijden met waterstofvoertuigen



29 september 2011

# Inventarisatie risico's rijden met waterstofvoertuigen

© 2011 Kiwa N.V.  
Alle rechten voorbehouden.  
Niets uit deze uitgave mag  
worden verveelvoudigd,  
opgeslagen in een  
geautomatiseerd  
gegevensbestand, of  
openbaar gemaakt, in enige  
vorm of op enige wijze,  
hetzij elektronisch,  
mechanisch, door  
fotokopieën, opnamen, of  
enig andere manier, zonder  
voorafgaande schriftelijke  
toestemming van de  
uitgever.

**Kiwa Gas Technology B.V.**  
Wilmersdorf 50  
Postbus 137  
7300 AC Apeldoorn

Tel. 055 539 32 52  
Fax 055 539 32 23  
[www.kiwagastechnology.nl](http://www.kiwagastechnology.nl)

## Colofon

<b>Titel</b>	Inventarisatie risico's rijden met waterstofvoertuigen
<b>Projectmanager</b>	R.M. van Aerde
<b>Opdrachtgever</b>	Agentschap NL
<b>Auteur(s)</b>	R.M. van Aerde

**Dit rapport is niet openbaar en slechts verstrekt aan de  
opdrachtgevers van het Contractonderzoekproject/adviesproject.  
Eventuele verspreiding daarbuiten vindt alleen plaats door de  
opdrachtgever zelf.**

# Samenvatting

Het toepassen van waterstof als directe of indirecte brandstof voor de aandrijving van voertuigen kent op dit moment diverse initiatieven in Nederland. Deze voertuigen en het gebruik hiervan is op een aantal punten afwijkend van voertuigen met conventionele brandstoffen. Hoewel er overeenkomsten zijn met CNG (Compressed Natural Gas) voertuigen zijn het de typische eigenschappen van waterstof die er voor zorgen dat beide niet volledig met elkaar vergeleken kunnen worden. Er is hierdoor behoefte ontstaan aan informatie over de risico's en de te nemen maatregelen om deze risico's te reduceren.

Agentschap NL heeft Kiwa Gas Technology opdracht gegeven om aan de hand van gesprekken met een aantal partijen te inventariseren welke risico's men ervaart en welke maatregelen men genomen heeft om deze risico's te reduceren. Kiwa Gas Technology heeft deze ervaringen aangevuld met eigen kennis, de verzamelde inzichten gerubriceerd en geordend, en gerapporteerd aan opdrachtgever middels dit rapport.

De inventarisatie is gericht op voertuigen met gasvormige waterstof voor personen- en goedertransport en op de volgende fasen van gebruik:

- Het tanken van het voertuig,
- Het rijden met het voertuig,
- Het stallen van het voertuig,
- Onderhoud en reparatie van het voertuig.

Het doel van dit document is informatie te geven aan partijen die waterstof gaan gebruiken als voertuigbrandstof en voor partijen die hierbij betrokken zijn. Het document geeft inzicht in de risico's en is een leidraad voor de toe te passen maatregelen ter verlaging van de risico's of ter beperking van de gevolgen. Daarnaast is in het document aangegeven of opstellen van nieuwe dan wel aanpassing van bestaande (normatieve) documenten noodzakelijk is om te komen tot een veilig gebruik van waterstof.

Dit document is tot stand gekomen met de medewerking van:

Mevr. Thomas – gemeente Amsterdam

Dhr. Smulders – B-style

Dhr. Faber – Circulus BV

Dhr. Van Drunen – GVB

Mevr. Wesselingh – VRH

Dhr. Matthijsen – RIVM

Dhr. Arentsen – NVBR

Dhr. van Wermeskerken – Ballast Nedam

Dhr. Bout – Air Products Nederland BV

Dhr. Rams – Kenniscentrum InfoMil (Agentschap NL)

Dhr. Appels – Agentschap NL

Dhr. van Aerde – Kiwa Gas Technology

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>1</b>
	<b>Inhoud</b>	<b>2</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>4</b>
1.1	Waterstofvoertuigen	4
<b>2</b>	<b>Waterstofvoertuigen en risicobeheersing</b>	<b>6</b>
2.1	Risicoperceptie	6
2.2	Risicoanalyse	6
2.3	Beheersmaatregelen	7
<b>3</b>	<b>De fasen van gebruik</b>	<b>9</b>
3.1	Erkenning van het voertuig	9
<b>4</b>	<b>Tanken van het voertuig</b>	<b>11</b>
4.1	Waterstoftankstations	11
4.2	Veiligheidsafstanden waterstof versus LPG	12
4.3	Risicoanalyse (QRA)	12
<b>5</b>	<b>Rijden met het voertuig</b>	<b>13</b>
5.1	Voertuigafmetingen	13
5.2	Aanrijdingen	13
5.3	Voertuigbrand	13
5.4	Hulpdiensten	14
<b>6</b>	<b>Stallen van het voertuig</b>	<b>15</b>
6.1	Constructieve maatregelen	15
6.2	Vergelijking met CNG voertuigen	15
<b>7</b>	<b>Onderhoud en reparatie</b>	<b>16</b>
7.1	De monteur	16
7.2	De werkplaats	16
7.3	Mechanische afzuiging	17
7.4	Gebruik PGS 26 [9]	17
7.5	Afblazen van gas in de buitenlucht.	17
<b>8</b>	<b>Aanbevelingen</b>	<b>18</b>

<b>9</b>	<b>Relevante normen/richtlijnen</b>	<b>19</b>
<b>10</b>	<b>Eigenschappen van waterstof</b>	<b>20</b>
10.1	Vergelijk tussen de brandstoffen waterstof en benzine (dampfase)	22
<b>11</b>	<b>Bibliografie</b>	<b>24</b>

# 1 Inleiding

De geschiedenis van de auto gaat ongeveer 100 jaar terug. Naast wat experimenten is er in het begin van deze periode voor gekozen om vloeibare brandstof (benzine en diesel) voor de aandrijving van het voertuig te gebruiken. Met voertuigen op traditionele vloeibare brandstoffen is hierdoor over de afgelopen 100 jaar veel ervaring opgedaan. Een van de aspecten waarmee ervaring is opgedaan is veiligheid. Het is altijd in het belang van alle betrokken partijen, zoals de automobielfabrikant, de gebruiker en de overheid, geweest om een veilig voertuig en een veilig gebruik van het voertuig te kunnen garanderen. Dit heeft geresulteerd in het gezamenlijk (overheid en marktpartijen) opstellen van regelgeving die betrekking heeft op het voertuig en de verschillende fasen van gebruik. Niet alles valt echter vast te leggen in regelgeving.

Personen die werkzaamheden verrichten of gebruik maken van een voertuig zijn bekend geraakt met de risico's en handelen overeenkomstig. Dit gedrag, samen met de genomen maatregelen, zorgen voor een veilig gebruik van het voertuig in de verschillende fasen van gebruik.

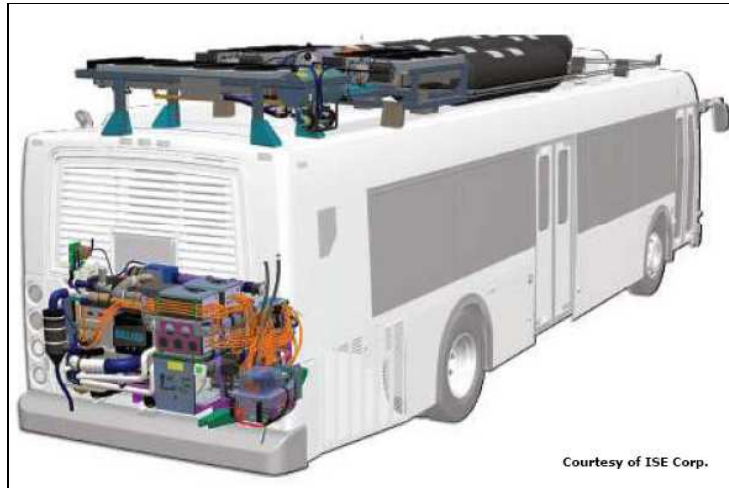
Toch zijn we met 100 jaar ervaring nog steeds niet klaar met het inventariseren van risico's en het nemen van maatregelen. Veranderingen in de omgeving, nieuwe technieken en strengere milieu-eisen leiden er toe dat de risico's opnieuw beschouwd moeten worden.

## 1.1 Waterstofvoertuigen

In verband met het energievraagstuk wordt gezocht naar andere (alternatieve) brandstoffen die geen of minder aanslag maken op de natuurlijke hulpbronnen. Waterstof is een voorbeeld van een nieuwe alternatieve brandstof.

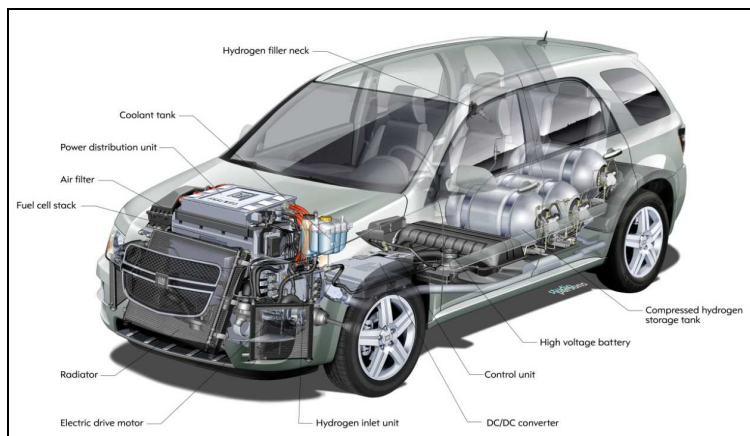
Waterstofvoertuigen kunnen globaal ingedeeld worden naar voertuigen met waterstof als directe (waterstof verbranden in de verbrandingsmotor) of indirecte brandstof (waterstof omzetten in elektrische energie) voor de aandrijving van voertuigen. In beide gevallen heeft het voertuig een voorziening voor het onder hoge druk of vloeibaar opslaan van waterstof. Daarnaast beschikt het voertuig over een systeem dat de druk van het waterstof voor verdere toepassing reduceert. De specifieke eigenschappen van waterstof zijn in Hoofdstuk 10 beschreven.

De volgende twee figuren geven een voorbeeld van een waterstofvoertuig. Beide voertuigen zijn voorzien van een brandstofcel. Bij figuur 1 is de opslag van waterstof op het dak van het voertuig. Bij figuur 2 is de opslag van waterstof in het voertuig.



Courtesy of ISE Corp.

Figuur 1. Voorbeeld bus met waterstofopslag op het dak.



Figuur 2. Voorbeeld personenauto met waterstofopslag in het voertuig.  
Opel HydroGen4

## 2 Waterstofvoertuigen en risicobeheersing

Waterstof wordt al decennia gebruikt en geproduceerd in de industrie en getransporteerd over de weg. Hierbij is ervaring opgedaan met de eigenschappen en de risico's van het medium waterstof en de risico's die in verband staan met de betreffende toepassing. Hierbij dient echter wel opgemerkt te worden dat deze ervaringen opgedaan zijn in een industriële omgeving met professionele gebruikers. Opleiding, voorschriften en toezicht zijn gebruikelijke beheersmaatregelen in de industrie om de risico's van het gebruik van waterstof te beheersen. Bij het gebruik van waterstof als voertuigbrandstof zijn de beheersmaatregelen en de omgeving anders.

Door middel van proefprojecten in binnen- en buitenland is ervaring opgedaan met het gebruik van waterstofvoertuigen. Hierdoor is er ook ervaring opgedaan met het identificeren en omgaan met risico's. Het verschil met de huidige situatie is dat de fase van de proefprojecten nu over gaat in een fase waarbij waterstofvoertuigen als alternatief dienen naast voertuigen op traditionele brandstoffen. De gecontroleerde omgeving van het proefproject verdwijnt. Het waterstofvoertuig moet onder dezelfde voorwaarden en condities kunnen worden ingezet als een voertuig dat gebruik maakt van een traditionele vloeibare brandstof.

### 2.1 Risicoperceptie

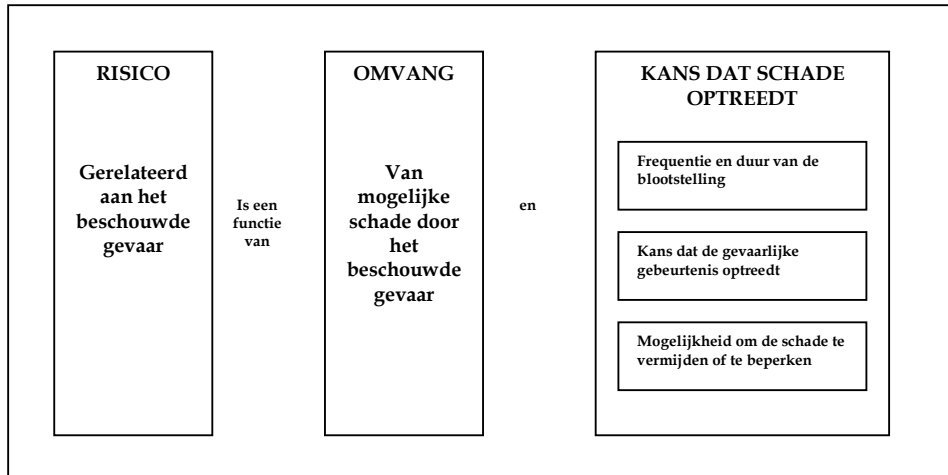
Risico's worden door individuen verschillend ervaren. Diverse factoren leiden tot een individuele risicoperceptie van risicovolle activiteiten en technologieën. Deze risicoperceptie kan leiden tot een negatieve houding en zelfs angst voor de activiteit of technologie. Enkele factoren die hierbij een rol spelen zijn ervaring met de technologie, de lange termijn effecten, afstand tot de activiteit, bekendheid met het risico.

Ook bij de toepassing van waterstof kan als gevolg van de risicoperceptie een negatieve houding ontstaan. Het is van belang om met deze perceptie van risico rekening te houden. Goede voorlichting aan de direct betrokkenen (eventueel passagiers) en omwonenden is van belang voor een succesvol project.

### 2.2 Risicoanalyse

Om een gefundeerde uitspraak te kunnen doen over gevaren is het van belang om door middel van een systematische aanpak de gevaren en het daaraan verbonden risico te inventariseren en te analyseren. Verschillende methoden zijn beschikbaar voor een systematische aanpak welke moet leiden tot het inventariseren van de gevaren. Bij de analyse van risico's is er de technische benadering van risico als het product van kans x gevolg. Uitgaande van een negatieve gebeurtenis (het gevaar) wordt vastgesteld wat de kans en de gevolgen zijn van deze gebeurtenis. Vervolgens is het mogelijk om een kwalitatieve (schatting) of een kwantitatieve (meetbaar criteria) uitspraak te doen over het risico.





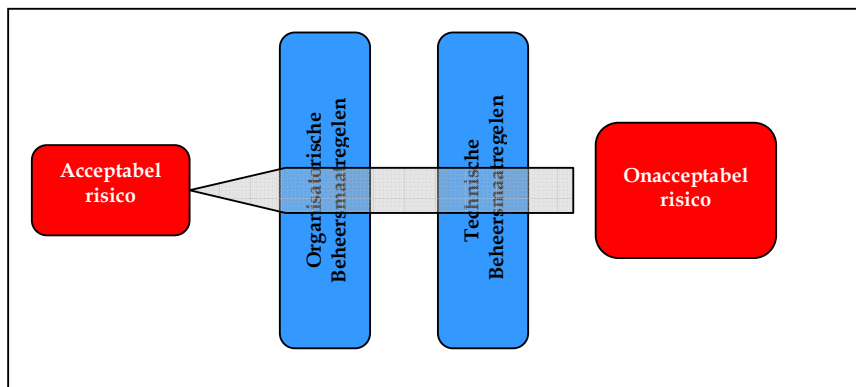
ISO 14121-1: 2007 figuur 2 risicofactoren.

De ISO 14121-1 beschrijft de principes voor risico-inventarisatie en -evaluatie. Hoewel deze norm als toepassingsgebied machines heeft, zijn de principes goed toepasbaar voor de risico-inventarisatie en evaluatie van waterstofvoertuigen. Bij de risico-inventarisatie en evaluatie moet de gebruiker, de omgeving (waaronder de passagiers) en de hulpverleners beschouwd worden als diegene die blootgesteld worden aan de gevaren.

Risicoanalyse is een continu proces. Verandering in omstandigheden en nieuwe inzichten geven aanleiding om de analyse te herzien.

### 2.3 Beheersmaatregelen

Bij onacceptabele risico's zal door het nemen van maatregelen de kans op voorkomen, of de omvang van de gevolgen, verkleind moeten worden tot er een aanvaardbaar laag risiconiveau ontstaat. De maatregelen kunnen organisatorisch (bijvoorbeeld instructies, opleiding en training) of technisch (bijvoorbeeld gasdetectie) van aard zijn. De keuze van maatregelen zal afhangen van de praktische mogelijkheden en de mate van de benodigde risicoreductie.



Bij het vaststellen van beheersmaatregelen zijn er verschillende aandachtspunten waarmee rekening gehouden moet worden. Het betreft hier onder andere de volgende punten:

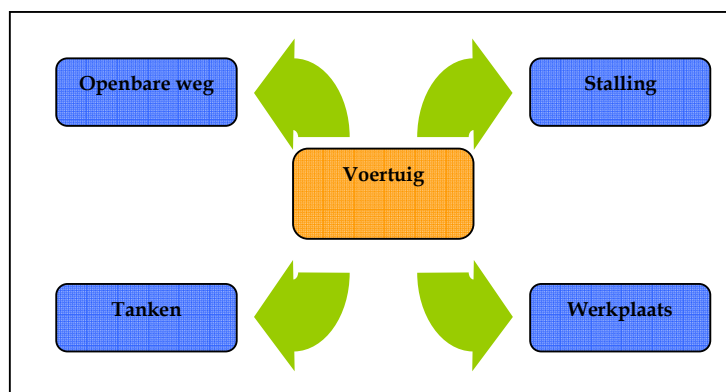
- Reduceert de maatregel het risico in voldoende mate?
- Is de maatregel voldoende betrouwbaar? (Bij instrumentele beveiligingen moet rekening gehouden worden met het falen van de techniek)
- Wordt er door het nemen van de maatregel mogelijk een nieuw risico geïntroduceerd?
- Is de maatregel eenvoudig en wordt deze niet als belastend ervaren? (Dit moet omzeilen van de maatregel voorkomen)
- Is de maatregel voldoende herkenbaar? (Men moet weten dat iets een beheersmaatregel is).

Bij aanvang van een risico-inventarisatie moeten de grenzen vastgesteld worden. Een grens kan zijn dat het gebruik van één voertuig wordt beschouwd. Wanneer vervolgens meerdere voertuigen worden gebruikt, dan zal het risico opnieuw vastgesteld moeten worden. Het nieuw vastgestelde risico kan aanleiding geven tot het nemen van aanvullende beheersmaatregelen.

### 3 De fasen van gebruik

Globaal valt voor een voertuig een generieke indeling naar de volgende gebruiksfasen te maken:

- Het tanken van het voertuig,
- Het rijden met het voertuig,
- Het stallen van het voertuig,
- Onderhoud en reparatie van het voertuig.



In elke fase veranderen de omgeving en de handelingen aan of met het voertuig. Hierdoor kunnen er nieuwe risico's geïntroduceerd worden specifiek voor de betreffende fase van gebruik. In de volgende hoofdstukken zijn per gebruiksfase risico's en aandachtspunten beschreven zoals die tijdens de inventarisatie naar voren zijn gekomen.

#### 3.1 Erkenning van het voertuig

Om met een voertuig op de openbare weg te rijden dient het voertuig te beschikken over een typegoedkeuring. Deze typegoedkeuring wordt door de Rijksdienst Wegverkeer (RDW) afgegeven op basis van overeenstemming met in Europees verband vastgestelde richtlijnen.

Voor voertuigen met een waterstofsysteem is de Verordening (EG) Nr. 406/2010 van toepassing. Deze beschrijft eisen voor zowel gasvormige als vloeibare waterstof systemen. In deze richtlijn zijn naast eisen aan de verschillende componenten die onder andere betrekking hebben op materiaaleigenschappen en gasdichtheid ook eisen beschreven die aan het waterstofsysteem worden gesteld. Zo moet bijvoorbeeld gasophoping in ongeventileerde ruimte voorkomen worden door het gas buiten het voertuig te ontluchten. Daarnaast moet door middel van een beveiliging voorkomen worden dat de tank bij brand barst en moet bij een storing waarbij waterstof kan ontsnappen, of bij een ernstig lek in het systeem, de tank automatisch worden afgesloten.

De richtlijn geeft geen voorschriften over hoe het systeem gebouwd dient te worden. Als voertuigbouwer zal men bij het ontwerp rekening moeten houden met de plaatsing van componenten en leidingen om te voorkomen dat het systeem onnodig kwetsbaar is.

De toetsing of aan alle relevante eisen is voldaan wordt uitgevoerd door de RDW of een door de RDW aangewezen technische dienst. Met het voldoen aan het totaal van eisen zoals beschreven in Verordening (EG) Nr. 406/2010 is er sprake van een qua veiligheid goedgekeurd voertuig.

Het is voor diegenen die een voertuig willen voorzien van een waterstofsysteem van belang om tijdig (in de concept fase) kennis te nemen van de inhoud van de eisen die gesteld gaan worden aan het voertuig. Afstemming met de RDW over de exact te stellen eisen voor typegoedkeuring wordt aangeraden.

Meer informatie over de richtlijnen en de goedkeuringsprocedures is te vinden op:

<http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/automotive/safety/hydrogen>

en

[www.rdw.nl](http://www.rdw.nl)

### **ADR regelgeving**

De nationale regelgeving aangaande het vervoer van gevaarlijke stoffen over de weg is gebaseerd op het internationale ADR verdrag. Dit verdrag stelt o.a. het volgende:

#### **Artikel 1.1.3.2 Vrijstellingen in samenhang met het vervoer van gassen;**

De voorschriften van het ADR zijn niet van toepassing op het vervoer van:

a) gassen in reservoirs van vervoermiddelen, die dienen voor de voortbeweging daarvan of voor de werking van hun bijzondere uitrusting (bijv. koelinrichtingen).

De ADR regelgeving is daarmee wel van toepassing op het transport van waterstof, maar niet van toepassing op voertuigen die waterstof als brandstof gebruiken.

## 4 Tanken van het voertuig

Typische drukken voor gasvormige opslag van waterstof zijn 350 en 700 bar. Met het verbruik van waterstof uit de voertuigtank(s) zal de druk in de tank(s) afnemen tot een druk waarbij het systeem niet meer kan functioneren. Door het toevoeren van waterstof kan de tank weer op druk gebracht worden.

De wijze waarop het voertuig getankt gaat worden zal afhangen van de aanwezige faciliteiten. Er kan sprake zijn van een tankstation (al dan niet openbaar) waarmee het mogelijk is te tanken tot de gewenste einddruk is bereikt. Als tijdelijke oplossing voor het tanken van een voertuig wordt er vaak voor gekozen om dit door middel van een extern flessenpakket te doen. Hierbij wordt een pakket met flessen waterstof aangesloten op het voertuig en wordt door middel van drukvereffening de tank gevuld met waterstof. In dit geval zal de uiteindelijke druk in de voertuigtanks afhangen van de druk en capaciteit van het flessenpakket.

### 4.1 Waterstoftankstations

Voor waterstoftankstations is de NPR 8099 beschikbaar. In deze Nederlandse praktijkrichtlijn zijn praktijkregels opgenomen voor de realisatie van (nieuw te bouwen) waterstoftankstations, inclusief het onderhoud en het beheer hiervan, toegespitst op de Nederlandse situatie. Deze praktijkrichtlijn kan door alle betrokken partijen worden gebruikt bij de realisatie van een waterstoftankstation, waaronder initiatiefnemers, vergunningverleners, installatie- en bouwbedrijven en beheerders.

Wanneer gebruik wordt gemaakt van een tankinstallatie welke buiten het werkveld van de NPR 8099 valt, (bijvoorbeeld in geval van drukvereffening, zie boven) is er geen specifiek document beschikbaar met aanwijzingen voor inrichting van de locatie. In deze gevallen valt men terug op de algemene bepalingen die zijn opgenomen in het Arbobesluit en de Wet algemene bepalingen omgevingsrecht (Wabo). De NPR 8099 geeft een overzicht van de wet- en regelgeving welke van toepassing is met betrekking tot de veiligheid van personen en bescherming van het milieu. Afhankelijk van de situatie (onder andere de aanwezige hoeveelheid waterstof en de wijze van opslag) kan het bevoegd gezag door middel van een vergunning specifieke eisen stellen aan de installatie.

Voor enkele deelaspecten zijn wel normen of richtlijnen beschikbaar.

Wanneer bijvoorbeeld gebruik wordt gemaakt van gasflessen met een totaal volume (waterinhoud) van meer dan 125 liter waterstof dan geeft de PGS 15 "Opslag van verpakte gevaarlijke stoffen" ([www.publicatiereeksgevaarlijkestoffen.nl](http://www.publicatiereeksgevaarlijkestoffen.nl)) aanwijzingen over de juiste wijze van opslag van deze gasflessen.

Aandachtspunten voor voorzieningen buiten het werkveld NPR 8099 zijn:

- Risico's in relatie met de te verrichten handelingen (bijvoorbeeld het tanken van het voertuig en het vullen van de bufferopslag).
- Aanwezigheid van voldoende beheersmaatregelen.
- Voorkomen van het onnodig verrichten van risicovolle handelingen (Bijvoorbeeld meerdere voertuig manoeuvreerbewegingen om bij het vulpunt te komen.)
- Het in acht nemen van veiligheidsafstanden. De NPR 8099 kan hierbij als leidraad dienen.
- Beschikbaar stellen van duidelijke instructies.

## 4.2 Veiligheidsafstanden waterstof versus LPG

Om over voldoende waterstof voor het tanken te beschikken is de aanwezigheid van een buffervoorraad noodzakelijk. Berekeningen door het RIVM [8] aan een fictief waterstoftankstation hebben aangetoond dat de te hanteren veiligheidsafstanden voor een waterstoftankstation vergelijkbaar zijn met de afstanden voor een benzine-, diesel- en CNG-, en kleiner dan voor een LPG-tankstation. Zonodig zal per situatie de veiligheidsafstand vastgesteld moeten worden.

## 4.3 Risicoanalyse (QRA)

Alle inrichtingen waar waterstof wordt afgeleverd zijn vergunningplichtig op grond van de Wet algemene bepalingen omgevingsrecht. Afhankelijk van de hoeveelheid opgeslagen waterstof kan het Besluit externe veiligheid inrichtingen (Bevi) van toepassing zijn. Het Bevi verplicht de uitvoering van een kwantitatieve risicoanalyse (QRA) om inzicht te krijgen in de risico's voor de omgeving.

Toch is het ook voor niet-Bevi-inrichtingen raadzaam om wel een QRA uit te (laten) voeren. De volgende tekst is opgenomen op de website van InfoMil.

### *QRA bij niet-Bevi*

*Bij de vergunningaanvraag voor een bedrijf met gevaarlijke stoffen mag het bevoegd gezag vragen om inzicht in de risico's. Ook als het Besluit externe veiligheid inrichtingen (Bevi) daarop niet van toepassing is.*

*Een QRA is daarvoor vaak een geschikt instrument. De vergunningoverlener moet dan wel een reëel vermoeden hebben dat de hoeveelheid gevaarlijke stoffen bij het bedrijf in geval van een calamiteit kan leiden tot slachtoffers buiten de inrichting.*

*In hoofdstuk 5 van het Inrichtingen- en vergunningenbesluit (Ivb) staat dat de aanvrager van een milieuvergunning de gegevens moet aanleveren die nodig zijn voor de beslissing op de aanvraag. Volgens artikel 5.4 Ivb kunnen dat ook gegevens zijn over mogelijke ongewone voorvallen met nadelige gevolgen voor het milieu. Bijvoorbeeld over de aard en omvang van een mogelijk incident en de maatregelen die worden getroffen ter beperking van de gevolgen.*

*Bij een bedrijf met gevaarlijke stoffen voorziet een QRA meestal in die behoefte.*

*De mogelijkheid om een QRA te gebruiken geldt niet voor activiteiten waarop het Activiteitenbesluit van toepassing is, omdat in dat besluit vaste afstanden staan voor risicovolle activiteiten met gevaarlijke stoffen. Dit geldt bijvoorbeeld voor een aardgasafleverinstallatie voor motorvoertuigen (art. 3.18 AB) of een propaanopslagtank kleiner dan 13 m<sup>3</sup> (art. 3.28 AB).*

*(Opmerking: bij het opstellen van dit artikel was de Wabo nog niet aan de orde. Thans is het Ivb omgezet naar het Besluit omgevingsrecht (Bor), en is in hoofdstuk 4 van het Bor en Regeling omgevingsrecht (Mor) het aanleveren van gegevens geregeld. Ivb artikel 5.4 is nu Mor artikel 4.2 geworden.)*

Meer informatie over externe veiligheid is te vinden in de "Wegwijzer externe veiligheid in de omgevingsvergunning" op de website van InfoMil.  
(<http://infomil.nl/wegwijzerev>)

# 5 Rijden met het voertuig

Voor toelating tot de openbare weg dient een voertuig voorzien te zijn van een goedkeuring door de RDW. Het waterstofvoertuig heeft daarmee hetzelfde minimale veiligheidsniveau als een voertuig met traditionele brandstoffen. Toch is er een aantal voertuigkenmerken waarmee rekening gehouden moet worden bij het gebruik van het voertuig.

## 5.1 Voertuigafmetingen

In veel gevallen zullen voertuigen (met name bussen en vrachtwagens, voor personenwagens geldt dit niet) met een waterstofsysteem afwijkende afmetingen hebben ten opzicht van eenzelfde voertuig met traditionele brandstoffen. Vooral de plaatsing van de tanks aan de buitenzijde van het voertuig kan grote invloed hebben op de voertuigafmetingen. Dit vereist aandacht bij het gebruik van het voertuig. Wanneer beide type voertuigen ingezet worden (bijvoorbeeld in geval van openbaarvervoer) is het van belang de chauffeur te informeren over een eventuele afwijkende voertuighoogte of grondspeling. In geval van vaste routes is het zinvol om vooraf vast te stellen of de te rijden route en eventuele alternatieve routes vrij zijn van obstakels waarmee de bus in contact kan komen. Denk hierbij aan tunnels, viaducten, overkappingen, bomen etc.

## 5.2 Aanrijdingen

Een aanrijding met een waterstofvoertuig is niet uit te sluiten. Het robuuste ontwerp van de tank en de eis uit de richtlijn dat bij een ernstig lek tussen tank en waterstofomzettingssysteem (motor of brandstofcel) de automatische kleppen op de tank moeten sluiten voorkomen het vrijkomen van grote hoeveelheden waterstof. Kleine hoeveelheden waterstof die vrijkomen als gevolg van beschadiging van het systeem zullen snel verdunnen met de buitenlucht.

Het is van groot belang om na een aanrijding de tank(s) en het systeem grondig te controleren op defecten voor het voertuig weer in gebruik wordt genomen

## 5.3 Voertuigbrand

Een voertuigbrand als gevolg van storing in het elektrische systeem van het voertuig, aanrijding of vandalisme (met name bij openbaar vervoer) is niet uit te sluiten. Een voertuigbrand zal zich over het algemeen niet instantaan ontwikkelen. De snelheid waarmee de brand zich ontwikkelt geeft de mogelijkheid om inzittenden te evacueren. De waterstoftanks zullen dus ook geleidelijk aan de warmtestraling blootgesteld worden.

De volgens de voorschriften (zie hoofdstuk 3.1) verplichte beveiligingsmaatregelen moeten het scenario van exploderen van tanks voorkomen.

Afhankelijk van de geplaatste beveiligingen zal de thermische beveiliging, na voldoende blootstelling aan de hitte, of de overdrukbeveiliging, na voldoende druk opbouw in de tank, openen. Na dit openen zal het in de tank aanwezige waterstof worden afgeblazen. Een explosie van de tank als gevolg van een te hoge inwendige druk wordt hiermee voorkomen.

Het vrijgekomen waterstof zal waarschijnlijk door de aanwezige brand worden ontstoken en verbranden. Gezien de eigenschappen van waterstof zal dit leiden tot een vlam met een hoge vlamtemperatuur echter met weinig warmtestraling<sup>1)</sup>.

Voertuigen met aardgas als brandstof (CNG voertuigen) hebben dezelfde systeemopbouw als waterstofvoertuigen. In beide gevallen is er sprake van een opslag in tanks onder hoge druk en zijn de tanks voorzien van beveiligingen. Over de afgelopen jaren zijn er in Nederland een aantal branden met CNG voertuigen geweest. Voor zover bekend hebben in al deze gevallen de beveiligingen gefunctioneerd en heeft er geen explosie van de tank plaatsgevonden.

#### 5.4 Hulpdiensten

Voor hulpverleners is het van belang te weten hoe zij dienen te handelen en welke gevaren er zijn wanneer waterstofvoertuigen betrokken zijn bij een incident. De aanwezigheid van gas onder hoge druk, hoge elektrische spanningen en mogelijk meerdere accu's vergt van hulpverleners mogelijk een andere aanpak dan bij voertuigen met traditionele brandstof.

Voorbeeld:

Bij de BMW 7 serie met vloeibaar waterstof als brandstof mocht de C-stijl van het voertuig bij calamiteiten niet doorgeknipt worden door de brandweer. Reden hiervoor is dat de leidingen van de tank naar de afblaasveiligheid op het dak van het voertuig door de C-stijl lopen.

Afgezien van het document "Handreiking voor optreden tijdens incidenten met waterstoftoepassingen Brandweer Amsterdam-Amstelland, Sector Expertise en Regie" is er voor zover bekend geen document beschikbaar voor hulpverleners.

Waar mogelijk, is het aan te raden om de hulpdiensten (met name brandweer) te informeren over de typische eigenschappen van waterstofvoertuigen, de stalling en het tankstation, en de do's en don'ts tijdens een incident.

Op de website [http://h2bestpractices.org/incident\\_procedures/](http://h2bestpractices.org/incident_procedures/) is informatie te vinden over de te nemen maatregelen en hoe te handelen in geval van incidenten.

<sup>1)</sup> In het ontbreken van koolwaterstoffen in waterstofgas ligt de oorzaak voor de geringe warmte (IR) straling.



## 6 Stallen van het voertuig

Een van de fasen tijdens het gebruik van een voertuig is het voor korte of langere tijd stallen. In veel gevallen zal dit stallen in een overdekte, geheel of gedeeltelijk gesloten ruimte plaatsvinden.

De kans op het onder normale omstandigheden vrijkomen (lekken), van gas is klein maar niet uitgesloten. Waterstof dat vrijkomt uit de installatie zal opstijgen en zich verzamelen daar waar de constructie dit toelaat en een explosief mengsel vormen. Afhankelijk van de hoeveelheid explosief mengsel zal ontsteking ervan in een omsloten ruimte leiden tot grote materiele schade en persoonlijk letsel. (explosieve verbranding van waterstof geeft hoge explosiedrukken).

Het signaleren van lekkage bijvoorbeeld door periodieke controle en het zorgen voor voldoende (mechanische) ventilatie is van belang voor een veilige stalling van het voertuig.

### 6.1 Constructieve maatregelen

Door het maken van de juiste keuzes in het ontwerp van de stalling is het mogelijk een stalling te creëren waarbij het waterstof zich niet kan ophopen en er een continue natuurlijke ventilatie aanwezig is. Bij nieuwbouw of aanpassingen aan bestaande voertuigstalling kan hiermee rekening gehouden worden. Het is hierbij wel van belang dat gewaarborgd wordt dat de constructieve maatregelen in stand blijven.

### 6.2 Vergelijking met CNG voertuigen

In feite zijn de risico's bij de stalling van waterstofvoertuigen niet wezenlijk anders dan bij CNG- voertuigen. De PGS 26: Gecomprimeerd aardgas, veilig stallen en repareren van motorvoertuigen ([www.publicatiereeksgevaarlijkestoffen.nl](http://www.publicatiereeksgevaarlijkestoffen.nl)) beschrijft diverse organisatorische en technische maatregelen voor het veilig stallen en repareren van CNG voertuigen. De in het document opgenomen maatregelen (met name het belang van ventilatie) zijn goed toepasbaar op een stalling voor waterstofvoertuigen. Met behulp van o.a. voorliggend rapport zullen uiteraard verschillen benoemd en aangepakt moeten worden.

Enkele opmerkingen bij het gebruik van de PGS 26:

- Het document beschrijft niet hoe moet worden omgegaan met meerdere voertuigen.
- In de PGS 26 wordt de stallingsruimte als afwijkend gebied overeenkomstig de NPR 7910-1 beschouwd. In de definitie van een afwijkend gebied wordt in de NPR 7910-1 gesproken over de aanwezigheid van ontstekingsbronnen en een explosieve atmosfeer inherent aan het proces. Voorbeelden hiervan zijn procesovens, fakkels, fornuizen. Het stallen van een voertuig kan niet beschouwd worden als een proces. De vraag is dan ook of hier terecht gebruik wordt gemaakt van de uitzonderingsregels.

# 7 Onderhoud en reparatie

Bij onderhoud en reparatie aan een voertuig zullen er afhankelijk van de omvang van de activiteiten, werkzaamheden aan of in de nabijheid van het waterstofsysteem verricht worden. Bij deze werkzaamheden zijn er twee aspecten waar rekening mee gehouden moet worden:

- Aanwezigheid van waterstofgas onder hoge druk.
- Vorming van een explosief mengsel na het vrijkomen van waterstof.

*De gevaren van gas onder hoge druk mogen niet onderschat worden. Kwetsbare delen van het lichaam zoals ogen en oren kunnen beschadigd raken wanneer deze worden blootgesteld aan hoge druk. Daarnaast kan het plotseling vrijkomen van gas onder hoge druk leiden tot een schrikreactie welke kan leiden tot gevolgeffecten.*

Er zijn werkzaamheden aan het voertuig welke niet direct in verband staan met het waterstofsysteem en toch een risico met zich mee kunnen brengen. Denk hierbij aan lassen of spuiten (en vervolgens drogen) van het voertuig. Van deze en ook andere werkzaamheden aan het voertuig zal vooraf vastgesteld moeten worden welke risico's er zijn.

Wanneer er werkzaamheden aan of in de nabijheid van het waterstofsysteem worden uitgevoerd is er een verhoogde kans en daarmee risico dat er waterstof zal vrijkomen. Om de risico's van gevaren te kunnen beheersen, danwel te reduceren, zijn maatregelen nodig:

- Organisatorische maatregelen zoals opleiding van en instructies aan de monteurs.
- Technische maatregelen in de werkplaats.

## 7.1 De monteur

Bij werkzaamheden aan het waterstofsysteem moeten de monteurs beschikken over voldoende kennis om veilig aan het systeem te kunnen werken. Aandachtspunten hierbij zijn:

- Kennis van het systeem en de te verrichten werkzaamheden.
- Juiste werkvolgorde.
- Kennis van verbindingstechnieken.
- Instructies hoe te handelen in het geval er waterstof vrijkomt.

## 7.2 De werkplaats

Het is van belang om de werkplaats voldoende te ventileren. Waterstof dat vrijkomt bij lekkage zal moeten worden afgevoerd naar buiten waar het zich zal verspreiden en verdunnen tot onder de onderste explosiegrens.

De NPR 7910-1 geeft aanwijzingen voor het bepalen van voldoende ventilatie.

Bij het bepalen van voldoende ventilatie moet worden uitgegaan van een bepaalde hoeveelheid gas (lekdebiet) dat vrij kan komen.

De kans dat er een zeer grote hoeveelheid gas vrijkomt zal klein, maar niet uitgesloten zijn. De "normale" ventilatie zal in dit geval niet voldoende zijn. Het is daarom aan te raden om ook de aanwezigheid van ontstekingsbronnen te voorkomen

op die plaatsen waar het waterstof zich naar zal verplaatsen en ophopen. Denk hierbij aan directe heteluchtverwarmers en verlichting.

### **7.3 Mechanische afzuiging**

Wanneer er gebruik wordt gemaakt van continue mechanische afzuiging of mechanische afzuiging welke start in het geval van een calamiteit, dan is het van groot belang om de beschikbaarheid en voldoende ventilatie capaciteit hiervan zeker te stellen. Bewaking van de ventilatie capaciteit en periodieke controle van het systeem zijn van belang.

Wanneer de afzuiging is opgenomen in een beveiligingssysteem geeft de NPR 7910-1 in hoofdstuk 8.3.6 "beschikbaarheid van ventilatie" aanwijzingen over hoe de beschikbaarheid gegarandeerd kan worden.

### **7.4 Gebruik PGS 26 [9]**

De PGS 26 beschrijft een beperkt aantal voorschriften voor het veilig werken aan CNG-installaties. Het is zinvol deze voorschriften mee te nemen bij het vaststellen van de te nemen maatregelen in de werkplaats.

### **7.5 Afblazen van gas in de buitenlucht.**

Er zijn verschillende situaties denkbaar waarbij het noodzakelijk is om het in de tanks aanwezige waterstof af te blazen. Dit afblazen van waterstofgas is niet zonder risico. Met het afblazen wordt er een grote hoeveelheid waterstof in de omgeving gebracht. Hoewel de eigenschap van waterstof om op te stijgen in dit geval gunstig is, is het effect van wind dominant [3]. Afhankelijk van windrichting en eventueel valwinden kan het gas zich in een ongewenste richting verspreiden. Omdat het gas reukloos is, is er geen waarschuwing.

Er zijn gevallen bekend, waarbij onder andere tijdens afblazen, het gas is ontstoken zonder aanwijsbare ontstekingsbron [6]. Andere rapporten wijzen op de mogelijke ontsteking als gevolg van hoge stroomsnelheden tijdens het afblazen [1].

## 8 Aanbevelingen

- Met de start van de verschillende initiatieven zal er ook waterstof getankt gaan worden. Het verdient aanbeveling om te inventariseren op welke verschillende wijzen er nu getankt wordt of waarop in de nabije toekomst getankt gaat worden. Vervolgens kan worden vastgesteld in hoeverre dit aansluit op de NPR 8099 en of deze eventuele aanpassing behoeft.
- Een belangrijke toepassing van waterstof als voertuigbrandstof zal onder andere het openbaar vervoer zijn. Het verdient voorkeur om voor deze groep gebruikers aanvullende informatie te verzamelen en beschikbaar te stellen. Hierbij valt te denken aan:
  - Informatie voor chauffeurs en omgeving (risicoperceptie).
  - Overzicht van generieke risico's en beheersmaatregelen.
- Het elektrische systeem (brandstofcel, electromotoren en toebehoren) is niet behandeld in dit document. Bij incidenten kan het elektrische systeem specifieke gevaren opleveren. Het advies is om deze gevaren en de te nemen maatregelen ter beheersing te inventariseren.
- Opstellen van een informatiedocument voor hulpdiensten. Aandachtspunten zijn o.a.:
  - Herkenbaarheid waterstofvoertuigen.
  - Rijden door tunnels.
  - Gas- en elektrische installatie aan boord.
- Er is een sterke behoefte aan informatie over de te nemen maatregelen voor het veilig stallen en werken aan waterstofvoertuigen. Om deze informatie beschikbaar te stellen kan de activiteit "stalling en werkplaats" toegevoegd worden aan de NPR 7910-1 als specifieke installatie (Hoofdstuk 13), kan de PGS 26 uitgebreid worden met maatregelen voor waterstofvoertuigen, of kan een nieuwe PGS opgesteld worden. Hierbij de aanbeveling om het nieuwe of gewijzigde documenten in lijn te brengen met de NPR 7910-1, welke aanbeveling overigens ook voor de huidige PGS 26 opgaat. In het uiteindelijke document zal onder andere praktische informatie gegeven moeten worden met betrekking tot lekbronnen en debiet en minimaal benodigde ventilatiecapaciteit. Tevens kan hier informatie aan toe worden gevoegd over de te nemen maatregelen om waterstof veilig te kunnen afblazen.

## 9 Relevante normen/richtlijnen

- PGS 26 Gecomprimeerd aardgas, veilig stallen en repareren van motorvoertuigen.
- PGS 15 Opslag van verpakte gevaarlijke stoffen.
- NPR 7910-1 Gevaarzone-indeling met betrekking tot ontploffingsgevaar.
- NEN-EN-IEC 60079-10-1: Explosive atmospheres, classification of areas.
- NPR 8099 Waterstoftankstation – Richtlijn voor de brandveilige, arbeidsveilige en milieuveilige toepassing van installaties voor het afleveren van waterstof aan voer- en vaartuigen.
- NPR-ISO/TR 15916 Considerations for the safety of hydrogen systems.
- Verordening (EG) Nr. 406/2010.
- ISO/DIS 20100 (draft) Gaseous hydrogen- Fuelling stations.

# 10 Eigenschappen van waterstof

Algemene eigenschappen van waterstof:

- Kleurloos.
- Reukloos.
- Niet giftig.
- Lage energiedichtheid per volume eenheid.
- Bij verbranding een hoge vlamsnelheid.
- Een kleurloze, onzichtbare vlam bij verbranding.
- Soortelijk gewicht 0,08988 kg/m<sup>3</sup>.
- Vlamtemperatuur in lucht 2318 K.

Ontstekings eigenschappen.





	Onderste ontstekingsgrens (volume %)	Bovenste ontstekingsgrens (volume %)	Mimumum ontstekingsenergie mJ	Ontstekings temperatuur °C
Waterstof	4,0	75,0	0,017	585
Methaan	5,3	17,0	0,274	537
Propaan	1,7	10,9	0,240	450
Benzine <sup>1)</sup>	1,0	6,0	0,240	215

<sup>1)</sup> Getallen bij benadering.  
bron NPR-ISO/TR 15916

Een volledig overzicht van de eigenschappen van waterstof is te vinden in de NPR-ISO/TR 15916.

Voor waterstof is een Gevarenkaart opgesteld, zie hierna.

Gevarenkaart waterstof.

<b>WATERSTOF</b> (drukhouder)		
CAS-nummer Kaartnummer	[1333-74-0] C-0145	Brutoformule Relatieve molecuulmassa
		H <sub>2</sub> 2,0
<b>FYSISCHE EIGENSCHAPPEN</b>		<b>ETIKETTERING</b>
Kookpunt, °C	-253	CLP (EU-GHS) Annex-VI: Signaalwoord: GEVAAR H: 220-280 Nota U
Smeltpunt, °C	n.b.	
Vlampunt, °C	brandbaar gas	 
Zelfontbrandingstemperatuur, °C	560	
Explosiegrenzen, volume% in lucht	4 - 76	EU-etikettering (voormalig Annex-I): R: 12 S: (2)-9-16-33
Minimum ontstekingsenergie, mJ	0,011	
Relatieve dichtheid gas (lucht=1)	0,07	 Zeer licht ontvlambaar
Oplosbaarheid in water, g/100 ml	niet	
Omrekenfactor: 1 mg/m <sup>3</sup> = 12,0 ppm		Transportindeling (ADR): UN-nummer 1049 GEVI 23 ERIC 2-10
<b>NFPA:</b> 		
<b>BELANGRIJKE GEGEVENS</b>		
<b>KLEURLOOS EN REUKLOOS SAMENGEPERST GAS</b> Het gas is lichter dan lucht. <sup>1)</sup> Vormt met chloor zgn. chloorknalgas dat o.a. door UV-licht ontstoken kan worden onder vorming van giftig en bijtend <i>chloorwaterstof</i> (zie aldaar). Reageert heftig met acetyleen, distikstofoxide, stikstofoxide en fluor <i>met kans op brand en explosie</i> . Vormt met zuurstof of lucht het zgn. knalgas.		
Interventiewaarden	VRW = nvt. AGW = 330 mg/m <sup>3</sup> LBW = 3300 mg/m <sup>3</sup>	Wettelijke grenswaarde niet vastgesteld
Acuut inademingsgevaar: Dit gas kan bij vrijkomen door verdringing van de lucht verstikkend werken.		
<b>DIRECTE GEVAREN</b>	<b>PREVENTIE</b>	<b>MAATREGELEN</b>
Brand: zeer brandgevaarlijk.	geen open vuur, geen vonken en niet roken.	<b>Blusstoffen:</b> toevoer afsluiten, indien niet mogelijk en geen gevaar voor omgeving, laten uitbranden, anders blussen met poeder, koolzuur.
Explosie: gas met lucht explosief. <sup>2)</sup>	gesloten apparatuur, ventilatie, explosieveilige elektrische apparatuur en verlichting, vonkarm handgereedschap.	bij brand: drukhouder koel houden door sproeien met water.
<b>NOODSITUATIE:</b> Explosiegevaar! Acuut gezondheidsgevaar! Gevarezone ONMIDDELIJK ontruimen en (laten) afzetten. Deskundige waarschuwen!		
<b>SYMPTOMEN</b>	<b>PERSOONLIJKE BESCHERMING</b>	<b>EERSTE HULP</b>
Inademen: ademnood, hoofdpijn, duizeligheid, bewusteloosheid.	ventilatie, ruimtelijke afzuiging, plaatselijke afzuiging, onafhankelijke adembescherming (onder geen beding filterbus).	frisse lucht, rust, en direct spoedeisende medische hulp inzetten.
Laat arts zo nodig het NVIC (+31(0)30-274 88 88) of het Belgisch Antigifcentrum (+32(0)70-245.245) bellen voor aanwijzingen over verdere behandeling.		
<b>MILIEU, OPRUIMING EN OPSLAG</b>		
Opruimen gemorst product: Deskundige waarschuwen. Draag verse luchtkap/ademluchtmasker. Extra ventilatie. Opslag: Brandveilig, ventilatie langs het plafond. <sup>3)</sup>		
<b>Opmerkingen:</b> Bij krachtig uitstromen van waterstof uit gasfles of in geval van gaslek kan in de lucht zelfontbranding optreden. <b>Voetnoten:</b> <sup>1)</sup> Bij hoge concentraties in de lucht, bijvoorbeeld in een slecht geventileerde ruimte, ontstaat zuurstofgebrek met kans op bewusteloosheid. <sup>2)</sup> Waterstof aantonen met geschikte explosiemeter. De gewone explosiemeter niet gebruiken. <sup>3)</sup> Bij opslag ventilatie op het hoogste punt.		

1380

Chemiekaarten® 26<sup>ste</sup> editie 2011

## 10.1 Vergelijk tussen de brandstoffen waterstof en benzine (dampfase)

Onderstaande tekst is overgenomen uit het document "Failure modes and effects analysis for hydrogen fuel cell vehicles - subtask 1. NHTSA, February 2009".

De tekst geeft een vergelijking van verschillende veiligheidsaspecten van waterstof en benzine in dampfase. De tekst sluit af met een samenvatting.

- On a mass, fuel-only calorific basis, hydrogen has about three times the energy content of gasoline, a value nearly equivalent to TNT, a solid high explosive, which sounds very hazardous. However, on a volumetric, fuel-air mixture calorific basis, gasoline-air has about twice the energy content as a hydrogen-air mixture.
- Because gasoline vapor has the lowest lower flammability limit (a critical flammability-limit metric for unconfined or open-air releases), it appears to be more hazardous than hydrogen in terms of how little quantity of released fuel is needed to create a flammable atmosphere. However, because it is flammable over a 10-times wider range of concentrations, hydrogen has a greater probability of being present at flammable levels during leaks.
- Because gasoline has the lowest lower detonation limit (a critical flammability-limit metric for confined releases), it appears to be more hazardous than hydrogen in terms of how little quantity of released fuel is needed to create a detonable (supersonic combustion) atmosphere. However, because it is detonable over a 20-times wider range of concentrations, hydrogen has a greater probability of being present at levels during leaks that could result in detonation. Moreover, it is more difficult to initiate the detonation of gasoline and natural gas than hydrogen, which itself requires on the order of 10 kilo-Joules.
- During leaks into the open air, gasoline accumulates as a liquid on surfaces or in a pool, then evaporates slowly, allowing extended time for a "fuel source" to be active, whereas, because of its high buoyancy and diffusivity in air, hydrogen would disperse very rapidly and allow only a limited duration over which any mixture of it in air were within its flammability range. Moreover, hydrogen dispersion would be up and away from the source, whereas gasoline vapor would remain close to ground level.
- During leaks into confined spaces, gasoline vapor tends to increase in concentration from the bottom (floor) up, soon exceeding its upper flammability limit, whereas hydrogen will tend to increase in concentration from the top (ceiling) down, and remain flammable for a longer period of time because of its nearly 10-times higher upper flammability limit.
- Because it requires the lowest minimum-ignition temperature, gasoline would appear to be more prone to ignite in air than hydrogen or natural gas when exposed to a hot surface. This effect is a function of the nature of the hot surface, and is quite variable.
- Because it requires 10-times lower minimum-ignition energy (MIE), hydrogen would be more prone to ignite in air than gasoline vapor or natural gas when exposed to the discharge of static electricity. For reference, the spark from a human electrostatic discharge can be up to 500 times that needed to ignite hydrogen. However, this comparison needs qualification because MIE usually occurs at near-stoichiometric fuel/air ratios. At off-stoichiometric fuel/air ratios, especially near the lower and upper flammability limits, the MIE for hydrogen, natural gas, and gasoline become comparable (~10 mJ), and, therefore, are equally safe (or hazardous).



- Hydrogen has been known to self-ignite during rapid discharge. While hydrogen has a low MIE, the exact ignition mechanism is unknown. It may be caused by heating during discharge due to negative Joule-Thomson effects or charging and electrical discharge of small particles in the air.
- If ignited, hydrogen leaks burn with a non-luminous, nearly invisible and difficult-to-detect bluish flame. (These flames are more easily seen in the dark.) In contrast, the flames of hydrocarbon-based fuels are luminous (reddish-yellow), because of the incandescence of the soot present.
- Because it emits about 5 times less thermal radiation as a gasoline vapor-air fire, a hydrogen-air fire has a much lower propensity to cause skin burns on subjects outside of the fire zone in the case of a large substantial “venting” or “blowdown” release of hydrogen.
- Because of its 6-times faster burning velocity, which reflects overall reaction rate, hydrogen fires can be of much shorter duration than fires involving gasoline vapor or natural gas.
- Hydrogen-air flames will more readily propagate through structures because hydrogen flames have the smallest quenching distance. A hydrogen flame will not be prevented from passing through openings as readily as fires involving gasoline vapor and natural gas.
- Because it has the hottest adiabatic flame temperature, hydrogen-air deflagration (subsonic combustion) generates about a 1.5-times higher maximum explosion overpressure, which would directly translate into more physical damage as a result of the explosion. If the ignition resulted in a detonation instead of a deflagration, the magnitude of the resulting overpressure could be up to 20 times higher on a TNT-equivalent basis. Such detonation is more prone in confined spaces than in the open air.

As illustrated, the risks and hazards of hydrogen as a transportation fuel are sometimes better, sometimes worse, and sometimes different from hydrocarbon-based transportation fuels. This does not imply one fuel is inherently safer than another, merely that the appropriate engineering controls must be developed and applied for each to ensure the overall desired level of safety is achieved.

# 11 Bibliografie

1. Failure modes and effects analysis for hydrogen fuel cell vehicles - subtask 1. NHTSA, February 2009.
2. Safety issues with hydrogen as a vehicle fuel, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, September 1999
3. NPR-ISO/TR 15916 Considerations for the safety of hydrogen systems, maart 2004.
4. NPR 8099 Waterstoftankstations - Richtlijn voor de brandveilige, arbeidsveilige en milieuveilige toepassing van installaties voor het afleveren van waterstof aan voer- en vaartuigen, augustus 2010.
5. Safety standard for hydrogen and hydrogen systems Guidelines for Hydrogen System Design, Materials Selection, Operations, Storage, and Transportation, NASA.
6. Spontaneous ignition of hydrogen Literature Review Prepared by the Health and Safety Laboratory for the Health and Safety Executive 2008
7. Risiko, unser Umgang mit der Angst, 7. Fuldaer Elektrotechnik-Kolloquium 2002.
8. Safety distances for hydrogen filling stations, RIVM, uitgave Journal of loss prevention in the process industries, 19 (2006).
9. PGS 26 Gecomprimeerd aardgas, veilig stallen en repareren van motorvoertuigen.
10. NEN-EN- ISO 14121-1:2007 safety of machines- risk assessment
11. Handreiking voor optreden tijdens incidenten met waterstoftoepassingen. Brandweer Amsterdam-Amstelland, Sector Expertise en Regie.