



**VINÇOTTE ENVIRONMENT**

Contactadres: Business Class Kantorenpark • Jan Ollieslagerslaan 35 • 1800 Vilvoorde • België  
Tel +32 (0)2 674 57 11 • fax +32 (0)2 674 51 82 • environment@vincotte.be • www.vincotte.com

Sociale Zetel: Diamant Building • A. Reyerslaan 80 • 1000 Brussel • België

Safety, quality and environmental services

Contract beheerd door **SECTIE STUDIES**

STUDIE BETREFFENDE DE TECHNISCHE EN  
REGLEMENTAIRE ANALYSE VAN DE MARKT VAN  
WATERSTOF ALS ENERGIEVECTOR VOOR  
AUTOMOBIEL- EN STATIONTOEPASSINGEN

**BIM**  
**GULLEDELLE 100**  
**1200 BRUSSEL**

**REFERENTIE : 5RE-52-60166311-01**



**VINÇOTTE ENVIRONMENT**

Contactadres: Business Class Kantorenpark • Jan Ollieslagerslaan 35 • 1800 Vilvoorde • België  
Tel +32 (0)2 674 57 11 • fax +32 (0)2 674 51 82 • environment@vincotte.be • www.vincotte.com

Sociale Zetel: Diamant Building • A. Reyerslaan 80 • 1000 Brussel • België

Safety, quality and environmental services

Contract beheerd door **SECTIE STUDIES**

<p>STUDIE BETREFFENDE DE TECHNISCHE EN REGLEMENTAIRE ANALYSE VAN DE MARKT VAN WATERSTOF ALS ENERGIEVECTOR VOOR AUTOMOBIEL- EN STATIONTOEPASSINGEN</p> <p>FASE 1</p> <p>TECHNISCHE ANALYSE VAN DE WATERSTOFMARKT</p>	<p><b>BIM</b> <b>GULLEDELLE 100</b> <b>1200 BRUSSEL</b></p>
<p>REFERENTIE : <b>5RE-52-60166311-01</b></p>	<p><b>Januari 2007</b></p>

# INHOUDSTAFEL

<b>HOOFDSTUK 1 : Inleiding</b> .....	<b>4</b>
1.1 Inleiding .....	4
1.2 Context en doel van de opdracht .....	4
1.3 Methodologie .....	5
<b>HOOFDSTUK 2 : Waterstof</b> .....	<b>6</b>
2.1 Inleiding .....	6
2.2 Waterstof en waterstofgas .....	6
2.3 Eigenschappen van waterstof .....	7
2.4 Reactiviteit .....	8
2.5 Veiligheidsaspecten .....	8
2.6 Toepassingen van waterstof .....	9
2.7 Waterstof als energiedrager .....	10
<b>HOOFDSTUK 3 : Productie van Waterstof</b> .....	<b>12</b>
3.1 Inleiding .....	12
3.2 Elektrolyseprocessen .....	13
3.2.1 Elektrolyse van water .....	13
3.2.2 Hoge temperatuurelektrolyse (HTE) van water .....	13
3.2.3 Thermochemische productie van waterstof .....	13
3.2.4 Elektrolyse van zout .....	14
3.3 Reforming .....	14
3.4 Biologische productie .....	15
3.5 Alternatieven voor de waterstofproductie .....	16
3.6 Besluit .....	16
<b>HOOFDSTUK 4 : Opslag en distributie van Waterstof</b> .....	<b>18</b>
4.1 Inleiding .....	18
4.2 Opslag als vloeistof .....	18
4.3 Opslag als gas .....	20
4.4 Opslag in een vaste stof .....	21
4.4.1 Opslag in poreuse materialen .....	21
4.4.2 Opslag als metaalhydride .....	21
4.5 Ondergrondse opslag .....	24
4.6 Besluit .....	24
<b>HOOFDSTUK 5 : Verdeling van waterstof</b> .....	<b>25</b>
5.1 Inleiding .....	25
5.2 Verdeelstations .....	25
5.2.1 Verdeling van vloeibare waterstof .....	26
5.2.2 Verdeling van gecomprieeerde gasvormige waterstof .....	27
5.2.3 Verdeling van waterstof aan vastestoffenopslag .....	28
5.3 Bevoorrading .....	28
5.3.1 In situ productie .....	28
5.3.2 Pijpleidingtransport .....	29
5.3.3 Wegtransport .....	29

5.4	Verdeling van waterstof .....	25
<b>HOOFDSTUK 6 : Gebruik van waterstof.....</b>		<b>31</b>
6.1	Brandstofcellen .....	31
6.1.1	Algemeen .....	31
6.1.2	SOFC .....	31
6.1.3	PEMFC .....	32
6.2	Verbrandingsmotoren .....	32
6.3	Waterstof in de Transportsector .....	32
6.3.1	Algemeen .....	32
6.3.2	Waterstofmotoren .....	33
6.3.3	Opslag van waterstof in voertuigen .....	33
6.4	Vaste toepassingen .....	35
<b>HOOFDSTUK 7 : Veiligheid.....</b>		<b>36</b>
7.1	Veiligheidsaspecten van waterstof .....	36
7.2	Veiligheidsrisico's .....	38
7.3	Veiligheidsafstanden.....	38
7.4	Veiligheidsaspecten van waterstof in voertuigen.....	40
7.5	Normering .....	40
7.6	Regulering .....	41
<b>HOOFDSTUK 8 : Waterstof en het milieu .....</b>		<b>42</b>
8.1	Inleiding .....	42
8.2	Waterstof in het milieu .....	42
8.3	De waterstofinfrastructuur en het milieu .....	44
8.4	Toekomstvoorspellingen .....	44
<b>HOOFDSTUK 9 : Vergelijkende tabellen .....</b>		<b>45</b>
<b>HOOFDSTUK 10 : Conclusie .....</b>		<b>55</b>

# HOOFDSTUK 1 : INLEIDING

---

## 1.1 INLEIDING

Voorliggende studie betreft de uitvoering van fase 1 van de studie betreffende de technische en reglementaire analyse van de markt van waterstof als energievector voor automobiel- en stationtoepassingen.

Deze studie wordt opgesteld in opdracht van:

BRUSSELS INSTITUUT VOOR MILIEUBEHEER (BIM)  
GULLEDELLE 100  
B – 1200 BRUSSEL

Fase 1 betreft de technische analyse van de waterstofmarkt.

## 1.2 CONTEXT EN DOEL VAN DE OPDRACHT

In het streven om de verdere economische ontwikkeling van onze geïndustrialiseerde maatschappij te verenigen met de beperking van de verontreinigende emissies, beschouwen velen waterstof als één van de meest veelbelovende alternatieve brandstoffen. Het gaat immers om een zuivere energiebron die uit eender welk basismateriaal kan worden aangemaakt.

Als vervangbrandstof voor vervoer kan waterstof rekenen op de bijzondere belangstelling van de grote autoconstructeurs die, geruggensteund door de overheid van de industrielanden, miljarden dollars investeren in de ontwikkeling van personenauto's, autobussen en vrachtauto's die op waterstof rijden. Terzelfder tijd wordt het probleem van de productie, opslag en distributie van waterstof bestudeerd, wat tot de geleidelijke installatie van 'waterstofstations' leidt.

Het resultaat van die inspanningen krijgt nu concreet vorm in tal van Europese steden, waar diverse demonstratieprojecten en langdurige testen met waterstofvoertuigen en –stations lopen. Brussel is geen uitzondering.

Het Brussels Hoofdstedelijk Gewest heeft als doel met deze studie het gebruik van waterstof als energievector op zowel technologische als reglementair vlak in kaart te brengen en daarbij de veiligheidsvoorschriften, de industriële specificaties en de procedures voor de periodieke inspectie van de installaties en de bestaande brandstofsysteemen te analyseren. Op deze manier kan het Gewest een antwoord bieden op het groeiend aantal aanvragen voor de installatie en exploitatie van (tijdelijke of definitieve) waterstofstations op zijn grondgebied.

Met deze studie wil het Brussels Hoofdstedelijk Gewest dan ook deze nieuwe technologie van nabij volgen om zo een bijdrage te leveren aan een duurzame mobiliteit.

## 1.3 METHODOLOGIE

Fase 1 van voorliggende studie betreft een technische analyse van de waterstofmarkt, waarin dieper wordt ingegaan op de verschillende mogelijke ontwikkelingen met betrekking tot de productie, opslag en distributie van waterstof, de technische aspecten ervan alsook op het toekomstperspectief dat deze ontwikkelingen bieden.

Het zal een globaal beeld geven van de zogeheten 'waterstofeconomie', waarbij de waterstofcyclus bekeken zal worden van bron tot verbranding als energiedrager. Zowel voor- als nadelen van de waterstofeconomie worden besproken.

Het resultaat van deze studie zal voorgesteld worden in vergelijkende tabellen, voor zowel productie, opslag als distributie, waarbij verbanden gelegd zullen worden tussen de verschillende elementen die deze studie oplevert.

Onafhankelijk van de voorgestelde en besproken technologie, zal steeds rekening gehouden worden met de veiligheidsaspecten ervan, gezien zij de leidraad zouden moeten vormen voor minstens de opslag en distributie van waterstof als energievectoren voor automobiel- en stationtoepassingen. Hierbij wordt teruggegrepen naar de Europese SEVESO en ATEX richtlijnen, die verplichten de risico's op en de gevolgen van respectievelijk zware ongevallen met gevaarlijke producten en explosies in kaart te brengen en hieraan maatregelen koppelen.

Ten slotte zal specifiek voor de productie van waterstof nagegaan worden welke de mogelijkheden zijn met betrekking tot productietechnieken en productielocaties binnen de grenzen van de besproken technologie. Deze conclusies zullen vervolgens worden toegepast op de grenzen van het grondgebied van het Brussels Hoofdstedelijk Gewest.

## HOOFDSTUK 2 : WATERSTOF

---

### 2.1 INLEIDING

Waterstof is een welgekend element, waarvan de fysische eigenschappen reeds lang bekend zijn.

Onder normale omstandigheden is waterstof een kleurloos, geurloos, smaakloos gas. Het is daarnaast een niet giftig, maar zeer ontvlambaar gas.

Waterstof heeft het CAS-nummer 133-74-0, het EG-nummer 001-001-00-9 en het UNO-nummer 1049.

### 2.2 WATERSTOF EN WATERSTOFGAS

Waterstof is een scheikundig element met symbool H en atoomnummer 1. Het is het kleinste atoom. In zuivere vorm komt waterstof voor als het diatomisch molecule  $H_2$ . Als naar waterstof verwezen wordt, is het de molecule  $H_2$  dat bedoeld wordt. Waterstof is het lichtst bekende gas.

Het werd voor het eerst beschreven door de Britse chemicus Robert Boyle in 1671. Hij had het over een brandbaar gas dat vrijkwam bij de reactie tussen ijzer en een verdund zuur.

Het is maar pas later in, 1766, dat de Britse wetenschapper Henry Cavendish, dat ontdekt werd dat dit gas in feite een chemisch element betrof. Hoewel hij veel eigenschappen zeer nauwkeurig wist te beschrijven, vermoedde hij dat in plaats van het zuur, het metaal de bron van het gas was. Daarom noemde hij zijn nieuw ontdekte element 'brandbaar gas van metalen'.

Enkele jaren later gaf Antoine Lavoisier waterstof de huidige naam. De naam waterstof (engels: hydrogen) of hydrogenium is afkomstig van de Griekse termen '*hydor*' (*water*) en '*geinomai*' (ontstaan uit), letterlijk 'waaruit water ontstaat'.

Het element waterstof is het op acht na meest voorkomend element in de aardkorst (1400 mg/kg) en na zuurstof het meest overvloedige element in de oppervlaktewateren ( $1,08 \cdot 10^5$  mg/l).

Waterstofgas komt veel minder voor. In de atmosfeer is minder dan 0,1% waterstofgas aanwezig.

Het is daarnaast het meest voorkomend element in het universum. In ons zonnestelsel bestaat meer dan 91% van het totale gewicht uit waterstof<sup>1</sup>.

Waterstof zelf bestaat uit één proton en één elektron. De waterstofmolecule  $H_2$  bestaat uit twee atomen waterstof en heeft twee verschillende verschijningsvormen: ortho-waterstof en para-waterstof. Het verschil tussen de twee ligt in de richting van de spin van de kernen. In ortho-waterstof hebben beide kernen een gelijke (parallele) spin, in para-waterstof is de spin van de kernen tegengesteld (anti-parallel) aan elkaar. In normale omstandigheden bevindt 75% van de waterstof zich in de ortho-toestand en 25% in de para-toestand. Deze evenwichtstoestand varieert met de temperatuur. Naarmate de temperatuur daalt wordt ortho-waterstof omgezet in para-

---

1 Handbook of Chemistry and Physics, 75th Edition, D.R. Lide Ed., CRC Press, Boca Raton, USA, 1994

waterstof. Waterstof in vloeibare vorm bij een temperatuur lager dan  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ , bestaat nog bijna uitsluitend (99,8%) uit para-waterstof<sup>2</sup>.

De omzetting van de ortho- naar de para-toestand gaat gepaard met de vrijzetting van energie, wat belangrijke consequentie heeft voor het vloeibaar maken van waterstof. Bij de omzetting van ortho naar para komt immers meer energie vrij dan de verdampingswarmte van waterstof, wat kan leiden tot verdampingsverliezen.

## 2.3 EIGENSCHAPPEN VAN WATERSTOF

Onder normale omstandigheden is waterstof een gas. Bij een normale druk kookt het bij  $-252,87^{\circ}\text{C}$  en smelt het bij  $-259,34^{\circ}\text{C}$ . De kooktemperatuur stijgt bij toenemende druk, tot aan het kritisch punt van waterstof, waar de kooktemperatuur  $-240^{\circ}\text{C}$  bij  $\pm 13$  bar bedraagt. Hogere drukken hebben geen invloed meer op het kookpunt.

Waterstof heeft een zeer lage dichtheid, zowel in gasvormige als in vloeibare toestand. Zo bedraagt de dichtheid van het gas  $0,08988\text{ kg/m}^3$ , dit is zo'n 7% van de dichtheid van lucht. Vloeibare waterstof ( $T = -253^{\circ}\text{C}$ ) heeft een dichtheid van  $70,8\text{ kg/m}^3$ , daar waar water een densiteit heeft van  $1000\text{ kg/m}^3$ . Als vaste stof verandert de dichtheid nagenoeg niet en bedraagt nog altijd maar  $70,6\text{ kg/m}^3$ .

Bij drukken hoger dan  $\pm 100$  bar gedraagt waterstof zich, in tegenstelling tot de meeste andere gassen, niet langer als een ideaal gas. Dit is voornamelijk te wijten aan de hoge polariteit van waterstof, waarbij de krachten tussen de verschillende moleculen een sterke rol spelen.

Dit wordt beschreven door het invoeren van een compressibiliteitsfactor  $Z$  in de ideale gaswet.

$$(1) \quad P.V = n.Z.R.T$$

Deze compressibiliteitsfactor wordt experimenteel bepaald en is afhankelijk van de aard van de stof, de temperatuur en de druk. In onderstaande tabel zijn waarden opgenomen voor de compressibiliteitsfactor  $Z$  van waterstof bij een temperatuur van  $20^{\circ}\text{C}$ .

Tabel # 2.1 : Compressibiliteitsfactor $Z$ voor $\text{H}_2$ bij $20^{\circ}\text{C}$										
DRUK (MPa)	0,1013	5	10	20	30	35	40	50	70	100
$Z$	1	1,032	1,065	1,132	1,201	1,236	1,272	1,344	1,489	1,702

Met behulp van deze factoren kan het gedrag van waterstof bij hoge druk voorspeld worden. In de praktijk komt het erop neer dat de ideale gaswet de dichtheid van waterstof overschat bij hoge drukken ( $> 100$  bar).

Een aantal bijkomende gegevens met betrekking tot waterstof<sup>3</sup> wordt hieronder gegeven:

<sup>2</sup> Encyclopedie des Gaz – Gas Encyclopaedia, L' Air Liquide, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, The Netherlands, 1976

<sup>3</sup> Chemiekaarten® - Gegevens voor veilig werken met chemicaliën, 18<sup>de</sup> editie, TNO Arbeid en Vereniging van Nederlandse Chemische Industrie VNCI, ten Hagen & Stam, 2003



<b>Tabel # 2.2: Eigenschappen waterstof</b>	
WATERSTOF (DRUKHOUDER)	
Structuurformule	H <sub>2</sub>
Moleculair gewicht	2
<b>VEILIGHEIDSINFORMATIE</b>	
Risicozinnen	12
Etikettering	Zeer licht ontvlambaar
NFPA	H: 0 – F: 4 – R: 0
<b>FYSISCHE EIGENSCHAPPEN</b>	
Kookpunt	-253°C
Vlampunt	Brandbaar gas
Zelfontbrandingstemperatuur	560°C
Verdampingswarmte	0,904 kJ/mol – 446 kJ/kg
Specifieke warmte	14304 J/kg.K – 28836 J/mol.K
Explosiegrenzen, vol% in lucht	4 – 76
pH	–
Oplosbaarheid in water	Niet
Oplosbaarheid in organische oplosmiddelen	-

## 2.4 REACTIVITEIT

Waterstof kan met de meeste andere elementen verbindingen aangaan. De elektronegativiteit van waterstof is 2,2, daarom kan het in verbindingen zowel de meer metallische als de meer niet-metallische component zijn. Eerstgenoemde verbindingen worden hydriden genoemd, waarbij waterstof ofwel als H<sup>-</sup> ionen deelneemt ofwel als atomen tussen het rooster van een ander element als opgeloste stof.

Het H<sup>+</sup> ion komt in de chemie nooit alleen voor. Dit zou slechts een kern zonder elektronenschil zijn die daarom sterk de neiging heeft elektronen aan te trekken. In een zure oplossing, die vaak wordt beschreven als een oplossing waarin vrije H<sup>+</sup> ionen voorkomen, zijn die ionen echter gebonden in ionen als H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> omdat de protonen zo reactief zijn.

## 2.5 VEILIGHEIDSASPECTEN<sup>4</sup>

Waterstof heeft een breed ontstekingstraject van 4 tot 76%, heeft een lage ontstekingsenergie (0,019 mJ) en brandt snel. Daardoor ontsteekt waterstof heel gemakkelijk, waarbij het snel verbrandt.

<sup>4</sup> Lees' Loss Prevention in the Process Industries, 3<sup>de</sup> editie, Dr. S. Mannan, Elsevier Butterworth – Heinemann, 2005

De brandbaarheid van waterstof brengt een explosierisico met zich mee. In de open lucht verspreidt waterstof zich snel, als gevolg van de grote vluchtigheid van het gas, waardoor snelle verdunning optreedt. Toch zijn gaswolkexplosies mogelijk.

De grote vluchtigheid zorgt er ook voor dat waterstof in vergelijking met de meeste andere gassen veel penetranter is en dat ook de vlam door veel kleinere openingen kan gaan, waardoor het dikwijls moeilijker is bepaalde installatieonderdelen waterstofvrij te houden.

Waterstof kan dus ontbranden, maar de resulterende vlammen zorgen slechts voor een beperkte warmtestraling, die bijvoorbeeld maar een tiende bedraagt van brandend propaan. In dit opzicht zijn waterstofbranden minder gevaarlijk dan gelijkaardige branden met koolwaterstoffen.

De vlammen zijn evenwel mogelijk onzichtbaar, waardoor ze moeilijk te detecteren zijn.

Bij hogere temperaturen en drukken tast waterstof staal aan, waardoor brosheid en decarbonisatie van het staal kunnen optreden. Het gebruik van aangepaste materialen bij de behandeling van waterstof is dan ook noodzakelijk.

Waterstof heeft daarbij de eigenschappen op te lossen in bepaalde (vaste) metalen en zo zekere afstanden te overbruggen. Zo kan het metaal palladium tot meer dan 1000 keer het volume aan waterstof opnemen.

Waterstoflekken zijn veel voorkomend. Waterstof diffundeert zeer gemakkelijk door de kleinste openingen, waardoor, indien er zich een drukverschil met de omgeving voordoet, het omgekeerd Joule-Thomson effect optreedt, waarbij het ontsnappend gas opwarmt en zelfs kan ontsteken.

Voor waterstof zijn geen toxische eigenschappen bekend. Bij blootstelling aan hoge concentraties kan waterstof evenwel een verstikkende werking hebben.

## 2.6 TOEPASSINGEN VAN WATERSTOF

Momenteel wordt waterstof bijna uitsluitend gebruikt als 'chemische grondstof'; het gebruik van waterstof als energiedrager is minimaal.

Wereldwijd wordt de helft van de waterstof gebruikt in de productie van ammoniak ( $\text{NH}_3$ ), een kleine 40% wordt gebruikt door de petrochemische industrie (raffinaderijen) en de resterende ruime 10% wordt gebruikt in de voedingsindustrie (hydrogenatie van vetten, margarines), de productie van methanol, enzovoorts.

Er wordt verwacht dat de vraag naar waterstof in de toekomst zal toenemen, vooral in de raffinaderijen, waar waterstof gebruikt in het ontzwavelingsproces van aardolieproducten.

Verder wordt waterstof gebruikt in bedrijven/processen waar gewerkt moet worden onder een gecontroleerde atmosfeer, zoals bij de productie van glas of halfgeleiders.

Indien waterstof in de toekomst ook als energiedrager doorbreekt, kan het gebruikt worden in verbrandingsmotoren, brandstofcellen en zo meer. De vraag naar waterstof zal dan exponentieel toenemen.

## 2.7 WATERSTOF ALS ENERGIEDRAGER

Waterstof is geen energiebron, het is een energiedrager. Dat wil zeggen dat eerst energie gestoken moet worden in de productie ervan, die op zijn beurt wordt afgegeven bij verbranding.

Waterstof verbrandt met zuurstof ter vorming van water, waarbij energie wordt vrij gezet in de vorm van warmte. De hoeveelheid energie die vrijkomt is afhankelijk van het feit of het gevormde water als waterdamp dan wel in vloeibare toestand voorkomt. In dit laatste geval zal de energie hoger zijn dan in het eerste geval, zo'n 10%, omdat hier ook de verdampingsenergie van het water vrijkomt. Een en ander wordt verduidelijkt met behulp van onderstaande vergelijkingen:



OVW staat hierbij voor onderste verbrandingswarmte, terwijl BVW staat voor bovenste verbrandingswarmte.

Zoals kan afgeleid worden uit bovenstaande vergelijkingen is de verbranding van waterstof een schoon proces, waarbij enkel water(damp) gevormd wordt. In de praktijk zal door de hoge temperatuur gelijktijdige verbranding van kleine hoeveelheden stikstof ( $\text{N}_2$ ) optreden, waardoor ook een zekere hoeveelheid  $\text{NO}_x$  zal worden uitgestoten. Er wordt evenwel geen roet gevormd.

De energie-inhoud van waterstof kan ofwel uitgedrukt worden per eenheid van massa (gravimetrisch energetisch vermogen) ofwel per eenheid van volume (volumetrisch energetisch vermogen). Gezien het zeer groot volume dat waterstof inneemt per eenheid massa, heeft waterstof een zeer groot gravimetrisch energetisch vermogen en een zeer laag volumetrisch energetisch vermogen.

Uitgaande van de verbrandingswarmte zoals gegeven in vergelijking (1) geeft dit een gravimetrisch energetisch vermogen van  $\sim 120 \text{ MJ/kg}$  en een volumetrisch energetisch vermogen van  $\sim 10,8 \text{ MJ/m}^3$ .

Voor vergelijking (2) wordt dit dan  $141 \text{ MJ/kg}$  en  $12,7 \text{ MJ/m}^3$  respectievelijk.

In onderstaande tabel worden ter vergelijking waarden gegeven voor andere, meer klassieke brandstoffen.

Tabel # 2.3 : Energie-inhoud voor verschillende brandstoffen		
BRANDSTOF	GRAVIMETRISCH ENERGETISCH VERMOGEN	VOLUMETRISCH ENERGETISCH VERMOGEN
Waterstof (200 bar)	141 MJ/kg	2,4 MJ/liter
Waterstof (vloeibaar)	141 MJ/kg	10 MJ/liter
Methanol (vloeibaar)	22,7 MJ/kg	19 MJ/liter
Benzine (vloeibaar)	47,6 MJ/kg	33,4 MJ/liter
Methaan (vloeibaar)	55,7 MJ/kg	25 MJ/liter

Bovenstaande tabel betreft de bovenste verbrandingswarmte voor waterstof.

Zoals bovenstaande tabel verduidelijkt heeft waterstof in vergelijking met andere brandstoffen een hoge energetische inhoud per eenheid van massa, terwijl die laag is per eenheid van volume.

Uiteraard zal het volumetrisch energetisch vermogen toenemen met toenemende druk en het hoogst zijn voor vloeistoffen, als gevolg van een toenemende dichtheid.

Vergeleken met fossiele brandstoffen is dus een veel groter volume nodig om éézelfde hoeveelheid energie op te slaan in waterstof onder druk of zelfs in vloeibare toestand, wat uiteindelijk een van de belangrijkste tekortkomingen van waterstof als energiedrager zal zijn. Redenen hiervoor zijn de compressibiliteit van waterstof en de bijzonder lage dichtheden van waterstof, zelfs in vloeibare toestand.

De eigenschappen van waterstof verschillen aanzienlijk van de eigenschappen van de gebruikelijke brandstoffen, zoals benzine of aardgas (methaan). Waterstof heeft een veel breder ontstekingstraject, is zeer gevoelig voor detonatie en beschikt ten opzichte van meer klassieke brandstoffen over een relatief lage ontstekingsenergie, indien gemengd met lucht in de juiste hoeveelheden.

Waterstof is, zoals reeds beschreven, aanmerkelijk minder gevaarlijk waar het brandgevaar en thermisch gevaar betreft, zeker in een open omgeving. In een gesloten omgeving kan het echter verantwoordelijk zijn voor een grotere drukeffecten.

## HOOFDSTUK 3 : PRODUCTIE VAN WATERSTOF

### 3.1 INLEIDING

Waterstof is een energiedrager, wat betekent dat er energie gestopt moet worden in de productie ervan.

Indien waterstof een toekomst wil hebben als energiedrager ter vervanging van fossiele brandstoffen, dan zal het inzetten van beschikbare productiecapaciteit, die kan voorzien in de enorme hoeveelheden die nodig zijn, één van de belangrijkste factoren zijn bij het omschakelen naar een waterstofgedreven economie.

Maar niet alleen de productie, ook leveringszekerheid, de milieu-impact en economische factoren zullen van belang zijn.

Op dit moment wordt zo'n 600 miljard Nm<sup>3</sup> of ± 54 miljoen ton waterstof per jaar geproduceerd, wat gelijk staat aan 170 miljoen ton olie equivalenten<sup>5</sup>. Ter vergelijking, in het jaar 2005 werd 3.895 miljoen ton ruwe olie geproduceerd in de wereld<sup>6</sup>.

Volgens het Amerikaans Departement voor Energie<sup>7</sup> wordt momenteel zo'n 9 miljoen ton waterstof per jaar geproduceerd in de Verenigde Staten voor allerlei industriële toepassingen, wat goed zou zijn voor het aandrijven van 20 tot 30 miljoen auto's. Ter vergelijking: in het jaar 2004 stonden ongeveer 136 miljoen personenwagens geregistreerd in de V.S., alle andere vormen van transportmiddelen (bus, vrachtwagen...) niet inbegrepen<sup>8</sup>.

Dit waterstof wordt momenteel enkel aangewend als chemische grondstof: in de olieverwerking (hydrokraken), de productie van ammoniak en de hydrogenatie van eetbare vetten (zie paragraaf 2.6)

Het voorgaande maakt dat er aanzienlijke vooruitgang geboekt moet worden in de productie van waterstof vooraleer dit een aanvaardbare, en door iedereen bruikbare brandstof kan worden, binnen de grenzen van energetische, milieutechnische en economische kosten.

Waterstof als energiedrager bezit de interessante eigenschap dat het op meerdere manieren geproduceerd kan worden, anders dan pakweg benzine.

Deze verschillende klassieke productiewijzen zullen worden toegelicht in de volgende paragrafen.

In de praktijk komt het er evenwel op neer dat de productie van waterstof in relevante hoeveelheden nog steeds sterk zal afhangen van fossiele brandstoffen, zoals olie, gas en steenkool, niet alleen als grondstof, maar ook als energieleverancier voor de productie.

Daarom wordt er steeds meer onderzoek gedaan naar alternatieve waterstofproductie. Ook deze technologieën zullen in wat volgt worden toegelicht.

5 Een ton olie equivalent (TOE) is een maat voor de energie-inhoud. Het correspondeert met de warmte die vrijkomt bij het verbranden van 1 ton ruwe olie en komt overeen met ± 41.85 GJ. Deze waarde is gebaseerd op conventie.

6 Quantifying energy – BP Statistical Review of World Energy 2006 – Oil, BP, 2006

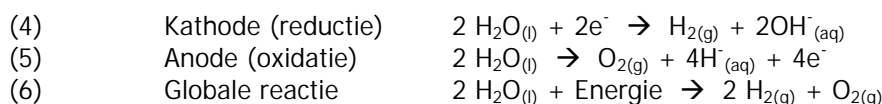
7 DOE – United States Department Of Energy – [www.energy.gov](http://www.energy.gov)

8 National Transportation Statistics, United States Bureau of Transportation Statistics – [www.bts.gov](http://www.bts.gov)

## 3.2 ELEKTROLYSEPROCESSEN

### 3.2.1 ELEKTROLYSE VAN WATER

In elektrolyse wordt waterstof gemaakt door de splitsing van water. Door het opleggen van een elektrische spanning hoger dan 1,23 V wordt water gesplitst volgens onderstaande formule. Zuurstof en waterstof worden vervolgens apart gecapteerd.



Deze splitsing gebeurt bij normale condities (temperatuur en druk). Het is een erg eenvoudig maar energie-intensief proces. Een efficiëntie van rond 70% voor elektrolyse wordt gerapporteerd. Hierbij wordt geen rekening gehouden met efficiëntieverlies als gevolg van de opwekking van de gebruikte elektriciteit.

Over het algemeen is de energie die in het proces gestopt moet worden hoger in waarde dan de waterstof die er mee gegenereerd wordt. Dit proces, dat maar voor slechts 5% van de wereldwijde productie instaat, is dan ook voornamelijk geschikt voor de ad hoc synthese van zeer zuivere waterstof.

Kan de energie, gebruikt om waterstof te produceren, gehaald worden uit duurzame energie-opwekking, zoals waterkracht, kan elektrolyse interessant worden. De milieu-impact van de waterstofsynthese zal in dat geval ook het minst groot zijn.

### 3.2.2 HOGE TEMPERATUURELEKTROLYSE (HTE) VAN WATER

Elektrolyse bij hoge temperaturen, waarbij water gesplitst wordt onder invloed van warmte, die wordt geleverd door warmtepompen, is efficiënter dan elektrolyse bij kamertemperatuur, omdat de inefficiënte stap van het omzetten van warmte naar elektriciteit wordt overgeslagen.

Bij een temperatuur van 2500°C of hoger is elektrische energie overbodig, omdat water op die temperatuur door middel van thermolyse wordt ontleed in waterstof en zuurstof. Omdat deze temperaturen onpraktisch zijn, opereren voorgestelde HTE systemen op temperaturen van 100 tot 850°C.

Hoge temperatuur-elektrolyse (HTE) bestaat voorlopig nog niet op industriële schaal. Er zijn immers zijn stabiele bronnen van grote hitte nodig. HTE kan niet wedijveren met de chemische omzetting van koolwaterstof in waterstof, omdat deze omzettingen niet gehinderd worden door de inefficiëntie van warmtemachines.

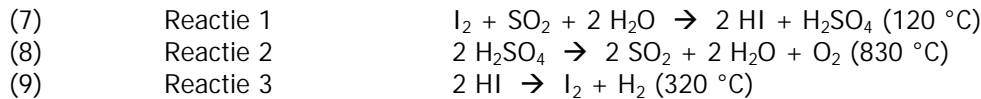
In de eerste plaats wordt voor warmtebronnen gedacht aan de hitte die vrijkomt bij de opwekking kernenergie, wat tot op heden de enige nuttig toepasbare bron zou kunnen zijn. Het gebruik van kernenergie blijft evenwel omstreden.

Geconcentreerde zonne-energie of aardwarmte kunnen in de toekomst soelaas bieden, maar zijn momenteel te weinig stabiel en/of efficiënt.

### 3.2.3 THERMOCHEMISCHE PRODUCTIE VAN WATERSTOF

Een mogelijk alternatief zijn thermochemische processen, zoals de zwavel – jodium cyclus. Hierbij wordt door toevoeging van warmte aan de chemisch proces een cyclus geïnduceerd, waarbij water gesplitst wordt.

De zwavel – jodium cyclus is een reeks thermochemische reacties, die verlopen zoals hieronder aangegeven.



Zowel de zwavel- als de jodiumcomponenten worden gerecupereerd en terug in het proces gebracht, vandaar het cyclisch karakter.

De warmte, die geleverd kan worden door zonne-energie of kernenergie, wordt opgenomen in de endotherme reacties 2 en 3 en deels terug afgegeven in de exotherme reactie 1. Het verschil tussen in- en uitgaande warmte vindt men terug in de verbrandingsenergie van het gevormde waterstof.

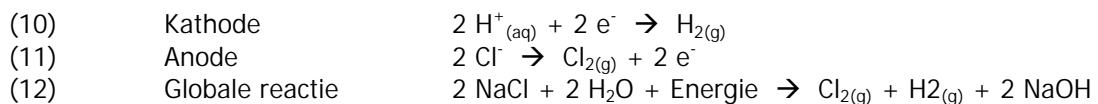
De netto reactie is dus elektrolyse van water in waterstof en zuurstof, onder invloed van warmte-energie.

Dergelijke thermochemisch processen kunnen efficiënter zijn dan HTE, omdat de inputenergie enkel uit warmte bestaat en niet langer elektriciteit vergt.

Deze manier van waterstofproductie werd reeds met succes toegepast op laboratoriumschaal. Om echter op grote schaal thermochemische processen toe te passen, zijn verbeteringen nodig in materialen die bestand zijn tegen hoge temperaturen, hoge druk en zeer corrosieve omgevingen.

### 3.2.4 ELEKTROLYSE VAN ZOUT

Waterstof wordt ook geproduceerd als nevenproduct van de productie van chloor ( $Cl_2$ ) uit pekkel (zout water).

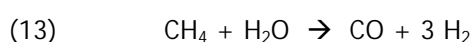


Gezien het waterstof slechts een nevenproduct is van een ander proces, wordt het niet als dusdanig op grote schaal toegepast.

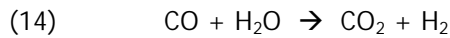
## 3.3 REFORMING

Het is mogelijk waterstof te winnen uit koolwaterstoffen, zij het met wisselende rendementen. Een nevenproduct van deze winning is  $CO_2$ . Het proces wordt aangeduid als reforming. In dit chemische proces wordt een brandstof in aanwezigheid van stoom en/of zuurstof en een katalysator omgezet in een waterstofrijk gasmengsel of reformaat.

In de meest gebruikte reformingstechniek wordt aardgas samengevoegd met stoom bij een temperatuur van 850°C en een druk van 25 bar.



CO wordt vervolgens bij een temperatuur van ongeveer 130°C in contact gebracht met water, waarbij extra waterstof gewonnen wordt. Daarnaast wordt er energie vrij gezet, meestal in de vorm van warmte.



Op deze manier wordt ook CO en CO<sub>2</sub> uit de stroom verwijderd, aangezien deze producten een nadelige invloed hebben op de levensduur van brandstofcellen, waarvoor het H<sub>2</sub> eventueel wordt gebruikt.

Steenkool kan dienen als alternatieve grondstof voor reforming-processen. Het wordt eerst omgezet in CO en methaan (stadsgas) en waarna waterstof wordt onttrokken.

In de praktijk zal echter de energie-inhoud van de geproduceerde waterstof steeds kleiner zijn dan die van het oorspronkelijk koolwaterstof dat gebruikt werd, als gevolg van warmteverliezen en procesthermodynamica.

Daarenboven komt in dit proces direct en indirect meer CO<sub>2</sub> vrij dan wanneer de koolwaterstoffen rechtstreeks verbrand zouden worden.

Voor de meeste toepassingen, zowel mobiel als stationair, kan aardgas even goed doen wat waterstof doet. Omzetting van aardgas naar waterstof heeft dan ook weinig of geen toegevoegde waarde. Daarenboven is het heel wat gemakkelijker om aardgas op te slaan en te transporteren, gezien de bestaande infrastructuur.

Dit proces is, gezien de energiekosten, evenwel het meest gebruikte voor de productie van industriële waterstof. Ongeveer 95% van de op dit moment geproduceerde waterstof wordt op deze manier gemaakt.

Ook andere koolwaterstoffen kunnen op dezelfde manier gebruikt worden als brandstof voor dit proces. Zo zou de conversie van bio-ethanol of bio-diesel ook mogelijkheid bieden als hernieuwbare grondstof voor het reformen van koolwaterstoffen.

### 3.4 BIOLOGISCHE PRODUCTIE

Het is bekend dat bepaalde types algen overschakelen van de klassieke fotosynthese, waarbij zuurstof wordt gevormd naar waterstofproducerende cycli, wanneer ze niet kunnen beschikken over het element zwavel.

De efficiënte omzetting van zonlicht in waterstofgedragen energie door de algen is laag. Het is slechts economisch interessant wanneer de omzetting van zonne-energie in waterstof een rendement haalt tussen 7 en 10%, waar dit voor gewone algenpopulaties momenteel slechts minder dan 1% is. Door gentechnologische technieken zijn onderzoekers erin geslaagd eencellige algen zo te wijzigen dat ze grotere hoeveelheden waterstof produceren. Het rendement wist men hierbij op te krikken tot ongeveer 2%<sup>9</sup>.

Het opkrikken van de efficiëntie en het rendement van dit proces tot op economisch aanvaardbare en haalbare niveaus bevindt zich momenteel in de onderzoeksfase.

Verscheidende testreactoren, waarin algen waterstof produceren, worden momenteel geëxploiteerd, waarbij de optimale randvoorwaarden worden onderzocht.

---

<sup>9</sup> Hydrogen from algae - fuel of the future?, FuelCellWorks News and Information Portal, [www.fuelcellworks.com](http://www.fuelcellworks.com), 2006



### 3.5 ALTERNATIEVEN VOOR DE WATERSTOFPRODUCTIE

Hoewel in bovenstaande werd toegelicht dat meerdere bronnen kunnen aangewend worden, zal op korte en zelfs middellange termijn een sterke afhankelijkheid blijven bestaan van fossiele grondstoffen voor de productie van waterstof, hetzij via benodigde elektriciteit of warmte, hetzij rechtstreeks als grondstof, eventueel gecombineerd met het afvangen en isoleren van de daarbij vrijgekomen CO<sub>2</sub>.

Toch zijn al de eerste stappen gezet in de richting van duurzaam energiegebruik uit hernieuwbare bronnen voor de productie van waterstof. Daarnaast maakt ook het debat rond het gebruik van nucleaire restwarmte voor de productie van waterstof steeds meer opgang.

Verder onderzoek naar alternatieven voor de waterstofproductie zal evenwel nog nodig zijn, vooraleer waterstof de rol van energiedrager van de toekomst op zich kan nemen. Het voldoen aan de eisen van duurzame ontwikkeling en het in de mogelijkheid zijn enorme hoeveelheden waterstof te kunnen produceren binnen de grenzen van de economische principes, zullen hierbij de belangrijkste factoren zijn.

In wat volgt, worden kort de belangrijkste onderzoeksrichtingen toegelicht.

- Foto-elektrochemische cel: foto-elektrolyse of fotogekatalyseerde splitsing van water: bestaande uit een combinatie van het elektrolyseproces en fotovoltaïsche technologie;
- Verbetering van de bestaande elektrolyseprocessen om op die manier de rendementen te verhogen;
- Bio-fotolyse en fotofermentatie: een combinatie van de toepassing van direct zonlicht met biologische processen, waarbij waterstof ontstaat (zie ook paragraaf 3.4);
- Biologische fermentatie in de afwezigheid van licht, ter vorming van waterstof;
- Gaswinning uit biomassa en omzetting naar waterstof door thermochemische processen
- Op grote diepte werden enorme hoeveelheden waterstof in de aardkorst aangetroffen, gevangen in gesteente. Dit zou het boren naar waterstof mogelijk maken, zoals er op dit moment olie en gas geboord worden<sup>10</sup>. Indien het ooit mogelijk zou zijn dit waterstof te winnen, zal waterstof niet langer een energiedrager zijn, maar een energiebron worden, net zoals olie of gas.

### 3.6 BESLUIT

Momenteel wordt het absolute merendeel van de waterstof geproduceerd om te worden verbruikt in allerlei chemische processen. Productieprocessen zijn hierop afgestemd.

---

<sup>10</sup> Hydrogen-fed bacteria may exist beyond earth (Nasa News – J. Bluck), Prof. Dr. F. Freund, NASA Ames Research Center, Moffett Field, California, USA, 2002

Het gebruik van waterstof als energiedrager blijft beperkt. Er bestaat momenteel ook geen productiecapaciteit die moet toelaten waterstof op grote schaal te produceren, al kan dit, binnen de economische context, snel veranderen.

De bestaande productieprocessen zijn in belangrijke mate afhankelijk van fossiele brandstof, hetzij direct als grondstof, hetzij indirect door het energieverbruik nodig voor de productie. Elke andere productiewijze is voorlopig niet in staat de benodigde hoeveelheden aan te maken binnen haalbare limieten.

Voornameijk meer onderzoek is nodig naar het verduurzamen van de industriële waterstofproductie, door de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen te verkleinen. Dit kan door de winning van waterstof uit onuitputtelijke bronnen, denk maar water, en door de nodige energie duurzaam op te wekken (zonne-energie, waterkracht...).

## HOOFDSTUK 4 : OPSLAG EN DISTRIBUTIE VAN WATERSTOF

---

### 4.1 INLEIDING

Wil waterstof een kans krijgen als energiedrager van de toekomst, is opslag en distributie ervan minstens zo belangrijk als de productie.

Zoals reeds eerder aangegeven, bezit waterstof een aantal eigenschappen, die dit niet zo eenvoudig maken. Door het bijzonder grote volume dat het lichte waterstof inneemt, zelfs onder hoge druk of in vloeibare vorm, is er immers voor éénzelfde hoeveelheid energie, een groter volume nodig om dit in te stockeren, dan voor om het even andere conventionele brandstof.

Er bestaan verschillende technieken voor het opslaan van waterstof. Ze worden in de volgende paragrafen toegelicht.

### 4.2 OPSLAG ALS VLOEISTOF

Waterstof wordt vloeibaar bij temperaturen lager dan  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$  onder atmosferische condities en kan als dusdanig opgeslagen en getransporteerd worden.

Vloeibare waterstof heeft een dichtheid van  $70\text{ kg/m}^3$  wat meer is dan bijvoorbeeld waterstof op 200 bar, maar nog steeds veel minder dan bijvoorbeeld water. Het volumetrisch energetisch vermogen van vloeibare waterstof is daardoor ook veel hoger dan voor samengedrukt waterstofgas (zie Tabel # 2.3).

Er zijn meerdere manieren om waterstof naar dergelijke lage temperaturen te brengen dat het vloeibaar wordt, waarbij meestal een combinatie van meerdere technieken wordt toegepast.

Het Joule – Thomson effect is van bijzonder belang bij het vloeibaar maken van waterstof. Het is thermodynamisch effect waarbij een gas ontspannen wordt over een adiabatisch ventiel, zonder toevoeging van arbeid of warmte, waarbij door toepassing van de gaswet, de temperatuur van het ontspannen gas evenredig daalt. Bij het Joule – Thomson effect is er sprake van een inversiepunt: voor elke gegeven druk heeft een gas een inversietemperatuur. Indien de isenthalpische expansie plaatsvindt bij een temperatuur hoger dan deze inversietemperatuur, zal de temperatuur van het ontspannen gas stijgen, indien de expansie gebeurt bij een temperatuur lager dan de inversietemperatuur daarentegen, zal de temperatuur van het gas dalen.

Voor de meeste gassen ligt deze inversietemperatuur ver boven kamertemperatuur. Waterstof en helium zijn echter voorbeelden van de weinige gassen waarbij expansie bij kamertemperatuur resulteert in opwarming van het gas.

Om die reden moet waterstof, na te zijn samengedrukt, eerst voorgekoeld worden tot beneden de maximum inversietemperatuur, zijnde  $-69\text{ }^{\circ}\text{C}$ , in overeenstemming met de heersende druk. Wordt waterstof nu ontspannen, dan zal het afkoelen, maar nooit voldoende om vloeibaar te worden.

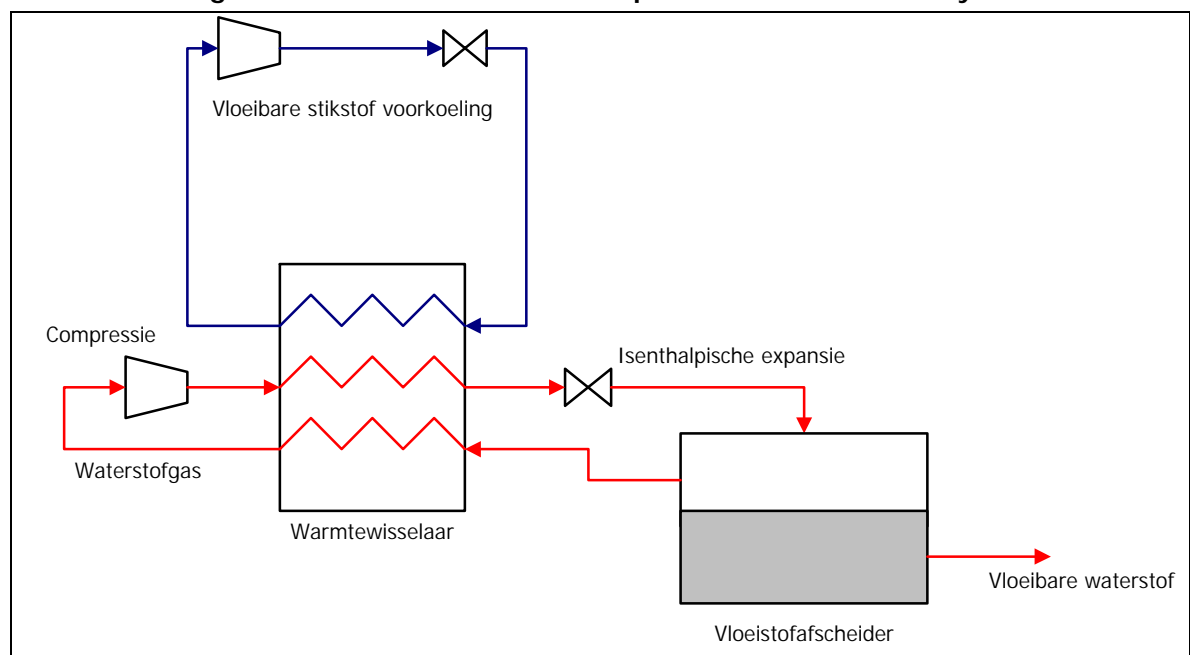
Daarom bestaat het proces uit verschillende stappen van koeling vooraleer in een laatste stap vloeibaar waterstof wordt gevormd. In kleinere installaties gebeurt dit over een Joule – Thomson klep, in grotere installaties is dit een cryogene turbine.

In de praktijk wordt waterstof samengedrukt bij kamertemperatuur. Dit samengedrukt gas wordt dan met behulp van koude of vloeibare stikstof gekoeld tot ongeveer  $-190\text{ °C}$  in een warmtewisselaar. De temperatuur wordt nog verder verlaagd door ook het terugkerend ijskoud waterstofgas na expansie door de warmtewisselaar te laten stromen. In sommige processen wordt voor deze extra koude ook wel vloeibaar neon of helium gebruikt.

Het koude waterstofgas wordt dan, wanneer het koud genoeg is, isenthalpisch ontspannen tot atmosferedruk, waarbij een deel van het gas vloeibaar wordt. De vloeistof wordt afgevangen en afgevoerd, terwijl het overblijvende, koude waterstofgas eerst terug over de warmtewisselaar (cfr. supra) wordt gevoerd, alvorens het terug wordt opgedrukt en weer wordt gekoeld.

Een en ander is verduidelijkt in onderstaande figuur.

**Figuur # 4.1: Vloeibare waterstofproductie m.b.v. Linde-cyclus**



Moderne installaties voor de vloeibaarmaking van waterstof gebruiken hybride technologie, de Claude cyclus, gebaseerd op de hierboven toegelichte Linde-cyclus.

Het principe berust op het feit dat een deel van het samengedrukte, voorgekoelde gas ontspannen wordt over een turbine, waarbij het verder afkoelt. Dit koude gas uit de turbine levert de koude voor het voorcoelen van de hoofdstroom, door middel van de warmtewisselaars. Dit maakt externe voorcooling, zoals hierboven aangegeven, overbodig.

De rest van de stroom wordt gewoon, net zoals in de Linde cyclus, gewoon isenthalpisch ontspannen.

In paragraaf 2.2 werd reeds gewag gemaakt van de ortho- en para-toestand waarin waterstof zich kan bevinden. Onder normale omstandigheden bevindt zo'n 75% van het waterstof zich in de ortho-toestand. Bij vloeibare waterstof is dit evenwicht verschoven naar meer dan 99% para-waterstof. Indien in de vloeibare waterstof nog ortho-waterstof voorkomt in concentraties hoger dan de evenwichtstemperatuur bij die temperatuur, zal dit na verloop van tijd omgezet worden in para-

waterstof, tot het evenwicht hersteld is. Hierbij komt, zoals reeds eerder gezegd, energie vrij die hoger is dan de verdampingsenergie van waterstof, waardoor verdampingsverliezen kunnen ontstaan.

Om de omzetting van ortho- naar para-waterstof zo goed mogelijk te laten verdampen worden daarom katalysatoren ingezet tijdens het vloeibaar maken.

Het vloeibaar maken en houden van waterstof is echter een energie-intensief gebeuren. Het proces van het vloeibaar maken alleen vraagt al tot bijna 40% van de totale energie-inhoud van waterstof. De normale operatie van een installatie zoals beschreven bij temperaturen van  $-253\text{ °C}$  vergt zo'n 90 kJ per mol waterstof.

Er werden reeds met succes opslagtanks voor vloeibare waterstof ontwikkeld voor bussen. Deze tanks, met een doormeter van 0,5 meter en een lengte van 5,5 meter, heeft een capaciteit van 540 liter vloeibare waterstof.

### 4.3 OPSLAG ALS GAS

De opslag van waterstof gebeurt het meest onder de vorm van een gecomprimeerd gas. Specifieke technologie moet hierbij toegepast worden, aangezien waterstof, door zijn eigenschappen, zeer lekgevoelig is.

De meest gebruikte druk waaronder waterstof wordt opgeslagen is ongeveer 200 bar. Waterstof is ook op die druk commercieel beschikbaar. Gezien het lage volumetrisch energetisch vermogen van waterstof, is de actieradius van mobiele toepassingen beperkt bij normale tankgroottes, zeker in vergelijking met vloeibare waterstoftanks.

Opslag van gecomprimeerd waterstof geniet echter in vele gevallen de voorkeur boven vloeibare waterstof. Het is een gekend proces, vergt veel minder energie en is gemakkelijker op te slaan en te distribueren.

De toekomstige R&D-doelstellingen richten zich dan ook op drukken van 700 bar voor voertuigtoepassingen, om zo meer energie te kunnen stockeren in beperktere volumes. Momenteel wordt dan ook veel onderzoek uitgevoerd naar te gebruiken materialen (metalen, kunststoffen) en productietechnieken voor de aanmaak van dergelijke drukrecipiënten.

Belangrijk daarbij is dat lichte materialen gebruikt kunnen worden, die toch kunnen weerstaan aan de extreem hoge drukken en de doordringendheid van waterstof. Anders wordt het gewicht van de tank te bepalend om te kunnen aanwenden in transporttoepassingen. Uiteraard mag dit alles niet ten koste gaan van de veiligheid.

Verschillende bedrijven hebben al geclaimd over dergelijke tanks te beschikken. Deze zijn vervaardigd uit versterkte composietmaterialen.

Ook de distributie van gas op dergelijk hoge druk moet verder ontwikkeld worden, wil gasvormig waterstof een rol spelen als energiedrager.

Zoals reeds hoger vermeld is het comprimeren van waterstof (zie ook compressibiliteit, paragraaf 2.3) een welgekend proces en vergt het relatief weinig energie. Het samendrukken van waterstof van atmosferische druk ( $\sim 1\text{ bar}$ ) tot 450 bar vergt slechts 25 kJ/mol.

## 4.4 OPSLAG IN EEN VASTE STOF

### 4.4.1 OPSLAG IN POREUSE MATERIALEN

Het is mogelijk waterstof op te slaan in materialen met een groot oppervlak. De mate waarin dit kan gebeuren, hangt sterk af van de aard van dat oppervlak, de druk en de temperatuur.

Dit principe is gebaseerd op fysische adsorptie van  $H_2$  en/of chemische adsorptie van atomair waterstof, na dissociatie van  $H_2$ .

Tot op heden is vooral onderzoek gevoerd naar oppervlakken die koolstof bevatten<sup>11</sup>. Zo is aangetoond dat in één laag grafeen<sup>12</sup> met een specifiek oppervlak van  $1315 \text{ m}^2/\text{gram}$  per koolstof zo'n 0,4 atomen waterstof kan adsorberen. Dit staat voor 3,3 gewichts-% per zijde van een dergelijke grafeenlaag.

Met nanopartikels grafiet, behandeld met waterstof op 10 bar gedurende 80 uur, kon worden vastgesteld dat tot bijna 0,95 waterstofatomen geadsorbeerd werden per koolstof of zo'n 7,4 gewichtsprocent.

Voorwaarde is natuurlijk dat de materialen waterstof terug afgeven wanneer nodig. Meestal wordt dit gerealiseerd door middel van verhitting tot bepaalde temperaturen.

Opgemerkt moet worden dat nooit alle waterstof terug gedesorbeerd kan worden, wat uiteindelijk kan leiden tot een slechte werking van dergelijke opslag.

In dit zelfde verband is momenteel veel onderzoek naar de opslag van waterstof in koolstof nanobuisjes. Dit onderzoek is controversieel en eenduidige resultaten konden nog niet worden gepubliceerd.

Daarnaast is het ook mogelijk waterstof op te slaan in andere poreuze materialen, die niet gebaseerd zijn op koolstof, maar even goed een zeer groot specifiek oppervlak hebben. Vermeldenswaardig zijn silica-gels, die door een bepaald droogproces hun groot specifiek oppervlak verkrijgen, en zeolieten, kristallijne, poreuze materialen, dikwijls op basis van silicium.

Voordelen van de opslag in siliciumstructuren is hun kostprijs, hun chemische eigenschappen en het feit dat ze als microporeus materiaal al zeer goed bestudeerd zijn.

### 4.4.2 OPSLAG ALS METAALHYDRIDE

In een metaalhydride wordt waterstof chemisch gebonden aan de atomen van een metaal of legering.

Het waterstof kan aangevoerd worden als atomair waterstof (elektrolyt) of als moleculair waterstof, in welk geval de waterstof eerst ontbindt aan het oppervlak en dan pas oplost in het metaal. Bij desorptie gebeurt het omgekeerde: waterstof komt vrij als atomen en recombineren zich aan het oppervlak tot moleculaire waterstof. Opslag van moleculaire waterstof in metaalhydrides is niet mogelijk.

Metaalhydride wordt gevormd door blootstelling van waterstof aan een vast metaal. Initieel zal een gedeelte waterstof oplossen in het metaal, tot aan evenwichtsconcentraties.

<sup>11</sup> Risø Energy Report 3 – Hydrogen and its competitors, Risø National Laboratory, Denmark, 2004

<sup>12</sup> Grafeen is een koolstofmateriaal, bestaande uit een uni-planaire laag koolstofmoleculen in hexagonale structuur. Het kan beschouwd worden als de 2D-versie van grafiet. Nanobuisjes zijn in feite opgerolde grafenen.

Als nu echter de druk van het waterstof verhoogd wordt, zal er meer waterstof oplossen in het metaal, waardoor de waterstofdruk in het metaal stijgt. Op een bepaald punt en op een bepaald moment zullen echter de H – H interacties in het metaal sterker worden: op dit punt is een metaalhydride ontstaan. Deze kern van metaalhydride in het metaal zal groter worden tot uiteindelijk het volledige metaal is omgezet in metaalhydride. De transformatie van metaal naar metaalhydride wordt gekenmerkt door een gelijkblijvende waterstofdruk in het metaal, bij toenemende waterstofconcentraties in dat metaal. Deze gelijkblijvende evenwichtsdruk is op een curve een maat voor de hoeveelheid waterstof kan worden opgeslagen in metaalhydrides en is sterk afhankelijk van de temperatuur.

Is het metaal volledig omgezet in metaalhydride, dan zal de waterstofdruk ineens scherp stijgen met toenemende waterstofconcentraties in het metaal.

De vorming van het hydride, waarbij waterstof zich in de metaalstructuur nestelt, gaat dikwijls gepaard met een zekere uitzetting van het metaal.

Het samengaan van uitgezet hydride en niet uitgezet metaal geeft spanningen, wat kan leiden tot fouten in de metaalstructuur en interne spanningsvelden, waardoor het metaal bros wordt en afbrokkelt.

Het voordeel van waterstofopslag in dergelijke structuren is de hoge belading met waterstof die gerealiseerd kan worden, de beperkte werkingsdrukken, en de volledige desorptie van waterstof bij dezelfde druk.

Bijkomend is het voor transporttoepassingen zeer belangrijk dat een voldoende hoog gewichtspercentage aan waterstof wordt opgenomen. Er wordt vanuit gegaan dat het economisch interessant wordt wanneer een gewichtspercentage waterstof in het materiaal meer dan 4% bedraagt. Daar wringt echter dikwijls het schoentje.

Het nadeel bij dergelijke metaalsystemen is immers dat het meestal gaat om legeringen bestaande uit zware elementen, waardoor het gewichtsprocent waterstof dat kan worden opgenomen relatief heel laag blijft, iets wat voor commerciële aanwending in transporttoepassing een gevoelig minpunt blijft.

Voor stationaire toepassingen echter blijft dit type opslag van waterstof uitermate geschikt en bovendien is het veilige wijze van opslag.

In onderstaande tabel wordt een overzicht gegeven van enkele metaalhydrides en hun opslagcapaciteit.

<b>Tabel # 4.1 : Eigenschappen van enkele metaalhydrides</b>			
METAAL	HYDRIDE	GEWICHTS-%	EVENWICHTSDRUK, TEMPERATUUR
Pd	PdH <sub>0,6</sub>	0,56	0,02 bar, 298 K
LaNi <sub>5</sub>	LaNi <sub>5</sub> H <sub>6</sub>	1,37	2 bar, 298 K
ZrV <sub>2</sub>	ZrV <sub>2</sub> H <sub>5,5</sub>	3,01	10 <sup>-8</sup> bar, 323 K
FeTi	FeTiH <sub>2</sub>	1,89	5 bar, 303 K
Mg <sub>2</sub> Ni	Mg <sub>2</sub> NiH <sub>4</sub>	3,59	1 bar, 555 K
TiV <sub>2</sub>	TiV <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	2,6	10 bar, 313 K

Hieruit moet blijken hoe moeilijk het is materialen te vinden waarmee metaalhydrides gevormd kunnen worden die voldoende waterstof kunnen opnemen ten opzichte van het eigen gewicht.

Bovenstaande tabel toon ook aan dat de opslag van waterstof op deze manier mogelijk is in een veelvoud aan verschillende materialen. De evenwichtsdruk en de temperatuur voor die evenwichtsdruk, waarbij de opslag optimaal gebeurt zijn echter niet altijd van dien aard gebleken dat ze makkelijk toepasbaar zijn in transporttoepassingen.

Doorgedreven onderzoek heeft bepaalde metaallegeringen opgeleverd die toepasbaar kunnen zijn. Zo is  $\text{LaNi}_5$  (legering van nikkel en lantaan) een veelbelovend materiaal, met snelle ad- en desorptie van waterstof, beperkte hysteresisverschijnselen (een maat voor schade na uitzetting) en beperkte werkdruk bij kamertemperatuur. De densiteit van waterstof die theoretisch in dit materiaal bereikt kan worden is gelijk aan die van gecomprimeerd waterstof op een druk van maar liefst 1800 bar, terwijl al die waterstof gemakkelijk volledig kan worden gedesorbeerd bij een druk van slechts 2 bar. Gezien de zware elementen waaruit het metaal is opgebouwd, is het echter zo dat het gewichtspercentage te laag is.

Voor metaallegeringen waar een hoger gewichtsprocent opgenomen waterstof kan worden bereikt, zoals  $\text{Li}_3\text{Be}_2$ , is er meestal de beperking dat waterstof niet kan worden gesorbeerd binnen praktische grenzen van druk en temperatuur, zeker voor mobiele toepassing. Zo wordt ook de toepassing van magnesium ter vorming van  $\text{MgH}_2$  onderzocht. Dit materiaal haalt een hoge opslagcapaciteit in gewichtsprocent, maar de hydridevorming verloopt uitzonderlijk traag en bij hoge temperatuur.

Methodes om de kinetika van het proces te verbeteren zijn het onderwerp van doorgedreven research. Deze zijn onder andere een fijnere verdeling van het metaal, waardoor waterstof gemakkelijker opgenomen kan worden, maar ook toevoeging van andere metalen, ter vorming van een legering is mogelijk.  $\text{Mg}_2\text{Ni}$  is een voorbeeld van een verbeterd magnesiumhydride, waarbij nikkel hoogstwaarschijnlijk optreedt als katalysator voor dissociatie van waterstof aan de oppervlakte, voordat het in het metaal kan dissiperen.

Een laatste mogelijkheid is verschillende materialen te combineren, in de hoop zo de zwakheden van elk materiaal te omzeilen of minstens te verminderen. Zo is zijn er reeds pogingen gedaan om magnesium te mengen met nanokoolstofpartikels en of met andere legeringen zoals  $\text{LaNi}_5$ .

Het is duidelijk dat het onderzoek zich vooral toespitst op mobiele toepassingen voor dit type opslag. Daarbij wordt vooral gedacht in de richting van steeds lichtere legeringen met elementen als lithium, boor, aluminium en natrium.

Een dergelijk hydride,  $\text{LiBH}_4$  heeft de hoogst gekende belading: maar liefst 18 gewichtsprocent waterstof. De desorptietemperaturen liggen echter relatief hoog en is het nog niet geweten of alle waterstof wel terug uit de metaalstructuur gehaald kan worden.

Ook  $\text{NaAlH}_4$  is zo'n licht hydride. Na dopering met  $\text{TiO}_2$  is men er zelfs in geslaagd tot lagere desorptietemperaturen te komen, terwijl recent werd aangetoond dat deze dopering geen invloed heeft op de reversibiliteit van de ad- en desorptiecyclus.

Er zijn echter nog tal van vragen rond de kinetika van de processen die plaatsvinden, die eerst opgelost moeten worden, vooraleer deze 'lichte' metaalhydrides een toepassing kunnen vinden als waterstofopslag.

Werken met metaalhydrides gaat gepaard met een aanzienlijke warmteuitwisseling, die tot meer dan 25% van de verbrandingswarmte van waterstof kan oplopen. Tijdens de vorming van het hydride komt warmte vrij die afgevoerd moet worden. Bij het onttrekken van waterstof moet warmte toegevoerd worden. Deze warmtehuishouding wordt optimaal geregeld in een geïntegreerd proces. Zo is het reeds mogelijk dat brandstofcellen de warmte die ze opwekken bij de verbranding van waterstof gebruiken om die waterstof die ze nodig hebben te onttrekken aan de metaalhydrides. De manier waarop dat dit gebeurt kan verder afgesteld worden



Een laatste bemerking die gemaakt moet worden is dat er momenteel onderzoek wordt gevoerd naar vloeibare metaalhydrides. Het gaat dan om een zogenaamde slurry: ultrafijne deeltjes metaal in een vloeistof, zoals olie bijvoorbeeld. Het vloeibaar zijn van dit materiaal zou de (be)werkbaarheid van hydrides erg verhogen.

## 4.5 ONDERGRONDSE OPSLAG

Net zoals aardgas momenteel gestockeerd wordt in daartoe geschikte geologische lagen, wordt momenteel onderzoek gevoerd naar soortgelijke opslag voor waterstof.

Op die manier kan een zekere onafhankelijkheid worden ingebouwd ten opzichte van de waterstofproductie. De mogelijkheden van ondergrondse opslag zijn van dien aard dat energiereserves kunnen worden opgebouwd voor een grote gemeenschap en daarbij toelaten langere periodes te overbruggen.

Twee mogelijkheden liggen daarbij voorop: de opslag in lege grondwaterlagen en de opslag in geëxploiteerde zoutlagen. In het Verenigd Koninkrijk worden experimenten gevoerd voor de laatste optie.

## 4.6 BESLUIT

Uit de drie grote vormen van opslag die er momenteel bestaan voor waterstof is die in metaalhydrides minstens de meest veelbelovende, terwijl de opslag van gecompriëerde waterstof momenteel het best begrepen wordt en het minst energie kost om te realiseren. Nadeel is hier dat een groot volume noodzakelijk is voor de opslag van een bepaalde hoeveelheid energie, in vergelijking met de andere opslagwijzen.

De opslag van vloeibare waterstof heeft het nadeel zeer energie-intensief te zijn, terwijl de opslag ervan veel bijkomende eisen stelt.

Ondanks de steeds voortschrijdende stand van de technologie, is het duidelijk dat soms grenzen worden gevonden aan wat mogelijk is.

In de toekomst zal daarbij dan ook onvermijdelijk de vraag gesteld worden of het niet mogelijk of wenselijk is het design van auto's aan te passen aan de mogelijkheden die waterstof kan bieden, dan wel dat er verder gezocht moet worden naar technologieën voor duurzame mobiliteit afgestemd op het huidige voertuigontwerp.

## HOOFDSTUK 5 : VERDELING VAN WATERSTOF

---

### 5.1 INLEIDING

Om waterstof tot bij de eindverbruiker te krijgen, is een infrastructuur nodig, die voorziet in het transport en de verdeling van de geproduceerde waterstof.

De uitbouw van een dergelijke structuur zal een massale investering vragen en kan enkel gerealiseerd worden in samenhang met de ontwikkeling van de waterstofmarkt voor voertuigen.

Deze verdeling moet een hoge betrouwbaarheid kennen, net zoals dat momenteel het geval is voor de klassieke brandstofverdeling.

Onder deskundigen bestaat een grote eensgezindheid over welke stappen moeten worden genomen om een volledige waterstofinfrastructuur uit te bouwen.

Eerst zijn verdeelstations nodig in grote steden voor de bevoorrading van specifieke doelgroepen, zoals bussen of voertuigen met een beperkte actieradius, zoals vuilniswagens.

De inplanting in of nabij grote steden en het gebruik aldaar in openbaar vervoer zal ook de publieke opinie warm maken voor waterstof en hen bewust maken van de eigenschappen van waterstof.

Vervolgens zijn verdeelstations nodig op de grote verbindingswegen om zo het netwerk en de waterstofmarkt gradueel te verhogen. Op deze manier zal het netwerk zich geleidelijk aan uitbreiden tot een landelijke dekking gegarandeerd kan worden.

### 5.2 VERDEELSTATIONS

#### 5.2.1 VERDELING VAN WATERSTOF

Waar voertuigen willen rijden op een bepaald type brandstof, zullen ze op flexibele wijze hun brandstofvoorraad moeten kunnen aanvullen. Verdeelstations zullen dan ook een essentieel deel moeten uitmaken van de toekomstige waterstofeconomie, hetzij geïntegreerd, hetzij als losstaande verdeelstations.

In het kader van het European Integrated Hydrogen Project (EIHP2)<sup>13</sup> wordt vooropgesteld dat de integratie van waterstofverdeelstations in bestaande, conventionele tankstations mogelijk moet zijn en is. Hierbij dient men rekening te houden met de eigenschappen van waterstof, die fundamenteel verschillend zijn van die van de meer conventionele brandstoffen. Aanpassingswerken kunnen dan ook nodig zijn.

Ook de aanwezigheid van andere gevaarlijke stoffen moet in rekening gebracht worden. Het is zo dat de waterstof opgeslagen moet worden op een locatie die intrinsiek veilig is ten overstaan van de

---

<sup>13</sup> Working Draft Rev 3 "Gaseous Hydrogen Vehicle Refuelling Stations", WP2: Refuelling Station Group, European Integrated Hydrogen Project (EIHP2)

opslag van andere gevaarlijke stoffen en vice versa. Hierbij wordt dan voornamelijk gedacht aan de LPG-opslag, ook al omdat andere opslag gemeenzaam ondergronds gebeurt. Beide types opslag moeten dan ook afdoende van elkaar worden afgeschermd om vervolgeffecten te voorkomen. Dit gezegd zijnde, is er geen reden om aan te nemen waarom waterstofopslag niet tegelijkertijd kan gebeuren als opslag van andere brandstoffen, zowel boven- als ondergronds.

Het lijkt het meest logisch dat in deze verdeelstations aanvankelijk waterstof op hoge druk wordt verdeeld, aangezien de inspanningen van de constructeurs voornamelijk deze richting uitgaan.

Momenteel is het echter zo dat de meeste waterstofverdeelstations voorzien zijn voor het verdelen van zowel gecomprimeerd waterstofgas als vloeibaar waterstof. Het vloeibare waterstof wordt in dit geval aangeleverd, meestal per truck, gezien het ontbreken van andere infrastructuur. Het gasvormige waterstof wordt ofwel ter plekke geproduceerd, door reforming van aardgas of door middel van hydrolyse, ofwel aangemaakt door middel van verdamping van vloeibare waterstof. Het vloeibare waterstof wordt in beide gevallen meestal onder tussendruk opgeslagen.

De verdeling van waterstof is geen evident gegeven. Ofwel bevindt de waterstof zich op zeer hoge druk, tot 700 bar, ofwel op zeer lage temperatuur, minder dan  $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Zo zijn in het eerste geval drukondersteunende maatregelen nodig. Anders zou de druk in de waterstofopslagtank tijdens het ledigen gradueel verminderen tot uiteindelijk nul bar overdruk. Bij dergelijke drukdalingen mogen dan ook de temperatuurseffecten die hierbij spelen niet uit het oog verloren worden.

Verder onderzoek om de verdeling zo vlot en zo veilig mogelijk te laten verlopen zijn nog nodig, vooraleer waterstof verdeeld kan worden, zonder daartoe gekwalificeerd personeel nodig te hebben.

### 5.2.2 VERDELING VAN VLOEIBARE WATERSTOF

Vloeibare waterstof is een cryogene vloeistof op atmosferische druk. De temperatuur waarbij deze vloeistof wordt opgeslagen ligt onder de  $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ , wat natuurlijk zeer specifieke eisen stelt aan de installaties voor de verdeling ervan.

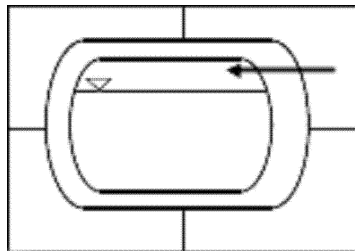
Verlading kan gebeuren volgens twee verschillende principes.

Bij het "differential pressure system" wordt de vloeistoftank continu gevuld door het drukverschil tussen de externe tank en de voertuigtank. Dit drukverschil wordt niet genereerd. Het gevormde of nog aanwezige waterstofgas in de voertuigtank wordt afgevoerd, hetzij eveneens continu (2-flow filling), hetzij sequentieel bij overschrijding van een bepaalde druk in de tank (1-flow filling). De duur van de tankbeurt bedraagt gemiddeld 5 minuten voor 2-flow filling en tot 7 à 8 minuten voor de 1-flow filling.

De verdampingsverliezen zijn echter groot en bedragen tot 8 gewichts-% van de totale hoeveelheid. Het teruggevoerde, gasvormige waterstof kan afgevangen en hergebruikt worden, maar betekent toch een essentieel verlies van energie, aanvankelijk in het systeem aanwezig.

**Figuur # 5.1: Differential pressure refuelling**


Bij het "pressure raising system" wordt de vloeistoftank eveneens continu gevuld, maar wordt het drukverschil aangelegd, met behulp van een pomp. Deze pomp is geïntegreerd in de tank en laat toe te werken met 0% evaporatieverlies. De verschillende systemen moeten hier evenwel voor uitgerust zijn.

**Figuur # 5.2: Pressure raising refuelling: geïntegreerde pomp**


Een verdeelstation uitgerust met een opslagtank met geïntegreerde pomp geniet de voorkeur, gezien de minimale verdampingsverliezen.

Indien het verdeelstation beschikt over een meer conventionele tank, geniet de 2-flow filling de voorkeur, gezien de kortere vultijden.

In ieder geval zullen verdeelstations moeten beschikken over een speciale 'interface', brandstofslang zeg maar, voor het veilig uitvoeren van vuloperaties met cryogene vloeistoffen. Dergelijke interfaces zijn reeds op de markt. Ze zullen afhankelijk zijn van het gekozen systeem.

### 5.2.3 VERDELING VAN GECOMPRIEERDE GASVORMIGE WATERSTOF

Voor het verdelen van gasvormig waterstof zijn verschillende mogelijkheden, afhankelijk van de manier waarop waterstof wordt opgeslagen.

Waterstof kan ofwel op lage druk aan het verdeelsysteem gevoed worden, ofwel op einddruk, zij het 200, 350 of zelfs 700 bar.

Het spreekt voor zich dat de opslag op einddruk de snelste manier is om een tank te vullen, want de waterstof kan zonder bijkomende bewerking afgeleverd worden. Dit wil ook zeggen dat er voldoende externe opslag voorzien moet worden op dergelijke hoge drukken. De vulling zelf gebeurt in dit geval door het verschil in druk.

Dergelijke hoge drukopslag van waterstof stelt wel specifieke eisen aan het opslagsysteem en de veiligheid ervan.

Om dit te verhelpen wordt reeds gebruik gemaakt van systemen waarin de waterstof op tussendruk wordt opgeslagen en bij levering vervolgens met behulp van krachtige compressoren (zogenaamde boostercompressoren) snel wordt opgedrukt en afgeleverd.

Een andere manier is de opslag van waterstof op lage of tussendruk in grote hoeveelheden en een kleine buffertank op hoge druk, die gevoed wordt door een compressor, en die de levering vlot en snel laat verlopen, op basis van het in de kleine buffertank beschikbare volume.

De tussenopslag kan gebeuren in metaalhydrides. Installaties die op deze manier werken, zijn al in gebruik. Zoals immers eerder gezegd, bestaan voor metaalhydrides reeds tal van stationaire toepassingen waarvan dit een voordeel is.

Een andere mogelijkheid is het afvullen van de tank met lage druk waterstof, waarbij de compressie bewerkstelligd wordt door het vullen zelf. Het nadeel van dergelijke operaties is de lange duur van de vuloperaties. Dit maakt ook dat er relatief gezien veel plaats nodig is voor het vullen van een groter wagenpark, aangezien de doorstroming, en dus het aantal cycli eerder beperkt is.

Dit kan voor een bepaald type wagenpark interessant zijn, bijvoorbeeld voor bussen van het openbaar vervoer, maar zal geen rol spelen bij de snelle brandstofverdeling zoals we die nu kennen. Volgens sommige bronnen ligt hierin de toekomst van waterstof als brandstof, omdat het het idee van thuisgebonden, kleinschalige waterstofproductie (bijvoorbeeld met behulp van biomassa) combineert met de mogelijkheid een opslagtank (in een voertuig of anderszijds) te vullen zonder al te veel randapparatuur.

Ook hier zal aan de afvulapparatuur de nodige eisen gesteld moeten worden met betrekking tot de veiligheid, gezien de hoge drukken waaraan gewerkt wordt en de karakteristieken van de brandstof.

#### **5.2.4 VERDELING VAN WATERSTOF AAN VASTESTOFFENOPSLAG**

Het verdelen van waterstof door het gebruik van vastestoffenopslag is momenteel niet aan de orde, eenvoudigweg omdat de technologie nog niet op punt staat en er geen voertuigtoepassingen bestaan die gebruik maken van dit type opslag.

Vastestoffenopslag is reeds mogelijk in grote stationaire toepassingen (cfr. supra) omdat hier tegemoet gekomen kan worden aan de eisen die dergelijke systemen stellen aan druk en temperatuur.

De opslag en verdeling wordt in dat geval geregeld door te spelen met de temperatuur van het hydridesysteem, met behulp van warmtewisselaars.

### **5.3 BEVOORRADING**

#### **5.3.1 IN SITU PRODUCTIE**

Bij de bevoorrading van waterstofverdeelstations is het feit dat waterstof om het even waar geproduceerd kan worden een belangrijk gegeven.

Hiervoor kunnen modulaire eenheden ontwikkeld worden, die door middel van elektrolyse waterstof maken, vertrekkend van water en elektriciteit. Randvoorzieningen bestaan dan uit compressoren, opslagvoorzieningen en verdeelinstallaties aangepast aan de hoge drukken waarbij waterstof verdeeld zal worden.

De modulaire eenheden kunnen aangepast worden aan de noden. Zo moet het op termijn mogelijk zijn om huis-aan-huiseenheden te ontwikkelen.

Ook in-situ reforming is mogelijk op plaatsen waar aardgas beschikbaar is. Hierbij moet rekening gehouden worden met de economische wetmatigheden van schaalvoordelen, waardoor de productie best gebeurt in de onmiddellijke nabijheid van het station in plaats van erop, waardoor waterstofleidingen nodig zullen zijn.

Vloeibare waterstof zal moeilijk op rendabele manier geproduceerd kunnen worden op de verdeelstations zelf. De in situ productie is dan ook weggelegd voor waterstofgas.

Het voordeel van in situ productie is dat er weinig of geen transport bij betrokken is, wat vanuit veiligheidsstandpunt te verkiezen is en dat er geen volledig geïntegreerde infrastructuur nodig. De techniek lijkt dan ook ideaal in een beginnende waterstofeconomie.

### 5.3.2 PIJPLEIDINGSTRANSPORT

Momenteel wordt onderzocht of het mogelijk is waterstof te mengen bij aardgas, tot concentraties van zo'n 15%, afhankelijk van het beschikbare netwerk. Er is een bestaande aardgasinfrastructuur, wat de kosten aanzienlijk zouden drukken. Waterstofverdeelstations zouden dan uitgerust moeten worden met voorzieningen om het waterstof uit het aardgas te filteren, op te zuiveren en ten slotte samen te drukken.

Het probleem is echter dat toepassingen die werken op aardgas moeilijkheden zouden ondervinden van verhoogde concentraties waterstof, zeker voor oudere toepassingen. Nieuwere ontwikkelingen zouden hier echter nog maar weinig last mogen ondervinden.

Men mag ook niet vergeten dat waterstof andere eigenschappen bezit dan aardgas en dat veel van het bestaande aardgasnetwerk niet geschikt is voor het co-transport van waterstof, in termen van lektheid, permeabiliteit van de leidingen of weerstand van het gebruikte materiaal aan waterstof.

Gezien de dichtheid van waterstof en het feit dat aan lage druk gewerkt moet worden omwille van de veiligheid, is echter een zeer omvangrijk netwerk met een voldoende capaciteit nodig om aan de benodigde vraag te kunnen voldoen.

In ieder geval is het transport van zuiver waterstof doorheen pijpleidingen goed gekend, vanuit de industrie. Momenteel gebeurt dergelijk transport al op grote schaal, tussen productie-installaties enerzijds en grote gebouwen anderzijds, binnen een beperkte geometrische omtrek, maar ook tussen verschillende industriële centra anderzijds.

### 5.3.3 WEGTRANSPORT

Wegtransport is een van de manieren om waterstofverdeelstations te bevoorraden. Dit type transport zal wellicht altijd nodig zijn, al was het maar voor uitzonderlijke gevallen of voor het bevoorraden van verafgelegen verdeelstations.

Ook voor het verdelen van vloeibare waterstof zullen vrachtwagens nodig blijven.

Waterstoftransport zal echter beperkt worden door het volume van de vrachtwagen, en niet langer door het gewicht van de lading. Een vrachtwagen met een inhoud van 40 ton, vervoert immers maar ongeveer 320 kg waterstof bij een druk van 200 bar. Als daar ladingsverliezen worden bijgeteld, blijft de uiteindelijke hoeveelheid die aan de eindverbruiker wordt afgeleverd bijzonder klein, vergeleken met het transport dat er voor nodig is.

Hetzelfde geldt voor vloeibare waterstof, dat evenzeer een lage dichtheid heeft. Gezien alle randapparatuur en isolatie die nodig is voor cryogeen transport toch een zeker volume inneemt, kan berekend worden dat een normale vrachtwagen ongeveer 2.100 kg vloeibare waterstof kan transporteren.

Dit is een beperkende factor. Toch zal in de praktijk meer brandstof vervoerd kunnen worden, dan nodig is om ze te vervoeren.

De ongevalgevoeligheid van wegtransport van waterstof blijft evenwel een risicofactor, zeker gezien de hoeveelheden die ze transporteren.

## HOOFDSTUK 6 : GEBRUIK VAN WATERSTOF

---

Waterstof is een energiedrager. Het moet dus de energie die erin vervat zit vrijgeven, ter vorming van kracht en warmte, en dit moet idealiter gebeuren met een hoge efficiëntie en zonder al te veel vervuilende bijproducten, zoals NO<sub>x</sub> of zelfs geluid.

Voor de volledigheid wordt een kort overzicht gegeven van de beschikbare technologieën om waterstof om te zetten in de benodigde energie, die van toepassing zijn voor de transportsector.

Er zijn nog andere manieren, zoals gasturbines, hybride combinaties en zo verder om waterstof om te zetten in energie, maar deze zijn niet relevant voor de transportsector.

### 6.1 BRANDSTOFCELLEN

#### 6.1.1 ALGEMEEN

De meest gehoorde manier om waterstof om te zetten in energie, is de elektrochemische 'verbranding' in zogenaamde brandstofcellen.

In een brandstofcel wordt waterstof omgezet in water met zuurstof uit de lucht, waarbij een elektronentransfer een elektrische stroom doet vloeien, die vervolgens de motor aandrijft. Dit gebeurt met een efficiëntie van meer dan 50% voor zuivere waterstof. Ter vergelijking, een klassieke benzinemotor bereikt een efficiëntie van ongeveer 25%.

Er zijn ook brandstofcellen beschikbaar die werken op andere types brandstof, zoals aardgas of methanol, waarvan het laatste type het dichtst staat bij doorbraak in het dagelijks leven, omwille van het gebruiksgemak en de hoge energiedichtheid.

Brandstofcellen worden ingedeeld volgens het elektrolyt dat ze bevatten. Dit heeft ook zijn weerslag op de temperatuur. Het gebruikte elektrolyt wordt weergegeven in de afkorting. Zo onderscheidt men:

- PEMFC : Proton Exchange Polymer Fuel Cell – werkingstemperatuur ± 80 °C
- PAFC : Phosphoric Acid Fuel Cell – werkingstemperatuur ± 200 °C
- MCFC: Molten Carbonate Fuel Cell – werkingstemperatuur ± 650 °C
- SOFC: Solid Oxide Fuel Cell - – werkingstemperatuur ± 600 à 1000 °C

De werkingstemperatuur is natuurlijk bepalend voor de toepassing ervan. Zo zijn PEMFC's de meest veelbelovende brandstofcellen, als gevolg van hun eerder lage werkingstemperatuur.

#### 6.1.2 SOFC

De SOFC's kunnen echter ook rechtsreeks gevoed worden met brandstoffen zoals methanol, methaan of biogas. Door hun hoge temperatuur kunnen ze de brandstof in de cel zelf omvormen tot waterstof, waardoor er minder verliezen zijn en de elektrische en algemene efficiëntie van dit soort cellen hoger ligt. Ze zijn wel duurder, gezien de materialen bestand moeten zijn tegen hoge temperaturen. Het verlagen van de werkingstemperatuur van dergelijke SOFC's zonder in te boeten



aan efficiëntie is dan ook een doel op zich geworden. Als emissies genereren de SOFC's enkel waterstof, dat gerecupereerd kan worden, CO<sub>2</sub> en water.

Door het ontbreken van een waterstofinfrastructuur focussen veel constructeurs zich op dit type brandstofcellen. Ze kunnen meer conventionele brandstoffen tanken en intern omzetten in waterstof. Het milieuvoordeel vervalt evenwel bijna volledig en heeft geen voordeel meer ten opzichte van klassieke verbrandingsmotoren.

### 6.1.3 PEMFC

Gezien hun lage werkingstemperatuur zijn PEMFC's ideaal voor motoren die van koud snel moeten kunnen starten, zoals typisch het geval is in voertuigtoepassingen.

Het minpunt van dergelijke brandstofcellen is dat ze zeer zuiver waterstof vereisen voor hun werking. Zo mag er zo goed als geen koolmonoxide in de stroom aanwezig zijn (zie ook hoofdstuk 3).

## 6.2 VERBRANDINGSMOTOREN

Waterstof kan ook direct verbrand worden met zuurstof, ter vorming van water, waarbij de vrijgekomen energie omgezet wordt in mechanische, in plaats van eerst in elektrische energie, zoals bij brandstofcellen. Het principe is gelijkaardig aan een combinatie van bestaande verbrandingsmotoren.

Aan de ene kant wordt brandstof en lucht gemengd alvorens het in de verbrandingskamer terechtkomt (zoals motoren op basis van ontsteking, zoals benzinemotoren), terwijl het brandstofmengsel daarna wordt gecompriëerd (zoals gebeurt bij dieselmotoren).

Het grote probleem bij dergelijke motoren is het afstemmen van alle acties op elkaar en het gebruik van de juiste verhoudingen lucht – waterstof. Daarnaast moet ook tijdens het rijden alles onder controle gehouden worden, om er voor te zorgen dat de motor optimaal werkt en blijft werken.

Er zijn rendementen tot 43% haalbaar.

Kleine hoeveelheden NO<sub>x</sub> in de uitlaat zijn onvermijdelijk. Bij de hoge verbrandingstemperaturen zullen immers steeds kleine hoeveelheden stikstof uit de lucht verbranden met zuurstof ter vorming van NO<sub>x</sub>.

## 6.3 WATERSTOF IN DE TRANSPORTSECTOR

### 6.3.1 ALGEMEEN

Deze studie spitst zich toe op transport als toepassing van waterstof als energiedrager. Het transport is tot op heden de meest voor de hand liggende sector als het gaat over de toepassing van waterstof. Iedereen kent de inspanningen die op dit vlak door de autoconstructeurs geleverd worden. Voor het zover is, zal echter nog veel onderzoek en ontwikkeling nodig zijn, zeker voor het gebruik van waterstof in gewone wagens. Daarbij zijn echter nog enkele struikelblokken, die hieronder kort toegelicht worden.

1. Waterstof zou moeten concurreren tegen relatief goedkope, gemakkelijk te verdelen en overal beschikbare fossiele brandstoffen.
2. Vooraleer de eindgebruikers mee de overstap zullen maken naar de waterstofeconomie, moeten door waterstof aangedreven wagens minstens over dezelfde of vergelijkbare kwaliteiten moeten kunnen beschikken als de huidige voertuigen, in termen van efficiëntie, vermogen, kostprijs, actieradius, betrouwbaarheid, beschikbaarheid van brandstof, tankgemak, en dergelijke meer.
3. Wat de introductie van waterstof het meest in de weg staat, is een voldoende veilige en economisch rendabele opslag ervan in de voertuigen die het moet aandrijven. Gezien de enorme vluchtigheid en lage dichtheid van waterstof, kan immers maar weinig waterstof worden opgeslagen per eenheid van volume, zoals ook al werd aangegeven in eerdere hoofdstukken.
4. Er moet een volledig verdeelnetwerk worden uitgebouwd. De leveringszekerheid van waterstof als brandstof moet immers gegarandeerd kunnen worden, wil men hierop (vlot) kunnen overschakelen.

### 6.3.2 WATERSTOFMOTOREN

Het ter beschikking zijn van motoren die op waterstof werken om voertuigen aan te drijven is natuurlijk essentieel.

Er zijn twee manieren om energie te winnen uit waterstof: ofwel wordt waterstof verbrandt in een verbrandingsmotor, ofwel wordt waterstof elektrochemisch omgezet tot water met behulp van lucht in een brandstofcel, waarbij elektriciteit wordt geproduceerd, die dan uiteindelijk de wagen aandrijft. Een derde manier is het gebruik van waterstofgevoede gasturbines, al zijn er momenteel nog geen toepassingen hiervoor in de transportsector, wegens de omvang van deze turbines. Momenteel is onderzoek lopende om meer kleinschalige turbines te ontwikkelen.

Zoals reeds gesteld, hebben onder de brandstofcellen de SOFC's veel aandacht gekregen, vanwege hun vermogen te werken op conventionele brandstoffen. Uit de praktijk is echter dikwijls gebleken dat dit type brandstofcel niet echt optimaal werkt, terwijl de kosten en de complexiteit van de motor wel veel hoger zijn dan voor andere brandstofcellen. Daarbij komt nog dat het milieuvoordeel herleidt wordt tot nul, als gevolg van de reforming van fossiele brandstof.

Meer en meer wordt dan ook overgeschakeld op PEMFC's, waarbij de werkingstemperatuur veel lager gehouden kan worden, ook al is hier zeer zuivere waterstof vereist. Maar ook de PEMFC's hebben nog niet bewezen dat ze op grote schaal en op economisch rendabele wijze kunnen worden geproduceerd.

Voor de klassieke verbrandingsmotor geldt het feit dat de processen die erachter schuil gaan goed gekend zijn. Dergelijke motoren zijn dan ook relatief eenvoudig conceptueel aan te passen voor een werking op waterstof.

Los hiervan is het in ieder geval zo dat er een neiging bestaat van de verschillende constructeurs om te kiezen voor waterstof op hoge druk, dan wel voor vloeibare waterstof.

### 6.3.3 OPSLAG VAN WATERSTOF IN VOERTUIGEN

Onafhankelijk van de ontwikkeling van de motoren, is de opslag van waterstof echter een steeds weerkerend probleem.

Rekening houdend met de energiedichtheid van waterstof kan dan gesteld worden dat een voertuig met een bereik van 400 km zo'n 24 kg benzine nodig heeft, waar er maar 8 kg waterstof nodig is voor de verbrandingsmotor en slechts 4 kg voor de brandstofcel. Het probleem is dat die 4 kg een veel groter volume nodig heeft dan de 24 kg benzine. De opslag van waterstof op een veilige en efficiënte manier blijft dus de uitdaging.

Het gewicht van de tank moet relatief laag kunnen blijven ten opzichte van de hoeveelheid waterstof die het bevat, wat niet evident is, gezien de hoge drukken waarbij gewerkt wordt. Daarbij moet het tankmateriaal inert zijn tegenover waterstof, om reacties, en dus verval van het materiaal, te verhinderen.

Autoconstructeurs maken al langer melding van het feit dat het hun lukt een waterstofwagen een zeker bereik te geven met voldoende waterstof aan boord. Het gewicht van de tanks neemt echter een onredelijk groot deel van het totale gewicht voor zijn rekening, wat economisch minder interessant is. Daarenboven zijn de gebruikte tanks, door hun specifieke eigenschappen, zomaar nog niet klaar om massaal geproduceerd en ingebouwd te worden.

Er is daarnaast nog een uitdaging die moet worden opgelost. Bij het legen van een tank op druk, zal de druk gradueel dalen, van maximaal 700 bar tot 0 bar overdruk. Drukondersteuning op deze tanks zal dus nodig zijn. De veiligheidsaspecten die hierbij komen kijken moeten nog verder uitgeklaard en vastgelegd worden. De specificaties zijn dan ook niet min. De tanks moeten aangepast zijn aan werkingstemperaturen tussen  $-40^{\circ}\text{C}$  en  $+85^{\circ}\text{C}$ . Ze moet, volgens de laatste ontwikkelingen, bestand zijn tegen drukken van 700 bar en tegen nog hogere vuldrukken. De tank moet ook in een zeer korte tijdspanne kunnen worden gevuld.

Opwarming van de tank en drukverlies behoren tot de belangrijkste veiligheidsrisico's. Daarnaast zal ook de kostprijs van de compressie (tot 875 bar vuldruk) en de efficiëntie, alsook het volume van dergelijke compressoren een bepalende rol spelen.

Voor vloeibare waterstof is cryogene opslag nodig. Er zijn tanks ontwikkeld die tot 10 kg waterstof kunnen opslaan. De cryogene tanks zijn speciaal ontwikkeld om waterstof te weerstaan, meer bepaald het bros worden van het metaal en de permeatie van waterstof erdoorheen.

Het nadeel is weerom dat dergelijke tanks, door alle voorzieningen en isolatie e.d., ontzettend zwaar zijn. Ook hier is meer onderzoek nodig om het tankgewicht te doen dalen, ten voordele van de economische rendabiliteit.

Voor vloeibare waterstof is het van belang de waterstof vloeibaar te houden. Warmtetransfers moeten dan ook vermeden worden. Hoogtechnologische isolatie werd reeds ontwikkeld. Probleem blijft dan wel dat vloeibare waterstof niet eeuwig koud gehouden kan worden. Momenteel is men er in geslaagd de periode waarbij zich geen al te significante verdampingsverliezen voordoen, te verlengen tot 10 dagen. Warm weer of het voertuig parkeren in de zon, kan hier natuurlijk een niet te onderschatten effect op hebben. Ook voor voertuigen die weinig gebruikt worden en dus een langere periode kennen tussen tankbeurten, kan het verlies oplopen.

Wat er ook van zij, veel autoconstructeurs hebben al prototypes, die worden aangedreven door vloeibare waterstof en die dus zijn uitgerust met cryogene opslagtanks. Een en ander is dus mogelijk, maar ook hier weer de boutade dat verder onderzoek noodzakelijk blijft, om zowel de efficiëntie van de wagen, alsook van de opslag, het tanken en het transport ervan te verbeteren.

Geen van beide opslagwijzen zijn echter ideaal. Onderzoek naar de opslag van waterstof in voertuigen neigt dan ook steeds meer in de richting van opslag in allerlei types vaste stoffen, zij het metaalhydrides of poreuze materialen.

Zoals reeds eerder gezegd is een zekere opslagcapaciteit in kilogram waterstof ten opzichte van het gewicht van het metaal of poreus materiaal nodig. Daarnaast moet de temperatuur en de druk waarbij waterstof opnieuw kan worden onttrokken aan de vaste stof binnen grenzen liggen die uitvoerbaar zijn in voertuigtoepassingen. Als laatste moet ook de gebruikte vaste stof voldoen aan

een aantal eisen inzake slijtage van het materiaal, alvorens het een volwaardig alternatief kan vormen.

Veel van het onderzoek dat hiernaar wordt uitgevoerd verdient en krijgt de aandacht van overheden en internationale onderzoeksgroepen. Waterstof heeft immers nog een achterstand in te halen ten opzichte van de momenteel gebruikte brandstoffen, alvorens het een alternatief kan vormen en ten volle kan concurreren met fossiele brandstoffen.

## 6.4 VASTE TOEPASSINGEN

Waterstof zal niet alleen een energiedrager voor transport, maar ook als aandrijfkracht voor tal van andere toepassingen.

Manieren om waterstof op te slaan zullen niet alleen belangrijk zijn in wagens, maar ook elders, al was het maar in de bevoorradingsstations die essentieel zullen zijn.

De eisen die hieraan worden gesteld zijn echter minder dwingend. Zo is het gewicht voor vaste opslag niet zo beperkend, al blijft het volume van de opslag natuurlijk wel bepalend.

Ook de materialen, de eigenschappen van de tank ten overstaan van waterstof, de uitstroomcapaciteiten en de waterstofverliezen blijven belangrijke aandachtspunten.

En ten slotte is er ook de kostprijs, al is deze factor minder dwingend dan voor toepassingen in de voertuigen. Desalniettemin moet hier rekening gehouden worden met vergelijkbare kosten voor de uitbating van traditionele bevoorradingsstations, al was het maar om de concurrentie te kunnen aangaan.

Zeker als waterstof de rol wil overnemen van de fossiele brandstoffen in al hun energietoepassingen, zullen enorme hoeveelheden waterstof intermediair moeten worden opgeslagen.

Zowel drukopslag als cryogene opslag wordt momenteel in de industrie veelvuldig toegepast en is dus een goed gekend gegeven, al moet opgelet worden met het feit dat grote volumes en hoge drukken (meer dan 180 bar), zoals noodzakelijk voor waterstof, niet altijd even goed samengaan.

Daarenboven is het niet altijd gemakkelijk druktanks volledig te legen, wat kan leiden tot substantiële verliezen in grotere volumes.

In de toekomst moet het ook mogelijk worden waterstof op te slaan in metaalhydrides (als mobiele toepassing) of in geologische lagen, zoals ook nu gebeurt voor aardgasopslag. In dit laatste geval moet op zoek gegaan worden naar geschikte geologische lagen en moet rekening gehouden worden met enorme hoeveelheden waterstof die vermoedelijk nooit gerecupereerd zullen kunnen worden, maar blijven 'steken' in de ondergrond.

## HOOFDSTUK 7 : VEILIGHEID

---

### 7.1 VEILIGHEIDSASPECTEN VAN WATERSTOF

Waterstof heeft in de publieke perceptie echter nog steeds een bijzonder onveilig imago, dat teruggaat op de ramp met de "Hindenburg" in 1937, de ontwikkeling van de "waterstofbom" en zelfs de gesimuleerde explosies in het secundair onderwijs.

Geen van bovenstaande 'vooroordelen' berust op een doorgedreven kennis van waterstof: de ramp met de "Hindenburg" – een met waterstof gevulde zeppelin – bleek vermoedelijk te wijten aan de compositie van de coating van het omhulsel, die de ongelukkige eigenschap had brandversnellend te zijn, er is nooit sprake geweest van een explosie; de waterstofbom is gebaseerd op het principe van kernfusie, een principe dat niet eens mogelijk is onder normale condities; het "ontploffen" van waterstof is niets anders dan wat gecontroleerd gebeurt in elke verbrandingsmotor, hetzij op LPG, benzine, diesel of enige andere brandstof.

Het negatieve imago van waterstof is deels onterecht, zoals hierboven aangegeven, maar ook voor een groot stuk terecht.

Men mag immers niet vergeten dat waterstof tal van eigenschappen heeft die stuk voor stuk een groter veiligheidsrisico inhouden dan wat voor de meer conventionele brandstoffen het geval zou zijn.

Zo heeft waterstof een veel breder ontstekingspad dan bijvoorbeeld LPG of aardgas. Mengsels van 4 tot 75 vol% in lucht kunnen ontsteken, daar waar voor bijvoorbeeld aardgas een mengsel van 15 vol% in lucht niet meer kan ontsteken. Daarenboven is de ontstekingsenergie van waterstof binnen dit ontstekingspad veel lager, waardoor het dus makkelijker zal ontbranden.

Ook de opening waardoor een brandstofvlam zich kan voortbewegen is veel kleiner in diameter dan voor andere brandstoffen. Een eventuele brand kan dus ver doordringen en zal zich niet gemakkelijk laten stoppen.

De voornaamste risicovolle eigenschappen van waterstof worden hieronder nog eens op een rijtje gezet:

- Waterstof is een sterk reducerend element, en in contact met metaaloxides (roest) kan de resulterende reactie flink wat warmte vrijzetten;
- Het gebruik van waterstof stelt hoge eisen aan de materialen die ermee in contact komen en die dikwijls verschillend zijn van wat momenteel gebruikelijk is voor brandstofopslag;
- Waterstof vertoont een omgekeerd Joule-Thomson effect. Dit betekent dat bij plotse drukdaling van samengedrukt waterstofgas bij omgevingstemperatuur, de temperatuur toeneemt, in plaats van het omgekeerde, wat kan leiden tot ontsteking;
- Waterstof vormt gemakkelijk een explosief mengsel, ook met andere elementen, zoals halogenen;
- Waterstof is, gezien zijn dichtheid en vluchtigheid, in staat te diffunderen doorheen openingen die voor andere gassen te klein zijn en zelfs doorheen materialen;

Omwille van bovenstaande, zal waterstof gemakkelijker exploderen bij vrijzetting dan andere conventionele brandstoffen. Positief is dat waterstof extreem licht en vluchtig is en dus heel snel zal opstijgen en diffunderen in de lucht, daar waar andere brandstoffen of de gassen ervan, vaak zwaarder zijn dan lucht en daardoor moeilijker snel diffunderen.

Dit is in de open lucht een enorm voordeel. In gebouwen die hiervoor niet zijn aangepast, vormt dit echter een van de grootste risico's. Waterstof hoopt er zich op tegen het plafond of onder het dak, waar het dan vervolgens kan ontsteken, vaak met desastreuze gevolgen.

Dit betekent ook dat garages of andere gebouwen waarin voertuigen die werken op waterstof aanwezig kunnen zijn, aangepast moeten zijn en moeten beschikken over een "high-level"-ventilatie, die de ophoping van waterstof tegen plafonds of onder het dak moet tegengaan. Dikwijls is dit niet het geval. De ventilatie van deze gebouwen is immers voorzien op gassen die zich ophopen nabij de grond, en waar zich dus ook de meeste ventilatieopeningen zullen bevinden.

Een ander veiligheidsaspect, dat waterstof trouwens deelt met aardgas, is dat het een zo goed als geur- en kleurloos gas is. Hoopt waterstof – of aardgas – zich op in een ruimte, dan kan het daar een zeer explosief mengsel vormen. Detectie is dan van groot belang.

Bij aardgas worden geurende componenten toegevoegd om zo de detectie van concentraties aardgas mogelijk te maken voordat ze gevaarlijk worden. Zo is het ook voor waterstof technisch mogelijk gasvormig waterstof te detecteren, zelfs bij zeer kleine concentraties.

Eerder was ook al gezegd dat waterstof brandt met een (bijna) kleurloze vlam, wat de detectie van een waterstofbrand niet in de hand werkt. Dit maakt het voor brandbestrijders dikwijls heel moeilijk de brandhaard te detecteren, of zelfs maar vast te stellen dat er een brandhaard is. Het bijmengen van stoffen die wel ontbranden met een zichtbare vlam, kan hierbij een oplossing zijn.

Het gebruik van energie houdt altijd een veiligheidsrisico in. De veiligheidsvraagstukken die moeten worden opgelost met betrekking tot het gebruik van waterstof, zijn niet anders dan die ooit gesteld voor benzine, LPG, aardgas en zelfs elektriciteit. Het gemak waarmee we nu omgaan met deze vormen van energie laat zien dat de veiligheidsrisico's goed in de hand te houden zijn. Zelfs de toepassing van het toch zeer brandbare aardgas in het huishouden levert slechts een paar incidenten per jaar op.

Het gebruik van waterstof vormt in die zin geen bijzonderheid. Het is een brandstof die eisen stelt waar het betreft het veilig omgaan ermee. Toch moet hier een nog een lange weg gegaan worden om waterstof voor iedereen beschikbaar te stellen.

De chemische, petrochemische en elektronica-industrie mag dan reeds jarenlange ervaring hebben met waterstof, in hoeveelheden die dikwijls groter zijn dan wat commercieel toepasbaar zou zijn in automobieltoepassingen en de veiligheidsstatistieken mogen dan, op enkele kleine incidenten na, een opvallend positieve veiligheidsgeschiedenis laten zien, toch moet hier een bedenking bij worden gemaakt.

De positieve veiligheidsstatistieken waarvan sprake (zie hierboven) zijn te wijten aan het feit dat waterstof hier wordt 'behandeld' door daarvoor opgeleide mensen, die zich moeten houden aan tal van veiligheidsregels, standaarden en goede praktijken.

Daarenboven wordt het waterstof in de industrie niet op dezelfde manier gebruikt in de industrie, als zou moeten voor automobieltoepassingen, namelijk onder zeer hoge druk (200 – 700 bar), als een vloeistof of als een metaalhydride.

De veiligheidsstatistieken kunnen dan ook een vertekend beeld geven. Er zijn eigenlijk geen of weinig gegevens bekend over de hierboven vermelde toepassingen in voertuigen, nog over het gebruik ervan door personen die hiervoor geen specifieke opleiding hebben gekregen.

## 7.2 VEILIGHEIDSRISICO'S

Bij het vrijkomen van waterstof zijn volgende mogelijke risicoscenario's belangrijk:

- Dispersie van waterstof met vertraagde ontsteking.
- Explosie van waterstof, gevolgd door een fakkelbrand.
- Onmiddellijke ontsteking met een resulterende fakkelbrand.

Bij vrijzetting zal waterstof zich snel verspreiden in de omgeving. Afhankelijk van de druk die op dat moment heerst, de weersomstandigheden en de grootte van het lek, zullen er zich in de omgeving onsteekbare concentraties opbouwen, rekening houdend met de ontstekingsgrenzen, tot op enkele meters van het lek. Uit testen is gebleken dat deze afstand varieert van 6 tot 12 meter.

Bij directe ontsteking vormen zich steekvlammen, waarvan de grootte afhankelijk is van de druk en de grootte lek. Met de mogelijke effecten van de resulterende warmtestraling moet rekening gehouden worden bij het ontwerp van waterstofsysteem.

Anderzijds is het zo dat externe effecten een gevolg kunnen hebben voor de integriteit van een waterstoftank en zijn inhoud. Voorbeelden hiervan zijn een brand of directe impact. Ook hier zijn de parallellen met LPG-opslag tanks duidelijk.

## 7.3 VEILIGHEIDSAFSTANDEN

Er werden in het verleden reeds veiligheidsstudies uitgevoerd die de veiligheidsafstanden bepalen die gerespecteerd moeten worden bij de inplanting van waterstofstations, net zoals dat gebeurde voor LPG-verdeelstations.

De vluchtigheid van waterstof in openlucht is een voordeel, ten opzichte van bijvoorbeeld LPG, dat veel slechter diffundeert.

Onderstaande geeft een samenvatting van een dergelijke veiligheidsstudie<sup>14</sup>, waarbij de methodologie gebaseerd is op degene die in Nederland en Vlaanderen gebruikt worden.

De studie ging uit van drie hypothetische verdeelstations met verschillende capaciteiten, waarbij waterstof telkens in situ werd geproduceerd. De drie verdeelstations kunnen als volgt gekarakteriseerd worden (grootte, dagelijkse verkoop, aantal wagens, productiewijze):

- Klein verdeelstation, 25 kg H<sub>2</sub>/dag, 10 wagens, productie van waterstof d.m.v. hydrolyse
- Middelgroot verdeelstation, 100 kg H<sub>2</sub>/dag, 40 wagens, productie van waterstof d.m.v. hydrolyse
- Groot verdeelstation, 500 kg H<sub>2</sub>/dag, 200 wagens, productie van waterstof d.m.v. reforming

De waterstof wordt geproduceerd op een druk van 8 bar en verder samengedrukt tot 450 bar. De intermediaire opslag tanks, bestaande uit telkens twee cilinders, hebben een capaciteit die gelijkstaat

<sup>14</sup> Safety distances for hydrogen filling stations, Matthijsen, A.J.C.M. & Kooi, E.S., Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 19, Nr. 6, November 2006.

aan de dagelijkse verkoop. Ze zijn voorzien van aangepaste veiligheidsvoorzieningen. Er wordt verondersteld dat de twee cilinders nooit samen falen.

De productie-eenheden worden geventileerd, om ophoping van waterstof te verhinderen.

Er wordt vanuit gegaan dat een wagen ongeveer 2,5 kg waterstof tankt. Deze hoeveelheid kan stijgen, naargelang de technologische vooruitgang.

De afstanden tot een contour die gelijk staat aan een plaatsgebonden risico gelijk aan  $10^{-6}$ , worden in onderstaande tabel opgenomen.

De berekeningen voor het middelgroot station zijn uitgevoerd voor het vullen van de voertuigen aan de pomp op einddrukken van 350 bar en 700 bar.

<b>Tabel # 7.1 : Afstanden tot risicocontour <math>10^{-6}</math></b>			
VERDEELSTATION	VANAF OPSLAG	VANAF PIJPLEIDING	VANAF VERDEELINSTALLATIE
Klein	10 m	4,5 m	5,0 m
Middelgroot – 350 bar	11 m	4,5 m	6,5 m
Middelgroot – 700 bar	15 m	5,5 m	8,5 m
Groot	13,5 m	4,5 m	11 m

De effectafstanden – dit zijn de afstanden waarbinnen de letaliteit bij een ongeval 1% of meer bedraagt – zijn gegeven in onderstaande tabel, zowel voor een druk van 350 bar als 700 bar.

De effectafstanden zijn logischerwijs groter dan de afstanden tot een plaatsgebonden risico van  $10^{-6}$ , omdat bij het bepalen van de effectafstanden geen rekening gehouden wordt met de kansen dat een dergelijk accident zich voordoet.

<b>Tabel # 7.2 : Effectafstanden</b>		
ONGEVALSCENARIO	EFFECTAFSTAND 350 BAR	EFFECTAFSTAND 700 BAR
Catastrofaal falen van een opslagtank	5 m	12 m
Lek in een opslagtank	17 m	32 m
Breuk van de vulslang & falen van de veiligheidskleppen	18 m	44 m
Lek in de vulslang	5 m	12 m
Breuk in de pijpleiding tussen verdeelinstallatie en opslagtank	21 m	31 m
Lek in de pijpleiding tussen verdeelinstallatie en opslagtank	5 m	11 m
Breuk in pijpleiding tussen compressor en opslagtank	29 m	70 m
Lek in pijpleiding tussen compressor en opslagtank	5 m	12 m

In vergelijking met de veiligheidsafstanden die gelden voor andere brandstoffen, blijken deze voor waterstof van vergelijkbare grootte. Ze zijn zelfs kleiner zijn dan voor traditionele LPG-verdeelinstallaties, waar de minimale afstand tot aan de contour  $10^{-6}$ , gemeten van aan het vulpunt van de LPG-opslagtank 40 meter bedraagt voor een installatie met een debietsbegrenzer die



ingesteld is op 190 liter/minuut, volgens een in opdracht van de Federatie Bupaan Propan (Febupro) uitgevoerde studie<sup>15</sup>.

Er is ook geen reden om aan te nemen dat bijkomende maatregelen moeten opgelegd worden voor gebieden die buiten de contour  $10^{-6}$  voor het plaatsgebonden risico vallen.

## 7.4 VEILIGHEIDSASPECTEN VAN WATERSTOF IN VOERTUIGEN

Het gebruik van waterstof stelt niet enkel veiligheidsvraagstukken voor wat betreft de opslag en verdeling ervan, maar ook voor het gebruik ervan in voertuigen.

Waterstof is immers ook in voertuigen aanwezig onder extreme condities, zoals hoge druk of lage temperatuur. Daarbij komt dat een en ander bestand moet zijn tegen of minstens voorzien op aanrijdingen of andere soortgelijke situaties of zelfs oneigenlijk gebruik van waterstof aanwezig in het systeem.

De belangrijkste aandachtspunten zijn:

- De tijdige en performante waterstofdetectie.
- Het voorkomen van lekken op elk punt in het systeem.
- Maatregelen om gevaarlijke mengsels van waterstof en lucht te vermijden, zowel in het systeem zelf (insluiting van lucht) als erbuiten.
- De ontwikkeling van een zekere weerstand van het waterstofsysteem in een voertuig tegen verschillende vormen van impact.
- Redundantie van veiligheidssystemen.
- Aangepaste veiligheidskleppen.

Dit alles vereist nog verdere ontwikkeling, al hebben de constructeurs aanzienlijke vooruitgangen geboekt. Zo beschikt BMW over een katalysator waarover waterstof dat wordt vrijgezet naar de atmosfeer door het openen van een veiligheidsklep, omgezet wordt tot water met zuurstof uit de lucht.

## 7.5 NORMERING

Het opstellen van normen, standaarden en toegepaste wetgeving moeten ervoor zorgen dat waterstof een veilig en volwaardig alternatief kunnen vormen.

Het is bij uitstek de taak van overheden om deze taak te sturen en te faciliteren, zowel op wereldniveau, als op Europees en nationaal niveau. Normen en standaarden gaan daarbij de wetgeving vooraf. Om goede wetgeving te zijn moet ze immers steunen op de ervaring en deskundigheid die vervat zit in deze normen en standaarden. Slechte wetgeving kan immers meer een rem vormen dan een stimulator te zijn.

Op initiatief van de Europese overheid worden tal van initiatieven genomen die hieraan invulling moeten geven.

---

<sup>15</sup> Veiligheidsafstanden LPG stations met bovengrondse LPG opslagtanks – Sectorstudie uitgevoerd in opdracht van Febupro, door een erkend VR deskundige samen met een stuurgroep samengesteld uit leden van Aminal Afdelingen Milieuvergunningen en Aminabel (cel VR), Febupro en de Belgische Petroleum Federatie, Det Norske Veritas, 2002

Organisaties die hieraan meewerken zijn onder meer ISO (International Organisation for Standardisation), IEC (International Electrotechnical Commission) op wereldniveau. Op Europees niveau gaat het om organisaties als CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardisation) en CEN (European Committee for Standardisation), die een gelijkaardige rol spelen als de IEC en de ISO respectievelijk.

Daarnaast zijn er tal van nationale belangengroepen actief, die lid zijn van bovenstaande organisaties, of nationale onderzoeksinstituten.

Aangezien veel van de ervaring met waterstof in voertuigtoepassingen verborgen blijven achter commerciële en concurrentiele geheimhouding, zou het kunnen dat essentiële veiligheidsaspecten achtergehouden worden, die bijgevolg over het hoofd worden gezien bij de normering.

De normering wordt dan ook best van nabij gevolgd door een panel van wetenschappers en bedrijven samen.

Het is in ieders belang dat de normen internationaal overeenstemmen en ook ondersteund worden. Het is immers zo dat verwacht mag worden dat een waterstofeconomie met een veilig imago, gedragen door de daarbij horende normen en standaarden, eerder een stimulans zullen zijn, dan een rem voor de ontwikkeling ervan.

Indien aan de voorwaarden voldaan wordt en een kwalitatieve normering wordt opgesteld, is er geen reden om aan te nemen waarom waterstof onveilig zou zijn dan conventionele brandstoffen en dat het risico kan worden teruggebracht tot aanvaardbare niveaus.

## 7.6 REGULERING

Er bestaan al tal van Europese richtlijnen, die vertaald werden in nationale regelgeving, die van toepassing zijn op onderdelen van de waterstofeconomie, zoals onder meer de "Machinerichtlijn", de "Pressurised Equipment" Richtlijn (PED) en de "ATEX" Richtlijnen.

Deze richtlijnen zijn voornamelijk gebaseerd op risico-evaluatie en bijhorende maatregelen.

Andere richtlijnen zijn van toepassing op voertuigen, dus ook op voertuigen die aangedreven worden door waterstof.

## HOOFDSTUK 8 : WATERSTOF EN HET MILIEU

---

### 8.1 INLEIDING

Waterstof wordt door iedereen die er wat mee te maken krijgt aanzien als een duurzame en schone energiedrager.

Veel heeft te maken met het feit dat de perceptie leeft dat waterstof gemaakt wordt uit puur water en dat bij verbranding terug enkel water wordt uitgestoten. Het gebrek aan andere emissies, voornamelijk dan koolstofdioxide, stikstofdioxide en roet, speelt sterk in het voordeel van waterstof, zeker als het gebruikt wordt ter vervanging van de meer conventionele, fossiele brandstoffen.

Dit beeld wijkt echter sterk af van de realiteit, en wel om meerdere redenen. Ten eerste bevindt de waterstofeconomie zich nog maar in de kinderschoenen. Er zijn bij lange na niet genoeg middelen om waterstof duurzaam te produceren, zodat er nog steeds belangrijke hoeveelheden fossiele brandstoffen, in primaire en/of secundaire vorm, gebruikt moeten worden om waterstof te maken. Hierbij zal mogelijk meer CO<sub>2</sub> vrijkomen, dan wanneer de fossiele brandstoffen gewoon direct zouden worden verbrand. Een klein voordeel is wel dat het maken van waterstof uit fossiele brandstoffen de mogelijkheid geeft het gevormd CO<sub>2</sub> af te vangen en te stockeren, waar dat voor de gewone verbranding niet mogelijk is.

Daarenboven kunnen de bestaande technologieën en technieken voor de productie, opslag en distributie van waterstof zeker nog verbeterd worden, waarbij de energieverliezen die hierbij geleden worden, tot een minimum moeten worden beperkt.

Naar de toekomst zullen dan ook massale investeringen nodig zijn om een mogelijke waterstofeconomie te kunnen verduurzamen.

Ten tweede is het gebruik van waterstof zeker niet emissievrij. Er was al sprake van de vrijzetting van potentieel enorme hoeveelheden CO<sub>2</sub> bij de productie ervan, zowel door reforming als door het gebruik van grote hoeveelheden klassiek opgewekte elektriciteit. Voor andere pollutanten, zoals NO<sub>x</sub> of SO<sub>2</sub> zal het waarschijnlijk onvermijdelijk zo zijn dat alles beter is dan de verbranding van fossiele brandstoffen. In die zin is het schoner de fossiele brandstoffen om te zetten in waterstof door middel van reforming, dan ze rechtstreeks te verbranden.

Een derde punt dat aangehaald moet worden, is dat het onduidelijk is wat de waterstofeconomie, en dus het doorgedreven gebruik van waterstof als energiedrager, zou doen met het milieu. Er zijn reeds meerdere malen stoffen verboden, waarvan het effect van hoge concentraties in de atmosfeer anders of erger was gebleken dan verwacht.

### 8.2 WATERSTOF IN HET MILIEU

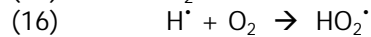
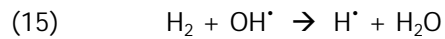
Waterstof is maar in zeer beperkte hoeveelheden, zo'n 0,5 ppm, terug te vinden in de atmosfeer. Waterstof komt voorts in de atmosfeer terecht door menselijke of andere processen. Enerzijds wordt waterstof in kleine hoeveelheden gevormd bij de verbranding van fossiele brandstoffen of biomassa. 40% van de waterstofemissies ontstaan op deze manier.

Nog eens 50% van de waterstof die in de atmosfeer terechtkomt, ontstaat uit fotochemische oxidatie van CH<sub>4</sub> en andere koolwaterstoffen. De laatste 10% zijn toe te schrijven aan vulkanen, oceanen en bacteriële werking. Dit zijn zeer grove schattingen, die slechts een idee kunnen geven, en zeker nog niet genoeg onderzocht zijn.

Waterstof verlaat de atmosfeer weer door depositie en van daaruit door microbiële opname in de bodem. Waterstof heeft ook de capaciteit om te ontsnappen aan de atmosfeer en te 'lekker' naar de ruimte toe, maar dit blijkt in de praktijk verwaarloosbaar.

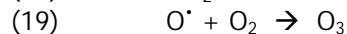
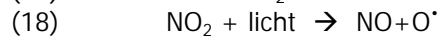
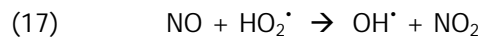
De 'bodem' wordt, milieutechnisch, dan ook aanzien als het grootste waterstofreservoir, die verantwoordelijk wordt geacht voor 75% van de opname van de waterstof uit de atmosfeer<sup>16</sup>.

De overige 25% van de waterstof in de atmosfeer reageert weg met vrije hydroxylradicalen, volgens onderstaande reacties.

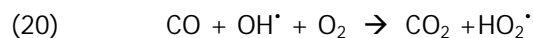


De hydroxylradicalen worden gevormd uit splitsing van ozon in zuurstof en een zuurstofradicaal, dat op zijn beurt met water reageert tot twee hydroxylradicalen.

In bovenstaande reacties wordt naast water ook een waterstofperoxyradicaal gevormd (HO<sub>2</sub>). Dit radicaal grijpt in in de fotochemische ozonvorming of het reageert weg met andere radicalen, waarmee de cyclische radicaalvorming beëindigd wordt. Deze ozonvorming, een van de oorzaken van teveel ozon in de lucht bij warme dagen, is een proces waarbij stikstofoxide afkomstig uit het verkeer reageert met het waterstofperoxyradicaal en verder reageert onder invloed van licht, ter vorming van ozon, zoals hieronder aangegeven.



De vrije hydroxylradicalen spelen echter nog een andere belangrijke rol in atmosferische processen. Ze dienen als belangrijke initiator voor de atmosferische afbraak van allerlei vluchtige organische stoffen (VOS), methaan en koolmonoxide, ter vorming van CO<sub>2</sub> en opnieuw een waterstofperoxyradicaal:



Al deze processen maken deel uit van een atmosferisch evenwicht, waarbij polluenten uit de atmosfeer verwijderd worden.

Als nu, als gevolg van een waterstofeconomie, deze waterstof de concentratie aan vrije hydroxylradicalen in de atmosfeer doet dalen, zal ook de capaciteit van de atmosfeer om polluenten te oxideren verminderen. In het meest ideale geval zou dit teniet moeten gedaan worden door het feit dat er in een waterstofeconomie ook minder polluenten zoals CO<sub>2</sub> of NO<sub>x</sub> geëmitteerd worden.

---

16 An Environmental Experiment with H<sub>2</sub>?, Michael J. Prather, Science, vol 302, pp 581 - 582

### 8.3 DE WATERSTOFINFRASTRUCTUUR EN HET MILIEU

Niet alleen waterstof zelf zou een bedreiging kunnen vormen voor het milieu. Gezien de eigenschappen van waterstof, moet steeds gewerkt worden met hoogtechnologische materialen en toepassingen, waarvan nog niet gekend is wat er de effecten van zijn op het milieu.

Zo zijn de opslagtanks voor samengedrukt waterstof in wagens tegenwoordig gemaakt van met koolstofvezel versterkte polymeren. Het is nog niet geweten of dit een te recycleren materiaal zal zijn, dan wel een eindafvalproduct.

Ook dergelijke vraagstukken zijn bepalend voor de toekomst van de waterstofeconomie.

### 8.4 TOEKOMSTVOORSPELLINGEN

Het is altijd zeer moeilijk om voorspellingen te doen voor de toekomst. Deze paragraaf moet dan ook onder het nodige voorbehoud gelezen worden.

Er bestaat heel wat onenigheid met betrekking tot de hoeveelheid waterstof die jaarlijks zou vrijkomen in de atmosfeer, als gevolg van een waterstofeconomie, eenvoudigweg omdat niemand precies weet hoe deze waterstofeconomie vorm moet of zal krijgen. Er bestaat zeker nog geen eensgezindheid over de manieren van productie, opslag, gebruikte hoeveelheden, toename hierin, enzovoorts.

Schattingen voor de hoeveelheid waterstof die in de atmosfeer terecht kan komen, lopen uiteen van de voorzichtige 0,1% tot zelfs 20% van de jaarlijks geproduceerde hoeveelheid. Deze laatste lijkt overdreven. Dergelijke verliezen zijn immers economisch niet tolereerbaar en al zeker niet veilig, gelet op de eigenschappen van waterstof. Realistische schatting gaan uit van waterstofverliezen naar atmosfeer van om en bij de 3%.

Er is echter nog veel meer onderzoek nodig naar de effecten van waterstof in de atmosfeer. Dit onderzoek zal zich focussen op zowel aanrijking van de atmosfeer met waterstof, als op de opnamecapaciteit van en de effecten op het grootste waterstofreservoir, de bodem.

Het belangrijkste zal zijn in te schatten welke de effecten zijn op de luchtkwaliteit, door een verstoring van hierboven beschreven cycli.

Daarnaast zal het van het grootste belang zijn te realiseren dat niet de dezelfde fouten gemaakt kunnen worden als eerder gebeurde met andere gassen die de atmosfeer zijn gaan aanreiken, waarvan de effecten in eerste instantie ook niet bekend waren, zoals CFK's en CO<sub>2</sub>.

---

## HOOFDSTUK 9 : VERGELIJKENDE TABELLEN

---

In wat volgt worden de verschillende besproken technieken en technologieën voor productie, opslag en verdeling overzichtelijk in tabellen gezet en vergeleken ten opzicht van elkaar.

**Tabel # 9.1 : Vergelijkende tabel "Productie van waterstof"**

	BONDIGE BESCHRIJVING VAN DE TECHNIEK	BONDIGE BESCHRIJVING VAN DE VOOR- EN NADELEN VAN DE TECHNIEK OP HET VLAK VAN DE VEILIGHEID	TOEKOMSTPERSPECTIEF
Elektrolyse van water	<p>Elektrolyse is de splitsing van water (H<sub>2</sub>O) in waterstof (H<sub>2</sub>) en zuurstof (O<sub>2</sub>) met behulp van elektriciteit. Met deze techniek wordt zeer zuiver waterstofgas geproduceerd.</p> <p>De techniek is zeer energie-intensief en niet rendabel wanneer elektriciteit op basis van fossiele brandstoffen wordt gebruikt.</p>	<p>De techniek wordt veel gebruikt in de industrie en is een zeer goed gekend en bestudeerd proces. Waterstof wordt op lage druk (2 tot 5 bar) geproduceerd.</p> <p>Hoge druk-elektrolyse is mogelijk met waterstofdrukken tot 120 bar, waardoor minder energie moet gestoken worden in de samendrukking van waterstof.</p>	<p>De kost van elektrolyse is afhankelijk van de prijs van de elektriciteit. Er is ongeveer 1,5 eenheid (elektrische) energie nodig om 1 eenheid (waterstofgedragen) energie te produceren.</p> <p>Hydrolyse van waterstof heeft een toekomst als de energie om het proces aan te drijven gehaald kan worden uit duurzame energiebronnen, zoals wind- of zonne-energie, of wanneer elektriciteit zeer goedkoop beschikbaar is. Elektrolyseprocessen zijn de link tussen waterstof en duurzame energieopwekking.</p> <p>Elektrolyse van water ter vorming van waterstof met gebruik van klassiek opgewekte elektriciteit (niet nucleair) is niet CO<sub>2</sub>-neutraal.</p>
Hoge temperatuurselektrolyse van water (HTE)	<p>HTE is de splitsing van water onder invloed van warmte. Bij temperaturen hoger dan 2500 °C is elektriciteit overbodig en gaat het eigenlijk om thermolyse.</p> <p>De warmte is afkomstig van een bepaalde bron en wordt overgedragen met behulp van warmtepompen. Bij lagere temperaturen is nog steeds elektriciteit nodig. De efficiëntie van HTE neemt dus toe met de temperatuur.</p>	<p>De hoge temperaturen waarbij gewerkt wordt stelt specifieke problemen en eisen bij het bedrijven van dergelijke processen.</p> <p>Werken bij lagere temperaturen is mogelijk, maar doordat dan meer elektriciteit nodig is, gaat een deel van de efficiëntie van dergelijke processen verloren. Voorlopig zijn er nog geen andere relevante bronnen van warmte, andere dan kernenergie, wat op zich zijn eigen veiligheidsproblemen stelt.</p>	<p>Deze techniek is nog niet commercieel beschikbaar maar beschikt over een groot potentieel omdat het productie op grote schaal mogelijk maakt, gebruik makend van warmte. Intrinsiek is de techniek CO<sub>2</sub>-neutraal.</p> <p>Er is een zeer stabiele bron van hitte nodig. Dergelijke bronnen zijn momenteel niet beschikbaar. De mogelijkheid om warmte afkomstig van nucleaire installaties te gebruiken voor de opwekking van waterstof wordt onderzocht. Het niet-duurzaam karakter van nucleaire energie maakt deze techniek echter controversieel.</p> <p>Onderzoek naar geconcentreerde zonne-energie en aardwarmte is gaande.</p> <p>Met betrekking tot kostprijs kan HTE niet concurreren met reforming, voornamelijk vanwege de relatieve inefficiëntie van de nodige warmtepompen.</p> <p>Op een temperatuur van 100°C is 350 megajoule aan warmte-energie nodig voor de productie van 1 kg waterstof. Op een temperatuur van 850°C is 225 megajoules warmte-energie nodig.</p>

Thermochemische productie	<p>Thermochemische productie bestaat uit een welbepaalde cyclus waarbij water gesplitst wordt, en die wordt geïnduceerd door de toevoeging van warmte aan dit systeem.</p> <p>De meest bestudeerde en bekende cyclus is de zwavel – jodium cyclus.</p> <p>De warmte is afkomstig van een bepaalde bron en wordt overgedragen met behulp van warmtepompen.</p>	<p>De werkingstemperatuur is afhankelijk van de gebruikte cyclus, maar zal over het algemeen lager zijn dan bij HTE.</p> <p>De productie op hoge schaal gebeurt bij hoge temperaturen, hoge drukken en corrosieve omstandigheden.</p> <p>Verdere ontwikkelingen voor het op punt stellen en het opschalen van deze techniek zijn nog nodig.</p>	<p>Deze techniek is nog niet commercieel beschikbaar maar beschikt over een groot potentieel omdat het productie op grote schaal mogelijk maakt, gebruik makend van warmte. Intrinsiek is de techniek CO<sub>2</sub>-neutraal.</p> <p>De warmtebronnen zijn mogelijk nucleair en dus controversieel. Onderzoek naar geconcentreerde zonne-energie en aardwarmte is gaande.</p> <p>De techniek is mogelijk efficiënter en dus goedkoper dan HTE omdat geen elektriciteit nodig is, enkel warmte.</p>
Elektrolyse van zout	<p>Bij elektrolyse van pekkel (zout water) voor de productie van chloorgas ontstaat waterstof als nevenproduct.</p>	<p>Waterstof wordt op lage druk geproduceerd.</p>	<p>Het wordt niet op grote schaal toegepast omdat het maar een nevenproduct is, de efficiëntie ervan laag is en er te veel energie nodig is om rendabel te zijn.</p>
Reforming	<p>Waterstofproductie met behulp van reforming is gebaseerd op de omzetting van koolwaterstoffen in waterstof.</p> <p>Het leeuwendeel van de waterstof wordt momenteel op deze manier geproduceerd.</p> <p>De techniek is niet CO<sub>2</sub>-neutraal en levert zelfs meer CO<sub>2</sub> op dan rechtstreekse verbranding.</p> <p>Het geproduceerde H<sub>2</sub> is niet van een hoge zuiverheidsgraad.</p> <p>Zowel aardgas als andere koolwaterstoffen, zoals biodiesel of bio-ethanol, kunnen dienen als grondstof.</p>	<p>De techniek is zeer goed gekend en wereldwijd verspreid. Ze kan op verschillende schalen toegepast worden, zelfs mobiel.</p> <p>Hoge temperaturen en drukken zijn nodig voor een economisch rendabel proces..</p>	<p>Voor de nabije toekomst zal deze techniek de meest belangrijke en ook meest goedkope vorm blijven voor de productie van waterstof. De grondstof is dan aardgas.</p> <p>Indien uitgevoerd op centrale plants kan werk worden gemaakt van het afvangen en stockeren van CO<sub>2</sub> waardoor de techniek min of meer CO<sub>2</sub>-neutraal wordt.</p> <p>Sceptici stellen dat het eenvoudiger is het aardgas gewoon te verbranden. Er gaat immers minder energie verloren en er komt minder CO<sub>2</sub> vrij.</p> <p>De lagere zuiverheidsgraad maakt zuivering van de waterstofstroom noodzakelijk. De onzuiverheden zijn immers nefast voor de levensduur van voorhanden zijnde brandstofcellen.</p> <p>Met bio-ethanol of biodiesel als grondstof wordt de techniek deels verduurzaamd.</p>
Vergassing van koolwaterstoffen	<p>De vergassing van koolwaterstoffen is in feite gelijk aan reforming. Hogere en zwaardere koolwaterstoffen, zoals kolen, maar ook biomassa, zijn hier de grondstof. Ze worden bij hoge temperatuur omgezet in methaan en CO, waaruit vervolgens waterstof gewonnen wordt. De geproduceerde waterstof heeft een vrij lage graad van zuiverheid.</p>	<p>De techniek is gekend voor waar het steenkool als grondstof betreft, maar vergt grootschaligheid. De veiligheidsaspecten zijn gelijk aan die van reforming.</p>	<p>De techniek vergt vrij veel energie omdat er eerst een kostelijke vergassing moet plaatsvinden. Daarnaast moet het geproduceerde waterstof gezuiverd worden en is de techniek verre van CO<sub>2</sub>-neutraal.</p> <p>De algemene efficiëntie is te laag. Daarenboven is het gemakkelijker gebruikte biomassa om te zetten in alternatieve brandstoffen dan om er waterstof van te maken.</p>



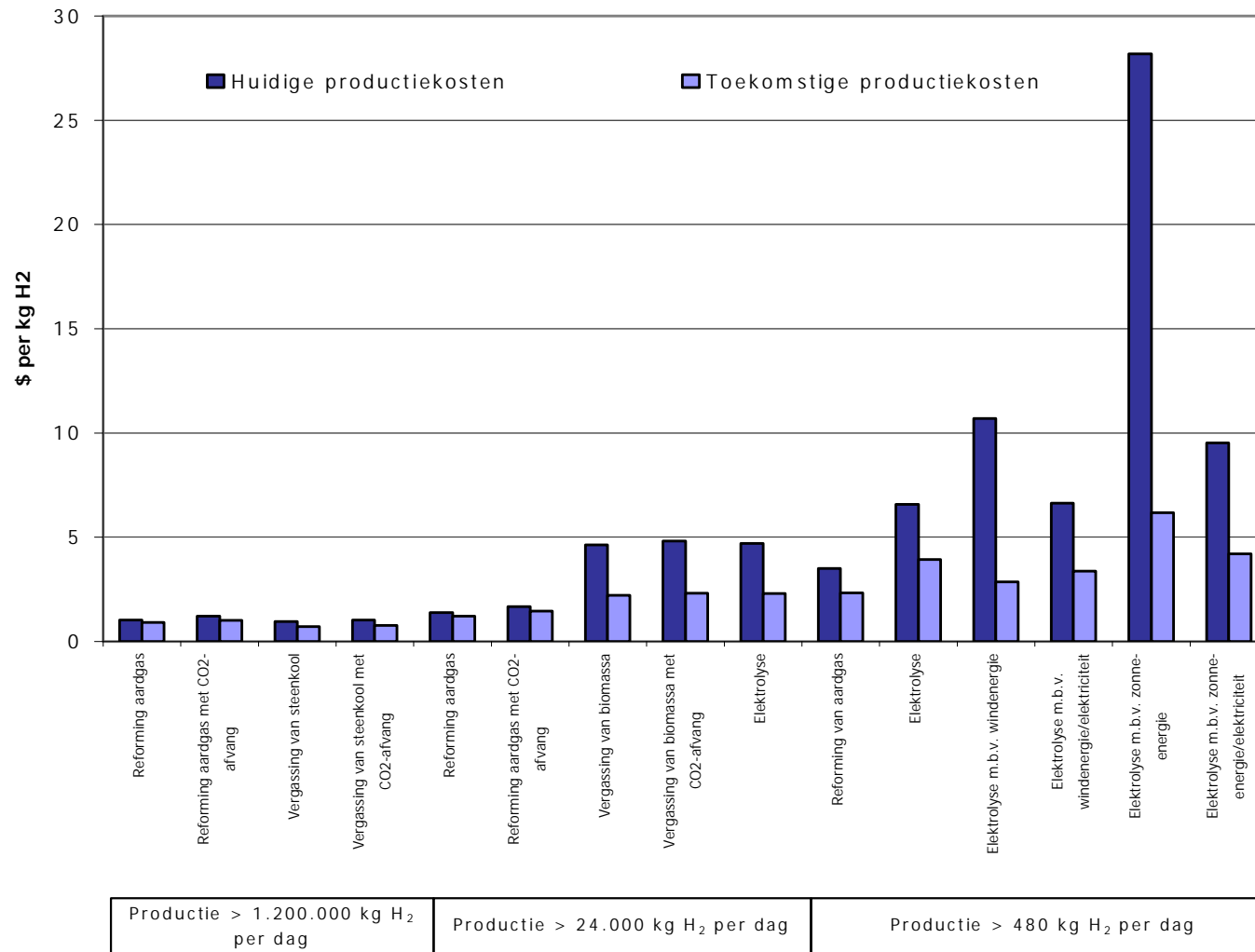
Biologische productie	Bepaalde types algen produceren zuivere waterstof onder bepaalde condities, onder invloed van zonlicht.	Veilige behandeling van het geproduceerde waterstof moet (nog) worden gecombineerd met de ideale omstandigheden die nodig is voor optimale algengroei. Onderzoek hiernaar is nog steeds nodig en wordt momenteel uitgevoerd op her en der opgestelde testreactoren.	De techniek staat helemaal nog niet op punt en kan op dit moment nog niet instaan voor grote productiecapaciteiten. De efficiëntie van het hele proces, met andere woorden de productiesnelheid van waterstof, is nog zeer laag. Nadeel van deze productietechniek is de grote oppervlaktes die nodig zullen zijn voor de zogenaamde algenboerderijen. Potentieel groot voordeel van de techniek is dat het gemakkelijk decentrale productie van waterstof zou moeten toelaten. Afhankelijk van de toekomstige ontwikkelingen, zou dit een vrij goedkope technologie moeten zijn.
-----------------------	---	---	---

Bij deze tabel moeten volgende randbemerkingen gemaakt worden:

1. De meeste technieken zijn verre van CO<sub>2</sub>-neutraal omdat energie of grondstof nodig is voor de productie van waterstof. Gecentraliseerde productie van waterstof maakt het wel mogelijk CO<sub>2</sub> selectief af te vangen en te stockeren, waar dit bij rechtstreekse verbranding van fossiele brandstoffen in voertuigen of kleine toepassingen niet het geval is.
2. In elk van deze technieken wordt waterstofgas geproduceerd. De veiligheidsaspecten zijn bekend en voor elk type productie hetzelfde. Enkel de temperatuur en de druk speelt dan een onderscheidende rol, maar is evenwel niet relevant.
3. De uitvoerbaarheid van de verschillende besproken technologieën zijn sterk afhankelijk van economische en politieke beslissingsprocessen. Ook ondersteunende ontradende maatregelen op verschillende niveaus interageren sterk met de verdere ontwikkeling van de beschreven technologieën.
4. De kostprijs is in alle gevallen, gezien het feit dat waterstof een energiedrager is, in grote mate afhankelijk van de kost van de inputenergie. De wenselijkheid en/of de mogelijkheid van het gebruik van bepaalde energiebronnen dragen hiertoe bij.

In onderstaande figuur worden indicatieve prijzen (in dollar per geproduceerde kilo waterstof)<sup>17</sup> opgenomen voor de nu bekende technieken. Bij de interpretatie van deze technieken moet rekening gehouden worden met bovenstaande opmerkingen. Daarnaast wordt de verwachte evolutie weergegeven van de productiekosten.

<sup>17</sup> The hydrogen economy: opportunities, costs, barriers and R&D needs, National Academy of Science, National Academies Press, Washington, 2004



Hierbij vallen enkele dingen op:

1. De gangbare technieken toegepast op middelgrote en grote schaal zijn reeds verregaand geoptimaliseerd waar het de productiekost betreft, waardoor er hier in de toekomst weinig prijsbeweging te verwachten valt. Voor de nieuwe productietechnieken en de kleinschalig toegepaste technieken zijn wel nog belangrijke kostenreducties te verwachten.
2. De productie van waterstof op basis van fossiele brandstoffen blijft verruit de goedkoopste manier, waardoor aan het doel van een duurzame waterstofeconomie deel voorbijgegaan wordt.
3. De grootste kostenreducties naar de toekomst toe zijn te zien voor het gebruik van duurzame energiebronnen voor de elektrolyse van water.
4. De productie van waterstof heeft merkelijk belang bij schaalvergroting. Deze tabel neemt natuurlijk de transport- en opslagkosten niet mee in aanmerking.

De hierboven beschreven technieken en technologieën zijn het meest bekend. Andere technieken worden volop onderzocht. Toepassingen zijn slechts beschreven op laboschaal. Ze zijn niet opgenomen in bovenstaande tabel omdat nog te weinig bekend is met betrekking tot de processen, hun veiligheid en hun efficiëntie op grote(re) schaal. Voorbeelden hiervan zijn:

1. Fotogekatalyseerde splitsing van water: elektrolyse op basis van zonlicht
  2. Bio-fotolyse en biofermentatie: biologische splitsing of biologische productie van water onder invloed van zonlicht (zie ook biologische productie)
  3. Fermentatie in afwezigheid van zonlicht ter vorming van waterstof
  4. Vergassing van biomassa (zie ook vergassing koolwaterstof)
  5. Het aanboren van waterstofvoorraden in de ondergrond

**Tabel # 9.2 : Vergelijkende tabel "opslag van waterstof"**

	BONDIGE BESCHRIJVING VAN DE TECHNIEK	BONDIGE BESCHRIJVING VAN DE VOOR- EN NADELEN VAN DE TECHNIEK OP HET VLAK VAN DE VEILIGHEID	TOEKOMSTPERSPECTIEF
Opslag als vloeistof	<p>Waterstof is een vloeistof bij een temperatuur van – 253°C en een druk van 1 bar. Het kan op die manier opgeslagen worden. Men spreekt dan van cryogene opslag.</p> <p>Vloeibaar waterstof wordt niet als dusdanig geproduceerd maar is afkomstig van het vloeibaar maken van gasvormig waterstof.</p>	<p>Vloeibaar waterstof is niet brandbaar. Het verdampt evenwel snel. Een plas vloeibaar waterstof kan op die manier voor een grotere ontstekingsgevoelige wolk vormen die langer blijft duren, dan eenzelfde hoeveelheid gasvormig waterstof, dat onmiddellijk kan diffunderen.</p> <p>Voordeel is dan weer dat de druk waarmee gewerkt wordt veel lager is, en vrijzetting van waterstof dan ook minder gewelddadig zal zijn.</p> <p>De cryogene omstandigheden stellen ook risico's, bijvoorbeeld door bevroering.</p>	<p>Vloeibare waterstof heeft het nadeel dat vrij veel energie nodig is voor het vloeibaar maken ervan, namelijk zo'n 30% van de energie-inhoud ervan voor grote installaties (meer voor kleinere installaties). De energie-inhoud per eenheid van volume is evenwel groter dan voor gasvormige opslag, wat maakt dat de actieradius van voertuigen aangedreven door vloeibare waterstof groter is.</p> <p>Daarnaast vergt cryogene opslag heel wat randapparatuur, zoals doorgedreven isolatie en zijn de verdampingsverliezen aanzienlijk, zeker over langere periodes.</p> <p>De kosten van opslag zijn beperkter dan de kosten van opslag van gas. De hogere kosten van de vloeibaarmaking zijn daar echter niet bijgeteld.</p>
Opslag als gas	<p>Gezien de grote volumes die waterstof inneemt bij kamertemperatuur, is opslag als gas enkel mogelijk onder hoge druk.</p> <p>Gecomprimeerd gas kan op verschillende drukken worden opgeslagen in daarvoor geschikte opslagtanks. Als stelregel geldt: hoe hoger de druk, des te groter is de energie-inhoud per eenheid van volume.</p>	<p>De opslag van waterstof bij een druk van 200 bar is gangbare praktijk, waarvan de veiligheidsrisico's goed gekend zijn.</p> <p>De opslag van waterstof bij hogere drukken (&gt; 350 bar) stellen reële veiligheidsproblemen.</p> <p>Aangezien traditionele stalen tanks te zwaar zijn om in aanmerking te komen als opslagtank in voertuigen zijn nieuwe ontwikkelingen nodig. Momenteel zijn reeds tanks beschikbaar op basis van composietmaterialen. Het hele waterstofsysteem moet voorzien zijn op dergelijke drukken. Absolute lekdichtheid voor hoge drukken is van uitermate groot belang.</p>	<p>De opslag van waterstof als een gas is de meest gangbare praktijk en tot op heden de meest goedkope, temeer omdat het samendrukken van gas goedkoper is dan het vloeibaar maken ervan. Ongeveer 4 tot 8% van de energie-inhoud is nodig om waterstof samen te drukken van 1 bar tot ongeveer 350 bar.</p> <p>De energiedichtheid is lager bij lagere drukken. Bij een druk van 700 bar komt de energiedichtheid in de buurt van die van vloeibare waterstof.</p> <p>Gasvormig waterstof heeft het beste toekomstperspectief: het is gemakkelijk te decentraal te produceren, een troef in de begindagen van een eventuele waterstofeconomie en het kan verdeeld worden doorheen een pijpleidingnetwerk.</p> <p>Het gebruik van hoogtechnologische tanks uit composietmaterialen, maakt opslag bij drukken hoger dan 200 bar echter een kostbare zaak.</p>

Opslag als hydride	Waterstof kan opgeslagen worden in specifieke metaallegeringen, waar het een zogenaamd hydride vormt. Waterstof is in de structuur aanwezig als een atoom en niet als een gasmolecule.	De opslag van waterstof als een hydride is een betrekkelijk veilige manier van opslag. De waterstof is atomair gebonden aan de metaalstructuur en komt pas vrij onder bepaalde omstandigheden van druk en temperatuur. Het vormen van de hydrides is exotherm. Er komt vrij veel warmte vrij bij de opslag, waardoor koeling bij belading met waterstof noodzakelijk zal blijken te zijn.	Hét grote nadeel van opslag als hydride is het zware gewicht van het metaal ten opzichte van het gewicht waterstof. Daarnaast is het niet steeds mogelijk waterstof eenvoudig terug te onttrekken aan zijn hydridetoestand, zeker niet bij mobiele tanktoepassingen. Betere metaallegeringen, betere kinetica van de processen en een hogere gravimetrische dichtheid zijn nodig vooraleer deze techniek commercieel te exploiteren zal zijn. Bijkomend probleem is de kostprijs van de gespecialiseerde metaallegeringen (1 tot 1,5 maal de kostprijs van hoogtechnologische druktanks en 2 tot 3 maal de kostprijs van een cryogene opslagtank), de levensduur ervan, alsook de eindverwerking van dergelijke metalen op het einde van de levenscyclus.
Opslag in poreuze materialen	Waterstof kan opgeslagen worden in specifieke zeer poreuze materialen, zoals koolstof- of silicastructuren.	De opslag van waterstof in een poreuze structuur is een betrekkelijk veilige manier van opslag. De waterstof is atomair of moleculair gebonden aan de structuur en komt pas vrij onder bepaalde omstandigheden van druk en temperatuur.	Opslag in poreuze materialen is beloftevol naar de toekomst, maar wel op langere termijn. Voorlopig zijn de productiekosten van de gebruikte koolstofmaterialen te hoog en is de kinetica van de adsorptie nog te weinig gekend. De siliciummaterialen zijn veel goedkoper en meer beschikbaar en de kinetica is gekend. Hier is het voorlopig echter nog niet mogelijk voldoende hoge gravimetrische dichtheden te behalen.
Opslag in de ondergrond	Net zoals aardgas kan waterstof opgeslagen worden in daartoe geschikte geologische lagen.	De opslag in geologische lagen is een vrij veilige manier van opslag. Er is reeds voldoende kennis aanwezig vanuit vergelijkbare opslag van aardgas.	Ondergrondse opslag zal maar een rol spelen eens er grote productievolumes gerealiseerd worden. Ze kunnen de afhankelijkheid van diezelfde productie verkleinen en pieken en dalen in het verbruik opvangen. Verder onderzoek naar geschikte geologische lagen is nodig. Het grote nadeel is dat een relatief groot aandeel van de waterstof niet herwinbaar is. De kosten van dergelijk type opslag in niet bekend, maar aan te nemen valt dat een grote initiële investeringskost nodig is.

Bij deze tabel moeten volgende randbemerkingen gemaakt worden:

- De opslagtanks moeten afgeschermd worden van tanks die andere producten bevatten en van mogelijke invloeden van buitenaf, zoals menselijke tussenkomst, impact of externe brand, onafhankelijk van de manier waarop de waterstof is opgeslagen.

**Tabel # 9.3 : Vergelijkende tabel "transport en verdeling van waterstof"**

	BONDIGE BESCHRIJVING VAN DE TECHNIEK	BONDIGE BESCHRIJVING VAN DE VOOR- EN NADELEN VAN DE TECHNIEK OP HET VLAK VAN DE VEILIGHEID	TOEKOMSTPERSPECTIEF
Centrale productie: Transport per vrachtwagen Transport per spoor Transport per schip Transport per pijpleiding Transport als gas Transport als vloeistof Transport in gebonden toestand	Indien waterstof centraal wordt geproduceerd, dus bijvoorbeeld in grote productie-installaties, moet het vervoerd worden tot bij de eindverbruiker, net zoals dat het geval is met klassieke brandstoffen. De manier waarop waterstof getransporteerd wordt, is afhankelijk van het eindverbruik.	De voor- en nadelen van de verschillende transportmogelijkheden (vast, vloeibaar, in gebonden toestand) zijn vergelijkbaar met de voor- en nadelen beschreven bij de opslag. Transport per pijpleiding geniet de voorkeur, aangezien hierbij het minste menselijke handelingen nodig zijn.	Aangezien er weinig of geen infrastructuur bestaat voor het transport van waterstof, zal het inzetten van een pijpleidingnetwerk op korte of middellange termijn weinig waarschijnlijk zijn. Onderzoek naar het bijmengen van waterstof in de bestaande aardgasinfrastructuur is echter gaande. Gezien de flexibiliteit is het waarschijnlijk dat het meeste transport zal gebeuren per weg. Wegtransport van gasvormige waterstof is daarbij het minst efficiënt, dat van vloeibare waterstof het meest. Afhankelijk van de afstanden die overbrugd moeten worden, kan het zijn dat het voordeliger is waterstof vloeibaar te maken, te transporteren en terug te verdampen, dan het als gas te transporteren, zelfs op hogere drukken.
Decentrale productie	Bij decentrale productie, dit is productie op de plaats waar waterstof verdeeld wordt, is transport niet nodig. Verdeling van waterstof gebeurt via een gecontroleerd leidingnetwerk en over korte afstanden.	Voor de voor- en nadelen wordt verwezen naar de respectievelijke tabellen voor productie.	Decentrale productie maakt elk transport overbodig en is dat opzicht interessant alhoewel het het nadeel ondervindt van een initiële hoge investeringskost. Daarenboven vergt decentrale productie meer ruimte en is daarmee niet altijd integreerbaar in stedelijk of verstedelijkt weefsel. Decentrale productie van vloeibare waterstof is niet mogelijk, wegens de onredelijk hoge kost hiervan bij lage volumes. Anderzijds is decentrale productie op kleine schaal ideaal om op snelle manier en zonder overbodige transportrisico's een waterstofeconomie uit te bouwen. De technologie voor decentrale productie is voorhanden, goed gekend en modulair beschikbaar

Verdeling van vloeibare waterstof	Vloeibare waterstof wordt bij een temperatuur van $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ en een druk van 1 bar verdeeld vanuit een centrale opslagtank.	Nadelen van de distributie van vloeibare waterstof is de extreem lage temperatuur, alsook de eisen die dit stelt aan de koppelingsapparatuur tussen voertuig en verdeelslang. Ook kunnen, afhankelijk van de gekozen technologie, belangrijke evaporatieverliezen optreden. Voordeel is wel dat er bij lage druk gewerkt kan worden.	Er zijn reeds systemen beschikbaar voor de distributie van vloeibare waterstof, zowel manueel als volautomatisch. Het geheel is cryogeen wat extra kosten met zich meebrengt. Dergelijke lage temperaturen stellen immers eisen aan de materialen die ermee in aanraking komen. Er stellen zich problemen met de distributie door onbevoegde personen.
Verdeling van gasvormig waterstof	Gasvormige waterstof wordt verdeeld vanuit tussenopslagtanks die reeds op de gewenste einddruk staan of op een lagere tussendruk.	Ofwel wordt de tank langzaam gevuld, waarbij de opslagdruk bereikt wordt door de vuloperatie zelf, ofwel wordt de tank snel gevuld met reeds op druk gebracht waterstof. De eerste optie is veiliger, omdat er gewerkt kan worden bij lage drukken, maar heeft een lange duurtijd, die het geheel weinig interessant maakt. In het ander geval wordt gewerkt met hoge tot zeer hoge drukken wat specifieke veiligheidsproblemen stelt, maar economisch heel wat rendabeler is. Het is zo dat reeds heel wat normen, regulering en standaarden voorhanden zijn voor het veilig werken met gecompriemd waterstof. Ook is de apparatuur daarvoor getest en beschikbaar.	Er zijn reeds systemen beschikbaar voor de distributie van gasvormig waterstof, zowel manueel als volautomatisch. Voordeel is dat het waterstof ter plekke kan worden geproduceerd. Nadeel is dat er meer randapparatuur bij komt kijken dan bij cryogene distributie, in de vorm van compressoren, zeker als de waterstof opgeslagen wordt onder tussendruk. Er stellen zich problemen met de distributie door onbevoegde personen.
Verdeling van waterstof naar vastestoffenopslag	Waterstof wordt onder een bepaalde temperatuur en druk gevoed aan een metaalstructuur, waarbij een hydride gevormd wordt. Deze techniek is nog niet geschikt voor mobiele toepassingen.	n.v.t.	Er is nog niet veel onderzoek uitgevoerd naar de toekomstperspectieven van deze manier van distributie aangezien de opslagwijze zelf nog niet op punt staat.

Bij deze tabel moeten volgende randbemerkingen gemaakt worden:

1. Zowel de distributie van vloeibare waterstof als die van gasvormig waterstof worden op dit moment geschikt gemaakt voor uitvoering door derden. Geen van beide technieken is te bevoordelen ten opzichte van elkaar wanneer het aankomt op de mogelijkheid de distributie te laten uitvoeren door onbevoegden.

---

## HOOFDSTUK 10 : CONCLUSIE

---

Uit de studie is gebleken dat waterstofeconomie als een geïntegreerd geheel nog maar in de kinderschoenen staat.

Zowel productietechnieken als opslagtechnieken, met hun respectievelijke capaciteit, verdienen nog veel aandacht en onderzoek, vooraleer waterstof op grootschalige manier zal kunnen worden toegepast.

Daarnaast zullen drastische ontwikkelingen nodig zijn binnen het domein van de duurzame energieopwekking, gecombineerd met elektrolyseprocessen ter productie van waterstof, omdat slechts dan waterstof een volwaardig alternatief zal kunnen vormen voor fossiele brandstoffen, rekening houdend met de globale energie- en emissiebalans.

Voor wat opslag betreft, werden vier alternatieven besproken, naast tal van toekomstbeelden. Opslag onder druk van gasvormig waterstof is momenteel de best gekende techniek voor de opslag van waterstof. Er zijn echter nog verbeteringen nodig om de opslagefficiëntie te verbeteren. Klassiek nadeel is de grote volumes die nodig zijn voor dit type opslag, als gevolg van de geringe dichtheid van waterstof.

Een tweede technologie bestaat uit de cryogene opslag van vloeibare waterstof. Het probleem van een te lage volumetrisch energetisch vermogen wordt hier deels omzeild. Cryogene opslag heeft echter zo zijn problemen, zeker voor mobiele toepassingen, waarvoor nog oplossingen moeten worden aangereikt, alvorens op grote schaal kan worden overgeschakeld op deze techniek.

Er was ook opslag in metaalhydrides. Deze techniek is nog niet ver genoeg ontwikkeld om momenteel als volwaardig alternatief te bestaan in voertuigtoepassingen. Het vormt naar de toekomst echter wel de meest veelbelovende voor de lagedrukopslag van waterstof, gesteld dat materialen kunnen ontwikkeld worden die opereren bij bescheiden druk en temperatuur, of in die zin verbeterd worden. Het verdelen van waterstof die op deze manier opgeslagen wordt, is evenmin evident, zodat ook hier gesteld kan worden dat de techniek nog niet rijp is om door te breken op grote schaal.

Tenslotte was er opslag in poreuze systemen. Deze techniek is beloftevol, veilig, maar het minst ontwikkeld van alle mogelijke opslagstechnieken. Er zal dan ook nog veel onderzoek moeten gebeuren naar de manier van opslag, de kinetica, sorptie- en desorptieprocessen enzovoorts.

Boven op de technologische ontwikkelingen en hieraan gelijklopend, mogen de vraagstukken met betrekking tot veiligheid en milieu niet uit de weg gegaan worden. Het is essentieel dat hiervoor antwoorden gevonden worden vooraleer de waterstofeconomie zich kan ontwikkelen. De ontwikkeling hiervan zal in een volgende fase verder toegelicht worden.

De conclusie op basis van voorgaand onderzoek is dat waterstof momenteel geen alternatief vormt voor de conventionele brandstoffen. Daarvoor zijn nog te veel openstaande vragen en moet de techniek nog verder verfijnd worden.

Dat wil echter onder geen beding betekenen dat het geen beloftevolle technologie is. Zeker zijn verdere ontwikkelingen en onderzoek broodnodig. Dit zou passen in de visie van de meeste deskundigen op het gebied van de waterstofeconomie. In deze visie ondersteunen verschillende overheden proefprojecten in welgedefinieerde domeinen, om zo iedereen die erbij betrokken is, overheden, constructeurs, waterstofindustrie, de kans te geven te leren, om het idee zo uiteindelijk stilaan te laten groeien, zowel infrastructuur als in de publieke opinie, en tegelijkertijd te blijven ontwikkelen, zodat de waterstofeconomie de mogelijkheid krijgt op termijn volwassen te worden.





**VINÇOTTE ENVIRONMENT**

Contactadres: Business Class Kantorenpark • Jan Ollieslagerslaan 35 • 1800 Vilvoorde • België  
Tel +32 (0)2 674 57 11 • fax +32 (0)2 674 51 82 • environment@vincotte.be • www.vincotte.com

Sociale Zetel: Diamant Building • A. Reyerslaan 80 • 1000 Brussel • België

Safety, quality and environmental services

Contract beheerd door **SECTIE STUDIES**

STUDIE BETREFFENDE DE TECHNISCHE EN  
REGLEMENTAIRE ANALYSE VAN DE MARKT VAN  
WATERSTOF ALS ENERGIEVECTOR VOOR  
AUTOMOBIEL- EN STATIONTOEPASSINGEN

FASE 2

REGLEMENTAIRE ANALYSE VAN DE  
WATERSTOFMARKT

**BIM**  
**GULLEDELLE 100**  
**1200 BRUSSEL**

REFERENTIE : **5RE-52-60166311-02**

**Februari 2007**

# INHOUDSTAFEL

<b>HOOFDSTUK 1 : Inleiding</b> .....	<b>4</b>
1.1 Inleiding .....	4
1.2 Context en doel van de opdracht .....	4
1.3 Methodologie .....	5
<b>HOOFDSTUK 2 : Regionale wetgeving</b> .....	<b>6</b>
2.1 Milieuvergunningenbeleid .....	6
<b>HOOFDSTUK 3 : Belgische regelgeving</b> .....	<b>9</b>
3.1 De welzijnswet en de codex over het welzijn op het werk .....	9
3.1.1 Algemene bepalingen .....	9
3.1.2 Werkplaatsen waar gevaarlijke gassen kunnen aanwezig zijn .....	9
3.1.3 Ruimten met risico's voor werknemers door een explosieve atmosfeer.....	10
3.1.4 Chemische agentia .....	13
3.1.5 Receptanten voor samengeperst, vloeibaar gemaakt of opgelost gas .....	14
3.2 Het algemeen reglement op de elektrische installaties (AREI) .....	15
3.2.1 Algemeen .....	15
3.2.2 Artikel 59: Elektrolyse-installaties .....	16
3.2.3 Afdeling D: Ontploffingsgevaar in ontplofbare gasatmosfeer: art. 105 e.v. ....	17
<b>HOOFDSTUK 4 : Europese regelgeving</b> .....	<b>19</b>
4.1 ATEX 137 Richtlijn.....	19
4.2 ATEX 95 Richtlijn.....	19
4.3 PED richtlijn .....	21
4.4 SEVESO II richtlijn .....	22
4.5 Transportrichtlijnen .....	24
4.5.1 ADR.....	24
4.5.2 RID .....	25
4.5.3 TPED .....	25
4.5.4 ADN .....	25
4.5.5 Pijpleidingen .....	25
4.6 Overige richtlijnen .....	26
<b>HOOFDSTUK 5 : Normen</b> .....	<b>27</b>
5.1 ISO Standaarden.....	27
5.2 Belgische normen.....	28
5.2.1 Waterstof - Waterstofbrosheid .....	28
5.2.2 Cryogene opslag .....	28
5.2.3 Drukopslag .....	29
5.2.4 Explosieve atmosferen .....	29
5.2.5 Tankstations .....	29
5.3 NFPA Standaarden .....	30
5.3.1 NFPA 50A – Standard for Gaseous Hydrogen Systems at Consumer Sites.....	30
5.3.2 NFPA 50B – Standard for Liquid Hydrogen Systems at Consumer Sites .....	31

<b>HOOFDSTUK 6 : Codes van goede praktijk.....</b>	<b>35</b>
6.1 Gaseous hydrogen vehicle refuelling stations .....	35
6.2 Gaseous hydrogen stations – IGC Doc 15/06/E .....	37
6.3 Hydrogen cylinders and transport vessels – IGC Doc 100/03/E.....	37
6.4 Hydrogen transportation pipelines – IGC Doc 121/04/E .....	38
6.5 Safety in storage, handling and distribution of liquid hydrogen – DOC 06/02/E .....	38
6.6 Hydrogen vehicles and infrastructure in view of european licensing.....	40
<b>HOOFDSTUK 7 : Internationale referenties.....</b>	<b>41</b>
7.1 Duitsland .....	41
7.2 IJsland .....	41
7.3 De Verenigde Staten van Amerika .....	41
7.4 Canada.....	42
7.5 Denemarken .....	42
<b>HOOFDSTUK 8 : Conclusie .....</b>	<b>43</b>

---

# HOOFDSTUK 1 : INLEIDING

---

## 1.1 INLEIDING

Voorliggende studie betreft de uitvoering van fase 2 van de studie betreffende de technische en reglementaire analyse van de markt van waterstof als energievector voor automobiel- en stationtoepassingen.

Deze studie wordt opgesteld in opdracht van:

BRUSSELS INSTITUUT VOOR MILIEUBEHEER (BIM)  
GULLEDELLE 100  
B – 1200 BRUSSEL

Fase 2 betreft de reglementaire analyse van de waterstofmarkt.

## 1.2 CONTEXT EN DOEL VAN DE OPDRACHT

In het streven om de verdere economische ontwikkeling van onze geïndustrialiseerde maatschappij te verenigen met de beperking van de verontreinigende emissies, beschouwen velen waterstof als één van de meest veelbelovende alternatieve brandstoffen. Het gaat immers om een zuivere energiebron die uit eender welk basismateriaal kan worden aangemaakt.

Als vervangbrandstof voor vervoer kan waterstof rekenen op de bijzondere belangstelling van de grote autoconstructeurs die, geruggensteund door de overheid van de industrielanden, miljarden dollars investeren in de ontwikkeling van personenauto's, autobussen en vrachtauto's die op waterstof rijden. Terzelfder tijd wordt het probleem van de productie, opslag en distributie van waterstof bestudeerd, wat tot de geleidelijke installatie van 'waterstofstations' leidt.

Het resultaat van die inspanningen krijgt nu concreet vorm in tal van Europese steden, waar diverse demonstratieprojecten en langdurige testen met waterstofvoertuigen en –stations lopen. Brussel is geen uitzondering.

Het Brussels Hoofdstedelijk Gewest heeft als doel met deze studie het gebruik van waterstof als energievector op zowel technologische als reglementair vlak in kaart te brengen en daarbij de veiligheidsvoorschriften, de industriële specificaties en de procedures voor de periodieke inspectie van de installaties en de bestaande brandstofsyste men te analyseren. Op deze manier kan het Gewest een antwoord bieden op het groeiend aantal aanvragen voor de installatie en exploitatie van (tijdelijke of definitieve) waterstofstations op zijn grondgebied.

Met deze studie wil het Brussels Hoofdstedelijk Gewest dan ook deze nieuwe technologie van nabij volgen om zo een bijdrage te leveren aan een duurzame mobiliteit.

## 1.3 METHODOLOGIE

Fase 2 van voorliggende studie betreft een reglementaire analyse, die een overzicht bevat van de Brusselse, Belgische en vervolgens Europese regelgeving met betrekking tot de productie, opslag en distributie van waterstof.

Daarnaast wordt dieper ingegaan op mogelijk interessante elementen uit buitenlandse regelgeving.

Ook wordt een analyse gemaakt van de voorhanden zijnde normen en wat ze beschrijven, zowel op Belgisch, Europees als internationaal vlak.

In ditzelfde kader zal ook beschreven worden welke ontwikkelingen zich er op dit moment nog voordoen.

De reglementaire analyse moet leiden tot een overzicht van de van toepassing zijnde wetgeving en normen, maar moet ook de hiaten vastleggen.

## HOOFDSTUK 2 : REGIONALE WETGEVING

---

### 2.1 MILIEUVERGUNNINGENBELEID

Een milieuvergunning is vereist:

- voor de exploitatie van een nieuwe inrichting;
- voor de verplaatsing van een inrichting;
- voor het opstarten of het heropstarten van een inrichting die geen gebruik maakte van de vergunning binnen de door de bevoegde overheid voorgeschreven termijn (maximaal 2 jaar met mogelijkheid tot verlenging met 1 jaar);
- voor het heropstarten van een inrichting waarvan de exploitatie gedurende twee opeenvolgende jaren werd onderbroken;
- voor het voortzetten van de exploitatie van een inrichting waarvan de vergunning vervalt;
- voor het voortzetten van de exploitatie van een inrichting waarvoor geen vergunning nodig was en die in een bepaalde klasse wordt opgenomen.

De regelgeving met betrekking tot de milieuvergunning is vervat in de ordonnantie betreffende de milieuvergunningen van 5 juni 1997 en de opeenvolgende wijzigingen en uitvoeringsbesluiten.

De te volgen procedure is afhankelijk van de klasse waaronder een inrichting valt. Er wordt onderscheid gemaakt tussen de klassen I.A, I.B, II en III, met daarnaast een apart onderscheid voor tijdelijke inrichtingen.

Daarnaast wordt een opdeling gemaakt naar inrichtingen of projecten die betrekking hebben op:

- handelingen en werken van openbaar nut
- op een in de inventaris opgenomen niet-uitgebate bedrijfsruimte (zoals bedoeld in de ordonnantie van 18 december 2003 betreffende de rehabilitatie en de herbesteding van de niet-uitgebate bedrijfsruimten)
- op een beschermd, of op de bewaarlijst ingeschreven goed of waarvoor de inschrijvings- of beschermingsprocedure geopend is
- inrichtingen of projecten die slaan op een publiekrechtelijk persoon.

De bevoegdheden binnen het Brussels Hoofdstedelijk Gewest voor het afleveren van milieuvergunningen liggen bij het Brussels Instituut voor het Milieubeheer (BIM) voor de klassen I.A en I.B evenals voor de tijdelijke of klasse II inrichtingen waar het "openbare" projecten of projecten op geklasseerde sites betreft.

Voor "privé" of tijdelijke inrichtingen van klasse II is het college van Burgemeester en Schepenen bevoegd, net als voor inrichtingen van klasse III.

Bij het aanvragen van een milieuvergunning of milieuattest moet voor de projecten van klasse I.A een effectenbeoordeling opgemaakt worden door een op gewestelijk niveau erkend deskundige. Voor projecten van de klasse I.B kan deze effectenbeoordeling door de uitbater zelf opgesteld worden.

Een effectenbeoordeling is ook nodig voor bepaalde projecten die een stedenbouwkundige vergunning of attest vereisen.

In de milieuvergunning is het mogelijk voorwaarden op te leggen die specifiek te maken hebben met de uitbating van waterstofgerelateerde inrichtingen.

De relevante ingedeelde inrichtingen die betrekking kunnen hebben op de productie, opslag en distributie van waterstof zijn in onderstaande weergegeven:

- 39 A Industriële inrichtingen voor het vergassen en vloeibaar maken van alle koolstofhoudende producten tot 500 t/dag
- 70 - Inrichtingen voor het vullen van verplaatsbare recipiënten, van welke aard ook, met samengeperst, vloeibaar gemaakt of onder een druk hoger dan 1kg/cm<sup>2</sup> opgelost gehouden gas
- 71 A Luchtcompressoren met een hoger vermogen dan 2 kW
- 71 B Industriële inrichtingen voor gasscheiding, fysische gasverwerking & Gassamenpersingsstations (met uitzondering van luchtcompressoren), gasuitzettingsstations (met uitzondering van uitzettingsposten waarvoor het gas niet verwarmd hoeft te worden)
- 72 A Gashouders, opslagplaatsen voor vaste recipiënten van samengeperst, vloeibaar gemaakt of in oplossing gehouden gassen, (met uitzondering van opslagplaatsen voor handelsbutaan en –propan en hun mengsels) met een totale inhoud in liters: van 300 tot en met 1.000 liter
- 72 B Gashouders, opslagplaatsen voor vaste recipiënten van samengeperst, vloeibaar gemaakt of in oplossing gehouden gassen, (met uitzondering van opslagplaatsen voor handelsbutaan en –propan en hun mengsels) met een totale inhoud in liters: van 1.000 tot en met 1.000.000 liter
- 73 A Vaste inrichtingen voor gasproductie (met uitzondering van cokesfabrieken) met een capaciteit tussen 1 Nm<sup>3</sup>/u en 1.000 Nm<sup>3</sup>/u
- 74 A Opslagplaatsen voor verplaatsbare recipiënten van samengeperst, vloeibaar gemaakt of in oplossing gehouden gas met een totale capaciteit in liter water: van 300 tot en met 1.000 liter
- 74 B Opslagplaatsen voor verplaatsbare recipiënten van samengeperst, vloeibaar gemaakt of in oplossing gehouden gas met een totale capaciteit in liter water: groter dan 1.000 liter
- 130 - Niet in een andere rubriek vermelde industriële inrichtingen voor de productie, omzetting of verwerking van organische of anorganische chemische producten waarbij met name gebruik wordt gemaakt van:- alkylering- aminering met ammoniak-condensatie- dehydrogenering- verestering- halogenering en fabricage van halogenen-hydrogenering- hydrolyse- oxidatie- polymerisatie- ontzweveling, synthese en omzetting van zwavelhoudende verbindingen- nitratie en synthese van stikstofhoudende verbindingen- synthese van fosforhoudende verbindingen - distillatie- extractie-solvatatie- menging
- 208 - Geïntegreerde chemische inrichtingen, met name inrichtingen voor het vervaardigen op industriële schaal van stoffen door scheikundige transformatie, waar meerdere eenheden naast elkaar worden geplaatst en functioneel aan elkaar zijn gekoppeld, en die, in het bijzonder bestemd zijn voor de vervaardiging van: organische basischemicaliën, inorganische basischemicaliën, meststoffen met een fosfor-, stikstof- of kaliumbase (enkelvoudige of samengestelde meststoffen), fytosanitaire en kiemdodende basisproducten, farmaceutische basisproducten aan de hand van een scheikundig of biologisch proces, springstoffen.
- 210 - Cokesfabrieken, inrichtingen voor het chemisch omzetten van de vaste brandstoffen die niet in rubriek 39 zijn opgenomen, meer dan 500 t/dag.
- 211 - Industriële inrichtingen voor het vergassen en vloeibaar maken van alle koolstofhoudende producten van meer dan 500 t/dag.

- 225 - Opslagplaatsen voor vaste recipiënten van samengeperst, vloeibaar gemaakt of in oplossing gehouden gassen (uitgenomen de opslagplaatsen voor handelsbutaan en propaan en hun mengsels) met een totaalinhoud, in liters, van meer dan 1.000.000 liter.
- 226 - Vaste inrichtingen voor de productie van gassen (uitgenomen de cokesfabrieken) met een capaciteit hoger dan 1.000 Nm<sup>3</sup>/h.

Daarnaast is het mogelijk dat de nodige nutsvoorzieningen nodig voor de productie, opslag en distributie eveneens ingedeeld zijn.

Aandachtspunt is de kaderordonnantie van 17 juli 1997 betreffende de strijd tegen geluidshinder in een stedelijke omgeving en de uitvoeringsbesluiten ervan van 21 november 2002. Het comprimeren en distribueren van waterstofgas zal immers de nodige compressoren vereisen om zulks te doen.

Ten slotte is het zo dat elke inrichting moet voldoen aan de vigerende regelgeving in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest.



## HOOFDSTUK 3 : BELGISCHE REGELGEVING

---

### 3.1 DE WELZIJNSWET EN DE CODEX OVER HET WELZIJN OP HET WERK

De wet van 4 augustus 1996 betreffende het welzijn van de werknemers bij de uitvoering van hun werk, ook de "welzijnswet" genoemd, is de basiswet op het vlak van de veiligheid en de gezondheid op het werk. Deze uitvoeringsbesluiten worden voor het merendeel gebundeld in de Codex over het welzijn op het werk.

De besluiten in deze codex zijn opgebouwd volgens een filosofie die vernieuwend is ten opzichte van deze waarvan uitgegaan werd in het Algemeen Reglement voor de Arbeidsbescherming (ARAB), de vroegere bundeling van voorschriften inzake arbeidsveiligheid en -gezondheid. Daar waar in de huidige welzijnsreglementering uitgegaan wordt van doelvoorschriften, bevat het ARAB voornamelijk gedetailleerde middelenvoorschriften. De welzijnswet en de codex houden dus minder uitvoerig omschreven technische voorschriften in. Er wordt gewerkt volgens een lossere structuur met voornamelijk rechtsnormen waaraan de werkgever op zijn eigen manier concrete invulling kan geven.

Het ARAB zal binnen afzienbare tijd helemaal verdwijnen doordat ook de resterende bepalingen uit het ARAB zullen worden overgeheveld naar de codex of wanneer dat niet mogelijk is, worden opgeheven.

Deze regelgeving is van toepassing op alle werknemers en werkgevers en daaraan gelijkgestelden, dus ook uitbaters en werknemers van waterstofverdeelstations, productie-installaties en opslaginstallaties.

#### 3.1.1 ALGEMENE BEPALINGEN

Elke werkplaats in België valt onder de algemene bepalingen van de welzijnswet en zijn uitvoeringsbesluiten.

Ze hebben voorts geen betrekking op de specifiek gevallen waarbij waterstof betrokken is. De meer toegepaste bepalingen worden in onderstaande toegelicht.

#### 3.1.2 WERKPLAATSEN WAAR GEVAARLIJKE GASSEN KUNNEN AANWEZIG ZIJN

Het hoofdstuk IV van titel III 'Arbeidsplaats' van hoger vermelde codex betreft de bepalingen met betrekking tot bijzondere werkplaatsen, waarvan afdeling 8 werkplaatsen bespreekt waar gevaarlijke gassen aanwezig kunnen zijn.

Dit specifiek deel van de codex kreeg nog geen invulling en dus wordt verwezen naar de delen van het ARAB, waar zulks besproken wordt.

Het gaat meer in het bijzonder over de afdelingen V (Voorzorgen tegen brandgevaar, ontploffingen en de toevallige ontsnapping van schadelijke of ontvlambare gassen) en VI (Werkzaamheden in de plaatsen waar gevaarlijke gassen kunnen voorhanden zijn) van het hoofdstuk I (Bepalingen betreffende de veiligheid van de arbeiders) van titel II (Algemene bepalingen betreffende de arbeidshygiëne alsmede de veiligheid en de gezondheid van de arbeiders) van het Algemeen Reglement voor de arbeidsbescherming, het ARAB.

Deze teksten bespreken de minimumvoorschriften voor brandveiligheid en preventie van ontploffingen (afdeling V) en ventilatie in gesloten ruimtes waar zich gevaarlijke gassen kunnen bevinden (afdeling VI). Ze kunnen aangevuld worden door meer specifieke voorschriften, ontwikkeld en op maat gesneden van het werken met waterstof.

Met betrekking tot afdeling V worden de lokalen waarop deze afdeling van toepassing is, opgedeeld in drie verschillende groepen, waarvan de eerste groep de lokalen omvat waarin brandbare samengeperste, vloeibaar gemaakte of opgeloste gassen, in een hoeveelheid die groter is dan of gelijk is aan 300 liter, dit volume zijnde het waterinhaltsvermogen van de recipiënten waarin ze zijn opgeslagen, opgestapeld of dagelijks aangewend worden.

De eerste groep omvat eveneens de lokalen waarin ontvlambare vloeistoffen met een ontvlammingspunt lager dan 21°C (hoeveelheid groter dan of gelijk aan 50 liter) of lager dan 50°C (hoeveelheid groter dan of gelijk aan 500 liter) of zeer snel ontvlambare vaste stoffen (hoeveelheid groter dan of gelijk aan 50 kg) worden opgeslagen of dagelijks aangewend. Daarnaast omvat deze groep de lokalen waar een ontplofbare atmosfeer kan ontstaan tijdens de normale werking van de installaties.

De tweede groep zijn de lokalen waarin ontvlambare vloeistoffen met een ontvlammingspunt tussen 50°C en 100°C (hoeveelheid groter dan of gelijk aan 3000 liter), brandbare stoffen die de brand snel kunnen doen uitbreiden (hoeveelheid groter dan 1000 kg), snel brandbare vaste stoffen die giftige stoffen en/of grote hoeveelheden rook produceren (hoeveelheid groter dan 1000 kg) of vaste brandbare stoffen andere dan reeds vermeld (hoeveelheid groter dan 10000 kg) worden opgestapeld of dagelijks aangewend.

De derde groep bevat de andere lokalen.

Per groep worden voorschriften gegeven. Lokalen of ruimtes waarin waterstof opgeslagen of aangewend wordt, vallen dus onder de bepalingen gegeven voor de eerste groep.

### 3.1.3 RUIMTEN MET RISICO'S VOOR WERKNEMERS DOOR EEN EXPLOSIEVE ATMOSFEER

Het hoofdstuk IV van titel III 'Arbeidsplaats' van hoger vermelde codex betreft de bepalingen met betrekking tot bijzondere werkplaatsen, waarvan afdeling 10 werkplaatsen bespreekt waar werknemers risico's lopen als gevolg van de aanwezigheid van explosieve atmosferen.

Dit specifiek deel van de codex werd ingevuld door middel van een koninklijk besluit van 26 maart 2003 betreffende het welzijn van de werknemers die door explosieve atmosferen gevaar kunnen lopen.

Dit koninklijk besluit en zijn bijlagen zijn de omzetting in Belgisch recht van de Richtlijn 1999/92/EG van het Europees Parlement en de Raad van 16 december 1999 betreffende minimumvoorschriften voor de verbetering van de gezondheidsbescherming en van de veiligheid van werknemers die door explosieve atmosferen gevaar kunnen lopen, beter bekend als de ATEX-137 richtlijn.

Deze richtlijn bepaalt dat de werkgever, ter verzekering van de veiligheid en de gezondheid van werknemers, de nodige maatregelen treft om ervoor te zorgen dat:

- wanneer explosieve atmosferen kunnen ontstaan in hoeveelheden die het welzijn van werknemers of anderen in gevaar kunnen brengen, de werkomgeving zodanig is dat er veilig kan worden gewerkt;
- in een werkomgeving waarin explosieve atmosferen kunnen ontstaan in hoeveelheden die het welzijn van werknemers in gevaar kunnen brengen, tijdens de aanwezigheid van werknemers passend toezicht gewaarborgd is, in overeenstemming met de risicobeoordeling door middel van passende technische middelen;

- personen die geen werknemer zijn, en die om het even welke reden toegang hebben tot een werkomgeving waarin explosieve atmosferen aanwezig kunnen zijn, de veiligheid van de werknemers niet in het gedrang brengen.

Bij het voldoen aan zijn verplichtingen die hieruit voortvloeien dient de werkgever ter voorkoming van en bescherming tegen explosies, met de aard van zijn bedrijf overeenstemmende technische en/of organisatorische maatregelen te treffen volgens de volgende grondbeginselen:

- het verhinderen van het ontstaan van explosieve atmosferen of, wanneer dat gezien de aard van het werk niet mogelijk is;
- het vermijden van de ontsteking van explosieve atmosferen, en
- het beperken van de schadelijke gevolgen van een explosie, teneinde het welzijn van de werknemers te verzekeren.

Bovenstaande opsomming is te lezen in aflopende volgorde van prioriteit.

Deze maatregelen worden zo nodig gecombineerd en/of aangevuld met maatregelen tegen de uitbreiding van explosies en worden regelmatig herzien, in ieder geval telkens wanneer zich belangrijke veranderingen voordoen.

Bij het voldoen aan zijn verplichtingen krachtens de bepalingen van het koninklijk besluit van 27 maart 1998 betreffende het beleid inzake het welzijn van de werknemers bij de uitvoering van hun werk, beoordeelt de werkgever de specifieke risico's die voortvloeien uit explosieve atmosferen, daarbij ten minste rekening houdend met:

- de waarschijnlijkheid van de aanwezigheid en het voortduren van explosieve atmosferen;
- de waarschijnlijkheid dat ontstekingsbronnen, elektrostatische ontladingen daaronder begrepen, aanwezig zijn, actief worden en daadwerkelijk ontsteken;
- de installaties, de gebruikte stoffen, de processen en hun mogelijke wisselwerkingen;
- de omvang van de te verwachten gevolgen.

De explosierisico's moeten in hun geheel worden beoordeeld.

Daarnaast stelt de wet dat de werkgever verantwoordelijk is voor alle zaken die onder zijn controle staan, wanneer zich op dezelfde arbeidsplaats werknemers van verschillende ondernemingen bevinden.

Op basis van de uitgevoerde risico-evaluatie deelt de werkgever de ruimten waar explosieve atmosferen aanwezig kunnen zijn in in zones (zie ook paragraaf 3.2.3).

De interne dienst voor preventie en bescherming op het werk, en indien nodig met het oog op de vereiste deskundigheid met betrekking tot de bescherming tegen explosies, de afdeling belast met de risicobeheersing van de externe dienst voor preventie en bescherming op het werk, worden overeenkomstig de bepalingen van het koninklijk besluit van 27 maart 1998 betreffende de interne dienst voor preventie en bescherming op het werk, betrokken bij de indeling van de ruimten waar explosieve atmosferen kunnen voorkomen.

In deze ruimten moeten dan de minimumvoorschriften van bijlage II van het onderhavige besluit worden toegepast (zie verder).

Aan de ingang van deze ruimten moeten waarschuwingsborden worden aangebracht die in overeenstemming zijn met bijlage III van het besluit.

Bij het uitvoeren van zijn verplichtingen stelt de werkgever een explosieveiligheidsdocument op, dat hij indien nodig actualiseert en ter beschikking houdt van de bevoegde instanties. Uit het explosieveiligheidsdocument moet met name blijken:

- dat de explosierisico's geïdentificeerd en beoordeeld werden;
- dat afdoende maatregelen genomen zullen worden om het doel van dit besluit te bereiken;

- welke ruimten overeenkomstig bijlage I in zones zijn ingedeeld;
- in welke ruimten de minimumvoorschriften van bijlage II van toepassing zijn;
- dat de arbeidsplaatsen en arbeidsmiddelen, met inbegrip van de alarminstallaties, met de vereiste aandacht voor de veiligheid worden ontworpen, bediend en onderhouden;
- dat overeenkomstig de bepalingen van het koninklijk besluit van 12 augustus 1993 betreffende het gebruik van arbeidsmiddelen, voorzorgsmaatregelen voor het veilig gebruik van de arbeidsmiddelen zijn getroffen.

Het explosieveiligheidsdocument dat betrekking heeft op arbeidsplaatsen, arbeidsmiddelen of arbeidsprocessen die op 30 juni 2003 of later voor het eerst worden gebruikt of ter beschikking van de werknemers worden gesteld, moet vóór de aanvang van de werkzaamheden worden opgesteld.

Artikel 9 van voormelde richtlijn bepaalt dat alle arbeidsmiddelen bestemd voor gebruik in ruimten waar een explosieve atmosfeer aanwezig alsook alle arbeidsplaatsen die ruimten bevatten waar een explosieve atmosfeer aanwezig kan zijn, moeten voldoen aan de voorschriften van het besluit. Gezien de aard en eigenschappen van waterstof zal elke installatie waarin waterstof aanwezig is aan bovenstaand koninklijk besluit moeten voldoen en daarom dus over een explosieveiligheidsdocument beschikken.

Daarnaast zijn voor alle ruimten waar explosieve atmosferen kunnen heersen ook onderstaande minimumvoorschriften voor de verbetering van de gezondheidsbescherming en van de veiligheid van de werknemers die door explosieve atmosferen gevaar kunnen lopen van toepassing:

- 1) Opleiding van werknemers
- 2) Schriftelijke instructies, werkvergunningen: indien het explosieveiligheidsdocument het voorschrijft:
  - moet werk in gevaarlijke ruimten worden uitgevoerd volgens de schriftelijke instructies die door de werkgever vastgesteld zijn;
  - moet een systeem van werkvergunningen worden toegepast voor gevaarlijk werk en werk dat samen met ander werk gevaren kan opleveren.
- 3) Ontsnappende en/of al dan niet bedoeld vrijkomende ontlambare gassen, dampen, nevels of brandbaar stof die explosiegevaar kunnen doen ontstaan, worden op passende wijze afgevoerd of verwijderd naar een veilige plaats of, als zulks niet uitvoerbaar is, veilig opgevangen of met behulp van een andere passende methode ongevaarlijk gemaakt.
- 4) Wanneer een explosieve atmosfeer meerdere soorten ontlambare en/of brandbare gassen, dampen, nevels of stoffen bevat, moeten de veiligheidsmaatregelen uitgaan van het grootste mogelijke risico.
- 5) Bij het vermijden van ontstekingsgevaar wordt ook rekening gehouden met elektrostatische ontladingen die van werknemers of de arbeidsomgeving als ladingsdrager of ladingsproducent uitgaan.
- 6) Installaties, apparaten, beveiligingssystemen en alle erbij horende verbindingstukken die op 30 juni 2003 of later voor het eerst worden gebruikt of ter beschikking van de werknemers worden gesteld, mogen slechts dan in bedrijf worden genomen of gehouden wanneer uit het explosieveiligheidsdocument blijkt dat aan het gebruik ervan geen explosiegevaar verbonden is. Dit geldt ook voor arbeidsmiddelen en de erbij horende verbindingstukken die geen apparaten of beveiligingssystemen zijn in de zin van ATEX 95 (zie ook paragraaf 4.2), bedoeld voor gebruik op plaatsen waar ontploffingsgevaar kan heersen, indien hun opnemings in de installatie aanleiding kan geven tot ontstekingsgevaar. Er moeten de nodige maatregelen worden getroffen om verwisseling van verbindingstukken te vermijden.
- 7) Alle nodige maatregelen moeten worden getroffen om ervoor te zorgen dat de arbeidsplaats, de arbeidsmiddelen en al de erbij horende verbindingstukken die ter beschikking van de werknemers wordt gesteld op zodanige wijze ontworpen, gebouwd, gemonteerd en geïnstalleerd zijn, en worden onderhouden en bediend dat het gevaar voor

explosies tot een minimum beperkt wordt en dat, mocht er zich toch een explosie voordoen, de uitbreiding ervan binnen die arbeidsplaats en/of arbeidsmiddelen onder controle of tot een minimum beperkt blijft. Bij die arbeidsplaatsen worden de nodige maatregelen getroffen om er voor te zorgen dat de werknemers zo weinig mogelijk fysieke risico's lopen bij een explosie.

- 8) De werknemers worden waar nodig optisch en/of akoestisch gewaarschuwd en teruggetrokken voordat de omstandigheden worden bereikt waarin zich explosies kunnen voordoen.
- 9) Indien het explosieveiligheidsdocument het voorschrijft, moeten vluchtmiddelen beschikbaar en gebruiksklaar zijn zodat de werknemers gevaarlijke gebieden bij gevaar snel en veilig kunnen verlaten.
- 10) Voor de eerste inbedrijfstelling van een arbeidsplaats waar explosieve atmosferen aanwezig kunnen zijn, moet de explosieveiligheid van de gehele installatie worden geverifieerd.
- 11) Wanneer de risicobeoordeling de noodzaak daarvan aantoont:
  - moet het mogelijk zijn te verzekeren dat, wanneer een onderbreking van de energietoevoer bijkomende gevaren teweeg kan brengen, apparaten en beveiligingssystemen onafhankelijk van de rest van de installatie in alle veiligheid blijven functioneren, in geval van onderbreking van de energietoevoer;
  - moeten automatisch gestuurde apparaten en beveiligingssystemen die van de voorziene bedrijfsomstandigheden afwijken zonder gevaar manueel kunnen worden uitgeschakeld. Dergelijke ingrepen mogen alleen door bevoegde werknemers uitgevoerd worden;
  - moet, wanneer de noodstopinrichtingen in werking worden gesteld, de opgeslagen energie zo snel en zo veilig mogelijk afgevoerd of geïsoleerd worden, zodat zij niet langer een bron van gevaar vormt.

Ook gelden criteria voor de keuze van apparaten en beveiligingssystemen. Voorzover het explosieveiligheidsdocument op basis van een risicobeoordeling geen andere eisen stelt, moeten in alle ruimten waar een explosieve atmosfeer aanwezig kan zijn, apparaten en beveiligingssystemen worden gebruikt overeenkomstig de categorieën bepaald in ATEX 95.

Met name de volgende categorieën apparatuur worden in die zones gebruikt, mits zij geschikt zijn voor de betrokken gassen, dampen, nevels en/of het betrokken stof, naargelang het geval:

- in zone 0 of zone 20, categorie 1-apparatuur;
- in zone 1 of zone 21, categorie 1- of categorie 2-apparatuur;
- in zone 2 of zone 22, categorie 1-, categorie 2- of categorie 3-apparatuur.

Voor meer verduidelijking hieromtrent wordt verwezen naar paragraaf 4.2.

### 3.1.4 CHEMISCHE AGENTIA

Het hoofdstuk I van titel V 'Chemische, kankerverwekkende, mutagene en biologische agentia' van hoger vermelde codex betreft de bescherming tegen de risico's van chemische agentia en werd ingevuld door het koninklijk besluit van 11 maart 2002 betreffende de bescherming van de gezondheid en de veiligheid van de werknemers tegen de risico's van chemische agentia op het werk.

Dit besluit heft voor een groot deel de vroegere reglementering over gevaarlijke stoffen en preparaten op die vervat was in het Algemeen Reglement voor de arbeidsbescherming.

Onder chemisch agens verstaat men elk chemisch element of elke chemische verbinding (in zuivere vorm of in een mengsel) zoals deze in natuurlijke staat voorkomt of het resultaat is van, gebruikt of

vrijgekomen is (ook in de vorm van afval) bij een beroepsactiviteit, al dan niet opzettelijk geproduceerd en al dan niet op de markt gebracht.

Onder stoffen verstaat men chemische elementen en hun verbindingen zoals ze voorkomen in natuurlijke toestand of bij het productieproces ontstaan.

Preparaten zijn mengsels of oplossingen die bestaan uit twee of meer stoffen.

De werkgevers zijn ertoe gehouden de risico's voor de veiligheid en gezondheid van de werknemers te evalueren die het gevolg zijn van de aanwezigheid op de arbeidsplaats van chemische agentia, en de nodige preventiemaatregelen te nemen.

Om een risicobeoordeling van chemisch agentia uit te voeren, moet de werkgever onder andere rekening houden met:

- hun gevaarlijke eigenschappen;
- informatie betreffende veiligheid en gezondheid die hij bij de leverancier moet inwinnen;
- het niveau, de aard en de duur van de blootstelling via het ademhalingsstelsel, de huid en andere blootstellingswijzen;
- de omstandigheden tijdens werkzaamheden waarbij chemische agentia betrokken zijn;
- de eventuele grenswaarden voor beroepsmatige blootstelling of biologische grenswaarden.

De werkgever moet in het bezit zijn van een evaluatie van het risico en vermeldt hierin bovendien welke preventiemaatregelen zijn getroffen. De risico-evaluatie moet naar behoren gedocumenteerd zijn of anders geeft hij een schriftelijke verantwoording waarom dit niet zo zijn, waarin hij aantoonst dat de aard en de omvang van de met chemische agentia verbonden risico's dit overbodig maken.

De risico-evaluatie wordt bijgewerkt, met name indien veranderingen hebben plaatsgevonden waardoor zij verouderd kan zijn, of wanneer uit de resultaten van het gezondheidstoezicht blijkt dat bijwerking nodig is.

Bepaalde bijzondere werkzaamheden binnen de onderneming of inrichting, zoals onderhoud, waarvan kan worden voorzien dat er een potentieel voor significante blootstelling bestaat of die om andere redenen schadelijke gevolgen voor de veiligheid en gezondheid kunnen hebben, zelfs nadat alle technische maatregelen zijn genomen, worden opgenomen in de risico-evaluatie.

De lijst van grenswaarden voor beroepsmatige blootstelling aan chemische agentia werd opgenomen in bijlage I van het koninklijk besluit.

Waterstof wordt ingedeeld als een agens dat gas of damp vrijgeeft dat of die op zich geen fysiologische werking heeft, maar het zuurstofgehalte in de lucht verlaagt. Wanneer het zuurstofgehalte daalt onder de 17-18 % (vol/vol), veroorzaakt het zuurstoftekort verstikking, die zich manifesteert zonder dat er een waarschuwing aan voorafgaat.

Gezien de aard en eigenschappen van waterstof zal de risico-evaluatie beperkt zijn en ondergeschikt aan de risico-evaluatie in het kader van de ATEX-regelgeving.

### 3.1.5 RECIPIËNTEN VOOR SAMENGEPERST, VLOEIBAAR GEMAAKT OF OPGELOST GAS

Paragraaf 5 van afdeling III (Acetyleen - Centrifuges - Motors met inwendige verbranding – arbeidsprocédés pneumatische verstuiving - Recipiënten voor samengeperst, vloeibaar gemaakt of opgelost gas) van hoofdstuk I (Toestellen, installaties, arbeidsprocédés, gemeen aan verscheidene nijverheidstakken) van titel III (Bijzondere bepalingen toepasselijk in zekere nijverheidstakken) van het Algemeen Reglement voor de arbeidsbescherming bevat bepalingen voor wat betreft recipiënten voor samengeperst, vloeibaar gemaakt of opgelost gas met een waterinhoud groter dan 1 liter en kleiner dan 300 liter.

Daarnaast beschrijft deze paragraaf de te nemen voorzorgen voor het opslaan en het hanteren van met gas gevulde recipiënten.

Deze tekst is voor het grootste deel opgeheven en vervangen door andere regelgeving. Er zal dan ook niet verder op worden ingegaan.

Paragraaf 6 van diezelfde afdeling bevat bepalingen met betrekking tot het laden en lossen van tankwagens, tankwagons en laadketels voor wat betreft vloeibaar gemaakte gassen.

De belangrijkste feiten hieruit zijn dat de elke laad- en/of losoperatie moet gebeuren onder het gezag en onder het toezicht van de werkgever van de onderneming waarin het laden of lossen plaatsvindt, of van een aangestelde die hij daartoe heeft aangeduid.

Daarnaast moet hij aangepaste maatregelen treffen om de risico's van dergelijke operaties te ondervangen.

Voorts stelt hij een geschreven instructie ter beschikking die de laad- en/of losoperatie regelt beschrijft, alsook de te nemen maatregelen om de risico's te beperken.

Indien het laden of lossen van vloeibaar gemaakte gassen door middel van slangen gebeurt, dienen deze slangen aan elk uiteinde beschermd door veiligheidsinrichtingen die het debiet volledig of gedeeltelijk stoppen in geval van breuk van de slang. Deze veiligheidsinrichtingen treden automatisch in werking of zijn van op afstand bedienbaar. Zij dienen geplaatst ofwel op de slang, ofwel onmiddellijk stroomopwaarts en stroomafwaarts van de slang, ofwel op de leidingen in vloeistoffase en in gasfase van de opslaghouders en de tanks.

## **3.2 HET ALGEMEEN REGLEMENT OP DE ELEKTRISCHE INSTALLATIES (AREI)**

### **3.2.1 ALGEMEEN**

Aangezien de bepalingen uit het Algemeen Reglement voor de Arbeidsbescherming die betrekking hadden op elektrische apparaten en installaties verouderd bleken, werd het Algemeen Reglement op de Elektrische Installaties opgesteld.

Het AREI werd bindend verklaard door twee koninklijke besluiten:

- koninklijk besluit van 10 maart 1981 waarbij het AREI bindend wordt verklaard voor de huishoudelijke installaties en sommige lijnen van transport en verdeling van elektrische energie (BS van 29 april 1981);
- koninklijk besluit van 2 september 1981 waarbij het AREI bindend wordt verklaard op de elektrische installaties in inrichtingen gerangschikt als gevaarlijk, ongezond of hinderlijk en in inrichtingen beoogd bij artikel 28 van het ARAB (BS van 30 september 1981).

De bepalinge van het AREI hebben als toepassingsgebieden:

- de elektrische toepassingen voor huishoudelijke lokalen;
- de installaties voor de transmissie en distributie van elektrische energie, gerealiseerd na 1 januari 1983, behalve voor deze welke zich binnen de omheining bevinden hetzij van een als gevaarlijk, ongezond of hinderlijk geklasseerde inrichting<sup>1</sup>, hetzij van een bij artikel 28 van het ARAB bedoelde inrichting;
- de elektrische installaties in inrichtingen gerangschikt als hetzij gevaarlijk, ongezond of hinderlijk, hetzij van een bij artikel 28 van het ARAB bedoelde inrichting.

Het is daarbij belangrijk te beseffen dat waterstof een brandbaar en explosiegevaarlijk product is met daarenboven een lage ontstekingsenergie. Het moet daarom zowel onder normale

---

<sup>1</sup> Een als gevaarlijk, ongezond of hinderlijk geklasseerde inrichting zoals genoemd in artikel 1, Hoofdstuk II van het Algemeen Reglement voor de arbeidsbescherming (ARAB)

omstandigheden als bij incidentele of andere vrijzetting beschermd worden tegen invloeden van buitenaf.

Het AREI bespreekt de invloeden afkomstig van elektrische installaties. Aarding, dus het voorkomen van elektrostatische ontladingen, bescherming tegen overstroom (door overbelasting, kortsluiting...) en bescherming tegen thermische invloeden van elektrische installaties als gevolg van hun werking zijn daarbij de belangrijkste.

Beschermingsmaatregelen tegen overspanning, overstroom, aarding en dergelijke meer worden beschouwd als algemeen te nemen maatregelen, die van toepassing zijn op alle gebieden zoals hierboven vermeld, dus ook elektrische installaties die te maken hebben met de productie, opslag en distributie van waterstof. Ze worden verder niet toegelicht.

Voor het ontplofbare waterstof, waaraan volgens artikel 101 de code BE3 kan worden toegekend, worden de specifieke maatregelen wel toegelicht.

Daarnaast bevat het AREI een artikel dat specifiek van toepassing is op de bescherming tegen elektrische schokken bij elektrolyse-installaties. Ook dit wordt in onderstaande verder toegelicht.

### 3.2.2 ARTIKEL 59: ELEKTROLYSE-INSTALLATIES

Onder het hoofdstuk II (Beschermingsmaatregelen), Afdeling 1 (Bescherming tegen elektrische schokken), deel B (Bescherming tegen elektrische schokken bij rechtstreekse aanraking) zijn onder het punt 5 (Bijzondere voorschriften in speciale gevallen) bepalingen opgenomen in artikel 59 voor elektrolyse-installaties, die, zoals reeds in fase 1 beschreven, klassiek gebruik maken van elektriciteit.

Het artikel stelt het volgende:

“Bij elektrolyse-installaties mogen in 't bijzonder de actieve delen van baden zoals elektroden, elektrolyten, klemmen en verbindingen blank blijven mits het naleven van de volgende voorwaarden:

1. Gezamenlijk inhoudsvermogen van de baden minder dan of gelijk aan 50 l:
  - de stroomgelijkrichters moeten gevoed worden via transformatoren met gescheiden wikkelingen of ia een scheidingsmiddel dat een gelijkwaardige veiligheid biedt;
  - de leidingen van de voedingsinstallaties in gelijkstroom moeten voorzien zijn van een volledige bescherming van de actieve delen (*volgens art. 34 – bescherming door middel van omhulsels of volgens art. 35 – bescherming door middel van isolatie*)
  - de voedingsspanning moet kleiner dan of gelijk zijn aan 75 volt gelijkspanning.
2. Gezamenlijk inhoudsvermogen van de baden groter dan 50 l:
  - a. Algemene maatregelen
    - a.1. de stroomgelijkrichters moeten gevoerd worden via transformatoren met gescheiden wikkelingen of via een scheidingsmiddel dat een gelijkwaardige veiligheid biedt;
    - a.2. de verkeersvloeren omheen de elektrolysebaden moeten zodanig uitgevoerd zijn dat het stagneren van elektrolyten vermeden wordt;
    - a.3. bij de toegangen moeten zichtbare en leesbare aanduidingen aangebracht worden, inzonderheid:
      - een bord met het waarschuwingsteken voor gevaar, bepaald in artikel 261;
      - een bord met toegangsverbod voor niet gemachtigde personen.
    - a.4. de werknemers moeten uitgerust zijn met aangepaste individuele beschermingsmiddelen tegen de gevaren van elektrische schokken;



- a.5. de werkzaamheden aan elektrolyse-installaties mogen enkel worden toevertrouwd aan personen die kennis hebben van de aan deze installaties verbonden gevaren.
- b. Aanvullende maatregelen
  - b.1. spanning groter dan 36 volt gelijkspanning met rimpel of 60 volt gelijkspanning zonder rimpel.

De actieve delen van de voedingsleidingen gaande tot het geheel van de baden waartussen een potentiaalverschil van meer dan 36 volt gelijkspanning met rimpel of van meer dan 60 volt gelijkspanning zonder rimpel bestaat, moeten, voor zover er geen technische bezwaren tegen zijn, voorzien zijn van een gedeeltelijke bescherming tegen de rechtstreekse aanraking:

    - Hetzij door verwijdering (art. 36);
    - Hetzij door middel van hindernissen (art. 37).
  - b.2. Spanning groter dan 120 volt.

In de doorgangen moeten bovendien de actieve delen van baden en/of voedingsleidingen, waartussen een potentiaalverschil van meer dan 120 volt gelijkspanning bestaat, zondanig van elkaar verwijderd zijn dat personen ze niet gelijktijdig kunnen aanraken. Deze voorwaarde is beschouwd als zijnde verwezenlijkt, als hun onderlinge afstand ten minste 2,5 meter bedraagt.

Indien deze bescherming door verwijdering niet uitvoerbaar is, moeten maatregelen met betrekking tot gedeeltelijke bescherming door middel van hindernissen toegepast worden.

### 3.2.3 AFDELING D: ONTPLOFFINGSGEVAAR IN ONTPLOFBARE GASATMOSFEER: ART. 105 E.V.

Zoals reeds eerder gesteld wordt in artikel 101 bepaald welke de uitwendige invloedsfactoren in acht genomen moeten worden bij het kiezen van elektrisch materieel. De aard van de behandelde of opgeslagen goederen is een dergelijke uitwendige invloedsfactor. Hierbij kan de behandeling en/of de opslag waterstof ingedeeld in de categorie BE3 – Ontploffingsgevaar. Voorwaarden om tot deze categorie gerekend te worden zijn de opslag of behandeling van ontplofbare stoffen of vloeistoffen met een vlampunt, kleiner dan of gelijk aan 55°C evenals de aanwezigheid van stof dat ontplofbaar is.

Op basis daarvan worden specifieke maatregelen opgesteld door het AREI, naast de algemene maatregelen. Ook de specifieke maatregelen blijven vrij algemeen.

Punt D van afdeling 2 (Bescherming tegen thermische invloeden) van hoofdstuk II van het AREI behandelt specifiek die plaatsen waar ontploffingsgevaar heerst als gevolg van ontplofbare atmosferen, met andere woorden plaatsen die vallen onder de categorie BE3.

Artikel 105 van dit punt stelt expliciet dat elke ruimte waar een dergelijk ontploffingsgevaar heerst ingedeeld moet worden in zones, volgens de regels van goed vakmanschap. De zones zijn als volgt ingedeeld:

- **Zone 0:** ruimte waar de atmosfeer bestendig of gedurende lange periodes ontplofbaar is of waar hetzij, gedurende lange perioden, hetzij gedurende korte maar veelvuldig voorkomende perioden een ontplofbare atmosfeer verwacht wordt;
- **Zone 1:** ruimte waar zich tijdens een normale werking van de installaties periodiek of toevallig een ontplofbare atmosfeer kan vormen;
- **Zone 2:** ruimte waar het bestaan van een ontplofbare atmosfeer weinig waarschijnlijk is bij normale werking en waar deze slechts korte tijd zou blijven bestaan in geval ze zich toch zou vormen.

Deze zones moeten worden vastgelegd op plan op basis van door de uitbater verstrekte gegevens. De plannen moeten worden goedgekeurd en geparafeerd door de uitbater, door een

vertegenwoordiger van een daartoe erkend organisme en door de met het toezicht belaste ambtenaar.

Artikel 106 beschrijft vervolgens welke elektrische leidingen, machines en/of toestellen in deze zone geïnstalleerd mogen worden. Ze moeten worden gekozen in functie van het type van elke gevaarlijke zone en van de kenmerken van het ontplofbaar mengsel van gas, damp of nevel en van lucht.

Aangaande het elektrisch materiaal moet de uitbater aan het erkende organisme de met het toezicht belaste ambtenaren de nodige conformiteits- en/of controlecertificaten kunnen voorleggen.

Voor intrinsiek veilige installaties moeten ofwel systeemcertificaten ofwel een systeembeschrijving, opgesteld door de systeemontwerpers, kunnen worden voorgelegd.

In artikel 107 worden bepalingen vastgelegd over de installatie van elektrisch materieel in de gedefinieerde zones.

In artikel 108 worden bepalingen opgesomd met betrekking tot de bescherming van het in de gevaarlijke zones geïnstalleerd elektrisch materieel tegen temperatuursverhogingen en vonken te wijten aan:

- Hetzij lek- of foutstromen;
- Hetzij zwerfstromen;
- Hetzij galvanisch contact met actieve delen;
- Hetzij elektrostatische ontladingen;
- Hetzij ontladingen veroorzaakt door cathodische beschermingsinstallaties..

Bovenstaande bepalingen maken dat installaties voor de behandeling en opslag van waterstof over een zogenaamd zoneringsdossier moeten beschikken. Dit zoneringsdossier kan deel uitmaken van het explosieveiligheidsdocument of zal er minstens in besproken moeten worden.

---

## HOOFDSTUK 4 : EUROPESE REGELGEVING

---

### 4.1 ATEX 137 RICHTLIJN

Met de ATEX 137 richtlijn wordt de richtlijn 1999/92/EG van het Europees Parlement en de Raad van 16 december 1999 betreffende minimumvoorschriften voor de verbetering van de gezondheidsbescherming en van de veiligheid van werknemers die door explosieve atmosferen gevaar kunnen lopen bedoeld.

Deze richtlijn werd omgezet in Belgisch recht door het koninklijk besluit van 26 maart 2003 betreffende het welzijn van de werknemers die door explosieve atmosferen gevaar kunnen lopen.

Het koninklijk besluit maakt deel uit van de codex over het welzijn op het werk.

Voor nadere toelichting hiervan wordt verwezen naar paragraaf 3.1.3.

### 4.2 ATEX 95 RICHTLIJN

Met de ATEX 95 richtlijn wordt de richtlijn 94/9/EG van de Raad van 23 maart 1994 inzake de onderlinge aanpassing van de wetgevingen van de lidstaten betreffende apparaten en beveiligingssystemen bedoeld voor gebruik op plaatsen waar ontploffingsgevaar kan heersen.

Deze richtlijn werd omgezet naar Belgisch recht door het koninklijk besluit van 22 juni 1999 tot vaststelling van de veiligheidswaarborgen welke apparaten en beveiligingssystemen, bedoeld voor gebruik op plaatsen waar ontploffingsgevaar kan heersen, moeten bieden.

Richtlijn 94/9/EG houdt verplichtingen in voor de persoon die producten in de handel brengt en/of in bedrijf stelt, ongeacht of dit de fabrikant is, diens gemachtigde, de importeur of enige andere verantwoordelijke persoon. De richtlijn regelt niet het gebruik van apparaten op plaatsen waar ontploffingsgevaar kan heersen. Dit wordt geregeld via de codex, zoals eerder besproken.

Kort gezegd stelt deze richtlijn dat producten, meer bepaald apparaten en beveiligingssystemen die bedoeld zijn voor gebruik op plaatsen waar ontploffingsgevaar kan heersen, alleen mogen worden gebruikt indien zij in overeenstemming zijn met de relevante richtlijnen (artikel 95-richtlijnen) die op het moment van in de handel brengen of in bedrijf stellen op het product van toepassing zijn.

De apparaten die bedoeld zijn voor gebruik op plaatsen, andere dan ondergrondse ruimtes, waar tengevolge van de explosieve omgeving gevaar kan heersen, worden onderverdeeld in verschillende categorieën:

- **Categorie 1** omvat apparaten die zo zijn ontworpen dat zij overeenkomstig de door de fabrikant vastgestelde bedrijfsparameters kunnen werken en een zeer hoog beschermingsniveau bieden.

De apparaten van deze categorie zijn bestemd voor een omgeving die door de aanwezigheid van gas, damp, nevel of stof/luchtmengsels voortdurend, of langdurig, of dikwijls explosief is (~ zone 0)

De apparaten van deze categorie moeten het vereiste veiligheidsniveau waarborgen, zelfs in geval van een uitzonderlijke storing van het apparaat, en worden gekenmerkt door zodanige beveiligingsmiddelen dat:

- hetzij, indien één van de beveiligingsmiddelen uitvalt, ten minste een tweede onafhankelijk middel het vereiste veiligheidsniveau waarborgt,
- hetzij, indien zich twee onderling onafhankelijke storingen voordoen, het vereiste veiligheidsniveau is gewaarborgd.

- **Categorie 2** omvat apparaten die zo zijn ontworpen dat zij overeenkomstig de door de fabrikant vastgestelde bedrijfsparameters kunnen werken en een hoog beschermingsniveau bieden.

De apparaten van deze categorie zijn bestemd voor een omgeving die door de aanwezigheid van gas, damp, nevel of stof/luchtmengsels waarschijnlijk explosief kan worden (~ zone 1).

De beveiligingsmiddelen bij apparaten van deze categorie moeten het vereiste veiligheidsniveau waarborgen, zelfs bij frequente storingen of bij gebreken in de werking van het apparaat waarmee gewoonlijk rekening moet worden gehouden.

- **Categorie 3** omvat apparaten die zo zijn ontworpen dat zij overeenkomstig de door de fabrikant vastgestelde bedrijfsparameters kunnen werken en een normaal beschermingsniveau bieden.

De apparaten van deze categorie zijn bestemd voor een omgeving waarin het weinig waarschijnlijk is dat er door de aanwezigheid van gas, damp, nevel, of stof/lucht-mengsels ontploffingsgevaar heerst en waarin een dergelijk gevaar zich naar alle waarschijnlijkheid slechts zelden voordoet en van korte duur is (~ zone 2).

De apparaten van deze categorie waarborgen bij normaal bedrijf het vereiste veiligheidsniveau.

De apparaten, beveiligingssysteem en voorzieningen waarop dit besluit van toepassing is, moeten voldoen aan de in bijlage II van de richtlijn opgenomen essentiële veiligheids- en gezondheidseisen, rekening houdende met hun bedoelde gebruik. Hierbij dient rekening gehouden te worden met de Europese geharmoniseerde normen en de nationale normen. Controle hierop is mogelijk en wordt uitgevoerd door een aangemelde instantie.

Voor de beoordeling van de overeenstemming van de apparaten met de geharmoniseerde normen en nationale normen gelden specifieke procedures, afhankelijk van de categorie waartoe de apparaten behoren en dus ook afhankelijk van het nodige veiligheidsniveau

Materieel dient volgens richtlijn 94/9/EG gemarkeerd te zijn met o.a. het CE merkteken. Met deze CE-markering verklaart de fabrikant dat het product is vervaardigd in overeenstemming met alle Europese richtlijnen. Hierna volgt voor categorie 1 en 2 het nummer van de aangemelde instantie (zie eerder), welke de productieplaats heeft gecertificeerd. Achter de Ex-aanduiding (in een zeshoek) volgt een I voor apparaten geschikt voor ondergrondse mijnbouw installaties of een II voor apparaten geschikt voor bovengronds bedrijf. Voor groep II volgt er een cijfer die één van de drie categorieën weergeeft voor plaatsing in één van de drie zones met gevaar op aanwezig gas of stof (G = gas / D = dust). Hierna volgt de CENELEC<sup>2</sup>-codering waarvoor het materieel is geconstrueerd. Eex betekent dat het in overeenstemming met de Europese standaarden is ontworpen. Ten slotte volgt de code die de beschermingswijze tegen ontsteking weergeeft, aan welk type gas(sen) het toestel kan worden blootgesteld en wat de maximale ontstekingstemperatuur is

De gasgroep zegt iets over de vluchtigheid van het gas, indien het zou worden ontstoken. Waterstof behoort tot de gasgroep IIC, wat duidt op de grootste vluchtigheid. Andere gasgroepen zijn IIA en

---

2 CENELEC: Comité Européen de Normalisation Electrotechnique, het Europese comité voor elektrotechnische standaarden

IIB, die elk minder vluchtige gassen inhouden. Elektrische apparaten geschikt voor deze gasgroepen moeten dus over een grotere gasdichtheid beschikken dan voor andere gasgroepen.

De temperatuursklasse verwijst naar de zelfontstekingtemperatuur van het gas. Het vertelt ook de maximale temperatuur die onderdelen van een apparaat geschikt voor het werken met dit bepaalde gas mag bereiken. De temperatuursklassen lopen van T1: > 450°C tot T6: > 85°C ... < 100°C. Waterstof behoort tot de temperatuursklasse T1.

Niet-elektrisch materieel dat een ontstekingsbron vormt heeft een aantal beschermingswijzen tegen ontsteking overeenkomstig EN 13463 deel 1 t/m 8. Ook deze beschermingswijzen worden aangeduid in de markering.

De fabrikant is verplicht om zijn naam, adres, een serienummer en fabricagejaar op een apparaat te vermelden en technische documentatie te kunnen overleggen waarin alle zaken met betrekking tot explosieveiligheid zijn vastgelegd. Tevens dient bij de inbedrijfstelling van een apparaat een gebruiksaanwijzing in de landstaal aanwezig te zijn.

De richtlijn is in die zin van toepassing op het gebied van productie, opslag en distributie van waterstof doordat erin wordt voorgeschreven waaraan de apparaten die gebruikt moeten worden in de verschillende gezoneerde gebieden (zie paragrafen 3.1.3 en 3.2.3) moeten voldoen. De apparaten die gebruikt worden of bedoeld zijn om gebruikt te worden in gezoneerde gebieden waar waterstof instaat voor het mogelijke ontploffingsgevaar, moeten aangepast zijn voor de gasgroep IIC en temperatuursklasse T1.

## 4.3 PED RICHTLIJN

De richtlijn Drukapparatuur, ook bekend als de PED richtlijn (Pressure Equipment Directive) betreft de richtlijn 97/23/EG van 29 mei 1997 van het Europees Parlement en van de Raad van de Europese Unie inzake de onderlinge aanpassing van de wetgevingen der lidstaten betreffende drukapparatuur.

Deze regelgeving werd verder uitgewerkt in het koninklijk besluit van 13 juni 1999 tot uitvoering van de richtlijn van het Europees Parlement en van de Raad van de Europese Unie van 29 mei 1997 inzake de onderlinge aanpassing van de wetgevingen der lidstaten betreffende drukapparatuur.

Dit besluit is van toepassing op het ontwerp, de fabricage en de overeenstemmingsbeoordeling van drukapparatuur en samenstellen waarvan de maximaal toelaatbare druk (PS) meer dan 0,5 bar bedraagt die in de handel worden gebracht en in gebruik genomen na de inwerkingtreding van dit besluit.

De filosofie achter deze richtlijn verschilt niet erg van de filosofie achter de ATEX 95 richtlijn (zie eerder).

Onder drukapparatuur wordt onder meer verstaan drukvaten, installatieleidingen, veiligheidsappendages en onder druk staande appendages. Voorzover van toepassing omvat de drukapparatuur ook de elementen die bevestigd zijn aan onder druk staande delen, zoals flenzen, tubulures, koppelingen, hijsogen, enz.

Omwille van de complexiteit van deze apparaten en de eraan verbonden risico's en gevaren is het nodig om aan een aantal essentiële veiligheidsvereisten te voldoen. Deze veiligheidseisen hebben onder andere betrekking op:

- maatregelen om de gevaren of risico's verbonden aan het voorzienbaar gebruik zoveel mogelijk te beperken of te elimineren;

- juist ontwerp van de apparatuur om te waarborgen dat deze tijdens haar gehele levensduur veilig is;
- veiligheidsvoorschriften voor tijdens het fabricageproces;
- materialen die geschikt zijn voor gebruik gedurende de voorziene levensduur, tenzij in vervanging is voorzien;
- enz.

Alvorens drukapparaten in de handel te brengen moet de fabrikant van drukapparatuur elk drukapparaat aan een overeenstemmingsbeoordelingsprocedure onderwerpen. Drukapparaten worden naar keuze van de fabrikant onderworpen aan een van de overeenstemmingsbeoordelingsprocedures die gelden voor de categorie waarin zij zijn ingedeeld. De fabrikant mag, voor zover dat mogelijk is, ook een procedure volgen die bestemd is voor een hogere categorie.

Om in de handel te worden gebracht of in bedrijf te worden gesteld moet drukapparatuur voldoen aan de essentiële veiligheidseisen (bijlage I van de richtlijn), de CE-markering dragen die aangeeft dat zij een overeenstemmingsbeoordeling hebben ondergaan en zijn voorzien van de EG-verklaring van overeenstemming. Bovendien moeten de gebruiksaanwijzing en de informatie, voor zover zulks voor een veilig en correct gebruik van de drukapparatuur en samenstellen door de Belgische eindgebruiker noodzakelijk is, verstrekt worden in de officiële landstalen.

De CE-markering wordt zichtbaar, goed leesbaar en onuitwisbaar aangebracht op elk drukapparaat of op elk samenstel wanneer deze voltooid zijn of zich in een staat bevinden die het mogelijk maakt de eindcontrole te verrichten. Het is niet noodzakelijk de CE-markering aan te brengen op elk van de afzonderlijke drukapparaten waaruit een samenstel bestaat. De afzonderlijke drukapparaten die reeds een CE-markering hebben wanneer zij in het samenstel worden opgenomen, behouden de markering.

Daarnaast legt de richtlijn verplichtingen op omtrent periodieke keuringen door daarvoor erkende organismen.

Waterstof valt volgens deze richtlijn onder de stoffen van groep I. Apparatuur en materieel voor de opslag van waterstof onder druk zal dus aan deze richtlijn moeten voldoen.

#### 4.4 SEVESO II RICHTLIJN

Met de Seveso II-richtlijn wordt de richtlijn 96/82/EG van de Raad van 09/12/1996 betreffende de beheersing van de gevaren van zware ongevallen waarbij gevaarlijke stoffen betrokken zijn, verstaan, welke de Seveso I-richtlijn vervangen heeft.

De Seveso II-richtlijn handelt over de preventie van zware ongevallen waarbij gevaarlijke stoffen betrokken zijn, en de beperking van de gevolgen van dergelijke ongevallen voor de mens en het leefmilieu, teneinde op een coherente en doeltreffende wijze hoge niveaus van bescherming te waarborgen binnen de gehele Europese Unie.

De Seveso II-richtlijn viseert twee groepen van bedrijven die aan verschillende verplichtingen moeten voldoen.

De zogenaamde lage drempel inrichtingen moeten alle nodige preventieve en beschermende maatregelen te treffen om zware ongevallen te voorkomen en de gevolgen ervan voor mens en milieu te beperken. Ze zijn kennisgevingsplichtig, en moeten een document opstellen dat hun preventiebeleid beschrijft.

De zogenaamde hoge drempel inrichtingen moeten een veiligheidsrapport en een intern noodplan opstellen. Ze moeten eveneens informatie verstrekken over de veiligheidsmaatregelen. Voor deze inrichtingen gelden ook de algemene voorkomings- en kennisgevingsverplichtingen.

De Europese Seveso II richtlijn beslaat een aantal domeinen waarvoor in België telkens een andere federale of gewestelijke overheidsdienst bevoegd is. De bijzondere wet van 16 juli 1993, een aanvulling van de bijzondere wet van 8 augustus 1980, verplicht de federale staat en de gewesten om hiervoor een samenwerkingsakkoord af te sluiten.

Om hieraan een invulling te geven in overeenstemming met de in België geldende bevoegdheidsverdeling werd het Samenwerkingsakkoord van 21/06/1999 afgesloten tussen de Federale Staat, het Vlaamse Gewest, het Waalse Gewest en het Brussels Hoofdstedelijk Gewest betreffende de beheersing van de gevaren van zware ongevallen waarbij gevaarlijke stoffen betrokken zijn.

Per ordonnantie houdende instemming met het Samenwerkingsakkoord tussen de Federale Staat, het Vlaams, het Waals en het Brussels Hoofdstedelijk Gewest betreffende de beheersing van de gevaren ongevallen waarbij gevaarlijke stoffen zijn betrokken van 20 juli 2000 keurde het Brussels Hoofdstedelijk Gewest het samenwerkingsakkoord goed.

Het Samenwerkingsakkoord wordt bij wet van 22 mei 2001 door alle betrokken partijen aangenomen.

De Seveso II-richtlijn is als gevolg van recente ongevallen en van nieuwe inzichten aangepast middels de Richtlijn 2003/105/EG van het Europees Parlement en de Raad van 16 december 2003 tot wijziging van Richtlijn 96/82/EG van de Raad betreffende de beheersing van de gevaren van zware ongevallen waarbij gevaarlijke stoffen zijn betrokken.

Het toepassingsgebied van de Seveso II-richtlijn werd vergroot. Voor het overige zijn in de Seveso II-richtlijn voornamelijk de drempelwaarden aangepast voor de gevaarlijke stoffen en worden bepaalde categorieën gevaarlijke stoffen uitgebreid.

De omzetting naar Belgisch recht van de amendering van de Seveso II-richtlijn middels een aanpassing van het samenwerkingsakkoord is nog niet uitgevoerd.

Zolang dit nog niet is gebeurd, is de amendering Seveso II-richtlijn nog niet van kracht in België.

Conform de richtlijn legt het Samenwerkingsakkoord (SWA) aan Seveso-bedrijven een aantal verplichtingen op met betrekking tot de beheersing van de gevaren van zware ongevallen waarbij gevaarlijke stoffen betrokken zijn.

De verplichtingen van een lagedrempelbedrijf zijn de volgende:

- Een kennisgeving (artikel 8 van het SWA);
- Een preventiebeleid voor zware ongevallen (artikel 9 van het SWA) en de uitvoering ervan.

De verplichtingen van een hogedrempelbedrijf zijn de volgende:

- Een kennisgeving (artikel 8 van het SWA);
- Een preventiebeleid en een veiligheidsbeheersysteem ter uitvoering van dit beleid (artikel 10 van het SWA);
- Een veiligheidsrapport (artikel 12 van het SWA).

Voor waterstof, een met naam genoemde stof uit bijlage I van het samenwerkingsakkoord geldt als lage drempelwaarde 5 ton en als hoge drempelwaarde 50 ton.

Inrichtingen waar waterstof aanwezig is in hoeveelheden die gelijk zijn aan of groter zijn dan één van de hierboven vermelde drempelwaarden, vallen onder de toepassingen van het samenwerkingsakkoord en dienen te voldoen aan de hierin opgenomen verplichtingen voor hoge- en lagedrempelbedrijven.

## 4.5 TRANSPORTRICHTLIJNEN

Voor het transport van gevaarlijke stoffen bestaat voor elk type transport een conventie of richtlijn. In onderstaande worden ze telkens toegelicht.

Transport van waterstof door de lucht en via nationale of internationale zeewateren wordt niet als relevant weerhouden.

### 4.5.1 ADR

ADR is de afkorting van de Franse titel van het Europees verdrag betreffende het internationaal vervoer van gevaarlijke goederen over de weg: "**A**ccord européen relatif au transport international des marchandises **D**angereuses par **R**oute".

Dit verdrag is gesloten in de Economische Commissie voor Europa van de Verenigde Naties te Genève (Zwitserland) op 30 september 1957. Het trad in werking op 29 januari 1968.

De voorschriften voor het vervoer van gevaarlijke goederen, die in de bijlagen van het verdrag vervat zijn, worden door een commissie van deskundigen regelmatig aangepast aan de stand van de techniek en de wetenschappelijke kennis. Er zijn daarom opeenvolgende versies van "ADR", zoals het ADR 2001, ADR 2003, ADR 2005, enzovoorts.

De voorschriften in het ADR zijn gebaseerd op de "Recommendations on the Transport of Dangerous Goods", uitgegeven door de Verenigde Naties. Ze worden tevens zoveel mogelijk afgestemd op de voorschriften voor het transport per spoor en op de binnenwateren (zie verder).

De Europese Unie heeft bij Richtlijn 94/55/EG van 21 november 1994 het ADR in de Europese Unie ingevoerd. In België is deze richtlijn omgezet door het Koninklijk besluit betreffende het vervoer van gevaarlijke goederen over de weg, met uitzondering van ontplofbare en radioactieve stoffen van 9 maart 2003.

Gecomprimeerd waterstof wordt als volgt ingedeeld:

- UN nummer 1049
- ADR/RID Classificatiecode 1F (Gecomprimeerd (1) brandbaar (F) gas)
- Etikettering ADR Symbool 2.1: brandgevaarlijk gas

Waterstof opgeslagen in een metaalhydride wordt als volgt ingedeeld:

- UN nummer 3468
- ADR/RID Classificatiecode 1F (Gecomprimeerd (1) brandbaar (F) gas)
- Etikettering ADR Symbool 2.1: brandgevaarlijk gas

Vloeibaar, cryogeen waterstof wordt als volgt ingedeeld:

- UN nummer 1966
- ADR/RID Classificatiecode 3F (Vloeibaar door koeling (3) brandbaar (F) gas)
- Etikettering ADR Symbool 2.1: brandgevaarlijk gas

Transport van waterstof over de weg is dus onderhevig aan de bepalingen van ADR. Aandachtspunt is dat, in het geval van stalen tanks, extra controles nodig zijn met betrekking tot waterstofbrosheid.



#### 4.5.2 RID

RID staat voor **R**egulations concerning the **I**nternational Carriage of **D**angerous Goods by Rail.

In de Europese Unie zijn de regels voor het vervoer van gevaarlijke stoffen over het spoor opgenomen in de richtlijn 96/49/EG betreffende de onderlinge aanpassing van de wetgevingen der lidstaten inzake het vervoer van gevaarlijke goederen per spoor.

In België vindt het RID ingang bij koninklijk besluit van 11 december inzake het vervoer van gevaarlijke goederen per spoor, met uitzondering van de radioactieve stoffen.

Het RID is gelijkaardig opgebouwd als het ADR.

Het vervoer van waterstof per spoor is onderhevig aan de voorschriften van het RID, waarbij een zelfde classificatie geldt als voor het ADR.

#### 4.5.3 TPED

Met betrekking tot vervoer van waterstof is een andere richtlijn eveneens belangrijk, namelijk de TPED (Transport Pressure Equipment Directive) ofwel de richtlijn 1999/36/EG van de Raad van 29 april 1999 betreffende vervoerbare drukapparatuur, die omgezet is in Belgische recht middels een koninklijk besluit van 14 maart 2002.

Deze richtlijn is van toepassing op onder meer nieuwe drukapparatuur en bestaande drukapparatuur die voldoet aan de technische voorschriften van het A.D.R. of van het R.I.D. (zie eerder) van kracht op 1 juli 2001.

De opbouw van de richtlijn is nagenoeg identiek aan die van de PED richtlijn en bevat eveneens bepalingen met betrekking overeenstemmingsbeoordeling, periodieke keuring en markering.

#### 4.5.4 ADN

ADN staat voor het **A**ccord européen relatif au transport international des marchandises **D**angereuses par voies de **N**avigation intérieures oftewel het Europees verdrag betreffende het internationaal transport van gevaarlijke stoffen over de binnenwateren.

Het ADN-reglement (ook ADN R genoemd) is niet van kracht in België.

Europa heeft een voorstel voor een richtlijn klaar betreffende de onderlinge aanpassing van de wetgevingen der lidstaten inzake het vervoer van gevaarlijke goederen per vaartuig over de binnenwateren

#### 4.5.5 PIJPLEIDINGEN

In Europa is reeds een extensief netwerk voor waterstof distributie aanwezig. Dit netwerk verbindt de grote industriële centra met elkaar.

Het transport van gasvormige producten doorheen pijpleidingen wordt in België geregeld door de wet van 12 april 1965 betreffende het vervoer van gasachtige producten en andere door middel van leidingen.

Gas wordt in deze wet gedefinieerd als elke brandstof die gasvormig is bij een temperatuur van 15 °C en onder een druk van 760 mm kwikkolom.

Deze regelgeving is in eerste instantie bedoeld voor het transport middels pijpleidingen van natuurlijk gas.

In principe valt elk gas onder deze wet, gezien de bepaling "en andere". Toch werd deze wet reeds meermaals aangevuld, per koninklijk besluit, om ze van toepassing te maken op andere producten, waaronder bijvoorbeeld zuurstof.

De wet stelt een vergunningsplicht in voor het bouwen en uitbaten van pijpleidingen bedoeld voor transport en distributie van gasvormige producten doorheen leidingen.

Daarnaast is er het koninklijk besluit van 11 maart 1966 betreffende de te nemen veiligheidsmaatregelen bij de oprichting en de exploitatie van installaties voor gasvervoer door middel van leidingen. Dit besluit en de daaropvolgende wijzigingen, ook voor de uitbreidingen met andere producten, bepaalt het minimum van voorschriften welke de houders van bovenvermelde vergunning op het gebied van veiligheidsmaatregelen bij de oprichting en de exploitatie van hun gasvervoersinstallaties moeten naleven.

Dan is er nog het koninklijk besluit van 21 September 1988 betreffende de voorschriften en de verplichtingen van raadpleging en informatie bij het uitvoeren van werken in de nabijheid van installaties van vervoer van gasachtige en andere producten door middel van leidingen, die er voor moet zorgen dat de veiligheid gegarandeerd kan worden bij dit type werken, zowel voor wat betreft het veilig exploiteren van de pijpleiding als voor wat betreft de veiligheid van de personen die de werken uitvoeren.

In het koninklijk besluit van 14 mei 2002 betreffende de vervoersvergunning voor gasachtige producten en andere door middel van leidingen ten slotte worden de criteria vastgelegd die gehanteerd worden bij het toekennen van een vervoersvergunning voor gasachtige en andere producten, alsook de procedure waarmee deze vervoersvergunningen worden toegekend. Daarnaast worden de voorwaarden voor toekenning en het houden van de vervoersvergunning vastgelegd, tezamen met de verplichtingen die hieraan vasthangen voor de houder ervan.

## 4.6 OVERIGE RICHTLIJNEN

Voor waterstofstoestellen, andere dan die voor de opslag van gecompriemd waterstof, kan eveneens het CE keurmerk toegekend worden.

De aspecten met betrekking hiertoe worden geregeld in tal van andere richtlijnen, die verder geen connectie hebben met waterstof, zoals daar zijn:

- Richtlijn 98/37/EG van het Europees Parlement en de Raad van 22 juni 1998 inzake de onderlinge aanpassing van de wetgevingen van de lidstaten betreffende machine (machinerichtlijn)
- Richtlijn 73/23/EEG van de Raad van 19 februari 1973 betreffende de onderlinge aanpassing van de wettelijke voorschriften der Lidstaten inzake elektrisch materiaal bestemd voor gebruik binnen bepaalde spanningsgrenzen (laagspanningsrichtlijn)
- Richtlijn 89/336/EEG van de Raad van 3 mei 1989 betreffende de onderlinge aanpassing van de wetgevingen van de Lidstaten inzake elektromagnetische compatibiliteit

In hetzelfde kader werden de ATEX 95 en de PED richtlijnen reeds besproken.

## HOOFDSTUK 5 : NORMEN

Waterstof is een gas, dat bovendien reeds lang gebruikt wordt en dus ook heel goed gekend zijn.

In dat opzicht bestaan reeds veel normen en standaarden met betrekking tot waterstof. Veel van deze normen zijn echter niet specifiek gericht op waterstof. Enkel diegene die dat wel zijn, worden in dit hoofdstuk aangehaald.

Heel veel inspanningen gaan tegenwoordig uit naar het normeren van de voertuigen zelf, op alle gebieden. Dit valt buiten het kader van deze studie.

### 5.1 ISO STANDAARDEN

Binnen het ISO is het Technisch Comité TC 197 verantwoordelijk voor waterstof. TC197 bestaat uit verschillende werkgroepen (WG):

- TC 197/WG 1 Liquid hydrogen - Land vehicles fuel tanks
- TC 197/WG 5 Gaseous hydrogen - Land vehicle filling connectors
- TC 197/WG 6 Gaseous hydrogen and hydrogen blends - Land vehicle fuel tanks
- TC 197/WG 8 Hydrogen generators using water electrolysis process
- TC 197/WG 9 Hydrogen generators using fuel processing technologies
- TC 197/WG 10 Transportable gas storage devices - Hydrogen absorbed in reversible metal hydride
- TC 197/WG 11 Gaseous hydrogen - Service stations
- TC 197/WG 12 Hydrogen fuel - Product specification
- TC 197/WG 13 Hydrogen detectors

Deze werkgroepen bereiden verschillende normen voor, die zich in verschillende stadia van goedkeuring bevinden. Een overzicht wordt hieronder gegeven:

- ISO/WD 13986: Tank containers for multimode transportation of liquid hydrogen
- ISO/AWI 14687-2: Hydrogen fuel -- Product specification - Part 2: Hydrogen fuel for cells
- ISO/CD 15869-1: Gaseous hydrogen and hydrogen blends – Land Vehicle fuel tanks – Part 1: General requirements
- ISO/DIS 15869-2: Gaseous hydrogen and hydrogen blends - Land vehicle fuel tanks – Part 2: Particular requirements for metal tanks
- ISO/CD 15869-3: Gaseous hydrogen and hydrogen blends – Land Vehicle fuel tanks – Part 3: Particular requirements for hoop wrapped composite tanks with a metal liner
- ISO/CD 15869-4: Gaseous hydrogen and hydrogen blends – Land Vehicle fuel tanks – Part 4: Particular requirements for fully wrapped composite tanks with a metal liner
- ISO/CD 15869-5: Gaseous hydrogen and hydrogen blends – Land Vehicle fuel tanks – Part 5: Particular requirements for fully wrapped composite tanks with a non-metallic liner
- ISO/FDIS 16110-1: Hydrogen generators using fuel processing technologies - Part 1: Safety
- ISO/CD 16110-2: Hydrogen generators using fuel processing technologies - Part 2: Procedures to determine efficiency
- ISO/AWI TS 20012: Gaseous hydrogen - Service stations

- ISO WI 20421-1 Cryogenic vessels — Large transportable vacuum insulated vessels — Part 1: Design, fabrication, inspection and testing.
- ISO/DIS 22734-1: Hydrogen generators using water electrolysis process - Part 1: Industrial and commercial applications
- ISO/CD 22734-2: Hydrogen generators using water electrolysis process - Part 2: Residential applications
- ISO/AWI 26142: Hydrogen detector

Onderstaande normen werden reeds gepubliceerd:

- ISO 13984:1999: Liquid hydrogen - Land vehicle fuelling system interface
- ISO/DIS 13985-1: Liquid hydrogen - Land vehicle fuel tanks – Part 1: Design, fabrication, inspection and testing
- ISO/DIS 13985-2: Liquid hydrogen - Land vehicle fuel tanks – Part 2: Installation and maintenance
- ISO 14687:1999: Hydrogen fuel - Product specification (ISO 14687:1999/Cor 1:2001)
- ISO/PAS 15594:2004: Airport hydrogen fuelling facility operations
- ISO/TR 15916:2004: Basic considerations for the safety of hydrogen systems
- ISO/TS 16111:2006: Transportable gas storage devices - Hydrogen absorbed in reversible metal hydride

*Deze norm is enkel van toepassing op hervulbare opslagtanks voor waterstof en is geldt niet voor gelijkaardige tanks die voorzien zijn om permanent te worden geïnstalleerd in voertuigen.*

- ISO 17268:2006: Compressed hydrogen surface vehicle refueling connection devices.  
Deze norm is van toepassing voor waterstofgas op een druk van hetzij 25 MPa of 35 Mpa (250 of 350 bar)

## 5.2 BELGISCHE NORMEN

Het voorbereiden van normen en standaarden gebeurt op internationaal en Europees niveau. Gezien de status van veel van deze teksten, zijn er nog niet veel doorgesijpeld tot op nationaal niveau.

In onderstaande wordt kort een overzicht gegeven van de relevante normen, uitgegeven door het Belgisch Instituut voor de Normalisatie (BIN) met betrekking tot het gebruik van waterstof in voertuigtoepassingen.

### 5.2.1 WATERSTOF - WATERSTOFBROSHEID

NBN EN 10229:1998 1998 Beoordeling van de weerstand van producten van staal tegen scheurvorming door de inwerking van waterstof (HIC)

NBN EN ISO 11114-4:2005 2005 Verplaatsbare gasflessen - Compatibiliteit van materialen voor flessen en afsluiters met de gasinhoud - Deel 4: Beproevingmethoden voor het selecteren van metalen bestand tegen waterstofbrosheid (ISO 11114-4:2005)

### 5.2.2 CRYOGENE OPSLAG

Er werden in de catalogus van het BIN meer dan 35 normen teruggevonden die betrekking hebben op cryogene opslag in het algemeen.

Ze zijn van toepassing op verschillende types tanks en verschillende wijzen van opslag.

### 5.2.3 DRUKOPSLAG

Er werden in de catalogus van het BIN meer dan 100 normen teruggevonden die betrekking hebben op drukopslag in het algemeen, gerelateerd aan de PED-richtlijn (zie eerder).

Ze zijn van toepassing op verschillende types tanks en verschillende wijzen van opslag.

### 5.2.4 EXPLOSIEVE ATMOSFEREN

Bij het BIN zijn tal van normen beschikbaar over elektrisch materieel en de verschillende beschermingsniveaus. Ze zijn niet waterstofsamen. Ze gelden voor apparatuur die worden ingezet in de gezoneerde gebieden (zie ook het AREI).

De meer algemene normen met betrekking tot explosieve atmosferen zijn hieronder gegeven:

- NBN EN 1127-1:1997 1997 Ontploffingsgevaarlijke atmosferen - Voorkoming van en bescherming tegen ontploffingen - Deel 1 : Basisbegrippen en methodologie
- NBN EN 1755:2000 2000 Veiligheid van gemotoriseerde transportwerktuigen - Inzet in potentieel explosiegevaarlijke atmosferen - Gebruik in gebieden met ontbrandbare gassen, dampen, nevels en stof :
- NBN EN 1834-1:2000 2000 Zuigermotoren met inwendige verbranding - Veiligheidseisen voor het ontwerp en de bouw van motoren voor toepassing in gebieden met ontploffingsgevaar - Deel 1: Motoren van groep II voor gebieden met ontplofbare gassen en dampen
- NBN EN 12874:2001 2001 Vlamdovers - Gedragingseisen, proeven en gebruiksbependingen
- NBN EN 13160-1:2003 2003 Lekdetectiesystemen - Deel 1: Algemene principes
- NBN EN 13237:2003 2003 Plaatsen waar ontploffingsgevaar kan heersen - Termen en definities voor apparatuur en beveiligingssytemen bedoeld voor gebruik op plaatsen waar ontploffingsgevaar kan heersen
- NBN EN 13463-1:2002 2002 Niet-elektrische uitrusting voor plaatsen waar ontploffingsdreiging kan heersen - Deel 1 : Grondslagen en eisen
- NBN EN 13980:2002 2002 Plaatsen waar ontploffingsgevaar kan heersen - Toepassing van kwaliteitssystemen
- NBN EN 14373:2006 2006 Systemen voor ontploffingsonderdrukking
- NBN EN 61779-1:2001 2001 Elektrische materieel voor de detectie en meting van brandbare gassen - Deel 1 : Algemene eisen en beproevingsmethoden
- NBN EN 61779-1/A1:2005 2005 Elektrisch materieel voor de detectie en meting van brandbare gassen - Deel 1 : Algemene eisen en beproevingsmethoden (toevoeging aan NBN EN 61779-1:2001)
- NBN EN 61779-4:2001 2001 Elektrisch materieel voor de detectie en meting van brandbare gassen - Deel 4 : Gebruikseigenschappen van materieel van groep II met een meetbereik tot 100 % van de onderste ontstekingsgrens
- NBN EN 61779-5:2001 2001 Elektrisch materieel voor de detectie en meting van brandbare gassen - Deel 5 : Gebruikseigenschappen van materieel van groep II met een meetbereik tot 100 % gas

### 5.2.5 TANKSTATIONS

Er zijn geen normen die specifiek betrekking hebben op tankstations. De van toepassing zijnde normen voor tankstations zijn opgenomen in onderstaande opsomming:

- NBN EN 13012:2002 2002 Tankstations - Constructie en prestatie van automatische vulpistolen voor gebruik op brandstofzuilen

- NBN EN 13617-1:2004 2004 Tankstations - Deel 1: Veiligheidseisen voor de constructie en prestatie van meetpompen, brandstofzuilen en pompinstallaties op afstand
- NBN EN 13617-2:2005 2005 Tankstations - Deel 2: Veiligheidseisen voor de constructie en prestatie van veiligheidsonderbrekers voor gebruik op brandstofzuilen
- NBN EN 13617-3:2004 2004 Tankstations - Deel 3: Veiligheidseisen voor constructie en prestatie van schuifspanningsventielen
- NBN EN 13617-4:2005 2005 Tankstations - Deel 4: Veiligheidseisen voor de constructie en prestatie van kettingwartels voor gebruik op meetpompen en verdelers

Het zal, zeker bij het ontbreken van gezamenlijke standaarden, normen of codes van goede praktijk, nodig zijn de noodzakelijke aandacht te besteden aan de combinatie van een waterstofverdeelstation met een klassiek tankstation, gezien de karakteristieken van waterstof in vergelijking tot die van de meer klassieke brandstoffen.

Indien het waterstofverdeelstation op zijn eigen bestaat, is dit natuurlijk niet nodig.

## 5.3 NFPA STANDAARDEN

### 5.3.1 NFPA 50A – STANDARD FOR GASEOUS HYDROGEN SYSTEMS AT CONSUMER SITES

Deze standaard behandelt de vereisten voor installaties waarin gasvormig waterstof gebruikt wordt en waarbij de waterstof van buitenaf wordt aangevoerd door voertuigen.

De standaard is niet van toepassing op waterstofproductie-installaties en installaties voor het afvullen van voertuigen die de verdeelstations bevoorraden.

In de standaard wordt de voorkeur aangeduid voor de locatie van waterstofsysteem, afhankelijk van de hoeveelheid waterstof die het kan bevatten. De opstelling in open lucht krijgt altijd de voorkeur. Eventueel kan het ook binnen, in een afzonderlijk gebouw.

Als het niet in een afzonderlijk gebouw is, moeten speciale voorzieningen getroffen worden, maar dan mag het niet voor hoeveelheden die meer bedragen dan 425 m<sup>3</sup>.

Als er geen speciale voorzieningen getroffen worden, mag de hoeveelheid niet meer bedragen dan 99 m<sup>3</sup>.

De veiligheidsafstanden die gerespecteerd moeten worden, zijn nagenoeg identiek aan diegene die gebruikt worden in de Europese code van goede praktijk (zie ook paragraaf 6.1). Deze veiligheidsafstanden gelden voor de opslag van waterstof.

Voor het vulpunt voor deze opslag gelden dezelfde afstanden.

Deze veiligheidsafstanden worden aangevuld met de bepaling dat er zich binnen de 4,6 meter rondom een waterstofinstallatie in de open lucht, geen niet-gecertificeerde elektrische apparaten mogen bevinden.

Als waterstofopslag, minder dan 99 m<sup>3</sup>, gebeurt in een gebouw, dienen volgende voorwaarden vervuld te zijn:

- Het gebouw dient geventileerd te worden, conform de bepalingen uit de standaard;
- Een afstand van minstens 6 m tussen de opslag van waterstof en de opslag van alle brandbare vloeistoffen, oxiderende gassen en gemakkelijk brandbare materialen (papier...);
- Een afstand van minstens 7,6 m tussen de opslag van waterstof en open vlammen, niet gecertificeerd elektrisch materiaal of andere ontstekingsbronnen;

- Een afstand van minstens 15 m tussen de opslag van waterstof en de aanzuigopeningen van ventilatie en/of AC-systemen of van luchtcompressoren;
- Een afstand van minstens 15 m tussen de opslag van waterstof en de opslag van andere brandbare gassen;
- Een afstand van minstens 15 meter of een muur met een brandweerstand van minstens 2 uur tussen een binnen gelegen waterstofsysteem (minder dan 99 m<sup>3</sup>) en een ander soortgelijk waterstofsysteem;
- De opslag van waterstof moet beschermd zijn tegen voorkomende schade als gevolg van vallende objecten of werken in de opslagzone.

Met betrekking tot de ventilatie van ingesloten ruimtes waar waterstof aanwezig zou kunnen zijn, wordt het volgende opgelegd:

- De ventilatie gebeurt onmiddellijk naar de open lucht;
- De openingen van inlaatlucht zijn gesitueerd enkel in buitenmuren en op vloerniveau. De uitlaatopeningen zijn gesitueerd op het hoogste punt of de hoogste punten van de ruimte, in een buitenmuur of in het dak;
- De in- en uitlaatopeningen hebben minstens een oppervlakte van 1 m<sup>2</sup> per 305 m<sup>3</sup> kamervolume.

Daarenboven moeten afzonderlijke gebouwen waarin waterstof wordt opgeslagen opgebouwd zijn uit buitenmuren en/of panelen, die dienen als explosieluik bij drukken van maximaal 13,3 kPa/m<sup>2</sup>.

Als waterstof opgeslagen wordt binnen, maar niet in een afzonderlijk gebouw, gelden nog strengere regels:

- Minstens één van de muren van het lokaal waar de waterstof opgeslagen wordt, is een buitenmuur;
- De binnenmuren – en vloeren hebben een brandweerstand van minstens 2 uur en zijn stevig verankerd;
- Openingen in de ruimte zijn enkel mogelijk naar de buitenlucht; er zijn geen connecties mogelijk naar andere ruimtes; ramen en deuren bevinden zich slechts in de buitenmuur en zijn gemakkelijk bereikbaar in geval van nood;
- Er is ventilatie voorzien (zie hoger) en de buitenmuur functioneert als explosieluik (zie hoger);
- In de ruimte mogen geen open vlammen, warme oppervlakken of niet-gecertificeerde elektrisch apparaten aanwezig zijn.

Ten slotte verplicht de standaard uitbaters ertoe in instructies te voorzien voor het personeel. De installatie wordt jaarlijks geïnspecteerd en onderhoud gebeurt door een gekwalificeerd iemand. De exploitant zorgt er tevens voor dat een zone van 4,6 meter rondom elke waterstoftank te allen tijde vrij is van verdroogde vegetatie of elk ander brandbaar materiaal.

### 5.3.2 NFPA 50B – STANDARD FOR LIQUID HYDROGEN SYSTEMS AT CONSUMER SITES

Deze standaard behandelt de vereisten voor installaties waarin vloeibaar waterstof gebruikt wordt en waarbij de waterstof van buitenaf wordt aangevoerd door voertuigen.

De standaard is niet van toepassing op *draagbare* waterstofopslag met een inhoud van minder dan 150 liter, noch op waterstofproductie-installaties en installaties voor het afvullen van voertuigen die de verdeelstations bevoorraden.

Met betrekking tot het ontwerp van de waterstofcontainers wordt het volgende opgelegd:

- De tanks moeten ontworpen zijn conform de geldende regelgeving en normen van toepassing op dit type opslag;

- Permanente tanks moeten stevig verankerd zijn in niet-brandbaar materiaal. Ondersteunende constructies in staal zijn voorzien van een brandwerende beschermingslaag met een weerstand van minstens 2 uur;
- De tanks zijn voorzien van overdrukventielen, conform de daarbij geldende regelgeving en normen;
- Delen van de installatie waarin vloeibaar waterstof kan worden opgesloten (pijpleiding tussen twee kleppen) zijn eveneens voorzien van overdrukventielen;
- De overdrukventielen moeten zo geïnstalleerd zijn dat ze ventileren naar de buitenlucht, op een manier die ervoor zorgt dat ontsnappend gas en/of vloeistof geen additioneel veiligheidsrisico stelt;
- De overdrukventielen mogen niet dichtvriezen of blokkeren als gevolg van vocht in de omgevingslucht, rekening houdend met de cryogene condities;
- De aanwezigheid van overdrukventielen worden aangeduid met behulp van de duidelijke signalisatie.

Uiteraard moet het volledige systeem voorzien zijn op cryogene omstandigheden. Daarbij worden derden zo weinig mogelijk blootgesteld aan niet-geïsoleerde onderdelen. Deze laatste wordt steeds zo vaak mogelijk vermeden en indien niet moeten de nodige maatregelen genomen worden.

Het systeem waarin vloeibaar waterstof opgeslagen wordt, moeten beschermd worden tegen elke vorm van fysieke schade.

Een noodklep moet voorzien worden zo dicht mogelijk bij de eigenlijke opslagtank. Bij opslag van meer dan 7570 liters mag er zich tussen deze noodklep en de tank geen ander object (kleppen, ventielen...) bevinden. De noodklep moet dan trouwens van op afstand bedienbaar zijn.

Elke ruimte waarin zich waterstof(gas) kan ophopen moet worden geventileerd naar de open lucht.

Voor de installatie in gebruik genomen kan worden, moet ze volledig getest worden voor waterstof bij de operationele drukken en temperaturen die zullen heersen in het systeem.

Verdampers om vloeibaar waterstof om te zetten in gasvormig waterstof moet eveneens stevig worden verankerd. Het systeem moet voorzien zijn op mogelijke expansies als gevolg van temperatuurverschillen. Elk circuit moet trouwens voorzien zijn van overdrukventielen.

De warmte die gebruikt wordt voor het verdampen mag slechts indirect worden overgedragen, bijvoorbeeld met behulp van lucht, water of stoom.

De verdampers moeten voorzien zijn van een lage temperatuursbewaking. Indien de gebruikte warmtebron wegvalt, zal de temperatuur in de verdamper immers snel dalen. Om schade te vermijden moet deze lage temperatuursbewaking het systeem kunnen stilleggen indien zulks gebeurt.

Voor wat betreft de inplanting van systemen die gebruik maken van vloeibare waterstof, wordt het volgende gevraagd:

- De opslagplaats is gemakkelijk toegankelijk voor levering en voor geautoriseerd personeel;
- De nodige voorzieningen om hulp in noodsituaties mogelijk te maken zijn genomen;
- Waterstofsysteem zijn niet gelegen onder of nabij elektrische leidingen, leidingen die brandbare vloeistoffen, brandbare gassen of oxiderende stoffen bevatten;
- Accumulatie van brandbare stoffen in een zone met een straal van 15,2 m rondom de opslagzone moet onmogelijk gemaakt worden;
- De opslaglocatie is omheind en voorzien van de nodige signalisatie;
- Opslag in een gesloten ruimte is voorzien van overdrukventielen die afgeleid worden naar een veilige locatie in de buitenlucht, op een hoogte van minstens 7,6 m;
- Er mogen zich geen geparkeerde wagens bevinden op een afstand van minder dan 7,6 meter van waar de losoperaties gebeuren.



Waterstofsysteemen bevinden zich bij voorkeur in de open lucht. Locaties in gesloten ruimtes zijn ook mogelijk, afhankelijk van de opgeslagen hoeveelheid.

Alle systemen moeten trouwen geaard zijn.

Voor systemen die binnen staan opgesteld zijn volgende veiligheidsafstanden in acht te nemen

- Het gebouw dient geventileerd te worden, conform de bepalingen uit de standaard;
- De overdrukventielen zijn aanwezig en geïnstalleerd conform de bepalingen uit de standaard;
- Een afstand van minstens 6,1 m tussen de opslag van waterstof en de opslag van alle brandbare vloeistoffen en gemakkelijk brandbare materialen (papier...);
- Een afstand van minstens 7,6 m tussen de opslag van waterstof en open vlammen, niet gecertificeerd elektrisch materiaal of andere ontstekingsbronnen;
- Een afstand van minstens 15 m tussen de opslag van waterstof en de aanzuigopeningen van ventilatie en/of AC-systemen of van luchtcompressoren;
- Een afstand van minstens 15 m tussen de opslag van waterstof en de opslag van andere brandbare en oxiderende gassen;
- De opslag van waterstof moet beschermd zijn tegen voorkomende schade als gevolg van vallende objecten of werken in de opslagzone;
- Containers moeten rechtopstaand bevestigd en stevig verankerd zijn;
- Las- en snijwerken, evenals roken zijn verboden zolang waterstof aanwezig is of kan zijn.

Daarnaast is in de standaard ook een uitgebreide tabel met veiligheidsafstanden, die gerespecteerd moeten worden, opgenomen en die in onderstaande tabel worden weergegeven.

<b>Tabel # 5.1 : Veiligheidsafstanden i.f.v. vloeibare waterstofopslag</b>			
ACTIVITEIT/OBJECT	VEILIGHEIDSAFSTAND		
	<13250 l	< 56780 l	283905 l
Gebouw of structuur, waarvan de muur aanpalend aan het te bouwen systeem is opgetrokken uit niet-brandbare of beperkt brandbare materialen, uitgerust met een sprinklersysteem of met een brandweerstand van meer dan 3h	1,5 m	1,5 m	1,5 m
Gebouw of structuur, waarvan de muur aanpalend aan het te bouwen systeem is opgetrokken uit niet-brandbare of beperkt brandbare materialen, niet uitgerust met een sprinklersysteem of met een brandweerstand minder dan 3h.	7,6 m	15,2 m	22,86 m
Gebouw of structuur waarvan de muur aanpalend aan het bouwen systeem is opgetrokken uit andere dan niet-brandbare of beperkt brandbare materialen, uitgerust met een sprinklersysteem	15,2 m	15,2 m	15,2 m
Gebouw of structuur waarvan de muur aanpalend aan het bouwen systeem is opgetrokken uit andere dan niet-brandbare of beperkt brandbare materialen, niet uitgerust met een sprinklersysteem	15,2 m	22,86 m	30,48 m
Opening in muren, met de mogelijkheid ze te openen	22,86 m	22,86 m	22,86 m
Opening in muren, zonder de mogelijkheid ze te openen	7,6 m	15,2 m	15,2 m
Bovengrondse opslag van brandbare vloeistoffen	15,2 m	22,86 m	30,48 m
Ondergrondse opslag van brandbare vloeistoffen (te meten vanaf ontluchtingspijpen of vulopeningen)	15,2 m	22,86 m	30,48 m
Opslag van brandbare gassen	15,2 m	22,86 m	30,48 m
Open vuur en laswerken	15,2 m	15,2 m	15,2 m

Tot aan inlaat voor rioleringsystemen	1,5 m	1,5 m	1,5 m
Aanzuigopeningen voor luchtcompressoren, ventilatiesystemen...	22,86 m	22,86 m	22,86 m
Plaatsen waar veel mensen samenkomen	22,86 m	22,86 m	22,86 m
Wegen, sporen, grenzen van aanpalende eigendommen	5 m	5 m	5 m
Grens met aangrenzende bebouwbare ruimtes	7,6 m	15,2 m	22,86 m

Voorts wordt geëist dat alle oppervlakken onder het waterstofsysteem (voor leidingen geldt dit enkel voor de niet-geïsoleerde), bestaan uit niet-brandbare materialen, waarbij bitumen en/of asfalt als brandbaar wordt beschouwd.

De norm geeft daarnaast eisen met betrekking tot de ventilatie (1 m<sup>2</sup> in- en uitlaatopeningen per 300 m<sup>3</sup> ruimtevolumen voor afzonderlijke gebouwen en 1 m<sup>2</sup> per 9 m<sup>3</sup> voor locaties in een ander gebouw, in- en uitlaatopeningen in een buitenmuur).

De gebouwen zijn opgebouwd uit niet of beperkt brandbare materialen. De samenstellende onderdelen van het gebouw dienen als explosiegeveilig vanaf drukken van 1,25 kPa per m<sup>2</sup>.

Ontstekingsbronnen in het gebouw waar het waterstofsysteem is opgesteld, zijn verboden.

Ten slotte verplicht de standaard uitbaters ertoe in instructies te voorzien voor het personeel. De installatie wordt jaarlijks geïnspecteerd en onderhoud gebeurt door een gekwalificeerd iemand.

De exploitant zorgt er tevens voor dat een zone van 7,6 meter rondom elke waterstoftank te allen tijde vrij is van vegetatie of elk ander brandbaar materiaal.

## HOOFDSTUK 6 : CODES VAN GOEDE PRAKTIJK

---

### 6.1 GASEOUS HYDROGEN VEHICLE REFUELLING STATIONS

In het kader van het Europees geïntegreerd waterstofproject (EIHP) werd een code van goede praktijk opgesteld met betrekking tot verdeelstations voor gasvormig waterstof.

Bij het opstellen van dit document werd rekening gehouden met volgende codes en standaarden:

- EIGA document IGC 15/96/E – Gaseous Hydrogen Installations
- NFPA 50A – Standard for Gaseous Hydrogen Systems at Consumer Sites (1999 ed)
- Duitse TRG 406 regelgeving: Refuelling stations for pressurised gases (CGH2 included)
- ISO/PDTR 15916 – Basic considerations for the safety of hydrogen systems.

De code van goede praktijk heeft betrekking op verdeelstations van waterstof en niet op productie-eenheden ervan. Volgende delen worden verondersteld inbegrepen te zijn:

- Een systeem voor het comprimeren van gas
- Een eenheid voor de zuivering van het gas
- Tussentijdse opslag
- Verdeelinstallatie voor het verdelen van gecomprimeerd waterstof naar voertuigen.

In het document worden de eigenschappen van waterstof en de daarmee verbonden belangrijkste risico's besproken.

Met betrekking tot het ontwerp van dergelijke verdeelstations wordt geëist dat ze voldoen aan alle nationale regelgeving met betrekking tot drukapparaten en tot leidingsystemen en dat er rekening gehouden wordt met de eisen voor risicoanalyse die gelden in de verschillende lidstaten.

Volgende onderwerpen worden in de code van goede praktijk besproken:

- Algemene voorschriften voor het ontwerp van verdeelstations
- Veiligheidsafstanden en zonering
- Compressie van waterstofgas
- Zuivering van waterstofgas
- Waterstofverdeelstations
- Het verdelen van waterstof
- Veiligheids- en ontluchtungskleppen
- Het verdeelsysteem
- Elektrische uitrusting
- Brandbestrijding
- Training en bescherming van het personeel
- Het in dienst stellen van een waterstofverdeelstation
- Onderhoud en inspectie

Het document heeft de intentie een standaardwerk te zijn voor waar het betreft de uitbating van verdeelstations voor gecomprimeerd waterstof.

Het hanteert ook een uitgebreide tabel met veiligheidsafstanden die gerespecteerd moeten worden en die in onderstaande tabel worden weergegeven.

<b>Tabel # 6.1 : Veiligheidsafstanden i.f.v. waterstofopslag</b>			
ACTIVITEIT/OBJECT	VEILIGHEIDSAFSTAND		
	<99 m <sup>3</sup>	99–425 m <sup>3</sup>	> 425 m <sup>3</sup>
Gebouw of structuur, waarvan de muur aanpalend aan het te bouwen systeem is opgetrokken uit niet-brandbare of beperkt brandbare materialen, uitgerust met een sprinklersysteem of met een brandweerstand van meer dan 2h	0 m	1,5 m	1,5 m
Gebouw of structuur, waarvan de muur aanpalend aan het te bouwen systeem is opgetrokken uit niet-brandbare of beperkt brandbare materialen, niet uitgerust met een sprinklersysteem of met een brandweerstand minder dan 2h.	0 m	3 m	8 m
Gebouw of structuur waarvan de muur aanpalend aan het bouwen systeem is opgetrokken uit andere dan niet-brandbare of beperkt brandbare materialen	3 m	8 m	15 m
Opening in muren, niet boven een onderdeel van een bepaalde installatie	3 m	3 m	3 m
Opening in muren boven een onderdeel van een bepaalde installatie	8 m	8 m	8 m
Bovengrondse opslag van brandbare vloeistoffen: 0 – 4000 liter	3 m	8 m	8 m
Bovengrondse opslag van brandbare vloeistoffen: meer dan 4000 liter	8 m	15 m	15 m
Ondergrondse opslag van brandbare vloeistoffen: 0 – 4000 liter	3 m	3 m	3 m
Ondergrondse opslag van brandbare vloeistoffen: meer dan 4000 liter	6 m	6 m	6 m
Ontluchtingspijpen of vulopeningen van ondergrondse tanks	8 m	8 m	8 m
Opslag van brandbare gassen: 0 – 250 m <sup>3</sup>	3 m	8 m	8 m
Opslag van brandbare gassen: meer dan 250 m <sup>3</sup>	8 m	15 m	15 m
Opslag van snel brandende vaste stoffen (timmerhout, papier...)	15 m	15 m	15 m
Opslag van traag brandende vaste stoffen (zwaar hout, kolen...)	8 m	8 m	8 m
Ontstekingsbronnen (op grondniveau)	8 m	8 m	8 m
Verdeelinstallatie voor voertuigen	5 m	5 m	5 m
Aanzuigopeningen voor luchtcompressoren, ventilatiesystemen...	15 m	15 m	15 m
Bovengrondse elektriciteitsleidingen (incl. tramleidingen)	15 m	15 m	15 m
Plaatsen waar veel mensen samenkomen	8 m	15 m	15 m
Publieke stoepen en parkeerstroken	5 m	5 m	5 m
Grens met aangrenzende bebouwbare ruimtes	1,5 m	1,5 m	1,5 m

Uniek aan het document is dat het een voorstel doet voor de zonering van typetankstations, zoals bedoeld in onder andere het AREI.

Daarnaast geeft het ook noties met betrekking tot noodplannen die moeten worden uitgewerkt voor de uitbating van waterstofverdeelstations.

Belangrijk is telkens dat de opslag van waterstof zo goed mogelijk wordt afgeschermd van derden, zowel voor manipulatie als voor impact.

## 6.2 GASEOUS HYDROGEN STATIONS – IGC DOC 15/06/E

Dit document is afkomstig van de EIGA (European Industrial Gases Association). Het is een revisie van de documenten met referentie 15/96 en 15/06. Het is op basis van dit document dat bovenstaande code van goede praktijk in het kader van het European Integrated Hydrogen Project (EIHP).

De code van goede praktijk van het EIHP en dit document hebben nagenoeg dezelfde opbouw en inhoud. Het eerste is op bepaalde punten meer uitgebreid, wat logisch is, gezien het een synthesesdocument betreft.

Voor een korte bespreking van het document wordt dan ook verwezen naar paragraaf 6.1.

Voor de volledigheid wordt in onderstaande de veiligheidsafstanden gegeven van typische activiteiten en/of objecten tot aan systemen die waterstof bevatten.

<b>Tabel # 6.2 : Veiligheidsafstanden tot aan waterstofsysteem</b>	
ACTIVITEIT/OBJECT	VEILIGHEIDSAFSTAND
Open vlammen en andere ontstekingsbronnen (inclusief elektrische)	5 m
Grenzen van de site / gebieden waar meerdere mensen aanwezig kunnen zijn	8 m
Houten gebouwen en/of structuren	8 m
Openingen in de muur van gebouwen (bijvoorbeeld shop)	5 m
Bovengrondse opslag van brandbare vloeistoffen en LPG	8 m
Ondergrondse opslag van brandbare vloeistoffen en LPG (horizontale afstand)	3 m
Ontluchtingspijpen	5 m
Opslag in cilinders van brandbare gassen, andere dan waterstof	5 m
Compressoren, aanzuigpunten van ventilatiesystemen	8 m

## 6.3 HYDROGEN CYLINDERS AND TRANSPORT VESSELS – IGC DOC 100/03/E

Dit document, uitgegeven door de European Industrial Gases Association (EIGA) is een revisie van een eerder document en formuleert aanbevelingen voor opslag- en transportstructuren voor waterstof met betrekking tot ontwerp, materialen, de bouw, het testen, het gebruik en inspectie.

Het is belangrijk te vermelden dat het document niet van toepassing is op vaste tanks, die beschreven worden in het document met betrekking tot waterstofstations (zie eerder).

De aanbevelingen zijn van toepassing op:

1. Alle nieuwe "gehard en getemperd" naadloze, chroom-molybdeenstalen waterstof cilinders en transportvaten.
2. Alle nieuwe, naadloze waterstofcilinders en transportvaten

3. Het herzien van het ontwerp van de verankeringsystemen van waterstofcilinders en transportvaten, en indien nodig het aanbrengen van wijzigingen volgens een op te stellen schema
4. Checklist voor het controleren van alle andere aanbevelingen
5. Aanbevelingen met betrekking tot de periodieke keuringen van naadloze waterstofcilinders en vaten.

Gezien de techniciteit van het document zou een verdere beschrijving te ver leiden.

## 6.4 HYDROGEN TRANSPORTATION PIPELINES – IGC DOC 121/04/E

Dit document, uitgegeven door de European Industrial Gases Association (EIGA) is een revisie van een eerder document en formuleert aanbevelingen voor alle aspecten van de uitbouw en het gebruik van een pijpleidingnetwerk voor waterstof. Daarmee worden niet alleen pijpleidingen over lange afstanden bedoeld, maar ook het volledige leidingsysteem, inclusief instrumentarium, zoals kleppen en flenzen, waarvan een waterstofsysteem voorzien moet zijn.

Dit document is geharmoniseerd voor wereldwijd gebruik.

Het document beschrijft de technische vereisten waarmee rekening gehouden moet worden tijdens het ontwerp, de bouw van de leidingsysteem, het gebruik ervan, maar ook de veiligheidsmaatregelen die nodig zijn voor het veilig exploiteren van de leidingen. Ook worden eventuele tussenstations uitvoerig beschreven.

Gezien de techniciteit van het document zou een verdere beschrijving te ver leiden.

## 6.5 SAFETY IN STORAGE, HANDLING AND DISTRIBUTION OF LIQUID HYDROGEN – DOC 06/02/E

Dit document, afkomstig van de European Industrial Gases Association (EIGA) betreft een revisie van het eerdere IGC Doc 06/93. Het bespreekt het werken met vloeibaar, cryogeen waterstof.

Het document beschrijft zeer gedetailleerd de eigenschappen en effecten van vloeibare, en dus zeer koude waterstof op de omgeving en op de gezondheid.

Zo heeft waterstof het op één na laagste kookpunt van alle gassen. Enkel helium doet beter.

Door deze extreme koude kan vloeibaar waterstof, maar ook de zeer koude gassen die bij verdamping vrijkomen, bij contact ernstige brandwonden veroorzaken. Gevoelige weefsels, zoals de ogen, kunnen in een fractie van een moment beschadigd worden.

Ook contact met niet geïsoleerde leidingen die de koude vloeistof bevatten, kan leiden tot ernstige schade en wonden, door vastvriezing.

Niet alleen op de mens, plant of dier heeft cryogeen waterstof een negatief effect. Ook materialen zoals staal, plastic of rubber vervriest, verliest deels zijn flexibiliteit en kan dan breken. Dit fenomeen wordt waterstofbrosheid genoemd.

De koude heeft ook een effect op andere vloeistoffen en gassen die ermee in contact komen. Bij dergelijke koude temperaturen zullen andere stoffen condenseren en/of bevriezen. Hierdoor kunnen kleppen, valven of zelfs hele leidingsystemen blokkeren of zelfs uiteenspatten. Voor bijvoorbeeld noodsystemen als het brandpreventiesysteem kan dit zeer nadelig uitdraaien.

Het condenseren van de lucht in vloeibare waterstof kan zelfs tot aanzienlijke explosierisico's leiden.

Vloeibaar waterstof heeft slechts een kleine verdampingswarmte nodig en begint dus zeer snel te koken en te verdampen. Wanneer dit te snel gebeurt, kan dit leiden tot wegspringen van vloeistofdruppels, wat op zich een risico is.

Het koude gas dat ontstaat is zwaarder dan lucht en zal zich dus verzamelen in de diepste punten van de omgeving, vanwaaruit het dan verder opwarmt en snel diffundeert. De koude van de waterstof en de warmte die het onttrekt aan de omgeving om te verdampen, zal leiden tot het condenseren van het vocht in de lucht, waardoor een duidelijke mistvorming plaatsvindt, die wijst op een lek van vloeibare waterstof.

Eén liter vloeibare waterstof zal daarbij ongeveer 850 liter gas gevormd hebben.

Een ander effect van de extreme koude, zeker voor slecht of niet-geïsoleerde leidingen of vaten, is dat de omgevingslucht vloeibaar wordt. Stikstof zal daarbij eerder condenseren dan zuurstof, waardoor er een aanrijking plaatsvindt van deze laatste component, wat dan op zijn beurt weer het brandgevaar verhoogt.

Ook in dit document worden op basis van bovenvermelde risico's veiligheidsafstanden gegeven voor de opslag van vloeibare waterstof. Die worden weergegeven in onderstaande tabel. Ze zijn over het algemeen groter dan voor gasvorming waterstof.

<b>Tabel # 6.3 : Veiligheidsafstanden tot aan de opslag van vloeibaar waterstof</b>	
ACTIVITEIT/OBJECT	VEILIGHEIDSAFSTAND
Muren met brandresistiviteit van meer dan 90 minuten	2,5 m
Technische gebouwen waar normaal geen mensen aanwezig zijn	10 m
Gebouwen waar mensen aanwezig zijn	20 m
Aanzuigpunten van compressoren of ventilatiesystemen	20 m
Opslag van brandbare vloeistoffen of vaste stoffen	10 m
Vaste opslag van vloeibare waterstof	1,5 m
Tankwagen met vloeibare waterstof	3 m
Opslag van brandbare gassen	8 m
Open vlammen, roken, laswerken	10 m
Plaatsen waar meerdere mensen kunnen samenkomen	20 m
Publieke gebouwen	60 m
Spoorwegen, wegen	10 m
Terreingrenzen	10 m
Bovengrondse hoogspanningsleidingen	10 m

Voorts worden de technische vereisten besproken waaraan voldaan moet worden bij het behandelen van vloeibare waterstof.

De installaties moeten buiten en bovengronds worden opgesteld. Voor ondergrondse opslag zijn bijkomende vereisten nodig. Hier is nog geen standaard voor.  
De afstanden kunnen geargumenteed verkleind worden, indien daarvoor de nodige voorzieningen getroffen worden.

Belangrijk is telkens dat de opslag van waterstof zo goed mogelijk wordt afgeschermd van derden, zowel voor manipulatie als voor impact.

Het document geeft voorts aanbevelingen voor tankwagens. In bijlage I ervan zijn technische voorschriften opgenomen.  
Daarnaast worden ideale transportroutes besproken. Tankwagens moeten zoveel mogelijk dichtbevolkte gebieden vermijden. Eventueel moet hierbij zelfs bij de inplanting rekening gehouden worden. Bij het transport moet uiteraard rekening gehouden worden met de bepalingen van het ADR en dus ook met routes die eventueel niet opengesteld zijn voor dergelijke transporten, zoals bepaalde tunnels.

Ook de losoperaties worden besproken. Het is van belang hiervoor een zo afgescheiden mogelijke ruimte te voorzien.

## 6.6 HYDROGEN VEHICLES AND INFRASTRUCTURE IN VIEW OF EUROPEAN LICENSING

Dit document, dat werd geschreven door Messer Griesheim GmbH in de schoot van het European Integrated Hydrogen Project (EIHP), is een vooruitgangsrapport en niet zozeer een code van goede praktijk.

Het wordt hier toch aangehaald, gezien de nuttige aanbevelingen met betrekking tot de zogenaamde interface voor verdeelstations die werken met vloeibare waterstof.  
Deze interface is te vergelijken met de klassieke tankhaspel, uiteraard aangepast aan de specifieke eisen die werken met cryogene vloeistoffen hieraan stelt. Dergelijke interface moet volgens het rapport aan volgende voorwaarden voldoen:

- Overeenstemmen met de ISO 13984 (LH2 – Land vehicle refuelling system interface)
- Geschikt voor publiek gebruik (gebruik door leken, ergonomisch verantwoord en geen noodzaak voor extra persoonlijke beschermingsmiddelen)
- Geschikt voor werking bij normale weersomstandigheden
- Eén koppeling voor alle mogelijke verbindingen (vullen, gasretour, aarding...)
- Grote betrouwbaarheid van de veiligheidsfuncties
- Betaalbaar
- Veilig

Het is zeer belangrijk dat waterstof niet de kans krijgt te ontsnappen en dat lucht geen kans krijgt in het systeem door te dringen, zowel voor de tank zelf als voor het verdeelapparaat.  
Systemen die voldoen aan de eisen zijn reeds ontworpen en zijn voorzien van het zogenaamde CBC-systeem (Clean Break Coupling) die aan bovenstaande eisen voldoet, en van de nodige sensoren.  
Testing van deze systemen is nog steeds gaande.



## HOOFDSTUK 7 : INTERNATIONALE REFERENTIES

---

Bij het onderzoek naar internationale referenties is gebleken dat er weinig elementen zijn die niet minstens gemeenschappelijk zijn aan hetgeen in voorgaande hoofdstukken werd besproken.

Gezien de sterke internationalisering van standaardisatie en normalisatie, kan men ervan uitgaan dat er geen specifieke normen zijn die enkel nationaal gelden en dus nog niet werden aangehaald.

### 7.1 DUITSLAND

TRG is een deel Duitse regelgeving en staat voor *Technische Regeln Druckgase*.

Het verenigt alle technische vereisten met betrekking tot drukvaten. Dit levert geen nieuwe elementen op, aangezien het gebaseerd is op de PED richtlijn die van toepassing is in heel Europa.

Hoofdstuk 400, waarvan de TRG 406 een onderdeel is, zijn alle vereisten voor de vulstations, die werken met gecompriëerde gassen.

TRG 406 is nog maar een voorstel en behandelt de technische vereisten voor verdeelstations van gecompriëerde gassen. De bepalingen hierover zijn sterk gelinkt met de EIGA-documenten, de NFPA standaarden en de Europese Code van Goede praktijk.

### 7.2 IJSLAND

In IJsland wordt veel onderzoek gedaan naar het transporteren van waterstof per boot en dit in grote hoeveelheden.

IJsland beschikt over talrijke bronnen van hernieuwbare energie het waarmee gemakkelijk waterstof zou kunnen produceren. IJsland onderzoekt daarom of het waterstof kan aanmaken en transporteren naar het buitenland, binnen de grenzen van het economisch haalbare.

Verder werken ze mee aan tal van Europese projecten. Specifieke informatie die in IJsland beschikbaar zou zijn, is dus reeds opgenomen in de besproken teksten en omgekeerd.

### 7.3 DE VERENIGDE STATEN VAN AMERIKA

Het Department of Energy (DOE) beschikt over een volledige afdeling die zich bezighoudt met de aspecten van waterstof.

## 7.4 CANADA

Canada speelt een voortrekkersrol binnen het technische comité TC197 van de ISO. Er werden geen nieuwe elementen gevonden relevant voor het onderzoek.

## 7.5 DENEMARKEN

Er werden geen aanvullende elementen gevonden, relevant voor het onderzoek. Denemarken maakt deel uit van het Europees onderzoeksproject.

---

## HOOFDSTUK 8 : CONCLUSIE

---

Elke activiteit met betrekking tot waterstof is vergunningsplichtig. Daarbij is rekening te houden met de schaal van deze activiteit.

Indien meer dan 5 ton waterstof aanwezig kan zijn, valt de activiteit onder de toepassing van de Seveso Richtlijn. Bij meer dan 50 ton waterstof is een kwantitatieve risicoanalyse (QRA) nodig. De vergunningsverlener zal hiermee rekening houden.

In ieder geval zal te allen tijde rekening gehouden worden met de veiligheidsafstanden die worden opgelegd in de verschillende normen voor de uitbating van waterstofsysteem. Mogelijk kan dit aangevuld worden met elementen uit de QRA.

Voor de plaatsgebonden activiteiten, productie, distributie en opslag, gelden zowel de codex met betrekking tot welzijn op het werk als het AREI. Ook de PED-richtlijn en de verschillende ATEX-richtlijnen zijn hierop van toepassing.

Met betrekking tot het transport van waterstof moet steeds verwezen worden naar de desbetreffende conventies, waaronder ADR en RID.

Ten slotte zijn er de normen en de codes van goede praktijk. Het is voorlopig wachten op de harmonisatie van de normen en in vele gevallen de definitieve goedkeuring. Desalniettemin leveren ze bijzonder veel nuttige elementen op waarmee zal worden rekening gehouden bij het formuleren van vergunningsvoorwaarden.



**VINÇOTTE ENVIRONMENT**

Contactadres: Business Class Kantorenpark • Jan Olieslagerslaan 35 • 1800 Vilvoorde • België  
Tel +32 (0)2 674 57 11 • fax +32 (0)2 674 51 82 • environment@vincotte.be • www.vincotte.com

Sociale Zetel: Diamant Building • A. Reyerslaan 80 • 1000 Brussel • België

Safety, quality and environmental services

Contract beheerd door **SECTIE STUDIES**

STUDIE BETREFFENDE DE TECHNISCHE EN  
REGLEMENTAIRE ANALYSE VAN DE MARKT VAN  
WATERSTOF ALS ENERGIEVECTOR VOOR  
AUTOMOBIEL- EN STATIONTOEPASSINGEN

FASE 3

TYPEVOORWAARDEN

**BIM**  
**GULLEDELLE 100**  
**1200 BRUSSEL**

REFERENTIE : **5RE-52-60166311-03-001**

**Maart 2007**

# INHOUDSTAFEL

<b>HOOFDSTUK 1 : Inleiding</b> .....	<b>4</b>
1.1 Inleiding .....	4
1.2 Context en doel van de opdracht .....	4
1.3 Methodologie .....	5
<b>HOOFDSTUK 2 : Typevoorwaarden</b> .....	<b>6</b>
2.1 Exploitatievoorwaarden met betrekking tot inrichtingen voor het verdelen van gasvormig waterstof als brandstof voor automobieltoepassingen.....	6
1. Definities .....	6
2. Ontwerp, constructie en inbedrijfstelling van de installatie(s) .....	6
2.1. Regelgeving en normen .....	6
2.2. Locatie van het waterstofsysteem en van het waterstofverdeelstation .....	7
2.3. Veiligheidsafstanden .....	8
2.4. Ontwerp .....	9
2.4.1. Algemeen .....	9
2.4.2. Elektrische installaties.....	10
2.4.3. Vereisten voor gebouwen of lokalen waarin een waterstofsysteem aanwezig is .....	10
2.4.4. Leidingssystemen .....	11
2.4.5. Afsluitkleppen .....	11
2.1.1.1. Afsluitklep voor elke waterstofopslageenheid.....	11
2.1.1.2. Hoofdafsluitklep .....	12
2.1.1.3. Noodafsluitklep.....	12
2.1.1.4. Afsluitklep tussen verdeelinstallatie en voertuig .....	12
2.4.6. Overdrukventielen .....	12
2.4.7. Afblaasleidingen .....	13
2.4.8. Waterstofverdampers .....	13
2.4.9. Verdeelinstallatie .....	13
2.5. Inbedrijfstelling .....	14
3. Exploitatie van de inrichting .....	15
3.1. Algemeen .....	15
3.2. Markering van gevaarlijke zones.....	15
3.3. Normaal bedrijf van de inrichting.....	15
3.4. Onderhoud en herstellingswerkzaamheden .....	16
3.5. Register .....	17
4. Veiligheid.....	17
4.1. Algemeen .....	17
4.2. Brandbestrijding .....	17
4.3. Personeel.....	18
2.2 Exploitatievoorwaarden met betrekking tot inrichtingen voor het verdelen van vloeibaar waterstof als brandstof voor automobieltoepassingen.....	19
1. Definities .....	19
2. Ontwerp, constructie en inbedrijfstelling van de installatie(s) .....	19
2.1. Regelgeving en normen .....	19
2.2. Locatie van het waterstofsysteem en van het waterstofverdeelstation .....	20
2.3. Veiligheidsafstanden .....	21
2.4. Ontwerp .....	22
2.4.1. Algemeen .....	22

2.4.2. Elektrische installaties.....	23
2.4.3. Vereisten voor gebouwen of lokalen waarin een waterstofsysteem aanwezig is.....	23
2.4.4. Leidingsystemen .....	24
2.4.5. Afsluitkleppen .....	24
2.2.1.1. Afsluitklep voor elke waterstofopslageenheid.....	25
2.2.1.2. Hoofdafsluitklep .....	25
2.2.1.3. Noodafsluitklep.....	25
2.2.1.4. Afsluitklep tussen verdeelinstallatie en voertuig.....	25
2.4.6. Overdrukventielen .....	25
2.4.7. Afblaasleidingen .....	26
2.4.8. Verdeelinstallatie .....	26
2.5. Inbedrijfstelling .....	27
3. Exploitatie van de inrichting .....	27
3.1. Algemeen .....	27
3.2. Markering van gevaarlijke zones.....	28
3.3. Normaal bedrijf van de inrichting.....	28
3.4. Onderhoud en herstellingswerkzaamheden .....	29
3.5. Register .....	30
4. Veiligheid.....	30
4.1. Algemeen .....	30
4.2. Brandbestrijding.....	30
4.3. Personeel.....	31

# HOOFDSTUK 1 : INLEIDING

---

## 1.1 INLEIDING

Voorliggende studie betreft de uitvoering van fase 3 van de studie betreffende de technische en reglementaire analyse van de markt van waterstof als energievector voor automobiel- en stationtoepassingen.

Deze studie wordt opgesteld in opdracht van:

BRUSSELS INSTITUUT VOOR MILIEUBEHEER (BIM)  
GULLEDELLE 100  
B – 1200 BRUSSEL

Fase 3 betreft het opstellen van exploitatievoorwaarden voor waterstofstations, het opstellen van een checklist en het opstellen van een gids ten behoeve van de ambtenaren die belast zijn met de behandeling van de aanvraagdossiers.

## 1.2 CONTEXT EN DOEL VAN DE OPDRACHT

In het streven om de verdere economische ontwikkeling van onze geïndustrialiseerde maatschappij te verenigen met de beperking van de verontreinigende emissies, beschouwen velen waterstof als één van de meest veelbelovende alternatieve brandstoffen. Het gaat immers om een zuivere energiebron die uit eender welk basismateriaal kan worden aangemaakt.

Als vervangbrandstof voor vervoer kan waterstof rekenen op de bijzondere belangstelling van de grote autoconstructeurs die, geruggensteund door de overheid van de industrielanden, miljarden dollars investeren in de ontwikkeling van personenauto's, autobussen en vrachtauto's die op waterstof rijden. Terzelfder tijd wordt het probleem van de productie, opslag en distributie van waterstof bestudeerd, wat tot de geleidelijke installatie van 'waterstofstations' leidt.

Het resultaat van die inspanningen krijgt nu concreet vorm in tal van Europese steden, waar diverse demonstratieprojecten en langdurige testen met waterstofvoertuigen en –stations lopen. Brussel is geen uitzondering.

Het Brussels Hoofdstedelijk Gewest heeft als doel met deze studie het gebruik van waterstof als energievector op zowel technologische als reglementair vlak in kaart te brengen en daarbij de veiligheidsvoorschriften, de industriële specificaties en de procedures voor de periodieke inspectie van de installaties en de bestaande brandstofsyste men te analyseren. Op deze manier kan het Gewest een antwoord bieden op het groeiend aantal aanvragen voor de installatie en exploitatie van (tijdelijke of definitieve) waterstofstations op zijn grondgebied.

Met deze studie wil het Brussels Hoofdstedelijk Gewest dan ook deze nieuwe technologie van nabij volgen om zo een bijdrage te leveren aan een duurzame mobiliteit.

### 1.3 METHODOLOGIE

Fase 3 van voorliggende studie betreft het opstellen van typevoorwaarden voor de exploitatie van waterstofstations. Daarnaast worden ter verduidelijking van deze typevoorwaarden documenten opgesteld ten behoeve van de ambtenaren die belast zijn of zullen worden met het behandelen van aanvraagdossiers.

De typevoorwaarden, alsook de daarbij horende documenten, zijn gebaseerd op de voorwaarden die met het oog op het exploiteren van waterstofverdeelstations zijn opgesteld door het Brussels Instituut voor Milieubeheer. Ze zullen daarnaast rekening houden met alle elementen die worden aangereikt vanuit fase 1 en 2 van deze studie.

Deze typevoorwaarden zullen in belangrijke mate beïnvloed worden door bestaande regelgeving, uiteraard rekening houdend met de specifieke realiteit, zowel op economisch als op veiligheidsniveau, aanwezig in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest.

De typevoorwaarden zullen opgebouwd worden volgens het onderstaande stramien:

- Titel der aanduiding van het toepassingsgebied van de typevoorwaarden;
- Typevoorwaarden voor het ontwerp en de constructie van de installatie(s);
- Typevoorwaarden voor de exploitatie van de inrichting(en);
- Aanduiding van de referenties naar regelgeving en/of normen.

Ter wille van de duidelijkheid en leesbaarheid zullen typevoorwaarden opgesteld worden voor verdeelstations voor gasvormig waterstof en voor vloeibaar waterstof.



## HOOFDSTUK 2 : TYPEVOORWAARDEN

Paragraaf 2.1 bevat de typevoorwaarden voor verdeelstations van gasvormig waterstof. Paragraaf 2.2 bevat de typevoorwaarden voor verdeelstations van vloeibaar waterstof. Elk van beide paragrafen draagt de titel zoals bedoeld in paragraaf 1.3.

De daaropvolgende titelnummering volgt niet het klassieke patroon, doch hetwelk het meest wenselijk lijkt voor de structuur van de voorwaarden.

### 2.1 EXPLOITATIEVOORWAARDEN MET BETREKKING TOT INRICHTINGEN VOOR HET VERDELEN VAN GASVORMIG WATERSTOF ALS BRANDSTOF VOOR AUTOMOBIELTOEPASSINGEN

#### 1. DEFINITIES

**Waterstofverdeelstation:** station bestemd voor de bevoorrading van autovoertuigen met waterstof onder druk of met vloeibaar gemaakt waterstof

**Waterstofsysteem:** dat gedeelte van de installatie verstaan waar waterstof opgeslagen en eventueel behandeld wordt. Het betreft onder meer opslagtanks, tussenopslagtanks, compressoren, filtereenheden, verdeeleenheden en de bijhorende appendages.

**Verdeelpunt:** Inrichting (flexibele slang en handvat) die de bevoorrading van de autovoertuigen met waterstof onder druk of met vloeibaar gemaakt waterstof mogelijk maakt.

**Verdeelinstallatie:** Inrichting met de flexibele slang(en), handvat(en) en meter(s) uitsluitend bestemd voor de bevoorrading van de autovoertuigen met waterstof onder druk of met vloeibaar gemaakt waterstof.

**Bevoorradingsplaats:** Plaats waar het voertuig moet parkeren tijdens de bevoorrading; de bevoorradingsplaats moet duidelijk door een merkteken op de grond worden aangeduid. **IN VOORWAARDEN ZELF VERMELDEN OOK NIET BIJ DEFINITIES**

#### 2. ONTWERP, CONSTRUCTIE EN INBEDRIJFSTELLING VAN DE INSTALLATIE(S)

##### 2.1. Regelgeving en normen

Het waterstofverdeelstation moet in overeenstemming zijn met de volgende richtlijnen:

- Richtlijn 97/23/EG van het Europees Parlement en de Raad van 29 mei 1997 inzake de onderlinge aanpassing van de wetgevingen der lidstaten betreffende drukapparatuur.
- Richtlijn 94/9/EG van het Europees Parlement en de Raad van 23 maart 1994 inzake de onderlinge aanpassing van de wetgevingen van de Lid-Staten betreffende apparaten en

beveiligingssystemen bedoeld voor gebruik op plaatsen waar ontploffingsgevaar kan heersen.

- Richtlijn 1999/92/EG van het Europees Parlement en de Raad van 16 december 1999 betreffende minimumvoorschriften voor de verbetering van de gezondheidsbescherming en van de veiligheid van werknemers die door explosieve atmosferen gevaar kunnen lopen

Het waterstofverdeelstation moet eveneens in overeenstemming zijn met de volgende normen en reglementen:

- NBN 69: Kleuren voor het merken van pijpleidingen voor het vervoer van vloeibare of gasvormige stoffen in landinstallaties en aan boord van schepen
- NBN C23: Elektrisch materieel voor ontploffingsgevaarlijke atmosferen
- NBN D51-004: Installaties voor brandbaar gas lichter dan lucht, verdeeld door leidingen
- NBN S21-001 t.e.m. NBN S21-018 Reddings- en brandweermaterieel
- NBN X08-001: Veiligheidskleuren en -tekens
- NBN X08-002: Veiligheidskleuren - Kleur- en lichtmetingskenmerken van de materialen
- AREI: Algemeen reglement betreffende de elektrische installaties
- ARAB: Algemeen reglement betreffende de arbeidsbescherming

## 2.2. Locatie van het waterstofsysteem en van het waterstofverdeelstation

Verdeelstations voor gasvormig waterstof, inclusief het waterstofsysteem, zijn zo gelegen dat ze eenvoudig toegankelijk zijn voor:

- Leveringen van waterstof
- Geautoriseerd personeel
- Het bestrijden van brand

Het waterstofsysteem, dat onder meer de opslagtanks, compressoren enzovoorts inhoudt, bevindt zich hetzij in de open lucht, hetzij in een daarvoor geschikt gemaakt lokaal of gebouw. Het ontwerp van het systeem zal aan de specifieke locatie worden aangepast.

De verdeelinstallaties bevindt zich in de open lucht. De ligging van het verdeelstation moet het mogelijk maken alle aanwezige personen in de omgeving eenvoudig te evacueren in geval van nood.

De ligging van de volledige inrichting is zo opgevat dat ingeval van falen van één van onderstaande elementen een voldoende afstand wordt verzekerd tussen het falend onderdeel en het waterstofsysteem

- Hoogspanningslijnen
- Leidingen en opslagplaatsen van brandbare en ontvlambare producten
- Leidingen en opslagplaatsen van brandbare en ontvlambare gassen
- Leidingen en opslagplaatsen van oxiderende materialen

Om de afstand tot een falend onderdeel te bepalen, wordt gebruik gemaakt van de definitie van mogelijke emissiebron. Leidingssystemen worden enkel beschouwd als een emissiebron, op punten waar de leiding onderbroken wordt door koppelingen, zoals flenzen, kleppen, aansluitingspunten en dergelijke. Het is tot deze onderdelen dat de veiligheidsafstanden zoals hierboven bedoeld, bepaald worden.

Alle systemen die waterstof bevatten, beschikken over de nodige voorzorgsmaatregelen, die de installatie moeten beschermen tegen externe schadelijke invloeden, zoals vrijzetting van brandbaar of ontvlambaar materiaal, aanrijding bij levering of door wagens, manipulatie door onbevoegden, enzovoorts.

De installaties, andere dan de verdeelinstallatie voor het kunnen verdelen van waterstof naar voertuigen moet bovendien afgeschermd worden van het publiek door middel van een stalen hekwerk of een gelijkaardige structuur met een minimum hoogte van 1,8 meter.

### 2.3. Veiligheidsafstanden

Tussen het waterstofsysteem, inclusief verdeelinstallaties en opslag, en gespecificeerde omgevingsobjecten zal een minimum veiligheidsafstand gewaarborgd worden, gemeten vanaf de verschillende punten in het waterstofsysteem waar mogelijk vrijzetting van waterstof kan optreden. Indien het waterstofsysteem of delen ervan in een gebouw staan opgesteld, wordt de minimum veiligheidsafstand gemeten vanaf de openingen in het gebouw waardoor waterstof zich kan verspreiden.

Leidingsystemen worden enkel beschouwd als een emissiebron van waterstof, op punten waar de leiding onderbroken wordt door koppelingen, zoals flenzen, kleppen, aansluitingspunten en dergelijke.

Veiligheidsafstanden zijn afhankelijk van de opgeslagen hoeveelheid.

Van deze veiligheidsafstanden kan afgeweken worden mits de voorziening van daartoe geschikte veiligheidsvoorzieningen en dient te gebeuren op basis van een veiligheidsstudie, die rekening zal houden met de aard en de eigenschappen van de emissiebron.

De minimum te bewaren veiligheidsafstanden zijn gegeven in onderstaande tabel:

<b>Tabel # 2.1 : Veiligheidsafstanden i.f.v. waterstofopslag</b>			
ACTIVITEIT/OBJECT	VEILIGHEIDSAFSTAND		
	< 99 m <sup>3</sup>	99–425 m <sup>3</sup>	> 425 m <sup>3</sup>
Gebouw of structuur, waarvan de muur aanpalend aan het te bouwen systeem is opgetrokken uit niet-brandbare of beperkt brandbare materialen, uitgerust met een sprinklersysteem of met een brandweerstand van meer dan 2h (b).	0 m (a)	1,5 m (a)	1,5 m (a)
Gebouw of structuur, waarvan de muur aanpalend aan het te bouwen systeem is opgetrokken uit niet-brandbare of beperkt brandbare materialen, niet uitgerust met een sprinklersysteem of met een brandweerstand minder dan 2h (b).	0 m (c)	3 m	8 m
Gebouw of structuur waarvan de muur aanpalend aan het bouwen systeem is opgetrokken uit andere dan niet-brandbare of beperkt brandbare materialen	3 m	8 m	15 m
Opening in muren, niet boven een onderdeel van een bepaalde installatie	3 m	3 m	3 m
Opening in muren boven een onderdeel van een bepaalde installatie	8 m	8 m	8 m
Bovengrondse opslag van brandbare vloeistoffen: 0 – 4000 liter	3 m	8 m	8 m
Bovengrondse opslag van brandbare vloeistoffen: meer dan 4000 liter	8 m	15 m	15 m
Ondergrondse opslag van brandbare vloeistoffen: 0 – 4000 liter	3 m	3 m	3 m
Ondergrondse opslag van brandbare vloeistoffen: meer dan 4000 liter	6 m	6 m	6 m
Ontluchtingspijpen of vulopeningen van ondergrondse tanks	8 m	8 m	8 m
Opslag van brandbare gassen: 0 – 250 m <sup>3</sup>	3 m	8 m	8 m
Opslag van brandbare gassen: meer dan 250 m <sup>3</sup>	8 m	15 m	15 m

Opslag van snel brandende vaste stoffen (timmerhout, papier...)	15 m	15 m	15 m
Opslag van traag brandende vaste stoffen (zwaar hout, kolen...)	8 m	8 m	8 m
Ontstekingsbronnen (op grondniveau)	8 m	8 m	8 m
Verdeelinstallatie(s) voor voertuigen	5 m	5 m	5 m
Aanzuigopeningen voor luchtcompressoren, ventilatiesystemen...	15 m	15 m	15 m
Bovengrondse elektriciteitsleidingen (incl. tramleidingen)	15 m	15 m	15 m
Plaatsen waar veel mensen samenkomen	8 m	15 m	15 m
Publieke stoepen en parkeerstroken	5 m	5 m	5 m
Grens met aangrenzende bebouwbare ruimtes	1,5 m	1,5 m	1,5 m

- (a) Muren of delen ervan op een horizontaal gemeten afstand van minder dan 3 meter van elk deel van het waterstofsysteem, moet een brandweerstand hebben van minstens 30 minuten.
- (b) Deuren en ramen in een gebouw of structuur vallen niet onder bepalingen voor dit gebouw of structuur, maar kennen een eigen minimum veiligheidsafstand.
- (c) Muren of delen ervan op een horizontaal gemeten afstand van minder dan 3 meter van elk deel van het waterstofsysteem, moet een brandweerstand hebben van minstens 1 uur.
- (d) De minimale veiligheidsafstand is steeds groter dan de helft van de hoogte van de aanpalende muur.

Voor het vulpunt van de waterstofopslag gelden dezelfde minimum veiligheidsafstanden als voor de rest van het waterstofsysteem.

De exploitant voorziet in een grondplan van de inrichting waarop wordt aangetoond dat de veiligheidsafstanden gerespecteerd worden.

Binnen deze afstand worden specifieke zones gedefinieerd, conform de bepalingen van het AREI, met betrekking tot plaatsen waar ontploffingsgevaar heerst als gevolg van ontplofbare atmosferen. De zones worden aangeduid op een plan.

Het document "Gaseous Hydrogen Vehicle Refuelling Stations" opgesteld in het kader van het European Integrated Hydrogen Project (EIHP2) geeft een voorstel over de zonering van het waterstofsysteem. Dit voorstel kan slechts dienen als leidraad.

Binnen deze zones zal enkel daarvoor bestemd materiaal gebruikt worden, conform de van toepassing zijnde regelgeving.

## 2.4. Ontwerp

### 2.4.1. Algemeen

Het waterstofsysteem moeten worden ontworpen, gebouwd en getest volgens de van toepassing zijnde richtlijnen met betrekking tot drukvaten en met betrekking tot gasleidingen en in overeenstemming met alle wettelijke bepalingen.

Alle gebruikte materialen voor het waterstofsysteem zijn geschikt voor waterstoftoepassingen. Maatregelen tegen corrosie van deze materialen worden genomen.

Het waterstofsysteem is aangepast aan de werkdruk en kan enkel op die druk uitgebraat worden. Elke verbinding in het systeem is minimum voorzien op de werkdruk en op het gebruik van waterstof.

Elke constructie, opgetrokken ter bescherming van het waterstofsysteem, bestaan uit beperkt of niet-brandbare materialen.

Overkappingen van enig deel van het waterstofsysteem zal de snelle diffusie van waterstof niet tegengaan en zal zo opgevat zijn dat ophoping van waterstof niet mogelijk is. Waar nodig zal hiertoe een ventilatiesysteem geïnstalleerd worden.

Het waterstofsysteem, inclusief mobiele onderdelen ervan, moet worden geaard, vooraleer het systeem in werking treedt.

Bevoorravingsvrachtwagens kunnen niet dienen als opslagplaats waarop de waterstofverdeelinstallatie is aangesloten, ook al zijn de vrachtwagens verankerd.

#### 2.4.2. Elektrische installaties

De elektrische installaties voldoen aan de bepalingen van het AREI.

De elektrische installaties die worden ingezet in zone waar een ontplofbare atmosfeer kan voorkomen, zal hiervoor geschikt zijn, volgens de zones die overeenkomstig gedefinieerd werden.

Waterstofopslagtanks in de open lucht zijn voorzien van een bliksemafleider met een elektrische weerstand minder dan 10 ohm.

De conformiteit van de volledige elektrische installatie wordt geattesteerd door een controleorganisme, erkend door het ministerie van Arbeid en Tewerkstelling.

#### 2.4.3. Vereisten voor gebouwen of lokalen waarin een waterstofsysteem aanwezig is

Volgende bepalingen gelden voor delen van het waterstofsysteem die worden geïnstalleerd in daartoe voorziene lokalen.

Gebouwen (of lokalen) waarin een waterstofsysteem aanwezig is, zijn hiervoor ontworpen, en bestaan uit één bouwlaag.

Elk lokaal waar waterstof aanwezig kan zijn, beschikt over voldoende ventilatie, met inlaat nabij het grondniveau en uitlaat naar het hoogste punt van het lokaal. Zowel de in- als de uitlaatpunten van het ventilatiesysteem leiden direct naar de atmosfeer. Passende maatregelen worden voorzien opdat in- en uitlaatpunten mogen niet geblokkeerd worden

De werking van het ventilatiesysteem wordt bewaakt.

Het gebouw is opgetrokken in beperkt en/of niet-brandbare materialen en beschikt over een brandweerstand overeenkomstig de daarvoor geldende bepalingen.

Ramen en deuren worden zo geplaatst dat ze gemakkelijk bereikbaar zijn in geval van nood. Deuren die niet onmiddellijk naar buiten leiden, worden ontworpen als branddeuren, overeenkomstig de bepalingen van artikel 52 van het Algemeen Reglement voor de Arbeidsbescherming (Artikel 52 van Afdeling V (voorzorgen tegen brandgevaar, ontploffingen en de toevallige ontsnapping van schadelijke of ontvlambare gassen), van hoofdstuk I (bepalingen betreffende de veiligheid van de arbeiders), van de titel II (algemene bepalingen betreffende de arbeidshygiëne alsmede de veiligheid en de gezondheid van arbeiders) van het ARAB).

Het gebouw is voorzien van alle maatregelen die moeten verhinderen dat waterstof kan doordringen in of naar plaatsen die hierop niet voorzien zijn, zoals elektrische leidingen, aanpalende ruimtes, dienstkokers...

Minstens één buitenmuur of het dak van het gebouw of lokaal waarin een waterstofsysteem aanwezig is, fungeert als explosieluik voor drukontlasting, dat zo ontworpen is dat het niet leidt tot rondvliegende projectielen.

Alle lokalen zijn voorzien van een verlichtingssysteem, geschikt voor de desbetreffende gevaarlijke zone, die te allen tijde een voldoende verlichting garandeert voor het veilig uitvoeren van alle handelingen met betrekking tot het waterstofsysteem.

Verwarming van de lokalen, indien nodig, zal gebeuren met behulp van stoom, warm water of andere manieren van indirecte verwarming. Elektrische verwarming is toegelaten, indien in overeenstemming met de vereisten voor gebruik in gevaarlijke zones. Verontreiniging met waterstof van de verwarmingsinstallatie zal verhinderd worden.

#### 2.4.4. Leidingsystemen

Alle leidingen die waterstof bevatten zijn daarvoor ontworpen en zijn voorzien van hiervoor geldende kleurencodes.

De leidingen zijn voorzien van kleppen, die het waterstofsysteem veilig kunnen afsluiten in geval van nood. Elk deel van de leiding waarin een hogere druk kan voorkomen dan de maximum werkingsdruk, moet voorzien zijn van overdrukventielen.

Zowel bovengrondse als ondergrondse leidingen zijn beschermd tegen corrosie en externe impact.

Ondergrondse leidingen worden in één stuk gelast, liggen op een minimumdiepte van 600 mm en worden voorzien van waarschuwing lint en afdekplaten. Kathodische beschermingssystemen voor dergelijke leidingen mogen geen invloed hebben op andere installaties.

Indien waterstofleidingen gelegd worden in goten waarin zich ook elektrische leidingen bevinden, zal de waterstofleiding in één stuk gelast worden. Een minimum afstand van 50 mm tussen de waterstofleiding en de elektrische leiding moet gerespecteerd worden.

Indien waterstofleidingen gelegd worden in goten waarin zich ook leidingen die andere producten bevatten, bevinden, zal de waterstofleiding hoger gelegd worden dan de andere leidingen.

#### 2.4.5. Afsluitkleppen

Het waterstofsysteem is uitgerust met afsluitkleppen die elk van de verschillende eenheden van het waterstofsysteem kan isoleren van elkaar.

De kleppen zijn voorzien op het werken met waterstof en aan de heersende condities. Elke klep zal voorzien zijn van een permanente aanduiding.

Idealiter worden vier manueel bedienbare afsluitkleppen voorzien op elke afzonderlijke leiding tussen een waterstofopslageenheid en de interface verdeelinstallatie – voertuig (vulkop), zoals hieronder beschreven:

##### 2.1.1.1. Afsluitklep voor elke waterstofopslageenheid

Elke afzonderlijke waterstofopslageenheid is manueel afsluitbaar van de rest van het systeem. Hiervoor wordt een afsluitklep voorzien naast elke eenheid, aan het begin van de leiding die de verdeelinstallaties bedient, maar binnen de van het publiek afgeschermd zone.

#### 2.1.1.2. Hoofdafsluitklep

Het volledige waterstofsysteem dat zich na de opslag bevindt, moet afgesloten kunnen worden van de opslag waarop het is aangesloten. Hiervoor wordt een manueel bedienbare afsluitklep voorzien buiten de van het publiek afgeschermd zone. De afsluitklep werkt in één richting en mag niet zonder meer terug geopend worden na sluiting.

Het bedienen van de hoofdafsluitklep moet er tevens toe leiden dat de spanning over verdeelinstallatie wordt afgesloten.

Waar de verdeelinstallaties in de onmiddellijke omgeving van de opslageenheden zijn opgesteld, kan deze afsluitklep eveneens dienen als noodklep (zie verder).

De hoofdafsluitklep wordt duidelijk en ondubbelzinnig aangeduid in een passende lettergrootte en op een contrasterende achtergrond. De sluitrichting wordt, indien nodig, duidelijk aangegeven.

#### 2.1.1.3. Noodafsluitklep

In een voor iedereen gemakkelijk te bereiken positie wordt een noodafsluitklep voorzien. Deze noodafsluitklep staat opgesteld buiten de gevaarlijke zone die gecreëerd wordt door de aanwezigheid van de verdeelinstallatie (conform de zonering), maar wel in de onmiddellijk bereikbare omgeving ervan.

Het bedienen van de noodafsluitklep moet er tevens toe leiden dat de spanning over verdeelinstallatie wordt afgesloten.

In geval van meerdere verdeelinstallaties zullen zoveel noodafsluitkleppen voorzien worden als nodig, in functie van de onmiddellijke bereikbaarheid ervan voor elke persoon die een van deze verdeelinstallaties bedient.

De hoofdafsluitklep kan functioneren als noodafsluitklep op voorwaarde dat deze hoofdafsluitklep onmiddellijk kan bereikt worden in geval van nood.

De noodafsluitklep wordt duidelijk en ondubbelzinnig aangeduid in een passende lettergrootte en op een contrasterende achtergrond. De sluitrichting wordt, indien nodig, duidelijk aangegeven.

#### 2.1.1.4. Afsluitklep tussen verdeelinstallatie en voertuig

Elke verdeelslang voor waterstof moet ter hoogte van de vulmond voorzien zijn van een afsluitklep, die het veilig verdelen van waterstof mogelijk maakt. Deze afsluitklep is voorzien van een ventiel voor residuele drukontlasting na elke tankbeurt. Deze drukontlasting gebeurt op een manier dat geen bijkomend risico wordt gecreëerd.

#### 2.4.6. Overdrukventielen

Overdrukventielen worden zo geplaatst en ingesteld in het waterstofsysteem dat het tijdens normaal bedrijf onmogelijk is hogere drukken dan de maximum toegelaten werkdruk te bekomen. Het overdrukventiel is zo ontworpen en ingesteld dat de maximaal voorkomende druk in het systeem nooit meer bedraagt dan 20% van de toegelaten werkdruk.

Overdrukventielen worden zo ontworpen en geplaatst dat vocht of andere contaminanten door bevrozing de goede werking van deze ventielen nooit kunnen verstoren.

De overdrukventielen worden zo ontworpen en geplaatst dat eventuele emissies geen bijkomend risico opleveren voor aanwezige structuren, opslagtanks of personen. Emissies naar plaatsen waar waterstof zich mogelijk kan ophopen is verboden.

Overdrukventielen worden zo ontworpen, geplaatst en bevestigd dat ze bestand zijn tegen de hogere drukken die resulteren uit een mogelijke emissie.

#### 2.4.7. Afblaasleidingen

Het waterstofsysteem moet voorzien zijn van afblaasleidingen voor het afblazen van waterstof naar de atmosfeer.

Op de afblaasleiding zijn geen structuren of apparatuur toegelaten die de vrije uitstroom van waterstof in voorkomend geval verhinderen.

De keuze van het materiaal van de afblaasleiding moet compatibel zijn met het gebruik van waterstof en de kans op ontsteking van geëmitteerd waterstof verhinderen.

Afblaasleidingen worden zo ontworpen, geplaatst en bevestigd dat ze bestand zijn tegen de hogere drukken die resulteren uit een mogelijke emissie.

De afblaasleidingen zijn zo ontworpen en geplaatst dat eventuele emissies geen bijkomend risico opleveren voor aanwezige structuren, opslagtanks of personen. Emissies naar plaatsen waar waterstof zich mogelijk kan ophopen is verboden.

#### 2.4.8. Waterstofverdampers

Indien de exploitatie voorziet in het verdampen van vloeibaar waterstof tot gasvormig waterstof, gelden volgende bepalingen. Voor de opslag van vloeibaar waterstof gelden de typevoorwaarden van toepassing op het verdelen van vloeibare waterstof.

Installaties voor het verdampen van vloeibare waterstof zijn zo ontworpen en gebouwd dat ze de expansie als gevolg van temperatuurschommelingen kunnen opvangen.

De installatie is voorzien van overdrukventielen.

De nodige maatregelen worden genomen om te voorkomen dat waterstofverdampers kunnen bevriezen.

#### 2.4.9. Verdeelinstallatie

Elke verdeelinstallatie moet afzonderlijk kunnen worden afgesloten van het waterstofsysteem, voor onderhoudsdoeleinden.

Het gebruik van elke waterstofverdeelinstallatie wordt automatisch in de controlekamer vermeld vanwaar de installatie op elk ogenblik kan worden onderbroken. Ook alle andere verdeelinstallaties andere dan voor het verdelen van waterstof, die zich in de nabije omgeving bevinden, kunnen van hieruit onderbroken worden.

Verdeelslang moet voorzien zijn van een afsluitklep, die automatisch sluit wanneer:

- De maximale opslagdruk in de voertuigtank bereikt is;
- Wanneer de druk te snel oploopt (> 30 bar/minuut)
- In geval van lek



Om dit te kunnen bewerkstelligen moet de verdeelinstallatie worden voorzien van de nodige controle- en detectievoorzieningen.

Daarnaast is de verdeelinstallatie voorzien van een uitrusting die telling van de geleverde hoeveelheden waterstof onder de verschillende werkingsomstandigheden moet mogelijk maken.

Ophoping van waterstof in de verdeelinstallatie zelf moet door het ontwerp ervan onmogelijk zijn.

De nodige voorzieningen worden genomen om schade te beperken in het geval een voertuig wegrijdt zonder dat de verdeelslang is afgekoppeld.

De verdeelslang is aangepast aan de werking met waterstof. De lengte van de verdeelslang bedraagt maximaal 5 meter. Alle voorzieningen worden genomen opdat de levering van waterstof door de verdeelslang ongehinderd kan verlopen. De verdeelslangen zijn voorzien van testcertificaten voor de specifieke werkingscondities.

Die verdeelslangen moeten goed worden onderhouden en vervangen bij misvorming of om het even welk fout.

Net voor de verdeelslang wordt een klep voorzien die een overmatig debiet naar de slang verhindert.

Verdeelinstallaties moeten zo worden opgesteld dat voertuigen niet doorheen een gevaarlijke zone moeten rijden, zoals gedefinieerd in de zoneringsplannen.

Verdeelinstallaties zijn voorzien van de nodige voorzieningen om impact te voorkomen of zijn geïnstalleerd op een betonnen platform.

De verbinding tussen het voertuig en de verdeelslang is ontworpen voor het werken met waterstof. Het verbindingsstuk is samen met de verdeelslang uitgerust met een dampretourleiding die de evacuatie van waterstofgas naar een veilige locatie mogelijk maakt. Deze dampretourleiding mag geen aanleiding geven tot interferentie met het verbindingsstuk.

De verbinding is gasdicht en zorgt ervoor dat lucht het waterstofsysteem niet kan binnendringen.

## 2.5. Inbedrijfstelling

Het waterstofverdeelstation kan pas in bedrijf gesteld worden nadat:

- De exploitant over alle certificaten beschikt die de conformiteit met de betreffende richtlijnen aangeeft.
- De volledige installatie getest is voor werking op de maximale werkingsdruk. Na de druktest wordt het volledige systeem gedroogd en/of zuurstofvrij gemaakt, vooraleer het gevuld kan worden met waterstof.
- De volledige installatie getest is met betrekking tot de gasdichtheid voor het gebruik met waterstof.

De uitbater stelt een procedure op voor het testen van het volledige systeem voor inbedrijfstelling. Deze procedure vermeldt alle kritische onderdelen van het systeem. De procedure beschrijft hoe elk van deze kritische onderdelen gecontroleerd moeten worden tijdens de gasdichtheidstesten.

De controle moet instaan voor het veilig bevinden van het systeem alvorens het in werking wordt gesteld.

### 3. EXPLOITATIE VAN DE INRICHTING

#### 3.1. Algemeen

De uitbater stelt instructies met betrekking tot de werking van het waterstofverdeelstation op en stelt ze ter beschikking van het personeel. Deze instructies bevatten een begrijpbaar en duidelijk overzicht alle technische gegevens van de verschillende onderdelen van het waterstofsysteem.

#### 3.2. Markering van gevaarlijke zones

Alle gevaarlijke zones worden gemarkeerd met permanente borden die duiden op de specifieke gevaren binnen die gevaarlijke zone.

De hiervoor gebruikte tekst, opgesteld in minstens het Nederlands en het Frans, is hetzelfde als of gelijkaardig aan:

WATERSTOF – ONTVLAMBAAR GAS  
VERBODEN TE ROKEN – OPEN VUUR NIET TOEGELATEN

Daarnaast wordt markering aangebracht in overeenstemming met de ATEX-richtlijnen.

De aldus aangeduide zones mogen enkel toegankelijk zijn voor geautoriseerd personeel dat op de hoogte moet zijn van de specifieke gevaren binnen die zone.

Werken in deze zone mogen slechts uitgevoerd worden op basis van een werkvergunning, uitgegeven door een daarvoor bevoegd persoon.

Alle installaties, andere dan de verdeelinstallatie voor het kunnen verdelen van waterstof naar voertuigen, zijn ontoegankelijk voor het publiek.

#### 3.3. Normaal bedrijf van de inrichting

Onder vuloperaties wordt zowel verstaan het vullen van de opslagtanks vanuit daartoe voorziene tankwagens als het vullen van voertuigen met behulp van een verdeelinstallatie.

De verdeelpompen kunnen mobiele tanken voor waterstofgas op druk vullen op voorwaarde dat deze mobiele tanks uitgerust zijn voor het veilig overbrengen van waterstof. Alvorens de vuloperatie mag starten dient de persoon die de operatie uitvoert zich hiervan te vergewissen.

Het gebruik van de verdeelpomp wordt automatisch in de controlekamer vermeld vanwaar de pomp op elk ogenblik kan worden onderbroken. Alle andere verdeelpompen andere dan voor het verdelen van waterstof, die zich in de nabije omgeving bevinden, kunnen van hieruit onderbroken worden.

Vuloperaties kunnen slechts uitgevoerd worden in de daartoe voorziene bevoorradingsplaats en door personen die met het oog hierop op de hoogte werden gesteld van de specifieke eisen en de gevaren van het werken met waterstof en van de noodprocedures. De nodige maatregelen om dit mogelijk te maken worden getroffen.

Het voertuig moet worden geaard, alvorens de vuloperatie kan plaatsvinden.

Indien er geen voeding van waterstof is, mag de vuloperatie niet starten.

Vuloperaties kunnen slechts starten als een gasdichte verbinding tussen de verdeelinstallatie en het te vullen voertuig tot stand is gebracht.

Vuloperaties moeten onmiddellijk beëindigd worden, hetzij automatisch, hetzij manueel, wanneer:

- De maximale opslagdruk in de voertuigtank bereikt is;
- Wanneer de druk te snel oploopt (> 30 bar/minuut)
- In geval van lek

Vuloperaties moeten onmiddellijk automatisch beëindigd worden bij breuk van de verdeelslang.

Alle hoofd- en noodafsluitkleppen moeten te allen tijde bereikbaar en duidelijk leesbaar zijn. Hindernissen die zulks onmogelijk zouden maken, moeten onmiddellijk verwijderd worden.

Het voertuig dat gevuld wordt, moet de motor uitschakelen. Deze verplichting dient kenbaar gemaakt te worden met behulp van speciaal daarvoor voorziene borden.

Er mag geen gebruik gemaakt worden van verlengstukken of andere mechanische systemen voor het manipuleren van afsluiters en/of kleppen.

Afsluiters en/of kleppen mogen niet gemanipuleerd worden vooraleer de verschillende leidingen verbonden zijn.

In geval een lek wordt vastgesteld, moet onmiddellijk een veiligheidsperimeter ingesteld worden en moet de resterend hoeveelheid waterstof in het systeem geloosd worden naar atmosfeer, via de daarvoor voorziene afblaasleidingen.

Het is verboden verbindingstukken onder druk in te sluiten.

De afsluitkleppen moeten gesloten worden, wanneer het verdeelstation niet in bedrijf is.

Het is ten zeerste verboden waterstofopslagtanks te manipuleren zolang het verdeelstation in bedrijf is.

#### 3.4. Onderhoud en herstellingswerkzaamheden

Onderhoud gebeurt op systematische wijze en wordt beschreven met behulp van passende instructies, voorzien van alle nodige technische informatie.

De uitbater voorziet in een systeem dat moet toelaten defecten of lekken zo spoedig mogelijk te detecteren en in voorkomend geval te herstellen of te vervangen.

Voor elk onderdeel van het waterstofsysteem wordt een onderhoudsprogramma opgesteld en nageleefd.

Elke handeling met betrekking tot onderhoud en herstellingswerkzaamheden wordt bijgehouden in een daartoe bestemd register.

Passende aandacht gaat steeds uit naar de specifieke veiligheidsrisico's verbonden aan het werken met waterstof.

Elk onderdeel waaraan werkzaamheden worden uitgevoerd, dient vrij te zijn van waterstof.

Het waterstofsysteem zal het onderwerp zijn van een jaarlijks inspectieprogramma, uitgevoerd door een erkend controleorganisme, in overeenstemming met de geldende bepalingen.

### 3.5. Register

De uitbater houdt een register bij, waarin alle documentatie relevant voor de goede werking van het verdeelstation wordt bijgehouden. Dit register staat ter beschikking van de daarvoor bevoegde overheden.

Dit register omvat onder meer:

- Een grondplan van de inrichting waarop wordt aangetoond dat de veiligheidsafstanden gerespecteerd worden;
- De zoneringsplannen;
- Explosieveiligheidsdocument;
- De testverslagen in het kader van de inbedrijfstelling van de inrichting;
- Alle attesten en certificaten die de conformiteit van de installatie met de in deze voorwaarden opgesomde normen en reglementen aantonen;
- Attesten met betrekking tot de periodieke inspectie;
- Alle technische plannen met betrekking tot de installatie, de opslagtanks en de leidingen;
- Stroomschema's van de installatie;
- Technische gegevens van de opslagtanks;
- Instructies voor het personeel, nooddiensten en andere bevoegde personen;
- Het noodplan;
- Onderhoudsplan en onderhoudsinstructies;
- Een overzicht van de onderhoudswerken;
- Een incidentenregister.

Het register wordt bijgehouden op het waterstofverdeelstation en staat te allen tijde ter beschikking gehouden van de met de inspectie belaste ambtenaar.

## 4. **VEILIGHEID**

### 4.1. Algemeen

Het is ten strengste verboden te roken, open vuur of vlammen te maken of een GSM te gebruiken binnen de volledige perimeter van het waterstofverdeelstation. Dit zal duidelijk worden aangegeven met behulp van pictogrammen in overeenstemming met het Koninklijk Besluit van 19 september 1980 betreffende de veiligheidssignalering op de arbeidsplaatsen en tot wijziging van verscheidene artikelen van het algemeen reglement voor de arbeidsbescherming.

De opslag van andere ontvlambare stoffen is verboden, tenzij de veiligheidsafstanden gerespecteerd worden.

Het waterstofverdeelstation moet proper worden gehouden en ontdaan worden van vodden, papier, hout, droog gras en andere brandbare elementen.

### 4.2. Brandbestrijding

Het waterstofverdeelstation moet uitgerust zijn met duidelijk zichtbare en gemakkelijk te bereikbare brandmeldpunten, die het brandalarm in werking zetten.

De uitbater voorziet in een volledig uitgewerkt noodplan dat in werking treedt bij brandmelding. Het noodplan beschrijft de te volgen procedures en is uitgewerkt tot op het niveau van de verschillende onderdelen van het waterstofsysteem.

Het volledige waterstofverdeelstation beschikt over geschikte en ondubbelzinnig aangeduide evacuatiemogelijkheden, die te allen tijde vrij van obstakels gehouden dienen te worden.

Het station beschikt over brandbestrijdingsmiddelen aangepast aan de lokale risico's overeenkomstig het advies van de Brandweerdienst (Besluit van de Regering van 23 november 1993, B.S. van 30.11.93). Ze moeten perfect werken, beschermd zijn tegen vrieskou en jaarlijks door een bevoegd technicus worden onderhouden. Die brandbestrijdingsmiddelen zijn bereikbaar en oordeelkundig geplaatst. Het brandbestrijdingsmateriaal moet onmiddellijk kunnen worden gebruikt.

Indien het waterstofverdeelstation uitgerust is met branddetectoren voor de detectie van waterstofbrand zal rekening gehouden worden met volgende voorwaarden, in overeenstemming met ISO/PDTR 15916 (Basic considerations for the safety of hydrogen systems):

- Infrarood detectie apparatuur zal een waterstofbrand niet detecteren
- De aanwezigheid van een waterstofbrand kan worden gedetecteerd op basis van UV-detectie. Interferentie met bijvoorbeeld laslicht of direct zonlicht is evenwel mogelijk en kan aanleiding geven tot vals alarm.

#### 4.3. Personeel

Al het personeel dat tewerk gesteld wordt op het waterstofverdeelstation, zal daarvoor opgeleid worden.

De uitbater stelt een draaiboek voor de exploitatie van het waterstofverdeelstation ter beschikking van het personeel. Dit document is altijd ter plaatse beschikbaar en bevat instructies voor het veilig uitbaten van de inrichting. Het omvat minstens:

- De procedure voor het in bedrijf stellen en het uit bedrijf halen van de installaties bij normale omstandigheden
- Het uit bedrijf halen van de installaties bij afwijkende omstandigheden
- De richtlijnen en inlichtingen met betrekking tot de veiligheidsaspecten, inclusief het noodplan.

De uitbater neemt de nodige maatregelen om het personeel niet bloot te stellen aan de gevaren van het werken met waterstof.

De uitbater neemt de nodige maatregelen om de opbouw van statische ladingen in de werkkledij van het personeel te vermijden.

## 2.2 EXPLOITATIEVOORWAARDEN MET BETREKKING TOT INRICHTINGEN VOOR HET VERDELEN VAN VLOEIBAAR WATERSTOF ALS BRANDSTOF VOOR AUTOMOBIELTOEPASSINGEN

### 1. DEFINITIES

**Waterstofverdeelstation:** station bestemd voor de bevoorrading van autovoertuigen met waterstof onder druk of met vloeibaar gemaakt waterstof

**Waterstofsysteem:** dat gedeelte van de installatie verstaan waar waterstof opgeslagen en eventueel behandeld wordt. Het betreft onder meer opslagtanks, tussenopslagtanks, compressoren, filtereenheden, verdeeleenheden en de bijhorende appendages.

**Verdeelpunt:** Inrichting (flexibele slang en handvat) die de bevoorrading van de autovoertuigen met waterstof onder druk of met vloeibaar gemaakt waterstof mogelijk maakt.

**Verdeelinstallatie:** Inrichting met de flexibele slang(en), handvat(en) en meter(s) uitsluitend bestemd voor de bevoorrading van de autovoertuigen met waterstof onder druk of met vloeibaar gemaakt waterstof.

**Bevoorradingsplaats:** Plaats waar het voertuig moet parkeren tijdens de bevoorrading; de bevoorradingsplaats moet duidelijk door een merkteken op de grond worden aangeduid.

### 2. ONTWERP, CONSTRUCTIE EN INBEDRIJFSTELLING VAN DE INSTALLATIE(S)

#### 2.1. Regelgeving en normen

Het waterstofverdeelstation moet in overeenstemming zijn met de volgende richtlijnen:

- Richtlijn 97/23/EG van het Europees Parlement en de Raad van 29 mei 1997 inzake de onderlinge aanpassing van de wetgevingen der lidstaten betreffende drukapparatuur.
- Richtlijn 94/9/EG van het Europees Parlement en de Raad van 23 maart 1994 inzake de onderlinge aanpassing van de wetgevingen van de Lid-Staten betreffende apparaten en beveiligingssystemen bedoeld voor gebruik op plaatsen waar ontploffingsgevaar kan heersen.
- Richtlijn 1999/92/EG van het Europees Parlement en de Raad van 16 december 1999 betreffende minimumvoorschriften voor de verbetering van de gezondheidsbescherming en van de veiligheid van werknemers die door explosieve atmosferen gevaar kunnen lopen

Het waterstofverdeelstation moet eveneens in overeenstemming zijn met de volgende normen en reglementen:

- De Belgische normen met betrekking tot opslag en behandeling van cryogene vloeistof
- NBN EN 1251: Cryogene vaten: verplaatsbare met vacuüm geïsoleerde vaten met een inhoud van niet meer dan 1000 liter
- NBN EN 1252: Cryogene vaten: materialen
- NBN EN 1625: Cryogene vaten: afsluiters voor cryogeen gebruik
- NBN EN 1797: Cryogene vaten: verenigbaarheid van gas en materialen
- NBN EN 12213: Methoden voor de beoordeling van de prestatie van de warmte-isolatie
- NBN EN 12300: Cryogene vaten: reinheid voor cryogene toepassingen

- NBN EN 12434: Slangen voor cryogene toepassingen
- NBN EN 13275: Pompen voor cryogeen gebruik
- NBN EN 13371: Koppelingen voor cryogeen gebruik
- NBN EN 13530: Cryogene vaten: grote verplaatsbare vacuüm geïsoleerde vaten
- NBN EN 13648: Cryogene vaten: veiligheidsvoorzieningen voor de bescherming tegen ontoelaatbare overdruk
- NBN EN 14197: Cryogene vaten: niet-verplaatsbare niet-vacuüm geïsoleerde vaten
- NBN EN 14398: Cryogene vaten: grote verplaatsbare niet-vacuüm geïsoleerde vaten
- NBN 69: Kleuren voor het merken van pijpleidingen voor het vervoer van vloeibare of gasvormige stoffen in landinstallaties en aan boord van schepen
- NBN C23: Elektrisch materieel voor ontploffingsgevaarlijke atmosferen
- NBN S21-001 t.e.m. NBN S21-018 Reddings- en brandweermaterieel
- NBN X08-001: Veiligheidskleuren en -tekens
- NBN X08-002: Veiligheidskleuren - Kleur- en lichtmetingskenmerken van de materialen
- AREI: Algemeen reglement betreffende de elektrische installaties
- ARAB: Algemeen reglement betreffende de arbeidsbescherming

## 2.2. Locatie van het waterstofsysteem en van het waterstofverdeelstation

Verdeelstations voor gasvormig waterstof, inclusief het waterstofsysteem, zijn zo gelegen dat ze eenvoudig toegankelijk zijn voor:

- Leveringen van waterstof
- Geautoriseerd personeel
- Het bestrijden van brand

Het waterstofsysteem, dat onder meer de opslagtanks inhoudt, bevindt zich hetzij in de open lucht, hetzij in een daarvoor geschikt gemaakt lokaal of gebouw. Het ontwerp van het systeem zal aan de specifieke locatie worden aangepast.

Opslagvaten van meer dan 1000 liter zijn niet toegestaan in een lokaal of een gebouw.

De verdeelinstallaties bevindt zich in de open lucht. De ligging van het verdeelstation moet het mogelijk maken alle aanwezige personen in de omgeving eenvoudig te evacueren in geval van nood.

De ligging van de volledige inrichting is zo opgevat dat ingeval van falen van één van onderstaande elementen een voldoende afstand wordt verzekerd tussen het falend onderdeel en het waterstofsysteem

- Hoogspanningslijnen
- Leidingen en opslagplaatsen van brandbare en ontvlambare producten
- Leidingen en opslagplaatsen van brandbare en ontvlambare gassen
- Leidingen en opslagplaatsen van oxiderende materialen

Om de afstand tot een falend onderdeel te bepalen, wordt gebruik gemaakt van de definitie van mogelijke emissiebron. Leidingsystemen worden enkel beschouwd als een emissiebron van waterstof, op punten waar de leiding onderbroken wordt door koppelingen, zoals flenzen, kleppen, aansluitingspunten en dergelijke. Het is tot deze onderdelen dat de veiligheidsafstanden zoals hierboven bedoeld, bepaald worden.

Alle systemen die waterstof bevatten, beschikken over de nodige voorzorgsmaatregelen, die de installatie moeten beschermen tegen externe schadelijke invloeden, zoals vrijzetting en accumulatie van brandbaar of ontvlambaar materiaal in de buurt van het waterstofsysteem, aanrijding bij levering of door wagens, manipulatie door onbevoegden, enzovoorts.

De installaties, andere dan de verdeelinstallatie voor het kunnen verdelen van waterstof naar voertuigen moet bovendien afgeschermd worden van het publiek door middel van een stalen hekwerk of een gelijkaardige structuur met een minimum hoogte van 2 meter.

### 2.3. Veiligheidsafstanden

Tussen het waterstofsysteem, inclusief verdeelinstallaties en opslag, en gespecificeerde omgevingsobjecten zal een minimum veiligheidsafstand gewaarborgd worden, gemeten vanaf de verschillende punten in het waterstofsysteem waar mogelijk vrijzetting van waterstof kan optreden. Indien het waterstofsysteem of delen ervan in een gebouw staan opgesteld, wordt de minimum veiligheidsafstand gemeten vanaf de openingen in het gebouw waardoor waterstof zich kan verspreiden.

Leidingsystemen worden enkel beschouwd als een emissiebron van waterstof, op punten waar de leiding onderbroken wordt door koppelingen, zoals flenzen, kleppen, aansluitingspunten en dergelijke.

Veiligheidsafstanden zijn afhankelijk van de opgeslagen hoeveelheid.

Van deze veiligheidsafstanden kan afgeweken worden mits de voorziening van daartoe geschikte veiligheidsvoorzieningen en dient te gebeuren op basis van een veiligheidsstudie, die rekening zal houden met de aard en de eigenschappen van de emissiebron.

De minimum te bewaren veiligheidsafstanden zijn gegeven in onderstaande tabel:

<b>Tabel # 2.2 : Veiligheidsafstanden i.f.v. vloeibare waterstofopslag</b>			
ACTIVITEIT/OBJECT	VEILIGHEIDSAFSTAND		
	< 12500 l	< 55000 l	< 280000 l
Gebouw of structuur, waarvan de muur aanpalend aan het te bouwen systeem is opgetrokken uit niet-brandbare of beperkt brandbare materialen, uitgerust met een sprinklersysteem of met een brandweerstand van meer dan 3h (b)	1,5 m (a)	1,5 m (a)	1,5 m (a)
Gebouw of structuur, waarvan de muur aanpalend aan het te bouwen systeem is opgetrokken uit niet-brandbare of beperkt brandbare materialen, niet uitgerust met een sprinklersysteem of met een brandweerstand minder dan 3h (b)	7,6 m	15,2 m	22,86 m
Gebouw of structuur waarvan de muur aanpalend aan het bouwen systeem is opgetrokken uit andere dan niet-brandbare of beperkt brandbare materialen, uitgerust met een sprinklersysteem (b)	15,2 m	15,2 m	15,2 m
Gebouw of structuur waarvan de muur aanpalend aan het bouwen systeem is opgetrokken uit andere dan niet-brandbare of beperkt brandbare materialen, niet uitgerust met een sprinklersysteem (b)	15,2 m	22,86 m	30,48 m
Opening in muren, met de mogelijkheid ze te openen	22,86 m	22,86 m	22,86 m
Opening in muren, zonder de mogelijkheid ze te openen	7,6 m	15,2 m	15,2 m
Bovengrondse opslag van brandbare vloeistoffen	15,2 m	22,86 m	30,48 m
Ondergrondse opslag van brandbare vloeistoffen (te meten vanaf ontluchtingspijpen of vulopeningen)	15,2 m	22,86 m	30,48 m
Bovengrondse opslag van vloeibaar waterstof	1,5 m	1,5 m	1,5 m
Opslag van brandbare gassen	15,2 m	22,86 m	30,48 m
Open vuur en laswerken	15,2 m	15,2 m	15,2 m



Tot aan inlaat voor rioleringsystemen	1,5 m	1,5 m	1,5 m
Aanzuigopeningen voor luchtcompressoren, ventilatiesystemen...	22,86 m	22,86 m	22,86 m
Plaatsen waar veel mensen samenkomen	22,86 m	22,86 m	22,86 m
Wegen, sporen, grenzen van aanpalende eigendommen	5 m	5 m	5 m
Grens met aangrenzende bebouwbare ruimtes	7,6 m	15,2 m	22,86 m
Bovengrondse elektriciteitsleidingen (incl. tramleidingen)	15 m	15 m	15 m

Daarbij zal rekening gehouden worden met volgende randvoorwaarden:

- Muren of delen ervan op een horizontaal gemeten afstand van minder dan 3 meter van elk deel van het waterstofsysteem, moet een brandweerstand hebben van minstens 30 minuten.
- Deuren en ramen in een gebouw of structuur vallen niet onder bepalingen voor dit gebouw of structuur, maar kennen een eigen minimum veiligheidsafstand.

Voor het vulpunt van de waterstofopslag gelden dezelfde minimum veiligheidsafstanden als voor de rest van het waterstofsysteem.

De exploitant voorziet in een grondplan van de inrichting waarop wordt aangetoond dat de veiligheidsafstanden gerespecteerd worden.

Binnen deze afstand worden specifieke zones gedefinieerd, conform de bepalingen van het AREI, met betrekking tot plaatsen waar ontploffingsgevaar heerst als gevolg van ontplofbare atmosferen. De zones worden aangeduid op een plan

Binnen deze zones zal enkel daarvoor bestemd materiaal gebruikt worden, conform de van toepassing zijnde regelgeving.

## 2.4. Ontwerp

### 2.4.1. Algemeen

Het waterstofsysteem moeten worden ontworpen, gebouwd en getest worden volgens de van toepassing zijnde richtlijnen met betrekking tot drukvaten en met betrekking tot opslag en behandeling van cryogene vloeistoffen en in overeenstemming met alle wettelijke bepalingen.

Alle gebruikte materialen voor het waterstofsysteem zijn geschikt voor cryogene waterstoftoepassingen. Maatregelen tegen corrosie van deze maatregelen worden genomen.

De tanks zijn verankerd met behulp van niet-brandbare materialen die geschikt zijn om aan een eventueel lek van vloeibare waterstof te weerstaan. De tank is zo ontworpen dat ze het eigen gewicht, het gewicht van de volledige inhoud en de invloed van externe factoren, zoals wind of sneeuw, kan weerstaan.

Het waterstofsysteem is opgesteld op een niet-brandbaar oppervlak, zoals beton.

Het waterstofsysteem is aangepast aan de werkdruk en aan de cryogene werkingsomstandigheden. Elke verbinding in het systeem is voorzien op de cryogene omstandigheden.

Elke constructie, opgetrokken ter bescherming van het waterstofsysteem, bestaan uit beperkt of niet-brandbare materialen.

Overkappingen van enig deel van het waterstofsysteem zal de snelle diffusie van waterstof niet tegengaan en zal zo opgevat zijn dat ophoping van waterstof niet mogelijk is. Waar nodig zal hiertoe een ventilatiesysteem geïnstalleerd worden.

Het waterstofsysteem, inclusief mobiele onderdelen ervan, moet worden geaard, vooraleer het systeem in werking treedt. Bevoorravingsvrachtwagens kunnen niet dienen als opslagplaats waarop de waterstofverdeelinstallatie is aangesloten, ook al zijn de vrachtwagens verankerd.

#### 2.4.2. Elektrische installaties

De elektrische installaties voldoen aan de bepalingen van het AREI.

De elektrische installaties die worden ingezet in zone waar een ontplofbare atmosfeer kan voorkomen, zal hiervoor geschikt zijn, volgens de zones die overeenkomstig gedefinieerd werden.

Waterstofopslagtanks in de open lucht zijn voorzien van een bliksemafleider met een elektrische weerstand minder dan 10 ohm.

De conformiteit van de volledige elektrische installatie wordt geattesteerd door een controleorganisme, erkend door het ministerie van Arbeid en Tewerkstelling.

#### 2.4.3. Vereisten voor gebouwen of lokalen waarin een waterstofsysteem aanwezig is

Volgende bepalingen gelden voor delen van het waterstofsysteem die worden geïnstalleerd in daartoe voorziene lokalen. In een daartoe voorzien lokaal wordt niet meer dan 1000 liter vloeibare waterstof opgeslagen.

Gebouwen (of lokalen) waarin een waterstofsysteem aanwezig is, zijn hiervoor ontworpen, en bestaan uit één bouwlaag.

Elk lokaal waar waterstof aanwezig kan zijn, beschikt over voldoende ventilatie, met inlaat nabij het grondniveau en uitlaat naar het hoogste punt van het lokaal. Zowel de in- als de uitlaatpunten van het ventilatiesysteem leiden direct naar de atmosfeer. Passende maatregelen worden voorzien opdat in- en uitlaatpunten mogen niet geblokkeerd worden. De werking van het ventilatiesysteem wordt bewaakt.

Het gebouw is opgetrokken in beperkt en/of niet-brandbare materialen en beschikt over een brandweerstand overeenkomstig de daarvoor geldende bepalingen.

Ramen en deuren worden zo geplaatst dat ze gemakkelijk bereikbaar zijn in geval van nood. Deuren die niet onmiddellijk naar buiten leiden, worden ontworpen als branddeuren, overeenkomstig de bepalingen van artikel 52 van het Algemeen Reglement voor de Arbeidsbescherming. (Artikel 52 van Afdeling V (voorzorgen tegen brandgevaar, ontploffingen en de toevallige ontsnapping van schadelijk of ontvlambare gassen), van hoofdstuk I (bepalingen betreffende de veiligheid van de arbeiders), van de titel II (algemene bepalingen betreffende de arbeidshygiëne alsmede de veiligheid en de gezondheid van arbeiders) van het ARAB).

Het gebouw is voorzien van alle maatregelen die moeten verhinderen dat waterstof kan doordringen in of naar plaatsen die hierop niet voorzien zijn, zoals elektrische leidingen, aanpalende ruimtes, dienstkokers...

Minstens één buitenmuur of het dak van het gebouw of lokaal waarin een waterstofsysteem aanwezig is, fungeert als explosieluik voor drukontlasting, dat zo ontworpen is dat het niet leidt tot rondvliegende projectielen.

Alle lokalen zijn voorzien van een verlichtingssysteem, geschikt voor de desbetreffende gevaarlijke zone, die te allen tijde een voldoende verlichting garandeert voor het veilig uitvoeren van alle handelingen met betrekking tot het waterstofsysteem.

Verwarming van de lokalen, indien nodig, zal gebeuren met behulp van stoom, warm water of andere manieren van indirecte verwarming. Elektrische verwarming is toegelaten, indien in overeenstemming met de vereisten voor gebruik in gevaarlijke zones.

Verontreiniging met waterstof van de verwarmingsinstallatie zal verhinderd worden.

#### 2.4.4. Leidingssystemen

Alle leidingen die waterstof bevatten zijn daarvoor ontworpen en zijn voorzien van hiervoor geldende kleurencodes.

De leidingen zijn voorzien van kleppen, die het waterstofsysteem veilig kunnen afsluiten in geval van nood. Elk deel van de leiding waarin een hogere druk kan voorkomen dan de maximum werkingsdruk, moet voorzien zijn van overdrukventielen.

Zowel bovengrondse als ondergrondse leidingen zijn beschermd tegen corrosie en externe impact.

Ondergrondse leidingen worden in één stuk gelast, liggen op een minimumdiepte van 600 mm en worden voorzien van waarschuwing lint en afdekplaten. Kathodische beschermingsystemen voor dergelijke leidingen mogen geen invloed hebben op andere installaties.

De nodige maatregelen worden genomen om bevrozing van de bodem te vermijden of tot een minimum te beperken.

Niet-geïsoleerde delen van het leidingssysteem worden waar mogelijk vermeden. Ze mogen zich niet boven ontvlambare materialen of oppervlakken bevinden. Accumulatie van vloeibaar geworden lucht moet vermeden worden.

De uitbater neemt de nodige maatregelen om personen te beschermen tegen de effecten van lage temperaturen op de gezondheid.

Indien waterstofleidingen gelegd worden in goten waarin zich ook elektrische leidingen bevinden, zal de waterstofleiding in één stuk gelast worden. Een minimum afstand van 50 mm tussen de waterstofleiding en de elektrische leiding moet gerespecteerd worden.

Indien waterstofleidingen gelegd worden in goten waarin zich ook leidingen die andere producten bevatten, bevinden, zal de waterstofleiding hoger gelegd worden dan de andere leidingen.

#### 2.4.5. Afsluitkleppen

Het waterstofsysteem is uitgerust met afsluitkleppen die elk van de verschillende eenheden van het waterstofsysteem kan isoleren van elkaar.

De kleppen zijn voorzien op het werken met waterstof en aan de heersende condities. Elke klep zal voorzien zijn van een permanente aanduiding.

Idealiter worden vier manueel bedienbare afsluitkleppen voorzien op elke afzonderlijke leiding tussen een waterstofopslageenheid en de interface verdeelinstallatie – voertuig (vulkop), zoals hieronder beschreven:

#### 2.2.1.1. Afsluitklep voor elke waterstofopslageenheid

Elke afzonderlijke waterstofopslageenheid is manueel afsluitbaar van de rest van het systeem. Hiervoor wordt een afsluitklep voorzien naast elke eenheid, aan het begin van de leiding die de verdeelinstallaties bedient, maar binnen de van het publiek afgeschermd zone.

#### 2.2.1.2. Hoofdafsluitklep

Het volledige waterstofsysteem dat zich na de opslag bevindt, moet afgesloten kunnen worden van de opslag waarop het is aangesloten. Hiervoor wordt een manueel bedienbare afsluitklep voorzien buiten de van het publiek afgeschermd zone. De afsluitklep werkt in één richting en mag niet zonder meer terug geopend worden na sluiting.

Het bedienen van de hoofdafsluitklep moet er tevens toe leiden dat de spanning over verdeelinstallatie wordt afgesloten.

Waar de verdeelinstallaties in de onmiddellijke omgeving van de opslageenheden zijn opgesteld, kan deze afsluitklep eveneens dienen als noodklep (zie verder).

De hoofdafsluitklep wordt duidelijk en ondubbelzinnig aangeduid in een passende lettergrootte en op een contrasterende achtergrond. De sluitrichting wordt, indien nodig, duidelijk aangegeven.

#### 2.2.1.3. Noodafsluitklep

In een voor iedereen gemakkelijk te bereiken positie wordt een noodafsluitklep voorzien. Deze noodafsluitklep staat opgesteld buiten de gevaarlijke zone die gecreëerd wordt door de aanwezigheid van de verdeelinstallatie (conform de zonering), maar wel in de onmiddellijk bereikbare omgeving ervan.

Het bedienen van de noodafsluitklep moet er tevens toe leiden dat de spanning over verdeelinstallatie wordt afgesloten.

In geval van meerdere verdeelinstallaties zullen zoveel noodafsluitkleppen voorzien worden als nodig, in functie van de onmiddellijke bereikbaarheid ervan voor elke persoon die een van deze verdeelinstallaties bedient.

De hoofdafsluitklep kan functioneren als noodafsluitklep op voorwaarde dat deze hoofdafsluitklep onmiddellijk kan bereikt worden in geval van nood.

De noodafsluitklep wordt duidelijk en ondubbelzinnig aangeduid in een passende lettergrootte en op een contrasterende achtergrond. De sluitrichting wordt, indien nodig, duidelijk aangegeven.

#### 2.2.1.4. Afsluitklep tussen verdeelinstallatie en voertuig

Elke verdeelslang voor waterstof moet ter hoogte van de vulmond voorzien zijn van een afsluitklep, die het veilig verdelen van waterstof mogelijk maakt. Deze afsluitklep is voorzien van een ventiel voor residuele drukontlasting na elke tankbeurt. Deze drukontlasting gebeurt op een manier dat geen bijkomend risico wordt gecreëerd.

#### 2.4.6. Overdrukventielen

Overdrukventielen worden zo geplaatst en ingesteld in het waterstofsysteem dat het tijdens normaal bedrijf onmogelijk is hogere drukken dan de maximum toegelaten werkdruk te bekomen. Het

overdrukventiel is zo ontworpen en ingesteld dat de maximaal voorkomende druk in het systeem nooit meer bedraagt dan 20% van de toegelaten werkdruk.

Overdrukventielen worden zo ontworpen en geplaatst dat vocht of andere contaminanten door bevrozing de goede werking van deze ventielen nooit kunnen verstoren.

De overdrukventielen worden zo ontworpen en geplaatst dat eventuele emissies geen bijkomend risico opleveren voor aanwezige structuren, opslagtanks of personen. Emissies naar plaatsen waar waterstof zich mogelijk kan ophopen is verboden.

Overdrukventielen worden zo ontworpen, geplaatst en bevestigd dat ze bestand zijn tegen de hogere drukken die resulteren uit een mogelijke emissie.

#### 2.4.7. Afblaasleidingen

Het waterstofsysteem moet voorzien zijn van afblaasleidingen voor het afblazen van waterstof naar de atmosfeer.

Op de afblaasleiding zijn geen structuren of apparatuur toegelaten die de vrije uitstroom van waterstof in voorkomend geval verhinderen.

De afblaasleidingen zijn zo ontworpen dat accumulatie van water of andere stoffen onmogelijk gemaakt wordt in de leiding.

De keuze van het materiaal van de afblaasleiding moet compatibel zijn met het gebruik van waterstof en de kans op ontsteking van geëmitteerd waterstof verhinderen.

Afblaasleidingen worden zo ontworpen, geplaatst en bevestigd dat ze bestand zijn tegen de hogere drukken die resulteren uit een mogelijke emissie.

De afblaasleidingen zijn zo ontworpen en geplaatst dat eventuele emissies geen bijkomend risico opleveren voor aanwezige structuren, opslagtanks of personen. Emissies naar plaatsen waar waterstof zich mogelijk kan ophopen is verboden.

#### 2.4.8. Verdeelinstallatie

Elke verdeelinstallatie moet afzonderlijk kunnen worden afgesloten van het waterstofsysteem, voor onderhoudsdoeleinden

Het gebruik van elke waterstofverdeelinstallatie wordt automatisch in de controlekamer vermeld vanwaar de installatie op elk ogenblik kan worden onderbroken. Ook alle andere verdeelinstallaties andere dan voor het verdelen van waterstof, die zich in de nabije omgeving bevinden, kunnen van hieruit onderbroken worden.

Verdeelslang moet voorzien zijn van een afsluitklep, die automatisch sluit wanneer:

- De maximale opslagdruk in de voertuigtank bereikt is;
- Wanneer de druk te snel oploopt
- In geval van lek

Om dit te kunnen bewerkstelligen moet de verdeelinstallatie worden voorzien van de nodige controle- en detectievoorzieningen.

Daarnaast is de verdeelinstallatie voorzien van een uitrusting die telling van de geleverde hoeveelheden waterstof onder de verschillende werkingsomstandigheden moet mogelijk maken.

Ophoping van waterstof in de verdeelinstallatie zelf moet door het ontwerp ervan onmogelijk zijn.

Verdeelinstallaties zijn geïnstalleerd op niet-brandbare ondergrond, zoals beton.

Verdeelinstallaties moeten zo worden opgesteld dat voertuigen niet doorheen een gevaarlijke zone moeten rijden, zoals gedefinieerd in de zoneringsplannen.

Verdeelinstallaties zijn voorzien van de nodige voorzieningen om impact te voorkomen of zijn geïnstalleerd op een betonnen platform.

De nodige voorzieningen worden genomen om schade te beperken in het geval een voertuig wegrijdt zonder dat de verdeelslang is afgekoppeld.

De verdeelslang is aangepast aan de werking met vloeibaar waterstof. De lengte van de verdeelslang bedraagt maximaal 5 meter. Alle voorzieningen worden genomen opdat de levering van vloeibaar waterstof door de verdeelslang ongehinderd kan verlopen. De verdeelslangen zijn voorzien van testcertificaten voor de specifieke werkingscondities.

Net voor de verdeelslang wordt een klep voorzien die een overmatig debiet naar de slang verhindert. De verdeelslangen moeten goed worden onderhouden en vervangen bij misvorming of om het even welke fout.

De verbinding tussen het voertuig en de verdeelslang is ontworpen voor het werken met waterstof. Het verbindingsstuk is samen met de verdeelslang uitgerust met een dampretourleiding die de evacuatie van waterstofgas naar een veilige locatie mogelijk maakt. Deze dampretourleiding mag geen aanleiding geven tot interferentie met het verbindingsstuk.

De verbinding is gasdicht en zorgt ervoor dat lucht het waterstofsysteem niet kan binnendringen.

## 2.5. Inbedrijfstelling

Het waterstofverdeelstation kan pas in bedrijf gesteld worden nadat:

- De exploitant over alle certificaten beschikt die de conformiteit met de betreffende richtlijnen aangeeft.
- De volledige installatie getest is voor toepassing cryogeen waterstof
- De volledige installatie getest is voor werking op de maximale werkingsdruk. Na de druktest wordt het volledige systeem gedroogd en/of zuurstofvrij gemaakt, vooraleer het gevuld kan worden met waterstof.
- De volledige installatie getest is met betrekking tot de gasdichtheid voor het gebruik met waterstof.

Het testen van het volledige systeem wordt beschreven in een procedure, op te stellen door de uitbater, waarin alle kritische onderdelen van het systeem vermeld worden. De procedure beschrijft een controle voor van al deze onderdelen gedurende het testen van de gasdichtheid van het systeem, die moet instaan voor het veilig bevinden van het systeem alvorens het in werking wordt gesteld.

## 3. **EXPLOITATIE VAN DE INRICHTING**

### 3.1. Algemeen

De uitbater staat stelt instructies met betrekking tot de werking van het waterstofverdeelstation op en stelt ze ter beschikking van het personeel. Deze instructies bevatten een begrijpbaar en duidelijk overzicht alle technische gegevens van de verschillende onderdelen van het waterstofsysteem.

### 3.2. Markering van gevaarlijke zones

Alle gevaarlijke zones worden gemarkeerd met permanente borden die duiden op de specifieke gevaren binnen die gevaarlijke zone.

De hiervoor gebruikte tekst, opgesteld in minstens het Nederlands en het Frans, is hetzelfde als of gelijkaardig aan:

VLOEIBAAR WATERSTOF – ONTVLAMBAAR GAS  
VERBODEN TE ROKEN – OPEN VUUR NIET TOEGELATEN

Daarnaast wordt markering aangebracht in overeenstemming met de ATEX-richtlijnen.

De aldus aangeduide zones mogen enkel toegankelijk zijn voor geautoriseerd personeel dat op de hoogte moet zijn van de specifieke gevaren binnen die zone.

Werken in deze zone mogen slechts uitgevoerd worden op basis van een werkvergunning, uitgegeven door een daarvoor bevoegd persoon.

Alle installaties, andere dan de verdeelinstallatie voor het kunnen verdelen van waterstof naar voertuigen, zijn ontoegankelijk voor het publiek.

### 3.3. Normaal bedrijf van de inrichting

Onder vuloperaties wordt zowel verstaan het vullen van de opslagtanks vanuit daartoe voorziene tankwagens als het vullen van voertuigen met behulp van een verdeelinstallatie.

De verdeelpompen kunnen mobiele tanks voor vloeibaar gemaakt waterstof vullen op voorwaarde dat deze mobiele tanks uitgerust zijn voor het veilig overbrengen van waterstof. Alvorens de vuloperatie mag starten dient de persoon die de operatie uitvoert zich hiervan te vergewissen.

Het gebruik van de verdeelpomp wordt automatisch in de controlekamer vermeld vanwaar de pomp op elk ogenblik kan worden onderbroken. Alle andere verdeelpompen andere dan voor het verdelen van waterstof, die zich in de nabije omgeving bevinden, kunnen van hieruit onderbroken worden.

Vuloperaties kunnen slechts uitgevoerd worden binnen de daartoe voorziene bevoorradingsplaats en door personen die met het oog hierop op de hoogte werden gesteld van de specifieke eisen en de gevaren van het werken met waterstof en van de noodprocedures. De nodige maatregelen om dit mogelijk te maken worden getroffen.

Het voertuig moet worden geaard, alvorens de vuloperatie kan plaatsvinden.

Indien er geen voeding van waterstof is, mag de vuloperatie niet starten.

Vuloperaties kunnen slechts starten als een gasdichte verbinding tussen de verdeelinstallatie en het te vullen voertuig tot stand is gebracht.

Vuloperaties mogen niet uitgevoerd worden in zones waar gelekt vloeibaar waterstof zich kan accumuleren.

Vuloperaties moeten onmiddellijk beëindigd worden, hetzij automatisch, hetzij manueel, wanneer:

- De maximale opslagdruk in de voertuigtank bereikt is;

- Wanneer de druk te snel oploopt (> 30 bar/minuut)
- In geval van lek

Vuloperaties moeten onmiddellijk automatisch beëindigd worden bij breuk van de verdeelslang.

Alle hoofd- en noodafsluitkleppen moeten te allen tijde bereikbaar en duidelijk leesbaar zijn. Hindernissen die zulks onmogelijk zouden maken, moeten onmiddellijk verwijderd worden.

Het voertuig dat gevuld wordt, moet de motor uitschakelen. Deze verplichting dient kenbaar gemaakt te worden met behulp van speciaal daarvoor voorziene borden. Alle voorzieningen moeten worden genomen om te voorkomen dat het voertuig kan weggrollen tijdens de vuloperatie.

Er mag geen gebruik gemaakt worden van verlengstukken of andere mechanische systemen voor het manipuleren van afsluiters en/of kleppen. Afsluiters en/of kleppen mogen niet gemanipuleerd worden vooraleer de verschillende leidingen verbonden zijn.

In geval een lek wordt vastgesteld, moet onmiddellijk een veiligheidsperimeter ingesteld worden en moet de resterend hoeveelheid waterstof in het systeem geloosd worden naar atmosfeer, via de daarvoor voorziene afblaasleidingen.

Het is verboden verbindingstukken onder druk in te sluiten.

De afsluitkleppen moeten gesloten worden, wanneer het verdeelstation niet in bedrijf is.

Het is ten zeerste verboden waterstofopslagtanks te manipuleren zolang het verdeelstation in bedrijf is.

#### 3.4. Onderhoud en herstellingswerkzaamheden

Onderhoud gebeurt op systematische wijze en wordt beschreven met behulp van passende instructies, voorzien van alle nodige technische informatie.

De uitbater voorziet in een systeem dat moet toelaten defecten of lekken zo spoedig mogelijk te detecteren en in voorkomend geval te herstellen of te vervangen.

Voor elk onderdeel van het waterstofsysteem wordt een onderhoudsprogramma opgesteld en nageleefd.

Elke handeling met betrekking tot onderhoud en herstellingswerkzaamheden wordt bijgehouden in een daartoe bestemd register.

Passende aandacht gaat steeds uit naar de specifieke veiligheidsrisico's verbonden aan het werken met waterstof.

Elk onderdeel waaraan werkzaamheden worden uitgevoerd, dient vrij te zijn van waterstof.

Het waterstofsysteem zal het onderwerp zijn van een jaarlijks inspectieprogramma, uitgevoerd door een erkend controleorganisme, in overeenstemming met de geldende bepalingen.

Bij het opstellen van het onderhoud- en inspectieprogramma wordt rekening gehouden met de cryogene aard van de opslag.



### 3.5. Register

De uitbater houdt een register bij, waarin alle documentatie relevant voor de goede werking van het verdeelstation wordt bijgehouden. Dit register staat ter beschikking van de daarvoor bevoegde overheden.

Dit register omvat onder meer:

- Een grondplan van de inrichting waarop wordt aangetoond dat de veiligheidsafstanden gerespecteerd worden;
- De zoneringsplannen;
- Explosieveiligheidsdocument;
- De testverslagen in het kader van de inbedrijfstelling van de inrichting;
- Alle attesten en certificaten die de conformiteit van de installatie met de in deze voorwaarden opgesomde normen en reglementen aantonen;
- Attesten met betrekking tot de periodieke inspectie;
- Alle technische plannen met betrekking tot de installatie, de opslagtanks en de leidingen;
- Stroomschema's van de installatie;
- Technische gegevens van de opslagtanks;
- Instructies voor het personeel, nooddiensten en andere bevoegde personen;
- Het noodplan;
- Onderhoudsplan en onderhoudsinstructies;
- Een overzicht van de onderhoudswerken;
- Een incidentenregister.

Het register wordt bijgehouden op het waterstofverdeelstation en staat te allen tijde ter beschikking gehouden van de met de inspectie belaste ambtenaar.

## 4. **VEILIGHEID**

### 4.1. Algemeen

Het is ten strengste verboden te roken, open vuur of vlammen te maken of een GSM te gebruiken binnen de volledige perimeter van het waterstofverdeelstation. Dit zal duidelijk worden aangegeven met behulp van pictogrammen in overeenstemming met het Koninklijk Besluit van 19 september 1980 betreffende de veiligheidssignalering op de arbeidsplaatsen en tot wijziging van verscheidene artikelen van het algemeen reglement voor de arbeidsbescherming.

De opslag van andere ontvlambare stoffen is verboden, tenzij de veiligheidsafstanden gerespecteerd worden.

Het waterstofverdeelstation moet proper worden gehouden en ontdaan worden van voden, papier, hout, droog gras en andere brandbare elementen.

### 4.2. Brandbestrijding

Het waterstofverdeelstation moet uitgerust zijn met duidelijk zichtbare en gemakkelijk te bereikbare brandmeldpunten, die het brandalarm in werking zetten.

De uitbater voorziet in een volledig uitgewerkt noodplan dat in werking treedt bij brandmelding. Het noodplan beschrijft de te volgen procedures en is uitgewerkt tot op het niveau van de verschillende onderdelen van het waterstofsysteem.

Het volledige waterstofverdeelstation beschikt over geschikte en ondubbelzinnig aangeduide evacuatiemogelijkheden, die te allen tijde vrij van obstakels gehouden dienen te worden.

Het station beschikt over brandbestrijdingsmiddelen aangepast aan de lokale risico's overeenkomstig het advies van de Brandweerdienst (Besluit van de Regering van 23 november 1993, B.S. van 30.11.1993). Ze moeten perfect werken, beschermd zijn tegen vrieskou en jaarlijks door een bevoegd technicus worden onderhouden. Die brandbestrijdingsmiddelen zijn bereikbaar en oordeelkundig geplaatst. Het brandbestrijdingsmateriaal moet onmiddellijk kunnen worden gebruikt.

Indien het waterstofverdeelstation uitgerust is met branddetectoren voor de detectie van waterstofbrand zal rekening gehouden worden met volgende voorwaarden, in overeenstemming met ISO/PDTR 15916 (Basic considerations for the safety of hydrogen systems):

- Infrarood detectie apparatuur zal een waterstofbrand niet detecteren
- De aanwezigheid van een waterstofbrand kan worden gedetecteerd op basis van UV-detectie. Interferentie met bijvoorbeeld laslicht of direct zonlicht is evenwel mogelijk en kan aanleiding geven tot vals alarm.

#### 4.3. Personeel

Al het personeel dat tewerk gesteld wordt op het waterstofverdeelstation, zal daarvoor opgeleid worden.

De uitbater stelt een draaiboek voor de exploitatie van het waterstofverdeelstation ter beschikking van het personeel. Dit document is altijd ter plaatse beschikbaar en bevat instructies voor het veilig uitbaten van de inrichting. Het omvat minstens:

- De procedure voor het in bedrijf stellen en het uit bedrijf halen van de installaties bij normale omstandigheden
- Het uit bedrijf halen van de installaties bij afwijkende omstandigheden
- De richtlijnen en inlichtingen met betrekking tot de veiligheidsaspecten, inclusief het noodplan.

De uitbater neemt de nodige maatregelen om het personeel niet bloot te stellen aan de gevaren van het werken met waterstof.

De uitbater neemt de nodige maatregelen om de opbouw van statische ladingen in de werkkledij van het personeel te vermijden.



**VINÇOTTE ENVIRONMENT**

Contactadres: Business Class Kantorenpark • Jan Ollieslagerslaan 35 • 1800 Vilvoorde • België  
Tel +32 (0)2 674 57 11 • fax +32 (0)2 674 51 82 • environment@vincotte.be • www.vincotte.com

Sociale Zetel: Diamant Building • A. Reyerslaan 80 • 1000 Brussel • België

Safety, quality and environmental services

Contract beheerd door **SECTIE STUDIES**

<p>STUDIE BETREFFENDE DE TECHNISCHE EN REGLEMENTAIRE ANALYSE VAN DE MARKT VAN WATERSTOF ALS ENERGIEVECTOR VOOR AUTOMOBIEL- EN STATIONTOEPASSINGEN</p> <p>FASE 3</p> <p>CHECKLIST</p>	<p><b>BIM</b> <b>GULLEDELLE 100</b> <b>1200 BRUSSEL</b></p>
<p><b>REFERENTIE : 5RE-52-60166311-03-002</b></p>	<p><b>Maart 2007</b></p>

---

# INHOUDSTAFEL

---

<b>HOOFDSTUK 1 : Inleiding</b> .....	<b>3</b>
1.1 Inleiding .....	3
1.2 Context en doel van de opdracht.....	3
1.3 Methodologie .....	4
 <b>HOOFDSTUK 2 : CheckList</b> .....	 <b>5</b>

---

# HOOFDSTUK 1 : INLEIDING

---

## 1.1 INLEIDING

Voorliggende studie betreft de uitvoering van fase 3 van de studie betreffende de technische en reglementaire analyse van de markt van waterstof als energievector voor automobiel- en stationtoepassingen.

Deze studie wordt opgesteld in opdracht van:

BRUSSELS INSTITUUT VOOR MILIEUBEHEER (BIM)  
GULLEDELLE 100  
B – 1200 BRUSSEL

Fase 3 betreft het opstellen van exploitatievoorwaarden voor waterstofstations, het opstellen van een checklist en het opstellen van een gids ten behoeve van de ambtenaren die belast zijn met de behandeling van de aanvraagdossiers.

## 1.2 CONTEXT EN DOEL VAN DE OPDRACHT

In het streven om de verdere economische ontwikkeling van onze geïndustrialiseerde maatschappij te verenigen met de beperking van de verontreinigende emissies, beschouwen velen waterstof als één van de meest veelbelovende alternatieve brandstoffen. Het gaat immers om een zuivere energiebron die uit eender welk basismateriaal kan worden aangemaakt.

Als vervangbrandstof voor vervoer kan waterstof rekenen op de bijzondere belangstelling van de grote autoconstructeurs die, geruggensteund door de overheid van de industrielanden, miljarden dollars investeren in de ontwikkeling van personenauto's, autobussen en vrachtauto's die op waterstof rijden. Terzelfder tijd wordt het probleem van de productie, opslag en distributie van waterstof bestudeerd, wat tot de geleidelijke installatie van 'waterstofstations' leidt.

Het resultaat van die inspanningen krijgt nu concreet vorm in tal van Europese steden, waar diverse demonstratieprojecten en langdurige testen met waterstofvoertuigen en –stations lopen. Brussel is geen uitzondering.

Het Brussels Hoofdstedelijk Gewest heeft als doel met deze studie het gebruik van waterstof als energievector op zowel technologische als reglementair vlak in kaart te brengen en daarbij de veiligheidsvoorschriften, de industriële specificaties en de procedures voor de periodieke inspectie van de installaties en de bestaande brandstofsyste men te analyseren. Op deze manier kan het Gewest een antwoord bieden op het groeiend aantal aanvragen voor de installatie en exploitatie van (tijdelijke of definitieve) waterstofstations op zijn grondgebied.

Met deze studie wil het Brussels Hoofdstedelijk Gewest dan ook deze nieuwe technologie van nabij volgen om zo een bijdrage te leveren aan een duurzame mobiliteit.

### 1.3 METHODOLOGIE

Fase 3 van voorliggende studie betreft het opstellen van typevoorwaarden voor de exploitatie van waterstofstations. Daarnaast worden ter verduidelijking van deze typevoorwaarden documenten opgesteld ten behoeve van de ambtenaren die belast zijn of zullen worden met het behandelen van aanvraagdossiers.

Een checklist ten slotte wordt opgesteld gebaseerd op enerzijds de bestaande regelgeving in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest en op basis van de typevoorwaarden anderzijds.

De checklist is een werkmiddel voor de ambtenaren die de exploitatievergunningen voor waterstofstations moeten afleveren.

De checklist heeft tot doel de essentiële punten op te sommen waarop de bevoegde ambtenaar moet letten bij de analyse van de aanvraag en/of bij de inspectie van de betrokken inrichting.

Het is essentieel dat de checklist de vragen bevat die de ambtenaar zich moet stellen bij de behandeling van een aanvraag of tijdens een inspectie met betrekking tot de elementen die in het dossier en op de plannen aanwezig moeten zijn.

De checklist is zo opgesteld dat ze vragen bevat die met een eenvoudig ja of nee te beantwoorden zijn.

## HOOFDSTUK 2 : CHECKLIST

### CHECKLIST WATERSTOFVERDEELSTATIONS

NIEUWE / BESTAANDE INSTALLATIE (AANVRAAGDOSSIER)

			Opmerkingen
1. In dienst?	Datum	Neen	Alvorens in dienststelling, overmaken van conformiteitsattesten, explosieveiligheidsdocument en veiligheidsrapport (indien nodig)
2. Aard van de opslag?	Vloeibaar waterstof	Ja / Neen	
	Gasvormig waterstof	Ja / Neen	
	Hoeveelheid	..... kg / ..... m <sup>3</sup>	Zie ook technische gegevens opslagtanks
	Werkingsdruk	..... bar	
3. Hoofdactiviteit waterstofsysteem	- Welke bijkomstige installaties worden voorzien?		
	▪ Opslagtanks	Ja / Neen	Hoeveel? Inhoud? Druk ? Temperatuur?
	▪ Compressor(en)	Ja / Neen	Hoeveel? Type? Vermogen?
	▪ Buffertanks	Ja / Neen	Hoeveel? Inhoud? Druk? Temperatuur?
	▪ Filterinstallaties	Ja / Neen	Hoeveel? Type?
	▪ Verdampers	Ja / Neen	Hoeveel? Type? Capaciteit?
	Is een inplantingsplan aanwezig waarop de verschillende installaties staan aangeduid?	Ja / Neen	

	Is een stroomschema toegevoegd met aanduiding van de essentiële veiligheidsuitrusting (noodstop, kleppen, ventielen...)?	Ja / Neen	
	Wordt een beschrijving gegeven van de voornaamste geplande maatregelen om de negatieve effecten op het waterstofsysteem (impact, hekwerk, aanwezigheid andere stoffen...)		
	Zijn de nodige veiligheidskleppen/noodstoppen voorzien in het systeem	Ja / Neen	Zie stroomschema's en technische plannen
4. Overige activiteiten	Gebeurt er opslag van ontvlambare, licht ontvlambare en/of oxiderende gassen en/of vloeistoffen op het terrein?	Ja / Neen	Welke?
	Worden andere vergunningsplichtige activiteiten uitgeoefend op het terrein?	Ja / Neen	Welke?
5. Veiligheidsafstanden	Zijn de veiligheidsafstanden gerespecteerd?	Ja / Neen	Aan te duiden op het grondplan van de inrichting in functie van mogelijke emissiebronnen
6. Gebouw	Wordt het waterstofsysteem of delen ervan ondergebracht in een daartoe voorzien gebouw?	Ja / Neen	
7. Veiligheid	Zijn evacuatiepunten beschikbaar	Ja / Neen	
8. Milieu	Bevat de aanvraag een voorbereidende nota voor een effectenstudie (klasse IA) of een effectenverslag (klasse IB)	Ja / Neen	Te beoordelen op basis van de rubricering
9. Mobiliteit	Is een globaal inplantingsplan ten opzichte van de omgeving met aanduiding van de voornaamste aanvoerroutes aanwezig? (Schaal 1:25.000 of kleiner)	Ja / Neen	
	Is de impact van de inrichting op de lokale mobiliteit bestudeerd? Levert dit problemen op?	Ja / Neen	



## BESTAANDE INSTALLATIE (INSPECTIE EN CONTROLE)

			OPMERKINGEN
1. In dienst?	Datum	.. / .. / ....	
2. Aard van de opslag?	Vloeibaar waterstof	Ja / Neen	
	Gasvormig waterstof	Ja / Neen	
	Hoeveelheid	..... kg / ..... m <sup>3</sup>	Zie ook technische gegevens opslagtanks
	Werkingsdruk	..... bar	
3. Controle register	Is het register beschikbaar?	Ja / Neen	
	Zijn volgende documenten beschikbaar in het register?		
	▪ Een grondplan met aanduiding van de veiligheidsafstanden	Ja / Neen	Zijn de veiligheidsafstanden actueel?
	▪ Zoneringsplannen	Ja / Neen	Zijn de zoneringsplannen actueel?
	▪ Explosieveiligheidsdocumenten		
	▪ Testverslagen in het kader van de inbedrijfstelling	Ja / Neen	Enkel voor nieuwe installaties
	▪ Certificaten en/of attesten m.b.t. conformiteit van de inrichting	Ja / Neen	ATEX, PED, AREI, verdeelinstallatie...
	▪ Attestatie periodieke inspectie	Ja / Neen	PED, AREI, Brandbestrijdingsmiddelen...
	▪ Technische plannen met betrekking tot installatie, opslagtanks en leidingen	Ja / Neen	
	▪ Stroomschema van de installatie	Ja / Neen	
	▪ Technische gegevens van de opslagtanks	Ja / Neen	
	▪ Instructies voor personeel, nooddiensten en andere bevoegden	Ja / Neen	
	▪ Noodplannen	Ja / Neen	
	▪ Onderhoudsplan en onderhoudsinstructies	Ja / Neen	
▪ Overzicht van de uitgevoerde onderhoudswerken	Ja / Neen		
▪ Incidentenregister	Ja / Neen		
4. Waterstofsysteem	Visuele controle van de installatie		
	▪ Zijn de nodige afsluitkleppen, afblaasleidingen, overdrukventielen aanwezig zoals aangegeven op de plannen?	Ja / Neen	

<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gebruikte kleurencodes voor gasleidingen in overeenstemming met norm?</li> </ul>	Ja / Neen	Volgens NBN 69 : kleuren voor het merken van pijpleidingen voor het vervoer van vloeibare of gasvormige stoffen in landinstallaties en aan boord van schepen
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Is het terrein goed onderhouden en/of bevinden er zich brandbare materialen (vodden, papier, verdroogd onkruid, asfalt) op het terrein?</li> </ul>	Ja / Neen	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Is het waterstofsysteem afgesloten voor het publiek?</li> </ul>	Ja / Neen	Het hek heeft minstens een hoogte van 1,8 meter voor een systeem met gasvormig waterstof of 2 meter voor een systeem met vloeibaar waterstof
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Is de nodige signalisatie aangebracht op het hekwerk?</li> </ul>	Ja / Neen	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Is het hekwerk in goede staat?</li> </ul>	Ja / Neen	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Is de ATEX-signalisatie (Ex) aangebracht in overeenstemming met de zoneringsplannen</li> </ul>	Ja / Neen	
Bevindt het waterstofsysteem zich in een gebouw (maximaal één bouwlaag)	Ja / Neen	Indien "Ja", ga verder met volgende vragen?
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ventilatiesysteem aanwezig</li> </ul>	Ja / Neen	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ In overeenstemming met typevoorwaarden</li> </ul>	Ja / Neen	Voldoende ventilatie, positie inlaat en uitlaat...
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ In- en uitlaat van het ventilatiesysteem niet geblokkeerd?</li> </ul>	Ja / Neen	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Zijn de deuren in het lokaal die niet direct naar buiten leiden branddeuren</li> </ul>	Ja / Neen	Conform artikel 52 van het ARAB
Verdeelininstallatie		
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Is de verdeelininstallatie voorzien van maatregelen om impact te voorkomen of geïnstalleerd op betonnen platform?</li> </ul>	Ja / Neen	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Is de breekkoppeling aanwezig op de verdeelslang</li> </ul>	Ja / Neen	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Is de signalisatie ter hoogte van de verdeelpunten duidelijk aangebracht?</li> </ul>	Ja / Neen	Motor stilleggen, geen GSM, geen open vuur...
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Is de noodstop duidelijk aangebracht?</li> </ul>	Ja / Neen	

	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Is een tweede afsluitklep aanwezig voorzien in de omgeving op een zichtbare en toegankelijke plaats</li> </ul>	Ja / Neen	
5. Veiligheidsvoorschriften	Gebeurt er binnen de veiligheidsafstanden opslag van ontvlambare stoffen?	Ja / Neen	
	Zijn de brandmeldpunten duidelijk zichtbaar?	Ja / Neen	
	Werkt de brandalarminstallatie naar behoren?	Ja / Neen	
	Evacuatiemogelijkheden?		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Zijn er voldoende evacuatiemogelijkheden, zowel uit het afgesloten gedeelte als uit het volledige station</li> </ul>	Ja / Neen	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Zijn de evacuatiepunten voldoende en ondubbelzinnig aangeduid?</li> </ul>	Ja / Neen	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Zijn de evacuatiepunten vrij of bestaat de mogelijkheid ze onmiddellijk vrij te maken?</li> </ul>	Ja / Neen	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Zijn de brandbestrijdingsmiddelen aangepast aan de lokale risico's?</li> </ul>	Ja / Neen	Controleren aan de hand van het advies van de brandweer
6. Personeel	Kan het personeel of andere bevoegde personen beschikken over de nodige beschermingsmiddelen	Ja / Neen	
	Beschikt het personeel of andere bevoegde personen beschikken over antistatische werkkledij?	Ja / Neen	





**VINÇOTTE ENVIRONMENT**

Contactadres: Business Class Kantorenpark • Jan Olieslagerslaan 35 • 1800 Vilvoorde • België  
Tel +32 (0)2 674 57 11 • fax +32 (0)2 674 51 82 • environment@vincotte.be • www.vincotte.com

Sociale Zetel: Diamant Building • A. Reyerslaan 80 • 1000 Brussel • België

Safety, quality and environmental services

Contract beheerd door **SECTIE STUDIES**

<p>STUDIE BETREFFENDE DE TECHNISCHE EN REGLEMENTAIRE ANALYSE VAN DE MARKT VAN WATERSTOF ALS ENERGIEVECTOR VOOR AUTOMOBIEL- EN STATIONTOEPASSINGEN</p> <p>FASE 3</p> <p>GIDS VOOR DE AMBTENAAR</p>	<p><b>BIM</b> <b>GULLEDELLE 100</b> <b>1200 BRUSSEL</b></p>
---	---

--	--

<p><b>REFERENTIE : 5RE-52-60166311-03-003</b></p>	<p><b>Maart 2007</b></p>
---	--------------------------

# INHOUDSTAFEL

<b>HOOFDSTUK 1 : Inleiding</b> .....	<b>3</b>
1.1 Inleiding .....	3
1.2 Context en doel van de opdracht .....	3
1.3 Methodologie .....	4
<b>HOOFDSTUK 2 : Technische gegevens m.b.t. het werken met Waterstof</b> .....	<b>5</b>
2.1 Eigenschappen van waterstof .....	5
2.1.1 Fysische eigenschappen .....	5
2.1.2 Energetische eigenschappen van waterstof .....	5
2.1.3 Waterstof en het milieu .....	6
2.1.4 Veiligheidsaspecten van waterstof .....	7
2.1.5 Speciale eigenschappen van vloeibaar waterstof .....	8
2.2 Productie van waterstof .....	9
2.2.1 Elektrolyse .....	9
2.2.2 Reforming .....	9
2.2.3 Biologische productie .....	10
2.3 Opslag van waterstof .....	10
2.3.1 Cryogene opslag van vloeibaar waterstof (LH2) .....	10
2.3.2 Gasvormige opslag onder druk (CGH2) .....	10
2.3.3 Opslag in een vaste stof .....	11
2.4 Verdeling van waterstof .....	12
2.4.1 verdelen van waterstof .....	12
2.4.2 Waterstofverdeelstations .....	14
<b>HOOFDSTUK 3 : Globale situering</b> .....	<b>15</b>
<b>HOOFDSTUK 4 : Gebruiksaanwijzing voor het beoordelen van het aanvraagdossier</b> .....	<b>16</b>
4.1 Indeling .....	16
4.2 Waterstofverdeelstation .....	17
4.2.1 Aard van de opslag .....	17
4.2.2 Waterstofsysteem .....	17
4.2.3 andere activiteiten .....	18
4.2.4 Omgeving .....	18
4.2.5 Veiligheidsafstanden .....	18
4.3 Ontwerp, constructie en plaatsing van de installaties .....	20
4.4 veiligheid, mobiliteit en milieu .....	20
<b>HOOFDSTUK 5 : Gebruiksaanwijzing voor het beoordelen van het aanvraagdossier</b> .....	<b>22</b>
5.1 Indeling .....	22
5.2 Controle van het register .....	22
5.3 Visuele inspectie van het waterstofsysteem .....	23
5.4 Onderhoud, toezicht en controle .....	25
5.5 Veiligheidsvoorschriften .....	25
5.6 Personeel / bevoegde personen .....	26

---

# HOOFDSTUK 1 : INLEIDING

---

## 1.1 INLEIDING

Voorliggende studie betreft de uitvoering van fase 3 van de studie betreffende de technische en reglementaire analyse van de markt van waterstof als energievector voor automobiel- en stationtoepassingen.

Deze studie wordt opgesteld in opdracht van:

BRUSSELS INSTITUUT VOOR MILIEUBEHEER (BIM)  
GULLEDELLE 100  
B – 1200 BRUSSEL

Fase 3 betreft het opstellen van exploitatievoorwaarden voor waterstofstations, het opstellen van een checklist en het opstellen van een gids ten behoeve van de ambtenaren die belast zijn met de behandeling van de aanvraagdossiers.

## 1.2 CONTEXT EN DOEL VAN DE OPDRACHT

In het streven om de verdere economische ontwikkeling van onze geïndustrialiseerde maatschappij te verenigen met de beperking van de verontreinigende emissies, beschouwen velen waterstof als één van de meest veelbelovende alternatieve brandstoffen. Het gaat immers om een zuivere energiebron die uit eender welk basismateriaal kan worden aangemaakt.

Als vervangbrandstof voor vervoer kan waterstof rekenen op de bijzondere belangstelling van de grote autoconstructeurs die, geruggensteund door de overheid van de industrielanden, miljarden dollars investeren in de ontwikkeling van personenauto's, autobussen en vrachtauto's die op waterstof rijden. Terzelfder tijd wordt het probleem van de productie, opslag en distributie van waterstof bestudeerd, wat tot de geleidelijke installatie van 'waterstofstations' leidt.

Het resultaat van die inspanningen krijgt nu concreet vorm in tal van Europese steden, waar diverse demonstratieprojecten en langdurige testen met waterstofvoertuigen en –stations lopen. Brussel is geen uitzondering.

Het Brussels Hoofdstedelijk Gewest heeft als doel met deze studie het gebruik van waterstof als energievector op zowel technologische als reglementair vlak in kaart te brengen en daarbij de veiligheidsvoorschriften, de industriële specificaties en de procedures voor de periodieke inspectie van de installaties en de bestaande brandstofsysteemen te analyseren. Op deze manier kan het Gewest een antwoord bieden op het groeiend aantal aanvragen voor de installatie en exploitatie van (tijdelijke of definitieve) waterstofstations op zijn grondgebied.

Met deze studie wil het Brussels Hoofdstedelijk Gewest dan ook deze nieuwe technologie van nabij volgen om zo een bijdrage te leveren aan een duurzame mobiliteit.

### 1.3 METHODOLOGIE

Fase 3 van voorliggende studie betreft het opstellen van typevoorwaarden voor de exploitatie van waterstofstations. Daarnaast worden ter verduidelijking van deze typevoorwaarden documenten opgesteld ten behoeve van de ambtenaren die belast zijn of zullen worden met het behandelen van aanvraagdossiers.

De gids voor de ambtenaar vormt in feite een synthese van al het voorgaande en zal de ambtenaar op bevattelijke wijze een uitleg verschaffen met betrekking tot het gebruik van waterstof als energievector voor voor automobiel- en stationtoepassingen.

De gids voor de ambtenaar geeft een beschrijving van de voornaamste eigenschappen van waterstof, een overzicht van de specifieke gevaren en risico's die aan werken met waterstof verbonden zijn, maar ook een technische beschrijving van de verschillende mogelijke toepassingen die nodig zijn om waterstof te produceren, te verdelen en op te slaan.

Verder heeft de gids de bedoeling het gebruik van de checklist en van de typevoorwaarden voor waterstofverdeelstations toe te lichten.



## HOOFDSTUK 2 : TECHNISCHE GEGEVENS M.B.T. HET WERKEN MET WATERSTOF

---

### 2.1 EIGENSCHAPPEN VAN WATERSTOF

#### 2.1.1 FYSISCHE EIGENSCHAPPEN

Waterstof is een kleurloos en reukloos gas. Het is smaakloos en niet-giftig. Het is het kleinste en lichtste element dat gekend is. De dichtheid van gasvormig waterstof bedraagt 0.08988 g/L. Ter vergelijking: lucht heeft een dichtheid van 1.29 g/L.

Waterstofgas mengt heel goed in lucht en diffundeert hierdoor bij kamertemperatuur zeer snel en stijgt het na vrijzetting in de lucht vrijwel onmiddellijk omhoog. Dit is een voordeel in open ruimten maar houdt een risico in op slecht geventileerde plaatsen.

Het kookpunt van waterstof bedraagt  $-252.77^{\circ}\text{C}$ , het smeltpunt  $-259.14^{\circ}\text{C}$ . Vloeibaar en vast waterstof hebben nog steeds een zeer lage dichtheid van respectievelijk 70.8 g/L ( $-253^{\circ}\text{C}$ ) en 70.6 g/L ( $-262^{\circ}\text{C}$ ).

De ontvlambaarheid van waterstof is groter dan voor andere brandstoffen zoals methaan of benzine. Het verbrandt in lucht bij concentraties van 4-75 volume%. Ter vergelijking: methaan bij 5-15% en propaan bij 2-9%.

Daarenboven is de minimale vereiste ontstekingsenergie voor waterstof zeer laag (0,02 mJ) voor concentraties in de lucht tussen 13-59 volume %.

Dit alles maakt van waterstof een zeer licht ontvlambaar gas. Daarenboven is waterstofgas explosief, zeker wanneer het zich in een gesloten ruimte bevindt.

Waterstof brandt met een bijna onzichtbare vlam, waardoor ze moeilijk te detecteren zijn. Als in normale omstandigheden een vlam zichtbaar is, dan is dat het gevolg van onzuiverheden in de lucht die verbranden.

De resulterende vlammen zorgen slechts voor een beperkte warmtestraling, die bijvoorbeeld maar een tiende bedraagt van brandend propaan. In dit opzicht zijn waterstofbranden minder gevaarlijk dan gelijkaardige branden met koolwaterstoffen.

#### 2.1.2 ENERGETISCHE EIGENSCHAPPEN VAN WATERSTOF

Waterstof is geen energiebron, het is een energiedrager. Dat wil zeggen dat eerst energie gestoken moet worden in de productie ervan, die op zijn beurt wordt afgegeven bij verbranding.

Waterstof verbrandt met zuurstof ter vorming van water, waarbij energie wordt vrij gezet in de vorm van warmte.

De verbranding van waterstof is een schoon proces, waarbij enkel water(damp) gevormd wordt. In de praktijk zal door de hoge temperatuur gelijktijdige verbranding van kleine hoeveelheden stikstof ( $\text{N}_2$ ) optreden, waardoor ook een zekere hoeveelheid  $\text{NO}_x$  zal worden uitgestoten. Er wordt evenwel geen roet gevormd.

Doordat waterstof én zeer licht en klein is, én tegelijkertijd een grote energie-inhoud heeft, beschikt waterstof over de grootste energie/massaverhouding (*gravimetrisch energetisch vermogen*) van alle brandstoffen. 1 kg waterstof heeft dezelfde energie-inhoud als 2,1 kg aardgas of 2,8 kg benzine.

Doordat 1 kg waterstof echter zo veel plaats inneemt, is energie/volume-verhouding (*volumetrisch energetisch vermogen*) heel laag en bedraagt slechts 1/4 van deze van petroleum en 1/3 van aardgas.

In onderstaande tabel wordt het energetisch vermogen van waterstof vergeleken met waarden voor anderen, meer klassieke brandstoffen.

Tabel # 2.1 : Energie-inhoud voor verschillende brandstoffen		
BRANDSTOF	GRAVIMETRISCH ENERGETISCH VERMOGEN	VOLUMETRISCH ENERGETISCH VERMOGEN
Waterstof (200 bar)	141 MJ/kg	2,4 MJ/liter
Waterstof (vloeibaar)	141 MJ/kg	10 MJ/liter
Methanol (vloeibaar)	22,7 MJ/kg	19 MJ/liter
Benzine (vloeibaar)	47,6 MJ/kg	33,4 MJ/liter
Methaan (vloeibaar)	55,7 MJ/kg	25 MJ/liter

Het volumetrisch energetisch vermogen neemt toe met toenemende druk en is het hoogst voor vloeistoffen, als gevolg van een hoogste dichtheid.

Vergeleken met fossiele brandstoffen is dus een veel groter volume nodig om éénzelfde hoeveelheid energie op te slaan in waterstof onder druk of zelfs in vloeibare toestand

### 2.1.3 WATERSTOF EN HET MILIEU

De eigenschappen van het grootschalig gebruik van waterstof op het milieu zijn niet bekend. Het is niet-giftig en kan niet beschouwd worden als een pollutant.

Waterstof is maar in zeer beperkte hoeveelheden, zo'n 0,5 ppm, terug te vinden in de atmosfeer. Waterstof komt voorts in de atmosfeer terecht door menselijke of andere processen.

Waterstof verlaat de atmosfeer weer door depositie en van daaruit door microbiële opname in de bodem. Waterstof heeft ook de capaciteit om te ontsnappen aan de atmosfeer en te 'lekkers' naar de ruimte toe, maar dit blijkt in de praktijk verwaarloosbaar.

De 'bodems' wordt, milieutechnisch, dan ook aanzien als het grootste waterstofreservoir, die verantwoordelijk wordt geacht voor 75% van de opname van de waterstof uit de atmosfeer.

De overige 25% van de waterstof in de atmosfeer reageert weg met vrije hydroxylradicalen, volgens onderstaande reacties. Dit proces grijpt in in de ozoncyclus. Deze cyclus maakt deel uit van een atmosferisch evenwicht, waarbij pollutanten uit de atmosfeer verwijderd worden.

Als nu, als gevolg van een waterstofeconomie, deze waterstof de concentratie aan vrije hydroxylradicalen in de atmosfeer doet dalen, zal ook de capaciteit van de atmosfeer om pollutanten te oxideren verminderen. In het meest ideale geval zou dit teniet moeten gedaan worden door het feit dat er in een waterstofeconomie ook minder pollutanten zoals CO<sub>2</sub> of NO<sub>x</sub> geëmitteerd worden.

Waterstof wordt aanzien als een duurzame en schone energiedrager. Veel heeft te maken met het feit dat de perceptie leeft dat waterstof gemaakt wordt uit puur water en dat bij verbranding terug enkel water wordt uitgestoten. Het gebrek aan andere emissies, voornamelijk dan koolstofdioxide, stikstofdioxide en roet, speelt sterk in het voordeel van waterstof, zeker als het gebruikt wordt ter vervanging van de meer conventionele, fossiele brandstoffen.

Dit beeld wijkt echter sterk af van de realiteit, en wel om meerdere redenen. Ten eerste zijn er bij lange na niet genoeg middelen om waterstof duurzaam te produceren, zodat er nog steeds belangrijke hoeveelheden fossiele brandstoffen, in primaire en/of secundaire vorm, gebruikt moeten worden om waterstof te maken. Hierbij zal mogelijk meer CO<sub>2</sub> vrijkomen, dan wanneer de fossiele brandstoffen gewoon direct zouden worden verbrand. Een klein voordeel is wel dat het maken van waterstof uit fossiele brandstoffen de mogelijkheid geeft het gevormd CO<sub>2</sub> af te vangen en te stockeren, waar dat voor de gewone verbranding niet mogelijk is.

Ten tweede is het gebruik van waterstof zeker niet emissievrij. Er was al sprake van de vrijzetting van potentieel enorme hoeveelheden CO<sub>2</sub> bij de productie ervan, zowel door reforming als door het gebruik van grote hoeveelheden klassiek opgewekte elektriciteit. Voor andere pollutanten, zoals NO<sub>x</sub> of SO<sub>2</sub> zal het waarschijnlijk onvermijdelijk zo zijn dat alles beter is dan de verbranding van fossiele brandstoffen. In die zin is het schoner de fossiele brandstoffen om te zetten in waterstof door middel van reforming, dan ze rechtstreeks te verbranden.

Een derde punt dat aangehaald moet worden, is dat het onduidelijk is wat de waterstofeconomie, en dus het doorgedreven gebruik van waterstof als energiedrager, zou doen met het milieu. Er zijn reeds meerdere malen stoffen verboden, waarvan het effect van hoge concentraties in de atmosfeer anders of erger was gebleken dan verwacht.

#### 2.1.4 VEILIGHEIDSASPECTEN VAN WATERSTOF

Het grootste gevaar van het werken met waterstof is dat van ongewenste ontbranding.

Waterstof – luchtmengsels hebben een breed ontstekingstraject, een lage ontstekingsenergie en branden met een zeer hete vlam.

Aan de andere kant is de warmtestraling van een waterstofbrand zeer gering, wat het risico op secundaire effecten aanzienlijk verkleint.

De grote vluchtigheid van waterstof is de grootste veiligheidstroef. Afhankelijk van de druk en temperatuur bij vrijzetting en afhankelijk van het vrijzettingsdebiel, zal waterstof zich in de omgeving verspreiden tot aan de ondergrens van het ontstekingstraject. Dit kan zijn tot op 6 tot 12 meter van het emissiepunt. Ook verderaf gelegen ontstekingsbronnen vormen in dus een risico.

Als waterstof ontbrandt, zal het van de concentratie afhangen of er een explosie volgt. Waterstofexplosie zijn voornamelijk een probleem op plaatsen waar waterstof zich kan accumuleren, zoals in afgesloten ruimtes zonder een afdoende ventilatie.

Bij een waterstofexplosie worden zeer hoge propagatiesnelheden gehaald. Dit is de reden waarom een voortschrijdende waterstofvlam moeilijk te doven of in te perken is.

Indien waterstof onmiddellijk ontsteekt na emissie uit bijvoorbeeld een klein lek, zal zich een fakkelbrand voordoen. De secundaire effecten van dergelijke brand kunnen op korte afstanden belangrijk zijn en eventueel leiden tot domino-effecten.

Bij hogere temperaturen en drukken tast waterstof staal aan, waardoor brosheid en decarbonisatie van het staal kunnen optreden. Het gebruik van aangepaste materialen bij de behandeling van waterstof is dan ook noodzakelijk.

Waterstof heeft daarbij de eigenschappen op te lossen in bepaalde (vaste) metalen en zo zekere afstanden te overbruggen. Zo kan het metaal palladium tot meer dan 1000 keer het volume aan waterstof opnemen.

Waterstoflekken zijn veel voorkomend. Waterstof diffundeert immers zeer gemakkelijk door de kleinste openingen.

Voor waterstof zijn geen toxische eigenschappen bekend. Bij blootstelling aan hoge concentraties kan waterstof evenwel een verstikkende werking hebben.

Op basis van de specifieke veiligheidsrisico's werden veiligheidsafstanden bepaald ten opzichte van mogelijke emissiepunten van waterstof. Deze veiligheidsafstanden zijn strikt na te leven. Er kan slechts van afgeweken worden op basis van een gemotiveerde veiligheidsstudie.

De veiligheidsafstanden zijn gedefinieerd ten opzichte van verschillende receptorpunten, die soms zelf ook een risico voor de installatie inhouden.

Voorbeelden van dergelijke punten zijn bijvoorbeeld nabijgelegen opslag van brandbare stoffen, de terreingrens, gebouwen, andere installaties, hoogspanningsleidingen en dergelijke meer.

### 2.1.5 SPECIALE EIGENSCHAPPEN VAN VLOEIBAAR WATERSTOF

Waterstof heeft het op één na laagste kookpunt van alle gassen. Enkel helium doet beter. Vloeibare waterstof is dus extreem koud en heeft daardoor specifieke effecten op de omgeving en op de gezondheid.

In de eerste plaats is het een vloeistof. Dat maakt dat wanneer vloeibaar waterstof vrijgezet wordt, die langer aanwezig blijft alvorens te verdwijnen.

Door deze extreme koude kan vloeibaar waterstof, maar ook de zeer koude gassen die bij verdamping vrijkomen, bij contact ernstige brandwonden veroorzaken. Gevoelige weefsels, zoals de ogen, kunnen in een fractie van een moment beschadigd worden.

Ook contact met niet geïsoleerde leidingen die de koude vloeistof bevatten, kan leiden tot ernstige schade en wonden, door vastvriezing.

Niet alleen op de mens, plant of dier heeft cryogeen waterstof een negatief effect. Ook materialen zoals staal, plastic of rubber vervriest, verliest deels zijn flexibiliteit en kan dan breken. Dit fenomeen wordt waterstofbrosheid genoemd.

De koude heeft ook een effect op andere vloeistoffen en gassen die ermee in contact komen. Bij dergelijke koude temperaturen zullen andere stoffen condenseren en/of bevriezen. Hierdoor kunnen kleppen, valven of zelfs hele leidingsystemen blokkeren of zelfs uiteenspatten. Voor bijvoorbeeld noodsystemen als het brandpreventiesysteem kan dit zeer nadelig uitdraaien.

Het condenseren van de lucht in vloeibare waterstof kan zelfs tot aanzienlijke explosierisico's leiden.

Vloeibaar waterstof heeft slechts een kleine verdampingswarmte nodig en begint dus zeer snel te koken en te verdampen. Wanneer dit te snel gebeurt, kan dit leiden tot wegspatten van vloeistofdruppels, wat op zich een risico is.

Het grote verschil tussen de temperatuur van cryogeen waterstof en van de omgeving zal trouwens een continue verdamping aandrijven, waardoor er steeds gezorgd moet worden dat de zo ontstane waterstofdampen, bijvoorbeeld in een opslagtank, steeds veilig geventileerd kunnen worden naar de omgeving.

Het koude gas dat ontstaat is zwaarder dan lucht en zal zich dus verzamelen in de diepste punten van de omgeving, vanwaaruit het dan verder opwarmt en snel diffundeert. De koude van de waterstof en de warmte die het onttrekt aan de omgeving om te verdampen, zal leiden tot het condenseren van het vocht in de lucht, waardoor een duidelijke mistvorming plaatsvindt, die wijst op een lek van vloeibare waterstof.

Eén liter vloeibare waterstof zal daarbij ongeveer 850 liter gas gevormd hebben.

Een ander effect van de extreme koude, zeker voor slecht of niet-geïsoleerde leidingen of vaten, is dat de omgevingslucht vloeibaar wordt. Stikstof zal daarbij eerder condenseren dan zuurstof, waardoor er een aanrijking plaatsvindt van deze laatste component, wat dan op zijn beurt weer het brandgevaar verhoogt.

## 2.2 PRODUCTIE VAN WATERSTOF

### 2.2.1 ELEKTROLYSE

De eenvoudigste manier om waterstof te produceren is door elektrolyse. Hierbij wordt water onder invloed van elektrische stroom omgezet in waterstof en zuurstof. Water wordt geoxideerd aan de anode ter vorming van zuurstof ( $O_2 + 4H^+ + 4e^-$ ) en gereduceerd aan de kathode ter vorming van waterstof ( $H_2 + 4OH^-$ ). Deze splitsing gebeurt bij normale condities (temperatuur en druk). Het is een erg eenvoudig maar energie-intensief proces. Over het algemeen is de energie die in het proces gestopt moet worden hoger in waarde dan de waterstof die er mee gegenereerd wordt. Dit proces, dat maar voor slechts 5% van de wereldwijde productie instaat, is dan ook voornamelijk geschikt voor de ad hoc synthese van zeer zuivere waterstof.

Andere vormen van elektrolyse zijn hoge temperatuurelektrolyse (HET), waarbij water gesplitst wordt onder invloed van warmte, die wordt geleverd door warmtepompen. Het proces is efficiënter dan elektrolyse bij kamertemperatuur, omdat de inefficiënte stap van het omzetten van warmte naar elektriciteit wordt overgeslagen. Hoge temperatuur-elektrolyse (HTE) bestaat voorlopig nog niet op industriële schaal. Er zijn immers zijn stabiele bronnen van grote hitte nodig. HTE kan niet wedijveren met de chemische omzetting van koolwaterstof in waterstof, omdat deze omzettingen niet gehinderd worden door de inefficiëntie van warmtemachines.

Bij thermochemische elektrolyse wordt door toevoeging van warmte aan de chemisch proces een cyclus geïnduceerd, waarbij water gesplitst wordt, waarbij  $H_2$  ontstaat. De netto reactie is elektrolyse van water in waterstof en zuurstof, gekatalyseerd door een thermochemische cyclus, onder invloed van warmte-energie. Dergelijke thermochemisch processen kunnen efficiënter zijn dan HTE, omdat de inputenergie enkel uit warmte bestaat en niet langer elektriciteit vergt. Op grote schaal kan het proces nog niet toegepast worden.

Bij de elektrolyse van zout wordt waterstof geproduceerd als nevenproduct (samen met NaOH) van de productie van chloor ( $Cl_2$ ) uit pekkel (zout water). Gezien het waterstof slechts een nevenproduct is van een ander proces, wordt het niet als dusdanig op grote schaal toegepast.

### 2.2.2 REFORMING

Het is mogelijk waterstof te winnen uit koolwaterstoffen. Een nevenproduct van deze winning is  $CO_2$ . Het proces wordt aangeduid als reforming. In dit chemische proces wordt een brandstof in aanwezigheid van stoom en/of zuurstof en een katalysator omgezet in een waterstofrijk gasmengsel of reformaat.

In de meest gebruikte reformingstechniek wordt aardgas samengevoegd met stoom bij een temperatuur van  $850^\circ C$  en een druk van 25 bar. Het resulterende waterstofgas heeft een mindere zuiverheid dan wanneer geproduceerd door elektrolyse en zal een extra zuivering moeten ondergaan. Dit proces is, gezien de energiekosten, het meest gebruikte voor de productie van industriële waterstof. Ongeveer 95% van de op dit moment geproduceerde waterstof wordt op deze manier gemaakt.

Steenkool kan dienen als alternatieve grondstof voor reforming-processen. Het wordt eerst omgezet in CO en methaan (stadsgas) en waarna waterstof wordt onttrokken

Ook andere koolwaterstoffen kunnen op dezelfde manier gebruikt worden als brandstof voor dit proces. Zo zou de conversie van bio-ethanol of biodiesel ook mogelijkheid bieden als hernieuwbare grondstof voor het reformen van koolwaterstoffen.

### 2.2.3 BIOLOGISCHE PRODUCTIE

Bepaalde types algen schakelen over van de klassieke fotosynthese, waarbij zuurstof wordt gevormd, naar een waterstofproducerende cyclus, wanneer ze niet kunnen beschikken over het element zwavel.

Dit proces is momenteel nog maar weinig efficiënt en wordt dus nog niet op grote schaal toegepast. Verscheidende testreactoren, waarin algen waterstof produceren, worden momenteel geëxploiteerd, waarbij de optimale randvoorwaarden worden onderzocht.

## 2.3 OPSLAG VAN WATERSTOF

Zoals werd aangegeven in het inleidend hoofdstuk heeft waterstof een lage gasdichtheid en laag kookpunt, wat maakt dat de opslag ervan een belangrijke technologische uitdaging vormt. Hieronder worden de verschillende opslagvormen besproken.

De drie belangrijkste opties om waterstof op te slaan zijn:

- Gasvormige opslag onder druk (CGH<sub>2</sub>)
- Cryogene opslag van vloeibaar waterstof (LH<sub>2</sub>)
- Opslag in een vaste stof (methaalhydrides...)

### 2.3.1 CRYOGENE OPSLAG VAN VLOEIBAAR WATERSTOF (LH<sub>2</sub>)

Waterstof wordt vloeibaar bij temperaturen lager dan -253 °C onder atmosferische condities en kan als dusdanig opgeslagen en getransporteerd worden.

Vloeibare waterstof heeft een dichtheid van 70 kg/m<sup>3</sup> wat meer is dan bijvoorbeeld waterstof op 200 bar, maar nog steeds veel minder dan bijvoorbeeld water. Het volumetrisch energetisch vermogen van vloeibare waterstof is daardoor ook hoger dan voor samengedrukt waterstofgas.

Er zijn meerdere manieren om waterstof naar dergelijke lage temperaturen te brengen dat het vloeibaar wordt, waarbij meestal een combinatie van meerdere technieken wordt toegepast.

Het vloeibaar maken en houden van waterstof is echter een energie-intensief gebeuren. Het proces van het vloeibaar maken alleen vraagt al tot bijna 40% van de totale energie-inhoud van waterstof.

Opslag van vloeibaar waterstof moet rekening houden met belangrijke verdampingsverliezen die op een veilige manier geventileerd moeten kunnen worden.

### 2.3.2 GASVORMIGE OPSLAG ONDER DRUK (CGH<sub>2</sub>)

De opslag van waterstof gebeurt het meest onder de vorm van een gecomprimeerd gas. Specifieke technologie moet hierbij toegepast worden, aangezien waterstof, door zijn eigenschappen, zeer lekgevoelig is, zeker bij hoge drukken.

De meest gebruikte druk waaronder waterstof wordt opgeslagen is ongeveer 200 bar. Waterstof is ook op die druk commercieel beschikbaar. Gezien het lage volumetrisch energetisch vermogen van waterstof, is de actieradius van mobiele toepassingen beperkt bij normale tankgroottes, zeker in vergelijking met vloeibare waterstoftanks.

Het is een gekend proces, vergt veel minder energie en is gemakkelijker op te slaan en te distribueren.

Bij het aanwenden van hogedruk opslagtanks in voertuigen is het van belang dat lichte materialen gebruikt worden, die toch kunnen weerstaan aan de extreem hoge drukken en de doordringendheid van waterstof. Anders wordt het gewicht van de tank te bepalend om te kunnen aanwenden in transporttoepassingen. Uiteraard mag dit alles niet ten koste gaan van de veiligheid.

### 2.3.3 OPSLAG IN EEN VASTE STOF

Opslag in een vaste stof is nog niet mogelijk in kleine mobiele toepassingen. Voor grote opslagtoepassingen, zoals tussentijdse opslag, is het wel reeds mogelijk.

Er worden twee grote opslagmanieren onderscheiden:

- Opslag in poreuze materialen
- Opslag als methaalhydride

Opslag van waterstof kan gebeuren in poreuze materialen met een groot specifiek oppervlak. Deze materialen kunnen gebaseerd zijn op koolstof of op andere materialen, zoals silicium

Dit principe is gebaseerd op fysische adsorptie van  $H_2$  en/of chemische adsorptie van atomair waterstof, na dissociatie van  $H_2$ .

Voorwaarde is natuurlijk dat de materialen waterstof terug afgeven wanneer nodig. Meestal wordt dit gerealiseerd door middel van verhitting tot bepaalde temperaturen.

Voordelen van de opslag in siliciumstructuren is hun kostprijs, hun chemische eigenschappen en het feit dat ze als microporeus materiaal al zeer goed bestudeerd zijn.

In een metaalhydride wordt waterstof chemisch gebonden aan de atomen van een metaal of legering. Het waterstof kan aangevoerd worden als atomair waterstof (elektrolyt) of als moleculair waterstof, in welk geval de waterstof eerst ontbindt aan het oppervlak en dan pas oplost in het metaal. Bij desorptie gebeurt het omgekeerde: waterstof komt vrij als atomen en recombineren zich aan het oppervlak tot moleculaire waterstof. Opslag van moleculaire waterstof in metaalhydrides is niet mogelijk.

De vorming van het hydride, waarbij waterstof zich in de metaalstructuur nestelt, gaat dikwijls gepaard met een zekere uitzetting van het metaal. Het samengaan van uitgezet hydride en niet uitgezet metaal geeft spanningen, wat kan leiden tot fouten in de metaalstructuur en interne spanningsvelden, waardoor het metaal bros wordt en afbrokkelt.

Het voordeel van waterstofopslag in dergelijke structuren is de hoge belading met waterstof die gerealiseerd kan worden, de beperkte werkingsdrukken, en de volledige desorptie van waterstof bij dezelfde druk. Het nadeel is dat het metaal als opslagmedium zeer zwaar is.

Werken met metaalhydrides gaat gepaard met een aanzienlijke warmteuitwisseling, die tot meer dan 25% van de verbrandingswarmte van waterstof kan oplopen. Tijdens de vorming van het hydride komt warmte vrij die afgevoerd moet worden. Bij het onttrekken van waterstof moet warmte toegevoerd worden. Deze warmtehuishouding wordt optimaal geregeld in een geïntegreerd proces.

Zo is het reeds mogelijk dat brandstofcellen de warmte die ze opwekken bij de verbranding van waterstof gebruiken om die waterstof die ze nodig hebben te onttrekken aan de metaalhydrides.

## 2.4 VERDELING VAN WATERSTOF

Bij de bevoorrading van waterstofverdeelstations is het feit dat waterstof om het even waar geproduceerd kan worden een belangrijk gegeven, dus ook in situ. Uiteraard heeft dit zijn impact om de omgeving.

Productie van waterstof kan met behulp van modulaire eenheden. Deze modulaire eenheden kunnen gebaseerd zijn op de verschillende productietechnieken en worden meestal gelimiteerd door de randvoorzieningen, zoals compressoren en opslagvoorzieningen.

Het voordeel van in situ productie is dat er weinig of geen transport bij betrokken is, wat vanuit veiligheidsstandpunt te verkiezen is en dat er geen volledig geïntegreerde infrastructuur nodig is.

Vloeibare waterstof zal moeilijk op rendabele manier geproduceerd kunnen worden op of nabij de verdeelstations zelf. De in situ productie is dan ook weggelegd voor waterstofgas.

Aan de andere kant is het mogelijk waterstof gecentraliseerd te produceren en daarna te transporteren via pijpleidingen of via wegtransport. Voorlopig is het enkel mogelijk zuiver waterstof doorheen pijpleidingen te transporteren, maar gezien de hoge kosten van een dergelijk netwerk is het weinig waarschijnlijk dat het een valabel alternatief zal zijn voor een wijd vertakt netwerk.

Wegtransport is een andere manier om waterstofverdeelstations te bevoorraden. Waterstoftransport zal echter beperkt worden door het volume van de vrachtwagen, en niet langer door het gewicht van de lading. Een vrachtwagen met een inhoud van 40 ton, vervoert immers maar ongeveer 320 kg waterstof bij een druk van 200 bar. Als daar ladingsverliezen worden bijgeteld, blijft de uiteindelijke hoeveelheid die aan de eindverbruiker wordt afgeleverd bijzonder klein, vergeleken met het transport dat er voor nodig is.

Hetzelfde geldt voor vloeibare waterstof, dat evenzeer een lage dichtheid heeft. Gezien alle randapparatuur en isolatie die nodig is voor cryogeen transport toch een zeker volume inneemt, kan berekend worden dat een normale vrachtwagen ongeveer 2.100 kg vloeibare waterstof kan transporteren.

De ongevalgevoeligheid van wegtransport van waterstof blijft evenwel een risicofactor, zeker gezien de hoeveelheden die ze transporteren. Het is dan ook belangrijk dat waterstofverdeelstations in dichtbewoonde gebieden vlot en eenvoudig te bereiken zijn voor het aanleveren van waterstof.

### 2.4.1 VERDELEN VAN WATERSTOF

De verdeling van waterstof is geen evident gegeven. Ofwel bevindt de waterstof zich op zeer hoge druk, tot 700 bar, ofwel op zeer lage temperatuur, minder dan  $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Zo zijn in het eerste geval drukondersteunende maatregelen nodig. Anders zou de druk in de waterstofopslagtank tijdens het ledigen gradueel verminderen tot uiteindelijk nul bar overdruk. Bij dergelijke drukdalingen mogen dan ook de temperatuurseffecten die hierbij spelen niet uit het oog verloren worden.

Daarenboven is het absoluut verboden dat waterstof naar de omgeving kan lekken, gezien zijn eigenschappen. De noodzakelijke technologie hiervoor is reeds beschikbaar.

Verlading van vloeibare waterstof kan gebeuren volgens twee verschillende principes.

Bij het "differential pressure system" wordt de vloeistoftank continu gevuld door het drukverschil tussen de externe tank en de voertuigtank. Dit drukverschil wordt niet genereerd. Het gevormde of



nog aanwezige waterstofgas in de voertuigtank wordt afgevoerd, hetzij eveneens continu (2-flow filling), hetzij sequentieel bij overschrijding van een bepaalde druk in de tank (1-flow filling). De duur van de tankbeurt bedraagt gemiddeld 5 minuten voor 2-flow filling en tot 7 à 8 minuten voor de 1-flow filling.

De verdampingsverliezen zijn echter groot en bedragen tot 8 gewichts-% van de totale hoeveelheid. Het teruggevoerde, gasvormige waterstof kan afgevangen en hergebruikt worden, maar betekent toch een essentieel verlies van energie, aanvankelijk in het systeem aanwezig.

Bij het "pressure raising system" wordt de vloeistoftank eveneens continu gevuld, maar wordt het drukverschil aangelegd, met behulp van een pomp. Deze pomp is geïntegreerd in de tank en laat toe te werken met 0% evaporatieverlies. De verschillende systemen moeten hier evenwel voor uitgerust zijn.

Een verdeelstation uitgerust met een opslagtank met geïntegreerde pomp geniet de voorkeur, gezien de minimale verdampingsverliezen.

Indien het verdeelstation beschikt over een meer conventionele tank, geniet de 2-flow filling de voorkeur, gezien de kortere vultijden.

In ieder geval zullen verdeelstations moeten beschikken over een speciale 'interface', brandstofslang zeg maar, voor het veilig uitvoeren van vuloperaties met cryogene vloeistoffen. Dergelijke interfaces zijn reeds op de markt. Ze zullen afhankelijk zijn van het gekozen systeem.

Voor het verdelen van gasvormig waterstof zijn verschillende mogelijkheden, afhankelijk van de manier waarop waterstof wordt opgeslagen.

Waterstof kan ofwel op lage druk aan het verdeelsysteem gevoed worden, ofwel op einddruk, zij het 200, 350 of zelfs 700 bar.

Het spreekt voor zich dat de opslag op einddruk de snelste manier is om een tank te vullen, want de waterstof kan zonder bijkomende bewerking afgeleverd worden. Dit wil ook zeggen dat er voldoende externe opslag voorzien moet worden op dergelijke hoge drukken. De vulling zelf gebeurt in dit geval door het verschil in druk.

Dergelijke hoge drukopslag van waterstof stelt wel specifieke eisen aan het opslagsysteem en de veiligheid ervan.

Om dit te verhelpen wordt reeds gebruik gemaakt van systemen waarin de waterstof op tussendruk wordt opgeslagen en bij levering vervolgens met behulp van krachtige compressoren (zogenaamde boostercompressoren) snel wordt opgedrukt en afgeleverd.

Een andere manier is de opslag van waterstof op lage of tussendruk in grote hoeveelheden en een kleine buffertank op hoge druk, die gevoed wordt door een compressor, en die de levering vlot en snel laat verlopen, op basis van het in de kleine buffertank beschikbare volume.

De tussenopslag kan gebeuren in metaalhydrides. Installaties die op deze manier werken, zijn al in gebruik. Zoals immers eerder gezegd, bestaan voor metaalhydrides reeds tal van stationaire toepassingen waarvan dit een voordeel is.

Een andere mogelijkheid is het afvullen van de tank met lage druk waterstof, waarbij de compressie bewerkstelligd wordt door het verpompen en het vullen zelf. Het nadeel van dergelijke operaties is de lange duur van de vuloperaties. Dit maakt ook dat er relatief gezien veel plaats nodig is voor het vullen van een groter wagenpark, aangezien de doorstroming, en dus het aantal cycli eerder beperkt is.

Ook voor het vullen met hogedruk waterstof zal aan de afvulapparatuur de nodige eisen gesteld moeten worden met betrekking tot de veiligheid, gezien de hoge drukken waaraan gewerkt wordt en de karakteristieken van de brandstof.

Vastestoffenopslag is reeds mogelijk in grote stationaire toepassingen (cfr. supra) omdat hier tegemoet gekomen kan worden aan de eisen die dergelijke systemen stellen aan druk en temperatuur. De opslag en verdeling wordt in dat geval geregeld door te spelen met de temperatuur van het hydridesysteem, met behulp van warmtewisselaars.

#### 2.4.2 WATERSTOFVERDEELSTATIONS

Los van in situ productie-installaties bestaan waterstofverdeelstations uit verschillende eenheden:

- Opslageenheden (gas – cryogeen – vast stof)
- Compressoren
- Filtereenheden voor zuurstof, vocht en andere onzuiverheden
- Leidingnetwerk
- Overdrukventielen en afblaassysteem (voor elk ander onderdeel van de installatie)
- Verdeelinstallatie(s)
- Verdeelslang(en)

## HOOFDSTUK 3 : GLOBALE SITUERING

---

In het streven om de verdere economische ontwikkeling van onze geïndustrialiseerde maatschappij te verenigen met de beperking van de verontreinigende emissies, beschouwen velen waterstof als één van de meest veelbelovende alternatieve brandstoffen. Het gaat immers om een zuivere energiebron die uit eender welk basismateriaal kan worden aangemaakt.

Als vervangbrandstof voor vervoer kan waterstof rekenen op de bijzondere belangstelling van de grote autoconstructeurs die, geruggensteund door de overheid van de industrielanden, miljarden dollars investeren in de ontwikkeling van personenauto's, autobussen en vrachtauto's die op waterstof rijden. Terzelfder tijd wordt het probleem van de productie, opslag en distributie van waterstof bestudeerd, wat tot de geleidelijke installatie van 'waterstofstations' leidt.

Het resultaat van die inspanningen krijgt nu concreet vorm in tal van Europese steden, waar diverse demonstratieprojecten en langdurige testen met waterstofvoertuigen en -stations lopen. Brussel is geen uitzondering.

Het Brussels Hoofdstedelijk Gewest wil met behulp van deze exploitatievoorwaarden ondersteuning bieden aan deze nieuwe technologie om zo een bijdrage te leveren aan een duurzame mobiliteit.

Er bestaan als dusdanig geen richtlijnen die het gebruik van waterstof regelen. Waterstofverdeelstations moet evenwel in overeenstemming zijn met de volgende richtlijnen:

- Richtlijn 97/23/EG van het Europees Parlement en de Raad van 29 mei 1997 inzake de onderlinge aanpassing van de wetgevingen der lidstaten betreffende drukapparatuur.
- Richtlijn 94/9/EG van het Europees Parlement en de Raad van 23 maart 1994 inzake de onderlinge aanpassing van de wetgevingen van de Lid-Staten betreffende apparaten en beveiligingssystemen bedoeld voor gebruik op plaatsen waar ontploffingsgevaar kan heersen.
- Richtlijn 1999/92/EG van het Europees Parlement en de Raad van 16 december 1999 betreffende minimumvoorschriften voor de verbetering van de gezondheidsbescherming en van de veiligheid van werknemers die door explosieve atmosferen gevaar kunnen lopen

De exploitatievoorwaarden zijn opgesteld voor het gebruik van vloeibare en/of gasvormig waterstof.

## HOOFDSTUK 4 : GEBRUIKSAANWIJZING VOOR HET BEOORDELEN VAN HET AANVRAAGDOSSIER

### 4.1 INDELING

De exploitatievoorwaarden worden opgelegd aan installaties voor het opslaan en verdelen van waterstof als voertuigbrandstof.

Waterstofverdeelstations worden ingedeeld onder minstens één van volgende rubrieken:

70	-	Inrichtingen voor het vullen van verplaatsbare recipiënten, van welke aard ook, met samengeperst, vloeibaar gemaakt of onder een druk hoger dan 1kg/cm <sup>2</sup> opgelost gehouden gas	1B
71	B	Industriële inrichtingen voor gasscheiding, fysische gasverwerking & Gassamenpersingsstations (met uitzondering van luchtcompressoren), gasuitzettingsstations (met uitzondering van uitzettingsposten waarvoor het gas niet verwarmd hoeft te worden)	1B
72	A	Gashouders, opslagplaatsen voor vaste recipiënten van samengeperst, vloeibaar gemaakt of in oplossing gehouden gassen, (met uitzondering van opslagplaatsen voor handelsbutaan en –propan en hun mengsels) met een totale inhoud in liters: van 300 tot en met 1.000 liter	2
72	B	Gashouders, opslagplaatsen voor vaste recipiënten van samengeperst, vloeibaar gemaakt of in oplossing gehouden gassen, (met uitzondering van opslagplaatsen voor handelsbutaan en –propan en hun mengsels) met een totale inhoud in liters: van 1.000 tot en met 1.000.000 liter	1B
225	-	Opslagplaatsen voor vaste recipiënten van samengeperst, vloeibaar gemaakt of in oplossing gehouden gassen (uitgenomen de opslagplaatsen voor handelsbutaan en –propan en hun mengsels) met een totaalinhoud, in liters, van meer dan 1.000.000 liter.	1A

Wordt het waterstof binnen de grenzen van de volledige inrichting geproduceerd, dan is deze activiteit ingedeeld onder één van de rubrieken:

73	A	Vaste inrichtingen voor gasproductie (met uitzondering van cokesfabrieken) met een capaciteit tussen 1 Nm <sup>3</sup> /u en 1.000 Nm <sup>3</sup> /u	1B
226	-	Vaste inrichtingen voor de productie van gassen (uitgenomen de cokesfabrieken) met een capaciteit hoger dan 1.000 Nm <sup>3</sup> /h.	1A

**Cryogene opslag van vloeibaar waterstof wordt niet afzonderlijk ingedeeld en vergt onder normale omstandigheden geen additionele koelinstallaties!**

Er wordt verder bij de indeling geen onderscheid gemaakt in het type of de aard van de opslag.

## 4.2 WATERSTOFVERDEELSTATION

Een locatieonderzoek voor de inplanting van een waterstofverdeelstation is noodzakelijk. Dit gebeurt aan de hand van een evaluatie van de veiligheidsafstanden die gerespecteerd moeten worden tussen alle mogelijke waterstofemissiepunten van de inrichting en gedefinieerde omgevingsobjecten daarbinnen en buiten.

Volgende gegevens zijn ter wille van dit locatieonderzoek van belang in het aanvraagdossier.

### 4.2.1 AARD VAN DE OPSLAG

2. Aard van de opslag?	Vloeibaar waterstof	Ja / Neen
	Gasvormig waterstof	Ja / Neen
	Hoeveelheid	..... liter / ..... m <sup>3</sup>
	Werkingsdruk	..... bar

Voordat een milieuvergunning afgeleverd wordt, moet evenwel geweten zijn welk type opslag er plaatsvindt (vloeibaar waterstof en/of samengeperst waterstof) zodat er specifieke exploitatievoorwaarden opgelegd kunnen worden.

Indien er overgeschakeld wordt op een ander type opslag, moet dit éérs gemeld worden aan het BIM. Het BIM moet het voorstel van omschakeling namelijk goedkeuren en, indien nodig, de lopende milieuvergunning wijzigen.

### 4.2.2 WATERSTOFSYSTEEM

Naast de opslag bestaat het waterstofverdeelstation uit andere activiteiten voor de behandeling en het transfereren van waterstof.

3. Hoofdactiviteit	Welke bijkomstige installaties worden voorzien?		
	▪ Opslagtanks	Ja / Neen	Hoeveel? Inhoud? Druk ? Temperatuur?
	▪ Compressor(en)	Ja / Neen	Hoeveel? Type? Vermogen?
	▪ Buffertanks	Ja / Neen	Hoeveel? Inhoud? Druk? Temperatuur?
	▪ Filterinstallaties	Ja / Neen	Hoeveel? Type?
	▪ Verdampers	Ja / Neen	Hoeveel? Type? Capaciteit?
	Is een inplantingsplan aanwezig waarop de verschillende installaties staan aangeduid?	Ja / Neen	
Is een stroomschema toegevoegd met aanduiding van de essentiële veiligheidsuitrusting (noodstop, kleppen, ventielen...)?	Ja / Neen		

	Wordt een beschrijving gegeven van de voornaamste geplande maatregelen om de negatieve effecten op het waterstofsysteem (impact, hekwerk, aanwezigheid andere stoffen...)		
--	---	--	--

Het aanvraagdossier dient een overzicht te bevatten van deze eenheden, inclusief hun technische karakteristieken, begeleid door de nodige stroomschema's en plannen van de opzet van het volledige waterstofsysteem!

Op basis hiervan moet de aanvrager een plan toevoegen met een indicatie van alle mogelijke emissiebronnen waar waterstofvrijzetting kan optreden.

#### 4.2.3 ANDERE ACTIVITEITEN

4. Overige activiteiten	Gebeurt er opslag van ontvlambare, licht ontvlambare en/of oxiderende gassen en/of vloeistoffen op het terrein?	Ja / Neen	Welke?
	Worden andere vergunningsplichtige activiteiten uitgeoefend op het terrein?	Ja / Neen	Welke?

Andere activiteiten die op het terrein plaatsvinden, in het bijzonder de bovengrondse en/of ondergrondse opslag van ontvlambare, licht ontvlambare en oxyderende gassen en vloeistoffen worden eveneens opgelijst en aangeduid op plan.

#### 4.2.4 OMGEVING

De aanvrager voegt bij het dossier een gedetailleerd plan van de omgeving waar minstens de receptoren in de omgeving op vermeld staan, meer bepaald:

- De terreingrens
- Alle gebouwen en/of gebouwde structuren binnen een straal van minstens 20 meter, te nemen vanaf de terreingrens
- Bovengrondse elektriciteitsleidingen
- Publieke gebouwen
- Plaatsen waar veel mensen samenkomen
- Parkeerterreinen, parkeerstroken en stoepen
- Eventueel de afstand tot de naaste mogelijk te bebouwen oppervlak.

#### 4.2.5 VEILIGHEIDSAFSTANDEN

Op basis van voorgaande wordt een evaluatie gemaakt van de inplanting van het project ten opzichte van de nabije omgeving.

Zowel voor vloeibaar waterstof als samengeperst, gasvorming waterstof gelden bepaalde te respecteren veiligheidsafstanden, afhankelijk van de hoeveelheid opgeslagen waterstof (in m<sup>3</sup> voor gasvormig waterstof – in liter voor vloeibaar waterstof).

5. Veiligheidsafstanden	Zijn de veiligheidsafstanden gerespecteerd?	Ja
-------------------------	---	----

Indien een omschakeling in het type opslag wordt aangevraagd, dienen de veiligheidsafstanden voor het overeenkomstige type gecontroleerd te worden.

## **Acties**

### Milieuvergunning

- Exploitatievoorwaarden opnemen, aangepast aan het type opslag en de hoeveelheid aanwezig waterstof, onder voorbehoud van conformiteit met de veiligheidsafstanden bij oplevering van het project
- Indien er over geschakeld wordt op een ander type opslag of de hoeveelheid aanwezig waterstof verhoogd wordt, moet dit eerst aan het BIM gemeld worden voor goedkeuring. Op dit ogenblik zal de milieuvergunning gewijzigd worden zodat de exploitatievoorwaarden aangepast kunnen worden aan de nieuwe situatie.

Op basis van de vergunde hoeveelheden moet worden nagegaan of het een Seveso-inrichting betreft, zoals bepaald in de wet van 22 mei 2001 houdende instemming met het samenwerkingsakkoord van 21 juni 1999 tussen de Federale Staat, het Vlaams, het Waals en het Brussels Hoofdstedelijk Gewest betreffend de beheersing van de gevaren van zware ongevallen waarbij gevaarlijke stoffen zijn betrokken.

De lage drempelwaarde voor waterstof bedraagt 5 ton. De hoge drempelwaarde bedraagt 50 ton.

## **Acties**

### Milieuvergunning

- Exploitatievoorwaarden opnemen, aangepast aan het type opslag en de hoeveelheid aanwezig waterstof
- Indien er over geschakeld wordt op een ander type opslag of de hoeveelheid aanwezig waterstof verhoogd wordt, moet dit eerst aan het BIM gemeld worden voor goedkeuring. Op dit ogenblik zal de milieuvergunning gewijzigd worden zodat de exploitatievoorwaarden aangepast kunnen worden aan de nieuwe situatie.

5. Veiligheidsafstanden	Zijn de veiligheidsafstanden gerespecteerd?	Neen
-------------------------	---	------

## **Acties**

### Brief naar de aanvrager

Het waterstofverdeelstation moet **onmiddellijk** stopgezet worden.

Het aanvraagdossier wordt onvolledig verklaard:

- Noodzaak voor een veiligheidsstudie die een mogelijk afwijken van de veiligheidsstandpunten motiveert.
- Voorstel voor een nieuw ontwerp van het waterstofverdeelstation, op basis van de geldende veiligheidsafstanden

### Milieuvergunning

- Indien geen nieuw voorstel of veiligheidsstudie ingediend wordt: weigering van de milieuvergunning;
- Indien een voorstel wordt ingediend voor een ander ontwerp van het waterstofverdeelstation, of er wordt overgeschakeld op een ander type opslag of de hoeveelheid aanwezig waterstof verhoogd wordt: evaluatie van de veiligheidsafstanden voor het aangepast type opslag of hoeveelheid;
- Indien een veiligheidsstudie wordt ingediend: evaluatie van de veiligheidsstudie door de bevoegde administratie alvorens de milieuvergunning toe te kennen of te weigeren.

### 4.3 ONTWERP, CONSTRUCTIE EN PLAATSING VAN DE INSTALLATIES

De handelingen, voorafgaande aan de ingebruikname moeten gebeuren conform de bepalingen van de van toepassing zijnde normen en regelgeving.

1. In dienst?		Neen
---------------	--	------

#### **Acties**

##### Milieuvergunning:

- Exploitatievoorwaarden in de milieuvergunning opnemen, aangepast aan het type en de hoeveelheid van de opslag, met aanduiding van het afleveren van de nodige documenten die nodig zijn voor het in dienst stellen van de installatie:
  - Conformiteitsattesten (oplevering, AREI, PED...)
  - Explosieveiligheidsdocument (conform de ATEX-richtlijnen)
  - Veiligheidsrapport (conform de Seveso-richtlijnen – indien nodig)

3. Hoofdactiviteit - waterstofsysteem	Zijn de nodige veiligheidskleppen/noodstoppen voorzien in het systeem	Neen
---------------------------------------	---	------

#### **Acties**

##### Brief naar de aanvrager

Het waterstofverdeelstation moet **onmiddellijk** stopgezet worden.

Het aanvraagdossier wordt onvolledig verklaard:

- Voorstel voor een nieuw ontwerp van het waterstofverdeelstation

##### Milieuvergunning

- Indien geen nieuw voorstel: weigering van de milieuvergunning;
- Indien een voorstel wordt ingediend voor de aanpassing van het minimaal aantal te voorziene veiligheidskleppen: exploitatievoorwaarden opnemen in de milieuvergunning

6. Gebouw	Wordt het waterstofsysteem of delen ervan ondergebracht in een daartoe voorzien gebouw?	Ja
-----------	---	----

**Het waterstofsysteem of delen daarvan kan ondergebracht worden in een daartoe voorzien gebouw.**

#### **Acties**

##### Milieuvergunning:

- Exploitatievoorwaarden in de milieuvergunning opnemen, aangepast aan het type en de hoeveelheid van de opslag, meer bepaald de bepalingen waaraan het gebouw moet voldoen.

**Afwijkingen ten opzichte van deze bepalingen zijn niet voorzien!**

### 4.4 VEILIGHEID, MOBILITEIT EN MILIEU

7. Veiligheid	Zijn evacuatiepunten beschikbaar	Ja / Neen
---------------	----------------------------------	-----------

Kan de exploitant aantonen dat de nodige evacuatiemogelijkheden aanwezig zijn?



### **Acties**

#### Brief naar de aanvrager

Het waterstofverdeelstation moet **onmiddellijk** stopgezet worden.

Het aanvraagdossier wordt onvolledig verklaard:

- Voorstel voor een nieuw ontwerp van het waterstofverdeelstation

#### Milieuvergunning

- Indien geen nieuw voorstel: weigering van de milieuvergunning;
- Indien een voorstel wordt ingediend voor de aanpassing van het minimaal aantal te voorziene veiligheidskleppen: exploitatievoorwaarden opnemen in de milieuvergunning

8. Milieu	Bevat de aanvraag een voorbereidende nota voor een effectenstudie (klasse IA) of een effectenverslag (klasse IB)	Ja / Neen
-----------	--	-----------

### **Acties**

#### Brief naar de aanvrager

Het aanvraagdossier wordt onvolledig verklaard:

- Voorbereidende nota voor een effectenstudie of het effectenverslag toevoegen aan de aanvraag

9. Mobiliteit	Is een globaal inplantingsplan ten opzichte van de omgeving met aanduiding van de voornaamste aanvoerroutes aanwezig? (Schaal 1:25.000 of kleiner)	Neen
	Is de impact van de inrichting op de lokale mobiliteit bestudeerd? Levert dit problemen op?	Neen

### **Gezien de veiligheidsrisico's die zijn verbonden aan het transport van waterstof is een vlotte bereikbaarheid van het waterstofverdeelstation noodzakelijk voor zowel klanten als leveranciers!**

Kan de aanvrager middels een gemotiveerd verslag aantonen dat de inplanting van het waterstofverdeelstation een vlotte bereikbaarheid garandeert en dat er geen significante impact is van de ligging van het waterstofverdeelstation of de lokale mobiliteit?

### **Acties**

#### Brief naar de aanvrager

Het aanvraagdossier wordt onvolledig verklaard:

- Globaal inplantingsplan ten opzichte van de omgeving toevoegen aan de aanvraag
- Verslag ter motivatie van de mobiliteitssituatie als gevolg van de aanwezigheid van de inrichting en het gevaarlijk transport dat erdoor gegenereerd wordt

#### Milieuvergunning

- Opnemen van de preferentiële aan- en afvoerroutes voor de bevoorrading van het waterstofverdeelstation

## HOOFDSTUK 5 : GEBRUIKSAANWIJZING VOOR HET BEOORDELEN VAN HET AANVRAAGDOSSIER

### 5.1 INDELING

1. In dienst?	Datum	.. / .. / ....
---------------	-------	----------------

Is de installatie in dienst genomen en zo ja wanneer? Beschikt de uitbater over alle nodige documenten?

- Conformiteitsattesten
- Actueel explosieveiligheidsdocument (in het kader van de ATEX-richtlijn), inclusief zoneringsplannen
- Indien vereist een veiligheidsrapport (in het kader van de Seveso-richtlijnen)

#### **Actie**

##### Brief naar de uitbater

De uitbater dient de ontbrekende stukken in bij de bevoegde administratie binnen redelijke termijnen. Indien de betrokken documenten niet voorhanden zijn, moet de uitbating van het waterstofverdeelstation **onmiddellijk** stopgezet worden.

2. Aard van de opslag?	Vloeibaar waterstof	Ja / Neen
	Gasvormig waterstof	Ja / Neen
	Hoeveelheid	..... liter / ..... m <sup>3</sup>
	Werkingsdruk	..... bar

Zijn er wijzigingen opgetreden ten opzichte van de afgeleverde milieuvergunning?

#### **Actie**

##### Brief naar de uitbater

Het waterstofverdeelstation moet **onmiddellijk** stopgezet worden.

De uitbater dient een aanvraagdossier in om de wijzigingen aan de installatie te melden.

### 5.2 CONTROLE VAN HET REGISTER

3. Controle register	Is het register beschikbaar?	Ja / Neen
	Zijn volgende documenten beschikbaar in het register?	
	▪ Een grondplan met aanduiding van de veiligheidsafstanden	Ja / Neen
	▪ Zoneringsplannen	Ja / Neen
	▪ Explosieveiligheidsdocumenten	
	▪ Testverslagen in het kader van de inbedrijfstelling	Ja / Neen

	▪ Certificaten en/of attesten m.b.t. conformiteit van de inrichting	Ja / Neen
	▪ Attestatie periodieke inspectie	Ja / Neen
	▪ Technische plannen met betrekking tot installatie, opslagtanks en leidingen	Ja / Neen
	▪ Stroomschema van de installatie	Ja / Neen
	▪ Technische gegevens van de opslagtanks	Ja / Neen
	▪ Instructies voor personeel, nooddiensten en andere bevoegden	Ja / Neen
	▪ Noodplannen	Ja / Neen
	▪ Onderhoudsplan en onderhoudsinstructies	Ja / Neen
	▪ Overzicht van de uitgevoerde onderhoudswerken	Ja / Neen
	▪ Incidentenregister	Ja / Neen

Zijn de documenten actueel en aangepast aan de meest recente situatie?

OPGEPAST: Een typekeuring voor een waterstofverdeelstation als geheel bestaat vooralsnog nog niet. Meerdere types keuringen door mogelijk verschillende keuringsorganismen (bv. elektriciteit, drukvaten, zonering...) zijn daardoor mogelijk!

### Actie

#### Brief naar de uitbater

De uitbater dient de ontbrekende stukken in bij de bevoegde administratie binnen redelijke termijnen. Indien de betrokken documenten niet voorhanden zijn, moet de uitbating van het waterstofverdeelstation **onmiddellijk** stopgezet worden.

Bij het ontbreken van attesten van periodieke keuringen en inspectie dient de uitbating van het waterstofverdeelstation onmiddellijk stopgezet te worden tot op het moment waarop de ontbrekende keuringen en/of inspecties werden uitgevoerd.

## 5.3 VISUELE INSPECTIE VAN HET WATERSTOFSYSTEEM

4. Waterstofsysteem	▪ Zijn de nodige afsluitkleppen, afblaasleidingen, overdrukventielen aanwezig zoals aangegeven op de plannen?	Ja / Neen
	▪ Zijn ze bereikbaar? Zijn ze zichtbaar en duidelijk aangegeven?	

### Actie

#### Brief naar de uitbater

De uitbating van het waterstofverdeelstation dient **onmiddellijk** stopgezet te worden, tenzij de uitbater gemotiveerd kan aantonen waarom afgeweken wordt.

4. Waterstofsysteem	▪ Gebruikte kleurencodes voor gasleidingen in overeenstemming met norm?	Ja / Neen
	▪ Is het terrein goed onderhouden en/of bevinden er zich brandbare materialen (vodden, papier, verdroogd onkruid, asfalt) op het terrein?	Ja / Neen
	▪ Is het waterstofsysteem afgesloten voor het publiek?	Ja / Neen
	▪ Is de nodige signalisatie aangebracht op het hekwerk?	Ja / Neen

	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Is het hekwerk in goede staat?</li> </ul>	Ja / Neen
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Is de ATEX-signalisatie (Ex) aangebracht in overeenstemming met de zoneringsplannen</li> </ul>	Ja / Neen

De aangebrachte kleurencodes zijn conform NBN 69 : kleuren voor het merken van pijpleidingen voor het vervoer van vloeibare of gasvormige stoffen in landinstallaties en aan boord van schepen:

Volgens deze norm is de "Basis-kenkleur voor gassen of vloeibare gassen (uitgezonderd lucht)" okergeel, met RAL-nummer 1004.

De kleur is in onderstaande balk aangeduid (bij benadering).



De basis-kenkleur kan naar keuze van de gebruiker aangebracht worden door:

- Verven over de hele lengte van de pijpleiding
- Als kleurband te verven om de pijpleiding over een lengte van ongeveer 150 mm, afhankelijk van de middellijn van de pijp
- Aanbrengen op de pijpleiding van een kleefband met de basis-kenkleur.

De basis-kenkleur moet bij voorkeur worden aangebracht bij alle verbindingen, aan weerszijden van afsluiters, van toestellen, van schotten, van muurdoorgangen en op alle punten waar het van belang is de aard van de vloeistof of het gas te kunnen bepalen.

Het gebruik van andere aanduidingen dan de kleur kan gebeuren naar keuze van de uitbater:

- Veiligheidskleuren (bv. veiligheidsgeel (RAL 1018) met diagonaal aangebrachte zwarte strepen als waarschuwing voor gevaar)
- Informatie over de aard van de vloeistof (bv. chemische naam, formule of symbool).

Indien van belang voor de werking en de veiligheid wordt de stromingsrichting van het gas of de vloeistof aangeduid met behulp van pijlen.

Het hek, waarvan sprake, heeft minstens een hoogte van 1,8 meter voor een systeem met gasvormig waterstof of 2 meter voor een systeem met vloeibaar waterstof.

Het ATEX-merkteken bestaat uit een driehoek, bestaande uit een geel veld met zwarte rand en het "Ex"-merkteken.



### **Actie**

#### Brief naar de uitbater

De uitbater regulariseert de toestand binnen redelijke termijnen. Zoniet zal de uitbating van het waterstofverdeelstation onmiddellijk stopgezet worden.

Indien het waterstofsysteem of delen ervan zich in een gebouw bevinden, dienen volgende zaken geïnspecteerd te worden, in overeenstemming met de typevoorwaarden!

4. Waterstofsysteem	▪ Ventilatiesysteem aanwezig en in overeenstemming met typevoorwaarden?	Ja / Neen
	▪ In- en uitlaat van het ventilatiesysteem niet geblokkeerd?	Ja / Neen

### **Actie**

#### Brief naar de uitbater

Het waterstofverdeelstation moet **onmiddellijk** stopgezet worden.

De uitbater dient een aanvraagdossier in om de toestand te regulariseren.

4. Waterstofsysteem in een gebouw	▪ Zijn de deuren in het lokaal die niet direct naar buiten leiden branddeuren	Ja / Neen
-----------------------------------	---	-----------

#### Brief naar de uitbater

De uitbater regulariseert de toestand binnen redelijke termijnen. Zoniet zal de uitbating van het waterstofverdeelstation onmiddellijk stopgezet worden.

4. Waterstofsysteem Verdeelinstallatie	▪ Is de verdeelinstallatie voorzien van maatregelen om impact te voorkomen of geïnstalleerd op betonnen platform?	Ja / Neen
	▪ Is de breekkoppeling aanwezig op de verdeelslang	Ja / Neen
	▪ Is de signalisatie ter hoogte van de verdeelpunten duidelijk aangebracht?	Ja / Neen
	▪ Is de noodstop duidelijk aangebracht?	Ja / Neen

### **Actie**

#### Brief naar de uitbater

Het waterstofverdeelstation moet **onmiddellijk** stopgezet worden.

De uitbater dient een aanvraagdossier in om de toestand te regulariseren.

## 5.4 ONDERHOUD, TOEZICHT EN CONTROLE

**Waterstof is een gevaarlijk gas dat door zijn zeer grote vluchtigheid gemakkelijk kan ontsnappen. Periodieke controle en onderhoud moeten het veilig uitbaten van de verdeelinstallatie mogelijk maken.**

**Het waterstofsysteem is onderwerp van een periodieke controleverplichting. Alle documenten hiervan maken deel uit van het register!**

## 5.5 VEILIGHEIDSVOORSCHRIFTEN

5. Veiligheidsvoorschriften	Gebeurt er binnen de veiligheidsafstanden opslag van ontvlambare stoffen, andere dan diegene die vermeld staan in de milieuvergunning en die in overeenstemming zijn met de veiligheidsafstanden?	Ja / Neen
	Zijn de brandmeldpunten duidelijk zichtbaar?	Ja / Neen
	Werkt de brandalarminstallatie naar behoren?	Ja / Neen
	Evacuatiemogelijkheden?	

	▪ Zijn er voldoende evacuatiemogelijkheden, zowel uit het afgesloten gedeelte als uit het volledige station	Ja / Neen
	▪ Zijn de evacuatiepunten voldoende en ondubbelzinnig aangeduid?	Ja / Neen
	▪ Zijn de evacuatiepunten vrij of bestaat de mogelijkheid ze onmiddellijk vrij te maken?	Ja / Neen
	▪ Zijn de brandbestrijdingsmiddelen aangepast aan de lokale risico's, conform het advies van de brandweer?	Ja / Neen

### **Actie**

Brief naar de uitbater

Het waterstofverdeelstation moet **onmiddellijk** stopgezet worden.

De uitbater dient een aanvraagdossier in om de toestand te regulariseren.

## 5.6 PERSONEEL / BEVOEGDE PERSONEN

**De inlichting en opleiding van het personeel of andere bevoegde personen gebeurt aan de hand van instructies en procedures die integraal deel moeten uitmaken van het register.**

6. Personeel	Kan het personeel of andere bevoegde personen beschikken over de nodige beschermingsmiddelen	Ja / Neen
	Beschikt het personeel of andere bevoegde personen beschikken over antistatische werkkledij?	Ja / Neen