



Europees "Train the Trainer"-programma voor hulpverleners

Les 1

Inleiding tot veiligheidsprocedures bij interventies met waterstof

NIVEAU I

Brandweerman

De informatie in deze les is gericht op het niveau van **brandweerman**.

Dit onderwerp is ook beschikbaar op niveau IV (specialist).

Deze les maakt deel uit van een pakket met opleidingsmateriaal voor de niveaus I tot IV: brandweerman, onderofficier, officier en specialist. Gelieve de les af te stemmen op de competenties en de leerverwachtingen van de doelgroep.

Opmerking: dit materiaal is eigendom van het HyResponder Consortium en moet als dusdanig erkend worden; de resultaten van HyResponse zijn als basis gebruikt.



Disclaimer

Ondanks de zorg waarmee dit document werd opgesteld, is de volgende disclaimer van toepassing: de informatie in dit document wordt verschaft zoals ze is; er wordt geen enkele garantie gegeven dat de informatie geschikt is voor een bepaald doel. De gebruiker ervan gebruikt de informatie op eigen risico en verantwoordelijkheid.

Het document bevat enkel de meningen van de auteurs. De FCH JU en de Europese Unie zijn niet aansprakelijk voor enig gebruik dat gemaakt zou worden van de hierin verschaft informatie.

Dankwoord

Het project heeft subsidies ontvangen van de Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (JU) onder subsidieovereenkomst nr. 875089. De JU ontvangt steun van het onderzoeks- en innovatieprogramma Horizon 2020 van de Europese Unie en van het Verenigd Koninkrijk, Frankrijk, Oostenrijk, België, Spanje, Duitsland, Italië, Tsjechië, Zwitserland en Noorwegen.

Overzicht

Deze les is een inleiding tot veiligheidsprocedures bij interventies waar waterstof in betrokken is. Waterstof wordt reeds lang op grote schaal gebruikt in de industrie in de vorm van samengeperst gas of in vloeibare vorm. Waterstof is niet meer of minder gevaarlijk dan andere gangbare brandstoffen, maar heeft zijn eigen specifieke eigenschappen en verbonden risico's. Een groeiend gebruik van toepassingen op basis van brandstofcellen en waterstof vereist een grondig begrip van de processen, gevaren en risico's, veiligheidsaspecten en -concepten, evenals professioneel opgeleid personeel om op een veilige manier te handelen in geval van mogelijke incidenten of ongevallen. Dit alles vereist een grondige verandering in de veiligheidscultuur, vooral voor hulpverleners, die de eersten zullen zijn die moeten handelen in noodsituaties waarbij samengeperste of vloeibare waterstof mogelijk betrokken kunnen zijn, zowel binnen als buiten, in stedelijke woonzones, op de wegen, in landelijke gebieden en in veel verschillende andere omgevingen.

Deze les bevat een overzicht van systemen en infrastructuur die functioneren op basis van brandstofcellen en waterstof. Daarin worden mogelijke gevaren, risico's, veiligheidsmaatregelen en concepten in verband met zowel stationaire als vervoer toepassingen voor brandstofcellen en waterstof in beschouwing genomen. Er wordt ook een overzicht gegeven van de belangrijkste toepassingen van waterstof, de voornaamste productiemethoden, opslagmogelijkheden en transportmethodes.

Het HyResponse-project wordt hier vermeld omdat het hier voorgestelde materiaal gebaseerd is op de originele lessen van HyResponse (<http://www.hyresponse.eu>).

Trefwoorden

Brandstofcellen, waterstof, productie, opslag, toepassing, veiligheid van waterstof

Inhoudstafel

Overzicht	3
Trefwoorden	3
Inhoudstafel	4
1. Doelgroep	6
1.1 Taakomschrijving: brandweerman	6
1.2 Competentieniveau: brandweerman	6
1.3 Voorkennis: brandweerman	6
2. Inleiding en doelstellingen	7
3. Overzicht van de productie, de opslag en het industrieel gebruik van H ₂	9
3.1 Productie van waterstof	9
3.2 Opslag van waterstof	10
3.3 Gebruik van waterstof in de industrie	12
4. Brandstofcelvoertuigen	14
4.1 Belangrijkste kenmerken van brandstofcelvoertuigen	14
4.2 Brandstofcelauto's	15
4.2.1 Opslag	15
4.2.2 Toevoersysteem	16
4.2.3 Brandstofcel	16
4.2.4 Elektrische aandrijving en omvormer	16
4.2.5 Veiligheidsaspecten en -concepten	17
4.3 Brandstofcelbussen	18
4.4 Heftrucks met brandstofcellen	21
4.5 Luchtvaart	22
4.6 Scheepvaart	24
5. Transport van waterstof	29
5.1 Vrachtwagens	29
5.1.1 Vrachtwagens voor gasvervoer	29
5.1.2 Vrachtwagens voor cryogene vloeistoffen	31
5.2 Treinen	32
5.3 Pijpleidingen	33
6. Stationaire toepassingen	35
6.1 Warmtekrachtkoppelingssystemen (WKK)	35

6.2	Noodstroomvoorziening	35
6.3	Opslagsystemen voor waterstofgebaseerde energie	37
7.	Overzicht van incidenten en ongevallen	41
7.1	Incidenten en ongevallen bij systemen en infrastructuur op basis van brandstofcellen en waterstof	41
7.2	Ongevallen tijdens de productie van waterstof	42
7.3	Een incident in een tankstation	42
8.	Introductie tot e-Laboratory	44
	Referenties	45

1. Doelgroep

De informatie in deze les is gericht op NIVEAU 1: brandweerman. Er zijn ook lessen beschikbaar op niveau II, III en IV: onderofficier, officier en specialist.

De taakomschrijving, het competentieniveau en de leerverwachtingen waarvan wordt uitgegaan op het niveau brandweerman worden hieronder beschreven.

1.1 Taakomschrijving: brandweerman

Een brandweerman is verantwoordelijk en wordt verwacht in staat te zijn om op een veilige manier interventies uit te voeren met persoonlijke beschermingsmiddelen, inclusief ademhalingsbescherming, waarbij hij de ter beschikking gestelde uitrusting gebruikt, zoals voertuigen, ladders, slang, blusapparaten, communicatie- en uitrusting, in eender welke klimatologische omstandigheden, op eender welke plaats en in alle noodsituaties waarin redelijkerwijs kan worden verwacht dat er een antwoord geboden moet worden.

1.2 Competentieniveau: brandweerman

Een brandweerman dient opgeleid te zijn in het veilig en correct gebruik van PBM, ademhalingsbescherming en andere uitrusting die hulpverleners verwacht worden te gebruiken, waarbij ondersteuning door passende kennis en oefening noodzakelijk is. Gedrag dat hun eigen veiligheid en die van andere collega's beschermt, moet beschreven worden in standaard operationele procedures. Vaardigheid en oefening in het dynamisch beoordelen van risico's voor de eigen veiligheid en die van anderen zijn noodzakelijk.

1.3 Voorkennis: brandweerman

Een brandweerman dient te beschikken over basiskennis en praktische basisvaardigheden die vereist zijn om relevante informatie te gebruiken om taken uit te voeren en standaard problemen met behulp van eenvoudige regels en hulpmiddelen op te lossen. Werken of studeren onder toezicht met enige zelfstandigheid.

2. Inleiding en doelstellingen

Toepassingen op basis van brandstofcellen en waterstof, zowel in de transport- als de energiesector, zijn vandaag beschikbaar op de markt, en het is zeer waarschijnlijk dat hulpverleners in de nabije toekomst met mogelijke ongevallen/incidenten geconfronteerd zullen worden. De ontwikkeling van technologieën op basis van brandstofcellen en waterstof vereist een beter en grondiger begrip bij hulpverleners van de gevaren, risico's, processen en veiligheidsaspecten verbonden aan systemen en infrastructuur op basis van brandstofcellen en waterstof. Vele aspecten zijn nog grotendeels onbekend bij hulpverleners: de productie van waterstof via elektrolyse en de omvorming van aardgas, gedecentraliseerde toepassingen voor de productie van waterstof, de opslag van gasvormige en vloeibare waterstof, het vervoer van waterstof en de omgang met materiaal, brandstofcellen in voertuigen (bv. auto's, bussen, heftrucks), waterstoftankstations, stationaire toepassingen voor brandstofcellen, op waterstof gebaseerde systemen voor energieopslag... . Verder is er een gebrek aan gestandaardiseerde interventieprocedures in geval van ongevallen of incidenten bij de voornoemde systemen en infrastructuur.

Het doel van deze les is om een inleiding te bieden voor hulpverleners over een aantal toepassingen op basis van brandstofcellen en waterstof, hen vertrouwd te maken met de specifieke risico's en de voornaamste benaderingen voor een veilig ontwerp van waterstoftoepassingen toe te lichten. Hulpverleners moeten beseffen dat waterstof niet meer of minder gevaarlijk is dan andere gangbare brandstoffen. Waterstof is anders en de kennis van de specifieke eigenschappen ervan zal het nemen van juiste beslissingen in geval van een ongeval bevorderen. Hulpverleners moeten een professionele opleiding krijgen voor de omgang met systemen op basis van waterstof met een druk tot 100 MPa en temperaturen tot -253 °C (vloeibaar gemaakte waterstof), zowel binnen als buiten.

Deze les is de eerste in de reeks en is gebaseerd op materiaal dat ontwikkeld en ter beschikking gesteld werd binnen het HyResponse-project (<http://www.hyresponse.eu/>). Er werd voor het eerst een internationaal curriculum voor opleidingen voor hulpverleners met betrekking tot waterstof ontwikkeld binnen (<http://www.hyresponse.eu/curriculum.php>). Dit was de eerste stap in de creatie van het Europees platform voor opleidingen voor hulpverleners met betrekking tot het veilig omgaan met waterstof. Dit curriculum werd verder ontwikkeld binnen het HyResponder-project (<https://hyresponder.eu>) om de huidige stand van zaken op te nemen en het uit te breiden met verdere details over vloeibare waterstof, besloten ruimtes, drukvaten enz.

De cursisten worden aangemoedigd om dit document te gebruiken om hen te helpen bij hun onafhankelijke studies en om bronnen te zoeken voor verdere informatie.

Aan het eind van deze les kan een hulpverlener/cursist:

- Vernieuwing en recente technologieën op basis van brandstofcellen en waterstof in de moderne samenleving begrijpen;
- De rol van waterstof als nieuwe energiedrager begrijpen;
- De voornaamste eigenschappen noemen van de productie, het transport, de levering en het gebruik van waterstof;

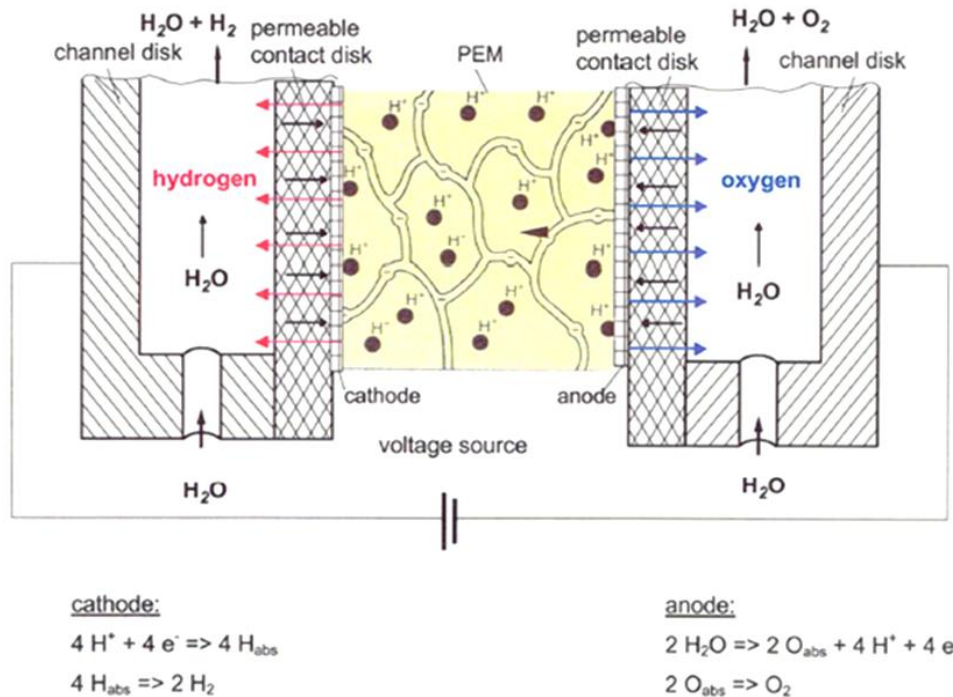
- Zich een beeld vormen van technologieën op basis van waterstof en van brandstofcellen;
- De meest gangbare industriële productiemethoden van waterstof beschrijven. (Hoewel deze les niet ontworpen is om cursisten een diepgaande kennis van alle productiemethoden te geven, wordt een beschrijving in grote lijnen gegeven van een reformer, PEM (protonuitwisselingsmembraan)- en alkaline-elektrolyzers, met een nadruk op veiligheidsaspecten en -concepten);
- Het werkingsprincipe van een brandstofcel en een brandstofcel-stack beschrijven;
- De werkingsprincipes en veiligheidsaspecten van een aantal toepassingen op basis van brandstofcellen en waterstof uitleggen, waaronder voertuigen met brandstofcellen, tankstations, stationaire opslag van waterstof, omgang met materialen en toepassingen voor de distributie van waterstof, noodstroomvoorziening en systemen op basis van brandstofcellen voor warmtekrachtkoppeling;
- Voorbeelden geven van incidenten of ongevallen die kunnen gebeuren bij toepassingen op basis van brandstofcellen en waterstof.

3. Overzicht van de productie, de opslag en het industrieel gebruik van H₂

3.1 Productie van waterstof

Waterstofmoleculen kunnen niet in hun pure vorm in de natuur teruggevonden worden. Daarom moet waterstof geproduceerd worden uit de verbindingen waarin ze voorkomt, bijvoorbeeld water, methaan, methanol, ammoniak, ethanol, biomassa enz. De productie van waterstof kan onderverdeeld worden in twee categorieën: gecentraliseerde productie op grote schaal en gedecentraliseerde productie op kleine of middelgrote schaal. Met gecentraliseerde productie bedoelt men de productie in grote, gevestigde chemische fabrieken waar massaal waterstof wordt geproduceerd, waarna deze naar klanten vervoerd wordt. In dit geval wordt de waterstof vervoerd, soms over lange afstanden, ofwel via pijpleidingen, ofwel over de weg of per schip. Voorbeelden zijn de grote steamreformers van grote gasmaatschappijen zoals onder andere Air Liquide, Linde en Air Products. Er zijn momenteel verschillende technologieën beschikbaar op de markt voor de industriële productie van waterstof. Er zijn twee commerciële routes voor de productie van waterstof: de elektrolyse van water (daterend van de late jaren 1920) en reformerende technologieën (geïntroduceerd in 1960).

De elektrolyse van water is een proces waarbij water opgesplitst wordt in waterstof en zuurstof met behulp van elektrische energie, zoals getoond in de vergelijking : $H_2O \rightarrow H_2 + \frac{1}{2} O_2$



Bron: Areva, 2015.

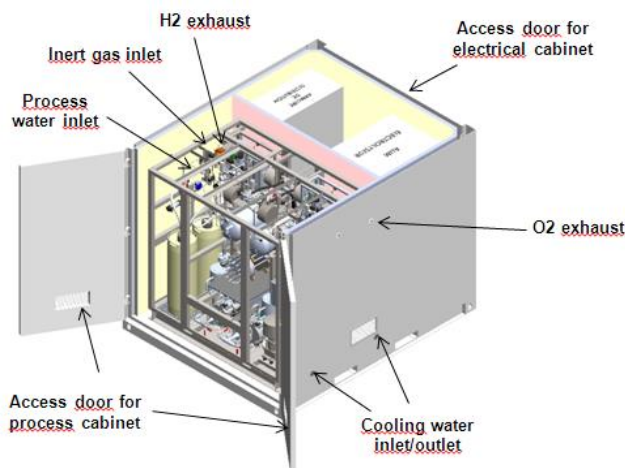
Figuur 1. Werkingsprincipes van een PEM-elektrolyser.

De mechanismen van de elektrolyse van water op basis van een protonuitwisselingsmembraan (PEM) worden getoond in figuur 1. Bij de PEM-elektrolyse van water wordt water

elektrochemisch opgesplitst in waterstof aan de kathode en zuurstof aan de anode. Tijdens de werking van de PEM-elektrolyser wordt water in de anodekanalen gepompt, waar het wordt opgesplitst in zuurstof, protonen en elektronen. De protonen bewegen door het protonuitwisselingsmembraan van de anode naar de kathode en bereiken zo de kathodekant. De elektronen bewegen van de anode naar de kathode via de externe stroomkring, die de drijvende kracht verschaft, d.w.z. de celspanning, voor de reactie. Aan de kathode vormen de protonen en de elektronen een nieuwe verbinding om waterstof te produceren.

De vorming van een explosiegevaarlijke omgeving in de afscheider kan veroorzaakt worden door een verstoorde werking van de leiding voor het overbrengen van het water of door een gaatje in het membraan. De volgende veiligheidsmaatregelen worden geacht een ATEX-situatie in de afscheider te voorkomen:

- een minimaal waterniveau in de gasafscheider opleggen boven 55% van zijn hoogte;
- het waterniveau in de gasafscheiders voor H₂ en O₂ controleren;
- de druk en het drukverschil tussen de H₂- en de O₂-leidingen controleren;
- de waterstofconcentratie bij de uitgang van de zuurstofgasafscheider controleren.



Figuur 2. System van een PEM-elektrolyser [1]

3.2 Opslag van waterstof

In dit onderdeel wordt een overzicht gegeven van de opslagmogelijkheden voor waterstof. Waterstoflekken, -branden en -explosies, evenals de interactie van waterstof met de voor opslag gebruikte materialen, zijn zeer relevant en zullen in de volgende lessen besproken worden. De opslag van waterstof is een faciliterende technologie die wordt gebruikt in een hele reeks toepassingen op basis van brandstofcellen en waterstof, gaande van de opslag in brandstofcelvoertuigen tot stationaire brandstofceltoepassingen. De opslag is inherent aan de toepassing. Bijvoorbeeld: omvang en gewicht zijn beperkende factoren voor passagiersvoertuigen, terwijl het gewicht een wenselijke eigenschap kan zijn voor heftrucks. De oplossingen voor de opslag zijn één van de voornaamste uitdagingen voor de op waterstof gebaseerde technologie.

De opslag van grote hoeveelheden waterstof gedurende lange periodes is een cruciale stap in de opbouw van infrastructuur voor toepassingen op basis van brandstofcellen en waterstof, die de consumptie en de productie van waterstof zal bepalen en zal zorgen voor de continuïteit van de bevoorrading van klanten. Er worden verschillende ondergrondse opslagsystemen voor waterstof onderzocht. Eén mogelijkheid is de opslag van waterstofgas in geologische formaties, zoals uitgeputte gasvelden, waterhoudende grondlagen of zoutcavernes. Een andere mogelijkheid is de ondergrondse opslag in tanks, waarbij waterstof ofwel als samengeperst gas ofwel in vloeibare vorm opgeslagen wordt. De geologische opslag vindt meestal plaats in de buurt van een waterstofproductie-installatie, terwijl de ondergrondse tanks zich dicht bij de plaats van gebruik bevinden, bijvoorbeeld bij tankstations.

- Opslag van waterstof kan in de volgende groepen ingedeeld worden:
- Opslag als samengeperst gas
- Opslag in vloeibare toestand
- Opslag in vaste toestand

De meest gangbare manier om waterstof op te slaan als samengeperst gas of als cryogene vloeistof is in cilinders of tanks uit metaal of composietmateriaal (figuur 3). Cryo-samengeperste technologie, waarbij waterstofgas onder hoge druk tot lage temperaturen gekoeld wordt, is een ander nuttig alternatief. De cilinders kunnen verschillende afmetingen, volumes (van 20 tot 300 l) en druk (20-70 MPa) hebben, en kunnen voor sommige toepassingen samengebracht worden in een bundel of rek voor het transport.



a



b



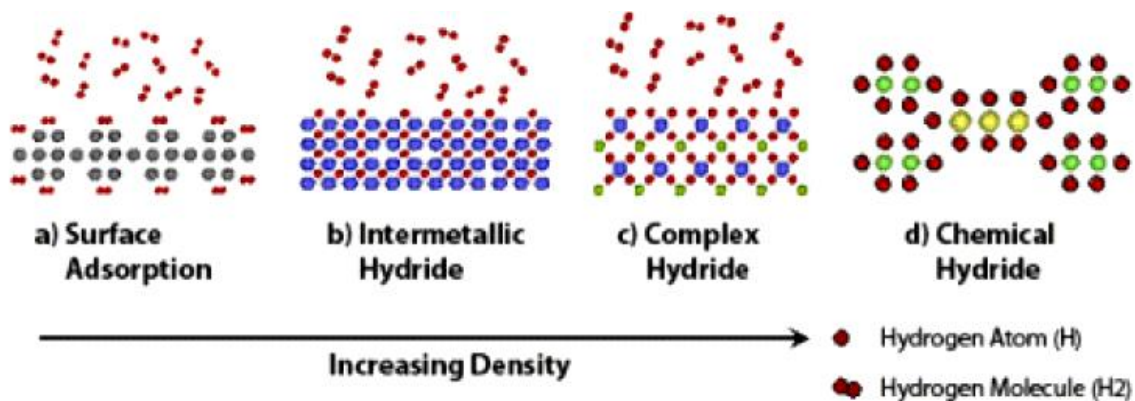
c

Figuur 3. Opslag van waterstof in een voertuig (a), een cilinderbundel (b) en een rek voor het transport van cilinders (c).

Waterstofgas kan samengeperst worden tot 20-100 MPa. De voornaamste moeilijkheden bij de opslag van waterstof als samengeperst gas zijn de hoeveelheid energie die nodig is voor het samenpersen, de inherente veiligheidsaspecten van de opslag van waterstof onder een dergelijke hoge druk en de extra kosten en het gewicht van de gebruikte cilinders. Problemen zoals permeatie (doordringbaarheid van de leidingen) en verbrossing (verlies van sterkte van materialen) zijn evenredig aan de druk van het gas en kunnen daarom bij een hogere druk een groter risico vormen. In Europa hebben de meeste transporteerbare cilinders enkel een klep als veiligheidsinrichting. In de VS zijn transporteerbare cilinders uitgerust met overdrukventielen. Dit voorschrift is zeer controversieel omdat ze vaak een bron van lekken vormen. De opslag

van samengeperst waterstofgas wordt meestal geïntegreerd in stationaire opslagsystemen voor waterstof en voor de opslag van waterstof in brandstofcelvoertuigen[1].

De tweede grote categorie van waterstofopslag is onder cryogene vorm, deze wordt gevormd bij afkoeling tot een temperatuur onder zijn kookpunt 20K (- 253 °C). In deze vorm kan waterstof ofwel een tijdlang opgeslagen ofwel vervoerd worden. Deze opslagmogelijkheid is ook zeer duur door de grote hoeveelheid energie die nodig is voor het vloeibaar maken. De kostprijs en het gewicht van geschikte materialen om de waterstof op een lage temperatuur te houden moeten ook in beschouwing genomen worden. Verder kan waterstof ofwel binnenin de structuur ofwel op het oppervlak van bepaalde vaste stoffen opgeslagen worden. Deze opslagmogelijkheid vereist geen hoge druk of lage temperaturen zoals de vorige twee methoden. Er zijn dus minder risico's verbonden aan de opslag. Er zijn drie belangrijke mechanismen voor de opslag van waterstof in stoffen: absorptie (opnemen van een stof in een ander medium), adsorptie (hechting van een stof aan de oppervlakte) (figuur 3a) en chemische reacties (figuur 3, b-d).



Figuur 3. Stoffen die worden gebruikt voor de opslag van waterstof in vaste toestand [2]

Alle drie deze mogelijkheden hebben voor- en nadelen en de veiligheidsaspecten bij opslag zijn ook verschillend; deze zullen in detail besproken worden in les 3 "Opslag van waterstof". Opslagsystemen voor waterstof kennen we onder volgende vormen: opslag voor transport, onder- of bovengrondse vaste opslagsystemen of opslag in brandstofcelvoertuigen.

3.3 Gebruik van waterstof in de industrie

Waterstof wordt in de industrie al langer dan 100 jaar gebruikt en veilig opgeslagen als samengeperst of vloeibaar gemaakt gas. Waterstof wordt gebruikt voor een hele reeks van toepassingen, waaronder: de raffinage van ruwe aardolie; als koelmiddel in grote elektriciteitsturbines; als brandstof voor de voortstuwing van raketten en projectielen; bij de productie van ammoniak voor meststoffen; in de metallurgie voor het onttrekken van pure metalen uit hun ertsen; in de halfgeleider-, glas-, farmaceutische, petrochemische, chemische en voedselindustrie; enz. De statistieken met betrekking tot incidenten in verband met waterstof tonen dat op dit moment incidenten in laboratoria het meest frequent zijn (ongeveer 32%) [3]. Het kleine aantal ongevallen kan verklaard worden door de strenge veiligheidsmaatregelen die reeds toegepast worden voor de productie en het eindgebruik van waterstof. Hierin zou in de komende jaren echter verandering kunnen komen door de uitbreiding van de toepassingen op

basis van brandstofcellen en waterstof naar het publieke domein en een frequenter gebruik van technologieën op basis van brandstofcellen en waterstof door privépersonen zonder speciale veiligheidsopleiding. De rapportage van de incidenten toont ook dat slechts een klein deel van het totale aantal geregistreerde incidenten tot nu toe tot een verlies van mensenlevens heeft geleid (4,6%) [4]. Hoewel de veiligheidsaspecten bij het gebruik van waterstof tot nu toe efficiënt onder controle zijn gehouden in de industrie, zullen bijkomende maatregelen nodig zijn, vooral met betrekking tot noodprocedures, zowel in de transportsector als op de residentiële brandstofmarkt, voornamelijk wegens de hoge druk die wordt gebruikt om de waterstof op te slaan. Waterstof is niet meer of minder gevaarlijk dan andere brandbare brandstoffen, zoals benzine en aardgas. In feite bieden sommige eigenschappen ervan, zoals het de geringe massadichtheid, voordelen voor de veiligheid in vergelijking met andere brandstoffen. Met alle brandbare brandstoffen moet echter op een verantwoordelijke manier omgegaan worden. Net als benzine en aardgas is waterstof brandbaar en kan het in bepaalde omstandigheden gevaarlijk zijn. Waterstof kan op een veilige manier gebruikt worden indien men eenvoudige richtlijnen in acht neemt en de gebruiker een goede kennis heeft van het unieke gedrag ervan. De kennis van de specifieke eigenschappen van waterstof en van de toepassingen op basis van brandstofcellen en waterstof maken een veilig gebruik van waterstof als brandstof mogelijk. Onze maatschappij heeft nood aan de ontwikkeling van een nieuwe veiligheidscultuur, innovatieve veiligheidsstrategieën en baanbrekende technische oplossingen. Er wordt aangenomen dat het niveau van veiligheid aan de interface van waterstof met de gebruiker gelijkaardig of hoger moet zijn dan voor het gebruik van fossiele brandstoffen. Daarom zullen de veiligheidsparameters van producten op basis van waterstof en brandstofcellen een rechtstreekse invloed hebben op hun concurrentievermogen op de markt [5].

4. Brandstofcelvoertuigen

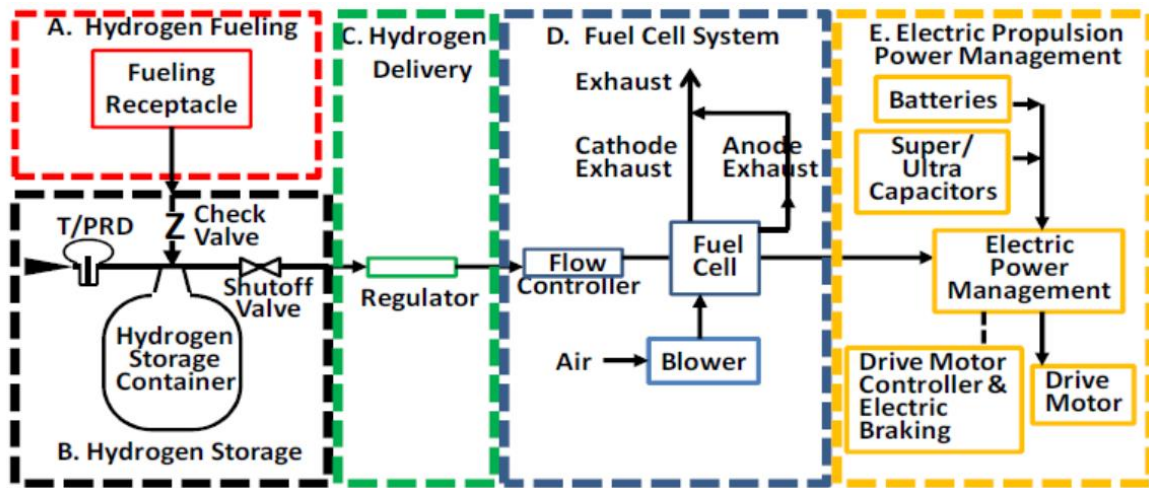
Technologieën op basis van brandstofcellen en waterstof voor weg- en gespecialiseerde voertuigen zijn vandaag zeer belangrijk. Sommige autofabrikanten, zoals Toyota, hebben de verkoop van voertuigen op basis van brandstofcellen en waterstof reeds gelanceerd in de regio's waar de tankinfrastructuur al aanwezig is. De voorbeelden van voertuigen omvatten personenwagens, bussen, scooters, lichte vrachtwagens enz. Zij gebruiken waterstof als brandstof en hebben geen brandstofmotor aangezien gebruik gemaakt wordt van brandstofcellen en een elektromotor. De beschikbaarheid van infrastructuur is een belangrijke stap naar het commerciële succes van deze producten. Deze voertuigen zien hetzelfde uit als conventionele voertuigen. Maar in tegenstelling tot conventionele voertuigen stoten ze geen verontreinigende stoffen uit en zijn ze zeer stil tijdens het gebruik. Een andere belangrijke toepassing zijn gespecialiseerde voertuigen. Gespecialiseerde voertuigen worden ontworpen voor specifieke doeleinden en maken meestal deel uit van een vloot. Heftrucks op basis van brandstofcellen zijn een goed voorbeeld van gespecialiseerde voertuigen. Dit soort voertuigen vereist een vermogen van 1,5 tot 10 kW. Op dit moment zijn veel privéondernemingen aan het investeren in een vloot van heftrucks op basis van brandstofcellen en tankinfrastructuur gezien de voordelen.

4.1 Belangrijkste kenmerken van brandstofcelvoertuigen

Deze voertuigen hebben een elektrische aandrijflijn die gevoed wordt door een brandstofcel die elektriciteit opwekt via een elektrochemische reactie waarbij waterstof ontstaat. Hoewel er veel verschillende prototypes van brandstofcelauto's bestaan, hebben de meeste de volgende belangrijke kenmerken (figuur 4) gemeen [6]:

- Systeem voor het gebruik van waterstof als brandstof;
- Opslagstelsel voor waterstof;
- Systeem voor de levering van waterstof als brandstof;
- Brandstofcel
- Elektrische aandrijving en omvormer.

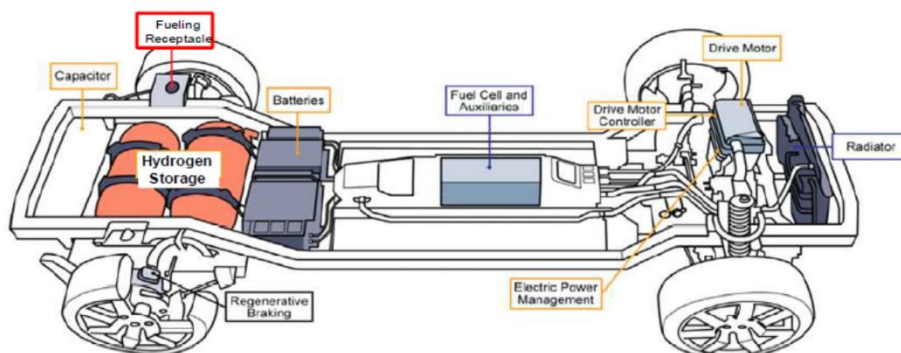
Tijdens het vullen wordt de waterstof opgeslagen in een tank. De waterstof heeft meestal de vorm van samengeperst gas. Wanneer een brandstofcelauto start, komt er waterstofgas vrij uit de tank. Drukregelaars en dergelijke (C) passen de werkdruk aan ten behoeve van de brandstofcel. De waterstof wordt omgezet in de brandstofcel (D) in elektrische stroom met een hoge spanning. Deze stroom wordt geleverd aan de omvormer van de elektrische aandrijving (E), waar hij wordt gebruikt om aandrijfmotoren van stroom te voorzien of batterijen en supercondensatoren op te laden.



Figuur 4. De belangrijkste systemen van een brandstofcelauto [6]

4.2 Brandstofcelauto's

Figuur 5 illustreert een typische plaatsing van de belangrijkste onderdelen van een doorsnee brandstofcelauto [6]. De vulinrichting wordt net als bij andere gangbare voertuigen op het achterste deel van het zijpaneel van de auto geplaatst. Net als benzinetanks worden de opslagtanks voor waterstof gewoonlijk dwars gemonteerd in het achterste deel van de auto, maar dit kan ook anders, bijvoorbeeld in de lengte in het middengedeelte van de auto. De brandstofcel en toebehoren worden meestal onder het passagiersgedeelte geplaatst, samen met de omvormer, de motorbesturing en de aandrijfmotoren. Gezien de afmetingen en het gewicht van tractiebatterijen en supercondensatoren bevinden deze onderdelen zich doorgaans onder in de auto. Op dit moment wordt waterstof vooral getankt in de vorm van gas (CGH_2) dat wordt samengeperst tot 125% van de nominale werkdruk van de auto om de tijdelijke opwarming door de adiabatische compressie (verkleinen van volume gas onder dezelfde omstandigheden) tijdens het tanken te compenseren.

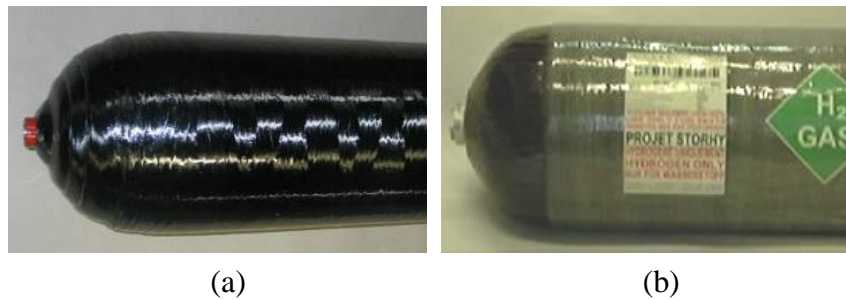


Figuur 5. Voorbeeld van een brandstofcelauto [6]

4.2.1 Opslag

De lichtgewicht cilinders met samengeperst gas onder een druk van 700 bar worden ontwikkeld om de opslagcapaciteit te vergroten. Ze bestaan uit een binnenhuls uit metaal (type III) of polymeer (type IV) die in een vezelversterkte structuur uit composiet geplaatst wordt (figuur

6). Er wordt gewerkt om de kostprijs van deze cilinders te verlagen. Meer informatie over systemen voor de opslag van waterstof in voertuigen zal gegeven worden in de volgende lessen.



Figuur 6. Prototypes van cilinders van 700 bar die ontwikkeld en getest werden in het kader van het Europese STORHY-project: (a) technologie van het type III, (b) technologie van het type IV.

4.2.2 Toevoersysteem

Via de brandstofleidingen wordt waterstof uit de tank geleverd aan de brandstofcel op de juiste druk en temperatuur. Dit wordt bereikt via een reeks debietregelkleppen, drukregelaars, filters en warmtewisselaars. De meeste brandstofleidingen zijn zilver van kleur, maar soms kunnen ze rood zijn. Indien de tank afgesloten wordt naar aanleiding van een ongeval, zal er zich slechts een kleine hoeveelheid waterstof in deze leidingen bevinden. Toch mogen hulpverleners de brandstofleidingen niet doorsnijden bij reddingsoperaties.

4.2.3 Brandstofcel

De brandstofcel wekt de elektriciteit op die nodig is voor de werking van de aandrijfmotoren en het opladen van de voertuigbatterijen en/of condensatoren. Er zijn verschillende soorten brandstofcellen, maar PEM-brandstofcellen vormen het meest gebruikte type in de auto-industrie. PEM-brandstofcellen brengen waterstof en zuurstof elektrochemisch samen om elektrische stroom op te wekken. Brandstofcellen kunnen continu elektriciteit opwekken bij toevoer van waterstof en zuurstof, waarbij simultaan elektriciteit en water worden geproduceerd zonder kooldioxide (CO_2) of andere schadelijke emissies te genereren die typisch zijn voor interne verbrandingsmotoren die op benzine of diesel werken. Over het algemeen genereren brandstofcellen in een licht passagiersvoertuig een voltage van ongeveer 400 V DC. Een omvormer verbindt de brandstofcel ook met de hoogspanningsbatterij. De werkingstemperatuur van de brandstofcel is veel lager dan voor een interne verbrandingsmotor waardoor ze efficiënter is.

4.2.4 Elektrische aandrijving en omvormer

De elektrische stroom die wordt gegenereerd door de brandstofcel wordt gebruikt om elektromotoren aan te drijven. Veel personenwagens met brandstofcellen hebben voorwielaandrijving, waarbij de elektrische aandrijfmotor en de aandrijflijn dwars in het "motorcompartiment" gemonteerd zijn, boven de vooras; andere configuraties en achterwielaandrijving zijn echter ook mogelijk. Grotere brandstofcelauto's van het type SUV kunnen vierwielaandrijving hebben met elektromotoren aan de voor- en achteras of met compacte motoren aan elk wiel. De hoogspanningsbatterijen worden gewoonlijk in een metalen

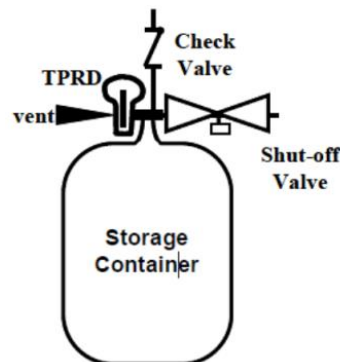
behuizing geplaatst, die stevig op het chassis wordt gemonteerd. Verschillende personenwagens met brandstofcellen gebruiken verschillende soorten batterijen, zoals nikkel-metaalhydride- of lithium-ionbatterijen. Andere mogelijke hoogspanningscomponenten zijn een schakelaar voor de brandstofcel, een controle-eenheid voor het batterijvoltage, een DC/DC omvormer, een aandrijfeenheid en een elektrische verwarming. De elektriciteit van de brandstofcellen en de hoogspanningsbatterij wordt aan de motoren geleverd via een aantal kabels, die zich gewoonlijk binnenin of achter ingesloten hoogspanningscomponenten en onder het voertuig bevinden. Deze kunnen gemakkelijk geïdentificeerd worden aan de hand van het kenmerkende oranje beschermende omhulsel.

4.2.5 Veiligheidsaspecten en -concepten

Brandstofcelauto's worden van brandstof voorzien via een speciaal vulpistool aan de verdeelzuil van het tankstation, dat aangesloten wordt op de vulinrichting van de auto zodat er een "gesloten systeem" wordt gecreëerd voor het overbrengen van waterstof naar de auto. De vulinrichting van de brandstofcelauto bevat een terugslagklep of andere inrichting die het lekken van waterstof uit de auto bij het loskoppelen van het vulpistool na het tanken voorkomt.

De onderdelen van een typisch opslagsysteem voor samengeperste waterstof worden getoond in [figuur 7](#). Het systeem omvat het opslagvat en alle andere onderdelen die de "primaire drukgrens" vormen die voorkomt dat er waterstof uit het systeem ontsnapt. Er zijn drie veiligheidsinrichtingen die deel uitmaken van het opslagsysteem voor samengeperste waterstof:

- Een terugslagklep;
- Een afsluitklep;
- Een thermisch geactiveerde overdrukventiel.



Figuur 7. Een typisch opslagsysteem voor samengeperste waterstof [6]

Tijdens het bijtanken komt er waterstof binnen in het opslagsysteem via een terugslagklep. De terugslagklep voorkomt het terugvloeien van waterstof naar de toevoerleidingen. Een automatische afsluiter voorkomt het wegvloeien van opgeslagen waterstof wanneer de auto niet gebruikt wordt of wanneer er een storing wordt gedetecteerd in het tankcircuit. In geval van brand zorgen thermisch geactiveerde overdrukventielen voor een gecontroleerd vrijkomen van het gas uit de tanks voordat de hoge temperaturen van het vuur de wanden van de vaten verzwakken en leiden tot een gevaarlijke breuk. Thermisch geactiveerde overdrukventielen

worden ontworpen om snel de volledige inhoud van het vat te laten ontsnappen. Het opnieuw afsluiten of onder druk brengen van het vat is daarbij niet mogelijk. Opslagvaten en thermisch geactiveerde overdrukventielen die aan een brand blootgesteld geweest zijn, dienen verwijderd en vernietigd te worden. De waterstof wordt gewoonlijk (maar niet altijd) uit de tanks weggeleid via een ontluichtingsleiding. De precieze locatie van deze ontluichtingsleidingen hangt af van de voertuigfabrikant en het model, maar zal zich meestal achteraan in het voertuig bevinden, in de buurt van de waterstoftank [6]. Het toevoersysteem zal de druk van de opgeslagen waterstof reduceren tot de werkdruk voor de brandstofcel. Bij een opslagsysteem voor samengeperste waterstof met een nominale werkdruk van 70 MPa bijvoorbeeld kan het zijn dat de druk verlaagd moet worden van waarden tot 87,5 MPa naar minder dan 1 MPa bij de ingang van de brandstofcel. Dit kan verschillende stappen van drukregeling vereisen om te komen tot een correcte en stabiele regeling en overdrukbescherming van de uitrusting die zich stroomafwaarts bevindt in geval van een storing van de drukregelaar. Het brandstofleveringssysteem kan beschermd worden tegen overdruk door het teveel aan waterstofgas af te laten via overdrukkleppen of door de gastoevoer af te sluiten (door de afsluitklep in het opslagsysteem voor waterstof te sluiten) wanneer er stroomafwaarts overdruk wordt gedetecteerd [6]. Er worden een aantal waterstofsensoren geplaatst in brandstofcelvoertuigen. Wanneer een potentieel gevaarlijk waterstoflek gedetecteerd wordt, zal de controller van het systeem de waterstofstroom uit de tank automatisch stoppen. Er zijn verschillende zones waar sensoren geplaatst kunnen worden: op het dashboard, naast opslagtanks voor waterstof, in de buurt van een uitlaatpijp, onder de motorkap, bovenaan in de passagiersruimte enz. Wanneer het aandrijfsysteem "AAN" staat, bewaken deze sensoren continu de waterstofconcentratie in deze zones. Volgens de standaard werkprocedure voor hulpverleners in de VS bijvoorbeeld, wordt de chauffeur, wanneer er waterstof wordt gedetecteerd op "waarschuwingsniveau", gewaarschuwd door het "H₂"-icoon op het dashboard en verschijnt de boodschap "H₂ gedetecteerd" op het controlepaneel. Wanneer er waterstof wordt gedetecteerd op "Alarmniveau" knippert het "H₂"-icoon, klinkt er een piepsignaal en verschijnt de boodschap "H₂ gedetecteerd – Verlaat het voertuig" op het controlepaneel [7]. Er dient opgemerkt te worden dat er in verschillende landen verschillende normen voor verschillende risiconiveaus zijn ingevoerd, hoewel de algemene standaard werkprocedures gelijkaardig waren. Verschillende waterstofconcentraties zullen in verschillende landen verschillende waarschuwingsniveaus activeren.

4.3 Brandstofcelbussen

Brandstofcelbussen gebruiken dezelfde technologie als brandstofcelauto's. Waterstof wordt opgeslagen in tanks die gewoonlijk op het dak van de bus worden geplaatst. De totale capaciteit bedraagt ongeveer 40 kg. De brandstofcelstack bevindt zich in het motorcompartiment achteraan. Een brandstofcelstack voor een bus is groter dan die voor een brandstofcelauto en genereert een hoger voltage, ongeveer 600 V. De belangrijkste voordelen van brandstofcelbussen in vergelijking met conventionele bussen zijn minder vervuiling, een lagere concentratie van broeikasgassen, een groter energetisch rendement en een stillere werking. Er zijn een reeks Europese projecten over transport op waterstof. Clean Energy Partnership (CEP) [8] bijvoorbeeld is het project dat erop gericht is het gebruik van technologieën op basis van brandstofcellen en waterstof in transporttoepassingen te testen en te demonstreren. CEP, opgericht in 2002, is een internationaal samenwerkingsverband van 18 partners, waaronder grote autofabrikanten zoals BMW Group, Honda, Daimler, Ford, Hyundai, GM/Opel, Toyota

en Volkswagen. In 2011 ging CEP over naar zijn derde fase, "Marktvoorbereiding". Een ander project is HyFLEET:CUTE, dat erop gericht is de grootste vloot van brandstofcelbussen ter wereld te ontwikkelen en uit te baten. In het HyFLEET:CUTE-project worden 47 bussen op waterstof ingezet in het gewone openbaar vervoer in 10 steden op drie continenten (Amsterdam, Barcelona, Peking, Hamburg, Londen, Luxemburg, Madrid, Perth, Reykjavik) [9]. Deze bussen hebben waardevolle gegevens opgeleverd voor ontwerpers en vervoersmaatschappijen doordat ze worden gebruikt in zware omstandigheden, tijdens ononderbroken periodes en onder extreme klimatologische voorwaarden. Een ander belangrijk aspect van dit project was het vertrouwd maken van het brede publiek met deze nieuwe technologie en zo de aanvaarding ervan te bevorderen [9]. Londen beschikt nu over 8 brandstofcelbussen die op de route RV1 tussen Covent Garden en Tower Gateway ingezet worden (figuur 8). Een zesjarig project van de FCH JU (Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking) met de titel JIVE (Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe) ging van start in januari 2017 en is gericht op de ingebruikname van 139 nieuwe uitstootvrije brandstofcelbussen en de daarvoor nodige tankinfrastructuur in vijf landen. Een volgend project, JIVE2, dat werd opgestart in januari 2018, zal in combinatie met het JIVE-project bijna 300 brandstofcelbussen in omloop brengen in 22 steden in heel Europa tegen de vroege jaren 2020 en is daarmee de meest grootschalige invoering in Europa tot nu toe. (<https://www.fuelcellbuses.eu/public-transport-hydrogen/jivejive2mehrlin-leaflet>)

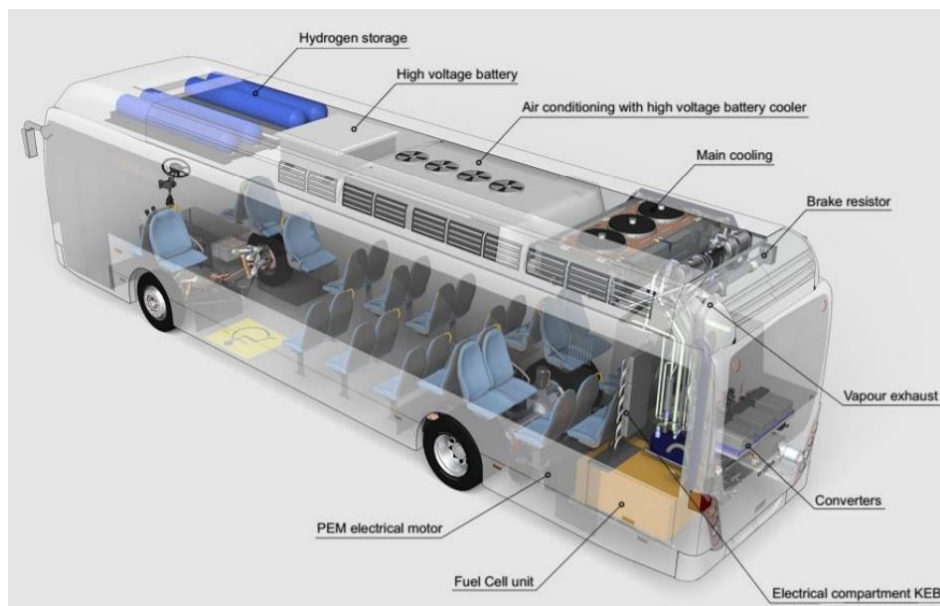


Figuur 8. Waterstofbus Wright Pulsar 2 op route RV1 in Londen.

Brandstofcelbussen zijn de laatste decennia sterk geëvolueerd. Er zijn een aantal verschillende configuraties gebruikt, waaronder interne verbrandingsmotoren op waterstof en verschillende brandstofceltechnologieën. Verder hebben bedrijven gebruik gemaakt van systemen met directe aandrijving en van hybride aandrijfsystemen, waarbij de aandrijflijn een energieopslagsysteem bevat (batterij of supercondensator) om de piekbelasting te beperken en regeneratief remmen mogelijk te maken. [10] Het overzicht dat werd gemaakt in het project NextHyLights [10] bevat een beknopte vergelijking van de voornaamste technologieën voor waterstofbussen. Figuur 9 toont de opbouw van een brandstofcelbus van SunLine van het type "All American" [11]. In dit voorbeeld wordt waterstof opgeslagen als samengeperst gas (CGH₂). Adams [12] voerde een onderzoek uit naar de optimale druk voor opslag in het voertuig voor bussen uitgerust met CGH₂-tanks. De conclusie was dat een genormaliseerde

drukbeperkingsinrichting in het voertuig noodzakelijk is om te garanderen dat er niet bijgetankt wordt met een druk die groter is dan de opslagdruk waarvoor het voertuig werd ontworpen. Deze normalisatie zou ook nodig zijn om onnodige kosten van systeemontwikkeling voor voertuigen en de eraan verbonden tankinfrastructuur te reduceren en om het risico op beschadiging van de tankinterfaces door incompatibiliteit te beperken. De compressie-energie in het gas in een opslagvat stijgt voor een bepaalde massa waterstof naarmate de opslagdruk stijgt; daardoor kan een plotse expansie van het gas door een breuk van het vat ernstige gevolgen hebben, die groter zullen zijn bij een hogere druk. Daarom werd bij het bestuderen van opslagsystemen voor bussen, waar het volume niet zo'n belangrijke beperking is dan bij auto's, vastgesteld dat de optimale druk voor niet-gelede stadsbussen met één enkel dek tussen 20 en 35 MPa lag [12].

De in brandstofcelbussen gebruikte veiligheidsinrichtingen zijn gelijkaardig aan die van brandstofcelauto's. Het overdrukventiel is een niet opnieuw sluitende, thermisch geactiveerde inrichting die is ontworpen om een tank met waterstof onder druk te beschermen tegen catastrofaal falen in het geval dat er zich een noodsituatie zoals een brand voordoet. Ze dient om ervoor te zorgen dat de door vlammen veroorzaakte thermische impact de druk in het opslagvat niet opvoert tot boven zijn structurele capaciteit. Er dient echter opgemerkt te worden dat branden die het openen van het overdrukventiel veroorzaken niet noodzakelijk leiden tot de onmiddellijke ontsteking van de vrijgekomen waterstof. De waterstoftanks zijn uitgerust met thermisch geactiveerde overdrukventielen en roestvrij stalen brandstof- en ontluichtingsleidingen. Er is een noodstopknop op het dashboard en één op de brandstofcel zelf in het motorcompartiment.



Figuur 9. Indeling van de belangrijkste elementen van een brandstofcelbus [11].

Hulpverleners moeten leren hoe ze moeten omgaan met brandstofcelvoertuigen bij verkeersongevallen. De voornaamste gevaren houden verband met een hoog voltage (tot 600 V) en een hoge druk van het gas (tot 70 MPa). Voor verschillende soorten wegvoertuigen vereist Verordening (EG) nr. 79/2009 in combinatie met Verordening (EU) nr. 406/2010 de etikettering van brandstofcelvoertuigen: voor lichte voertuigen moet het etiket zichtbaar in de buurt van de brandstoftank geplaatst worden (een ander etiket moet binnenin het

motorcompartiment worden aangebracht). Men is bezig met de actualisering van de richtlijnen op dit gebied en hulpverleners wordt aangeraden de etiketteringsvereisten te checken, bv. UNECE-werkgroep 13 (<https://unece.org/wp29-introduction>).

Er moeten reddingskaarten beschikbaar zijn voor alle brandstofcelvoertuigen en deze moeten in het voertuig aanwezig zijn. Idealiter hebben brandweerdiensten toegang tot deze informatie via communicatieverbindingen. Het niveau van deze toegang varieert echter en het kan zijn dat deze niet altijd mogelijk is. De identificatieparameters van het voertuig moeten ook alle kenmerken in verband met het hoge voltage en de hoge druk omvatten, zodat hulpverleners goed op tijd geïnformeerd worden. Op een gelijkaardige manier als bij voertuigen op conventionele brandstoffen kunnen de volgende elementen een risico inhouden voor hulpverleners bij een verkeersongeval: bumpers, schokdempers, banden, stutten voor motorkap en koffer, airbags, voorspanners van veiligheidsgordels, airconditioningsysteem en batterijen. Houd er rekening mee dat bij het loskoppelen van een laagspanningskabel alle systemen van een brandstofcelvoertuig afgesloten en stilgelegd worden (bv. waterstofopslag, hoog- en laagspanningssystemen).

4.4 Heftrucks met brandstofcellen

Veel bedrijven met grote magazijnen of distributiecentra gebruiken vandaag heftrucks met brandstofcellen om goederen te verplaatsen, waarbij deze 24/7 ingezet worden [1]. Brandstofcelheftrucks zijn hybride voertuigen die een brandstofcel, gewoonlijk van 1,5 tot 10 kW, combineren met een batterij. Waterstofcilinders worden buiten het gebouw/het magazijn opgeslagen. De waterstof wordt geleverd door een industriële gasleverancier op ter plaatse geproduceerd via de omvorming van aardgas of de elektrolyse van water. Het bijtanken van een brandstofcelheftruck gebeurt meestal binnen (maar tankinstallaties buiten zijn ook mogelijk) en duurt slechts enkele minuten. In vergelijking met gespecialiseerde voertuigen met batterij hebben brandstofcelheftrucks een langere levensduur en een groter vermogen gedurende een langere periode en kunnen ze in minder dan 3 minuten bijtanken. Een ander pluspunt van brandstofcelheftrucks zijn lagere bedrijfskosten en een grotere productiviteit doordat ze minder vaak naar het laadstation moeten. Aangezien er geen acculaders, opslag of ruimte voor het verwisselen van de accu nodig zijn, nemen ze minder magazijnruimte in. De voornaamste industriële leveranciers verkopen waterstoftankstations voor heftrucks met brandstofcellen. In **figuur 10** wordt een voorbeeld van een brandstofcelheftruck en zijn brandstofceleenheid getoond.



Een brandstofcelheftruck

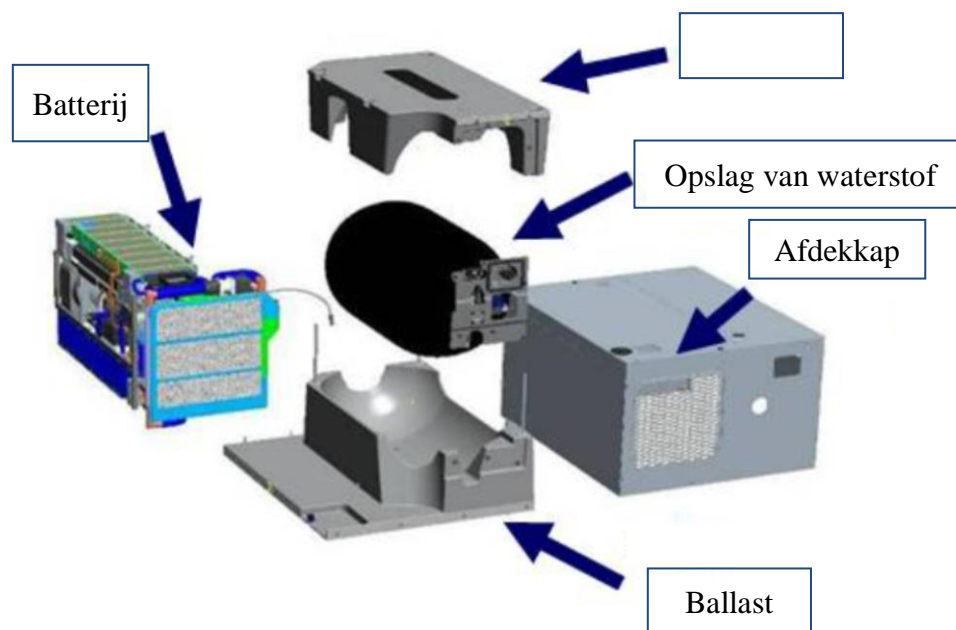


Brandstofcel van een heftruck

Figuur 10. Een brandstofcelheftruck en zijn brandstofceleenheid [1]

De voornaamste onderdelen van een brandstofceleenheid worden getoond in [figuur 11](#). Het betreft:

- brandstofcel ("PAC" genoemd);
- hulpstukken voor brandstofcel;
- opslagvat voor waterstof, waarvan het volume varieert tussen 20 en 70 l in water, uitgerust met een regelsysteem;
- lithium-ionbatterij die voldoet aan de door de Verenigde Naties vereiste tests zoals gespecificeerd in het Handboek beproevingen en criteria van de VN, subsectie 38.3;
- tank voor het verzamelen van water.



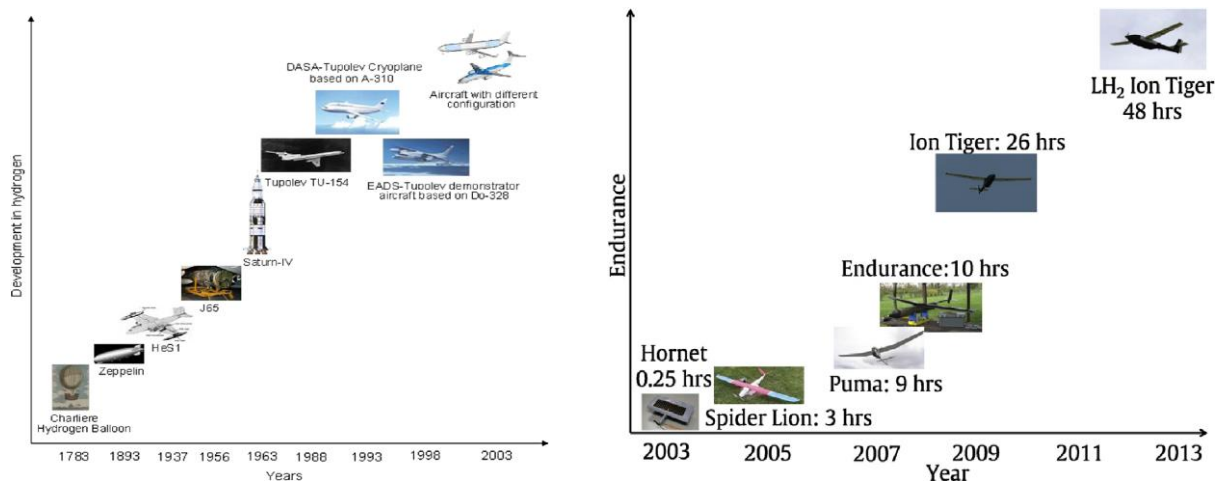
Figuur 11. Onderdelen van de brandstofceleenheid van een heftruck

Wat de veiligheid betreft, is het opslagvat voor waterstof beschermd met een thermisch geactiveerde overdrukventiel (die geactiveerd wordt door een thermische zekering), die zich tussen de isolatieklep van de heftruck en de cilinder bevindt. De zekering wordt geopend bij 109 °C en laat de waterstof onder druk snel vrijkomen. Er zit ook een terugslagklep op de vulopening om te voorkomen dat het gas in de opslagtank ontsnapt. Voorts zijn alle onderdelen van de brandstofcel in een gietijzeren behuizing ingebouwd, die op haar beurt beschermd is met een afdekkap. Deze gietijzeren behuizing biedt twee voordelen: ze beschermt tegen mechanische schade en ze maakt het afvoeren van waterstof mogelijk in geval van een externe thermische blootstelling.

4.5 Luchtvaart

Het onderzoek naar het gebruik van waterstof als brandstof voor vliegtuigen begon in 1956. De Verenigde Staten slaagden erin een vliegtuig van het type B57 Canberra te doen vliegen met als brandstof in één van zijn motoren waterstof die met helium onder druk werd gebracht

[13]. Vervolgens testten de Sovjets in 1988 de experimentele conversie van een vroeg exemplaar van de Tupolev Tu-154 waarvan één motor op waterstof werkte. De motor op vloeibare waterstof werd getest op hoogtes tot 7000 m en bereikte een snelheid van 900 km/u. Jammer genoeg werd het programma voor vloeibare waterstof gereduceerd tot slechts vijf vluchten en werd er beslist om niet verder te gaan met dergelijke brandstoffen wegens de hoge kosten en het gebrek aan waterstofinfrastructuur [14]. Tot op vandaag zijn er veel prototypes van vliegtuigen op waterstof gebouwd die gebruik maken van opslagmethoden op basis van samenpersen en vloeibaar maken, zoals de Tupolev Tu-155 (Tupolev, 2009), de Antares DLR-H2 (Fuel Cell Works, 2009), de Boeing Phantom Eye (Jackson en Haddox, 2010) en de ENFICA-FC Rapid 200-FC (Europese Commissie, 2011)[15]. De historische ontwikkeling van vliegtuigen op vloeibare waterstof en brandstofcellen wordt geïllustreerd in **figuur 12**. In september 2016 voltooide 's werelds eerste 4-zits passagiersvliegtuig met een brandstofcel en waterstof als brandstof, de HY4, zijn eerste vlucht van de luchthaven van Stuttgart. In deze toekomstige elektrische taxi wordt de waterstof opgeslagen met een druk tussen 4.300 PSI en 5.800 PSI in twee tanks uit koolstofvezel die in de twee rompen geplaatst worden. In dit vliegtuig met een maximumsnelheid van 200 km/u vormt de brandstofcel de waterstof direct om tot elektriciteit en is het enige afvalproduct dat uit dit proces voortkomt water [16]. Op 21 september 2020 maakte Airbus drie concepten bekend voor het eerste uitstootvrije commerciële vliegtuig, dat tegen 2035 in gebruik zou kunnen worden genomen. Elk van deze concepten vertegenwoordigt een andere aanpak om tot een uitstootvrije vlucht te komen, waarbij verschillende technologieën en aerodynamische configuraties onderzocht worden ter ondersteuning van de ambitie van het bedrijf om een pionier te zijn in de decarbonisatie van de volledige luchtvaartsector. Al deze concepten zijn gebaseerd op waterstof als primaire energiebron – een optie die volgens Airbus zeer veelbelovend is als schone brandstofoptie en die veel kans maakt om een oplossing te bieden voor de ruimtevaart en vele andere sectoren om hun doelstellingen op het vlak van klimaatneutraliteit te behalen.



Figuur 12. Historische ontwikkeling van vliegtuigen op waterstof (links) en brandstofcellen (rechts)

Een vliegtuig heeft een maximumgewicht tot 640 ton bij het opstijgen. Om deze lading te dragen, zijn er grote en krachtige motoren nodig, en deze motoren vereisen een grote hoeveelheid brandstof. Deze brandstofvereiste zorgt voor voordelen en uitdagingen in verband

met brandstofveiligheid, brandstofkosten, specifieke energie en equivalent energetisch rendement. Vandaag gebruiken vliegtuigen meestal brandstoffen op basis van aardolie, afkomstig van fossiele brandstoffen. Bij de meest gebruikte, kerosine, zijn de kosten lager dan bij andere brandstoffen [15, 17]. Hoewel kerosine en sommige soorten benzine de voorkeur hadden als brandstof voor de luchtvaart, zijn de voorraden ervan beperkt en heeft de groeiende broeikasgasuitstoot een negatieve impact op het milieu. Met deze overwegingen in gedachten bekijken onderzoekers en fabrikanten nieuwe wegen en manieren voor energiebeheer op basis van alternatieve/hernieuwbare brandstoffen.

In dit kader worden de in de luchtvaart gebruikte conventionele fossiele brandstoffen geleidelijk aan vervangen door alternatieve brandstoffen. Waterstof is in deze context één van de belangrijkste brandstoffen. De laatste jaren hebben onderzoekers en verbrandingsdeskundigen zich voornamelijk geconcentreerd op waterstof wegens zijn beschikbaarheid, zijn betere eigenschappen op het vlak van specifieke energie en zijn milieuvoordelen.

Er zijn twee gangbare manieren waarop waterstof gebruikt wordt in vliegtuigen: ofwel als brandstof in plaats van kerosine in grote vliegtuigen, ofwel als brandstof in PEM-brandstofcellen in straalmotoren in kleinere propellervliegtuigen [15].

4.6 Scheepvaart

Brandstofcellen op waterstof hebben hun prestaties bewezen in een brede waaier van toepassingen, waaronder bussen, vrachtwagens, auto's, heftrucks en zelfs passagierstreinen. Dankzij hun succes in zware landvoertuigen worden brandstofcellen nu geïntegreerd in zeeschepen. Brandstofcellen zullen een belangrijke rol spelen bij het helpen van maritieme sectoren om de uitstoot van broeikasgas op het water en in havens aan te pakken.

Het is bekend dat de zeevaart een belangrijke bron is van broeikasgassen. Dat komt doordat in scheepsmotoren traditioneel brandstof van lage kwaliteit wordt gebruikt die hoge emissies veroorzaakt. De laatste jaren heeft de publieke druk met betrekking tot luchtverontreiniging en klimaatverandering regeringen en andere autoriteiten ertoe aangezet actie te ondernemen om deze te beperken. Als gevolg daarvan worden er momenteel overal ter wereld voorschriften, gericht op de zeevaart, ingevoerd om de uitstoot van broeikasgassen te beperken.

Bijvoorbeeld:

- Het Noorse parlement nam in 2018 een resolutie aan om de fjorden in het land, die werelderfgoed zijn, te beschermen. Deze resolutie zal tegen 2026 alle emissies van cruiseschepen en ferries in de fjorden elimineren [22].
- In de staat Alaska beperken de Visible Emissions Standards de opaciteit van alle zeeschepen binnen drie mijl van de kustlijn.
- De International Maritime Organization (IMO) heeft verplichte maatregelen ingevoerd om de uitstoot van broeikasgassen te beperken en ze volledig te elimineren tegen het eind van deze eeuw. Hun initiële strategie zal de totale uitstoot van broeikasgassen van de internationale zeevaart beperken met minstens 50% ten opzichte van het niveau van 2008 tegen 2050.
- Het Europees Agentschap voor maritieme veiligheid (EMSA) wil de uitstoot van kooldioxide afkomstig van het zeevervoer in de EU beperken met minstens 40% (ten

opzichte van het niveau van 2005) tegen 2050. Er zijn gesprekken aan de gang over bijkomende beheersgebieden voor emissies in het noordpoolgebied, Centraal-Amerika, de Middellandse Zee en de Zwarte Zee, Japan, Noord- en Zuid-Korea en Australië.

Deze emissievoorschriften zullen een aanzienlijke impact hebben op zeeschepen en op de ondernemingen die ze uitbaten. Om zich aan deze veranderingen aan te passen, hebben vlootuitbaters oplossingen nodig die de uitstoot drastisch verminderen. Met zoveel verschillende soorten vaartuigen heeft de maritieme sector nood aan een oplossing die echt emissievrij is en die in verschillende soorten vaartuigen gebruikt kan worden.

Batterijen zijn een emissievrije oplossing voor kleinere vaartuigen die op korte trajecten ingezet worden, bijvoorbeeld kleine passagiersveerboten en boten op een meer. De lagere vermogensdichtheid en het hogere gewicht beperken echter het gebruik van batterijen voor veel toepassingen. Voor zeeschepen zijn brandstofcellen de enige haalbare echt emissievrije optie. Net als batterijen produceren brandstofcellen elektriciteit met een hoge efficiëntie via een elektrochemisch proces. Het verschil is dat bij een brandstofcel de energie apart wordt opgeslagen in de vorm van waterstofbrandstof. Zolang er brandstof beschikbaar is, zullen brandstofcellen elektriciteit produceren als een generator. De enige emissies van een brandstofcel zijn waterdamp en warmte.

Verder kan waterstofbrandstof geproduceerd worden met hernieuwbare energiebronnen, waaronder zonne-energie, windenergie, waterkracht en geothermische energie. De kostprijs van hernieuwbare waterstof daalt bovendien elk jaar, vooral doordat er geleidelijk aan grootschalige productieprojecten opgestart worden in Europa, Australië en Chili. Wanneer het werkt op hernieuwbare waterstof is een brandstofcelsysteem een energiebron die echt emissievrij is doorheen de volledige levenscyclus.

De overstap maken naar een nieuwe energiebron is een enorme onderneming. In het geval van brandstofcellen voor zeeschepen vormen de tankinfrastructuur en de beschikbaarheid van waterstof in havens obstakels. Voordat vervoersmaatschappijen hun schepen met brandstofcellen kunnen laten varen, moeten de waterstofvoorziening en de tankinfrastructuur verder ontwikkeld worden.

Op kortere termijn zijn hybride toepassingen die batterijen en brandstofcellen combineren haalbaar. Deze vereisen minder brandstof en voldoen toch aan de doelstelling van de nuluitstoot. Deze toepassingen zijn:

- energievoorziening voor kleinere vaartuigen, zoals veerboten en rivierboten.
- energievoorziening voor hulpstroom op grotere vaartuigen, zoals cruiseschepen, waar de behoefte aan hulpstroom groot is.
- energievoorziening voor aangemeerde vaartuigen.

Het gebruik van brandstofcellen voor maritieme toepassingen biedt drie belangrijke voordelen:

- Modulaire energiesystemen kunnen aangepast worden aan veel verschillende ladingsvereisten. De brandstofcellen met PEM (protonuitwisselingsmembraan) van Ballard zijn modulair (figuur 13), waardoor ze in verschillende parallele combinaties gebruikt kunnen worden om een vaartuig van de nodige stroom en redundantie te voorzien, van 100kW tot 1MW of meer.

- Gelijkstroom is compatibel met een elektrische architectuur. De PEM-brandstofcellen van Ballard zijn een bron van aanzienlijke gelijkstroom die compatibel is met een hybride elektrische architectuur met batterij. Ze kunnen ingezet worden in parallelle, aan- en uitschakelbare configuraties om te voldoen aan de variabele stroombehoeften van:
 - hybride elektrische aandrijving.
 - hulpstroomsystemen.
- Brandstofcelsystemen hebben een flexibele configuratie. In een brandstofcelsysteem zijn de onderdelen voor stroomproductie en die voor de opslag van brandstof gescheiden, wat de architect van het schip meer flexibiliteit biedt dan batterijen. Het brandstofcelsysteem van Ballard heeft een flexibele configuratie die zich aanpast aan de ruimtebeperkingen van het schip. Het kan in verschillende modules worden opgedeeld, die op verschillende plaatsen kunnen worden geplaatst. Bovendien kunnen de deskundigen van Ballard de bedrijfscycli van elke maat of type van zeeschip evalueren. Ze kunnen een haalbare, praktische oplossing ontwikkelen door de optimale kenmerken te bepalen op het vlak van:
 - hybride architectuur.
 - vermogen van de brandstofcel.
 - eisen betreffende neerwaartse beweging.
 - eisen betreffende de opslag van brandstof.
 - geschat brandstofverbruik.



Figuur 13. Maritieme brandstofcelmodule van 100 kW van Ballard

Brandstofcellen kunnen gebruikt worden in verschillende soorten schepen, bv. ferry's, cruiseschepen, rivierboten enz. Bij ferry's kunnen modulaire, schaalbare brandstofcelsystemen

zorgen voor een emissievrije aandrijving voor zowel kleine als grote ferry's. Er wordt verwacht dat de eerste emissievrije ferry's aangedreven zullen worden door een hybride architectuur van brandstofcellen en batterijen. De specifieke verhouding tussen batterijen en brandstofcellen zou afhankelijk zijn van de duur van de route en de dienstregeling. Omdat brandstofcellen aanzienlijke gelijkstroom leveren, kunnen ze ook stroom leveren die verdeeld kan worden over een ferry (of ander schip) om in zijn hulpstroombehoeften te voorzien, bv. voor verlichting, verwarming, airconditioning, instrumentatie, noodsystemen, kombuizen en andere aan boord aanwezige systemen. Voor een nog grotere efficiëntie zou de extra warmte die door de brandstofcellen wordt geproduceerd, gebruikt kunnen worden om water te verwarmen voor HVAC, wasserij en andere doeleinden. Het water dat wordt geproduceerd door de brandstofcel kan indien nodig worden gebruikt.

Toepassingen op cruiseschepen behoren mogelijk tot de eerste maritieme toepassingen van brandstofcellen. Sommige havens voor cruiseschepen eisen nu al dat deze emissievrij zijn. De toepassingen van brandstofcellen in cruiseschepen omvatten het opwekken van stroom voor de hotelvoorzieningen, de noodsystemen en een deel van de stroom voor de aandrijving. Opdat de sector deze eeuw haar doelstellingen voor nuluitstoot zou halen, moeten brandstofcellen 100% van de stroom op vele cruiseschepen leveren naarmate de waterstofinfrastructuur zich verder ontwikkelt.

Brandstofcellen zijn een haalbare oplossing voor een emissievrije aandrijving van rivierboten, met inbegrip van aken die door een duw- of sleepboot geduwd of gesleept worden en schepen met eigen voortstuwing. Ballard werkt reeds aan een demonstratieproject voor de aandrijving van een rivierboot in Lyon (Frankrijk) (figuur 14). Het project zal een duwboot aandrijven als werkschip op één van 's werelds meest uitdagende rivieren, de Rhône.



Figuur 14. Project van Ballard voor de aandrijving van een rivierboot in Lyon (Frankrijk)

In een poging om de luchtverontreiniging en de CO₂-uitstoot te beperken, zijn regeringen, havenbedrijven en organisaties over de hele wereld bezig met het verstrengen van de emissienormen voor zeeschepen. Daardoor staat de zeevaartsector onder druk om aan de toekomstige voorschriften voor nuluitstoot te voldoen. Stroomvoorziening met brandstofcellen op waterstof – een bewezen emissievrije oplossing voor de aandrijving van bussen, vrachtwagens en ander zwaar transport – biedt een reëel potentieel voor veel soorten

zeeschepen. Brandstofcellen op hernieuwbare waterstof vormen de meest praktische en haalbare emissievrije oplossing. De toepassing van deze technologie is een cruciale stap in de reductie van de uitstoot van zeeschepen en het schoner maken van de lucht voor een meer leefbare wereld.

5. Transport van waterstof

Zoals reeds geleerd, wordt waterstof al vele decennia in de industrie gebruikt. Nadat waterstof in een gecentraliseerde productie-installatie wordt geproduceerd, wordt het gewoonlijk naar de eindgebruikers of naar de betrokken toepassingen op basis van brandstofcellen en waterstof getransporteerd. Waterstof kan ofwel als samengeperst gas, ofwel als cryogene vloeistof getransporteerd worden. Er zijn een aantal manieren waarop dit bulktransport kan gebeuren: over de weg in vrachtwagens/opleggers en tanks, of via pijpleidingen.

5.1 Vrachtwagens

5.1.1 Vrachtwagens voor gasvervoer

Industriële gasbedrijven maken op dit moment gebruik van vrachtwagens om naadloze stalen vaten met samengeperste gasvormige waterstof (CGH₂) te transporteren over afstanden van 200-300 km vanaf een gecentraliseerde productielocatie. Individuele cilinders, cilinderbundels of lange cilindrische buizen worden op opleggers geïnstalleerd (figuur 15). De opslagdruk gaat van 200 tot 300 bar en een oplegger kan tussen 2.000 en 6.200 Nm³ CGH₂ voor vrachtwagens vervoeren, met de gewichtsbeperving van 40 ton. De hoeveelheid waterstof die op deze manier wordt vervoerd is relatief laag (van 180 tot 540 kg, afhankelijk van het aantal buizen of bundels), wat ongeveer 1-2% van de totale massa van de vrachtwagen vertegenwoordigt. De huidige opleggers gebruiken opslagcilinders van het type I (d.w.z. volledig uit metaal). Om hun prestaties te verhogen, kunnen bundels van lichtgewicht cilinders of buizen omwikkeld met composiet (type II) gebruikt worden. Deze leveringsmethode is relatief eenvoudig maar ze moet aangepast worden aan de hoeveelheden waterstof en de afstanden om concurrerend te zijn. De voornaamste beperkingen van de levering in vrachtwagens voor samengeperst gas zijn de investerings-, bedrijfs- en onderhoudskosten, waaronder ook de loonkosten voor de chauffeur, en de brandstofkosten.



(a)



(b)

Bron: Air Liquide, 2014.

Figuur 15. Air Liquide maakt in Europa gebruik van twee soorten CGH₂-opleggers: (a) opleggers met cilinders die 2.000 tot 3.000 Nm³ waterstof vervoeren, en (b) opleggers met composietcilinders die 6.200 Nm³ waterstof vervoeren.

Het vervoer met vrachtwagens voor gasvervoer (oplegger met cilinders, cilinder) is één van de meest ontwikkelde vervoerswijzen voor het vervoer over korte afstanden en voor kleine hoeveelheden waterstof. De belangrijkste beperkingen zijn de lage opslagcapaciteit voor klanten met een groot verbruik, waardoor frequente leveringen nodig zijn, en de lage druk van de geleverde waterstof, waardoor deze extra moet worden samengeperst, bijvoorbeeld in een

tankstation. Daarom worden alternatieve technologieën met een hogere druk, een grotere vervoerscapaciteit en lagere kosten onderzocht, zoals hieronder besproken. Lincoln Composites ontwikkelt composietbuizen met een grotere capaciteit. Het materiaal van een tank bestaat uit een plastic binnenlaag die volledig is omwikkeld met koolstofvezel geïmpregneerd met epoxyhars voor de levering van gasvormige waterstof in opleggers met cilinders. De TITAN TM tank bijvoorbeeld (diameter 1,08 m, lengte 11,5 m, watervolume 8.400 l en gewicht 2.087 kg) werkt met een druk van 250 bar. Hij kan 2-3 keer meer waterstof leveren dan de hoeveelheid waterstof die in stalen tanks met een vergelijkbare massa opgeslagen/getransporteerd kan worden. **Figuur 16** toont de opslageenheid die vier composiettanks bevat die 600 kg waterstof kunnen opslaan met een druk van 250 bar. De tanks die geschikt zijn voor een hogere druk zijn momenteel in ontwikkeling.



Bron: Lincoln Composites, 2014.

Figuur 16. Een oplegger met vier composiettanks, ontwikkeld door Lincoln Composites.

In het Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL, VS) worden hybride technologieën onderzocht, zoals cryo-compressie, waarbij druk en een lage temperatuur gecombineerd worden om de hoeveelheid waterstof die kan worden opgeslagen per volume-eenheid te verhogen en de energetische nadelen van het vloeibaar maken van waterstof te vermijden. Gecomprimeerd waterstofgas met een cryogene temperatuur heeft een veel hogere dichtheid dan in gewone compressietanks met omgevingstemperatuur. Deze nieuwe vaten zouden waterstof kunnen opslaan aan lage temperaturen, tot 80 K, met een druk van 200-400 bar. Deze aanpak vereist de ontwikkeling van geïsoleerde drukvaten uit composiet. Als alternatief zou men het gebruik kunnen overwegen van koude tanks voor waterstofgas, die minder koeling vereisen. Mogelijk is er een optimale combinatie van druk en temperatuur binnen het bereik van 80-200 K. Het LLNL heeft recent glasvezelmaterialen geïdentificeerd voor de opslag van koud waterstofgas (~ 150 K en tot 500 bar) die niet duur zijn en verwacht een kostenbesparing voor opleggers van 50%.

De voornaamste veiligheidsinrichtingen die in vrachtwagens voor gasvervoer worden gebruikt, zijn manuele veiligheidskleppen. Tijdens het vervoer worden alle opslagvaten met waterstof afgesloten met een klep. Wanneer ze in bedrijf zijn, zijn er verschillende veiligheidsinrichtingen en strikte procedures van kracht.

5.1.2 Vrachtwagens voor cryogene vloeistoffen

Waterstof kan ook over de weg vervoerd worden in vloeibare vorm (gekoeld tot onder 20 K of -253 °C) om grotere hoeveelheden te verdelen (honderden m^3/u). Wat de gewichtscapaciteit betreft, kunnen supergeïsoleerde vrachtwagens voor vloeibare waterstof (LH_2) tot 10 keer meer waterstof vervoeren dan de opleggers met cilinders die gebruikt worden voor het vervoer van CGH_2 . Vrachtwagens voor LH_2 die werken bij atmosferische druk hebben een volumetrische capaciteit van ongeveer 50.000-60.000 liter en kunnen tot 4.000 kg vervoeren (figuur 17). Ze krijgen de voorkeur als distributiemethode voor middelgrote en grote hoeveelheden waterstof over lange afstanden, wat verklaart dat de activiteit van LH_2 zich vooral in Noord-Amerika heeft uitgebreid (de capaciteit voor het vloeibaar maken van waterstof in Noord-Amerika is ongeveer tien keer groter dan in Europa). De in de vrachtwagen vervoerde vloeibare waterstof wordt vervolgens verdampt tot een product onder hoge druk voor gebruik op een klantlocatie.



Bron: beeldbank van Air Liquide, 2015

Figuur 17. Een door Air Liquide gebruikte tankwagen voor het vervoer van LH_2 naar de eindgebruiker.

Het voornaamste probleem van deze vervoersmethode is het kapitaalintensieve vloeibaarmakingsproces. Dit is ook een duur proces. De voor het vloeibaar maken benodigde energie bedraagt 30-40% van de onderste verbrandingswaarde van waterstof (terwijl dit 10% is voor de compressie van gas) [21]. De elektriciteitskosten vertegenwoordigen 50-80% van de kosten voor het vloeibaar maken. De afstand is de voornaamste factor bij de keuze tussen vervoer van LH_2 of van gasvormige waterstof CGH_2 . Het aantal vrachtwagens voor LH_2 zal afhangen van de vraag naar waterstof en van de plaats waar deze vloeibaar gemaakt wordt. Doordat de capaciteit van vrachtwagens voor vloeibare waterstof echter veel groter is dan voor gecomprimeerd gas, is deze leveringsmethode minder afhankelijk van de afstand. De investeringskosten en de bedrijfskosten (brandstof, lonen) van de vrachtwagens zijn veel lager. Daardoor is voor lange afstanden (vanaf ongeveer 400 km tot duizenden kilometers) en middelgrote hoeveelheden waterstof het vervoer in vrachtwagens voor vloeibare waterstof goedkoper dan in vrachtwagens voor gasvormige waterstof. Er moet echter rekening worden gehouden met de beschikbaarheid van LH_2 . Op dit moment wordt de industriële waterstofmarkt bediend door vier installaties voor het vloeibaar maken in Europa en tien in Noord-Amerika. Grotere markten zouden de bouw van nieuwe installaties rechtvaardigen. Aanzienlijke kostenbesparingen zijn mogelijk door de schaafeffecten van de installaties voor het vloeibaar

maken. Deze leveringsmethode is echter afhankelijk van de prijs van de elektriciteit en van de beslissing om nieuwe installaties te bouwen voor het vloeibaar maken. Betere technologieën zouden mogelijkheden kunnen creëren om de investeringskosten te verlagen, het energetisch rendement van het vloeibaarmakingsproces te verbeteren en het verlies van waterstof door verdamping tijdens de opslag en het vervoer te beperken (de verdampingssnelheid hangt af van de grootte, de vorm en de isolatie van het vat en van de opslagtijd en ligt meestal in de orde van 0,2% per dag voor een vat van 100 m³). Er zijn een aantal studies aan de gang om de technologieën voor het vloeibaar maken te verbeteren en nieuwe aanpakken voor te stellen (bijvoorbeeld de verbetering van de ortho-para-conversie, de ontwikkeling van magnetische koeling enz.).

5.2 Treinen

De eerste trein op waterstof in het VK, ontwikkeld in het kader van het HydroFLEX-project, ving zijn eerste reis op een hoofdspoor aan in Warwickshire in september 2020. In de komende jaren zullen meer brandstofceltreinen ingezet worden in heel Duitsland. De vraag blijft echter hoe de waterstof het best naar de tankstations voor de treinen wordt vervoerd. Een mogelijke weg is per spoor; deze optie wordt ondersteund door het energie-agentschap van de deelstaat Hessen. Het heeft DB Energie, de energieleverancier van de Duitse nationale spoorwegmaatschappij Deutsche Bahn, opgedragen te onderzoeken hoe dit bereikt kan worden vanuit het oogpunt van de technische, operationele en wettelijke haalbaarheid. Deze vraag werd onderzocht op basis van een bestaande waterstofbron in het industrieterrein Höchst in Frankfurt am Main op twee specifieke routes in het Rijn-Maingebied (zie [figuur 18](#)).



Bron: NPROXX, 2020

Figuur 18. Transport van waterstof per spoor.

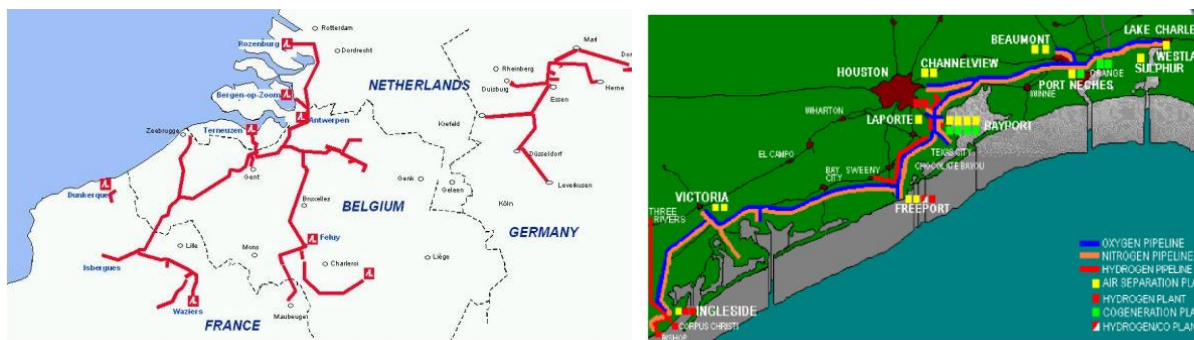
De deskundigen van DB Energie concludeerden dat het haalbaar was om het waterstoftankstation per spoor te voorzien van waterstof. Er zijn veel voordelen in vergelijking met het vervoer over de weg, zoals de precieze planning van de vervoerstijden, de hoge betrouwbaarheid en veiligheid, de mogelijkheid om grote hoeveelheden te vervoeren en het ontlasten van het wegverkeer in stedelijke gebieden. Vanuit technisch en wettelijk oogpunt zijn er geen argumenten tegen het vervoer per spoor. Er zijn echter momenteel nog geen

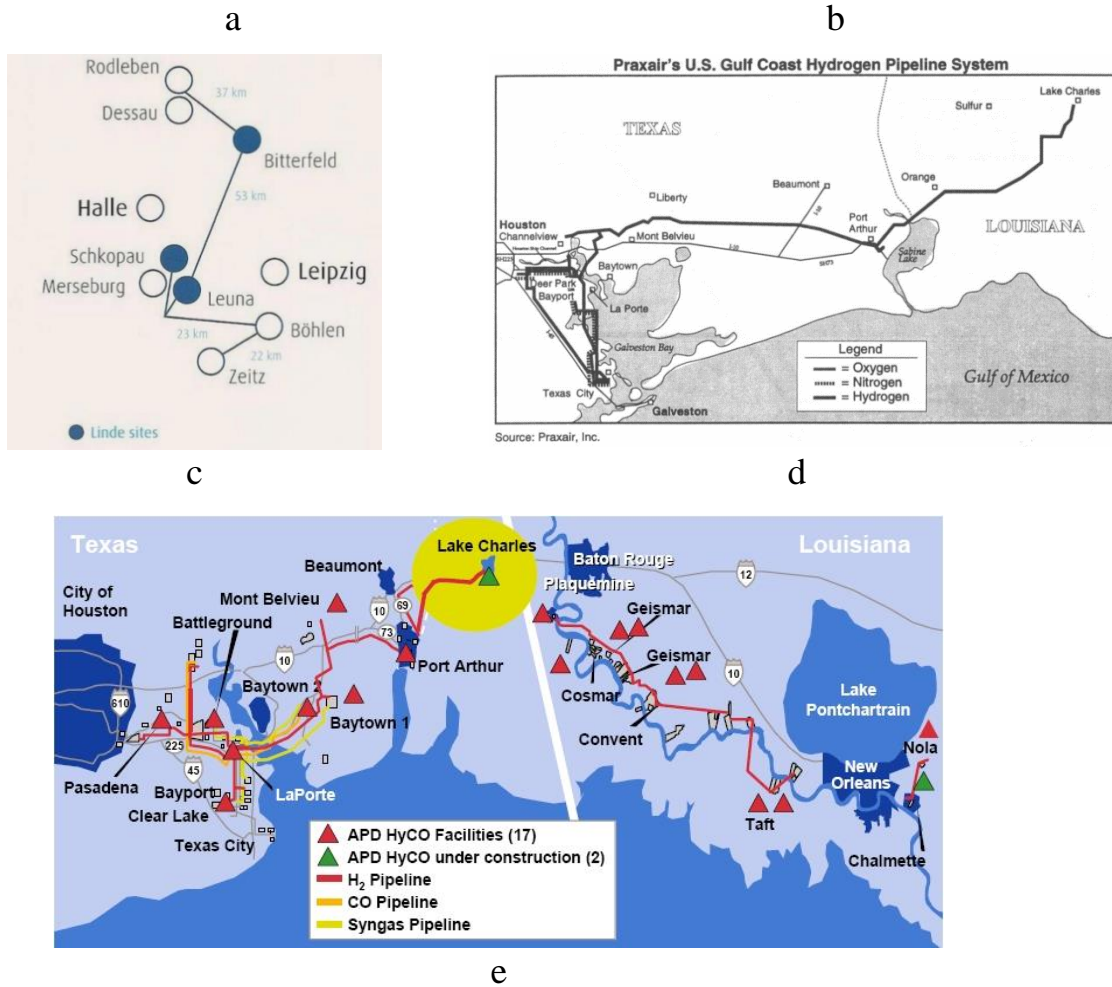
goedgekeurde vaten voor het vervoer van waterstof per spoor, enkel voor wegvervoer. Aangezien de vereisten zeer gelijkaardig zijn, kan wel verwacht worden dat er binnenkort een goedkeuring komt voor het vervoer per spoor. Om de haalbaarheid en de economische efficiëntie te kennen, zou in een afzonderlijke studie moeten worden nagegaan of het vervoer per spoor goedkoper is dan het vervoer over de weg. Op de twee onderzochte routes deed het vervoer per spoor het iets minder goed. Hieruit konden echter geen algemene conclusies worden getrokken. Het transport van waterstof over de weg is echter niet echt een duurzame oplossing, vooral wanneer brandstofceltreinen in de toekomst nog steeds moeten bijtanken.

5.3 Pijpleidingen

Er zijn vandaag een aantal commerciële waterstofpijpleidingen in gebruik voor de distributie van grote hoeveelheden (tientallen duizenden m^3/u) gasvormige waterstof aan de industriële markt. Hun lengte gaat van minder dan één tot honderden kilometers. De voornaamste actoren zijn de industriële gasbedrijven, namelijk Air Liquide, Air Products, Linde en Praxair. Als antwoord op een groeiende vraag naar waterstof, vooral van raffinaderijen, worden de bestaande netwerken uitgebreid en worden er nieuwe stukken aangelegd. In maart 2009 bijvoorbeeld kondigde Air Products een uitbreiding met 60 km aan van het Gulf Coast-netwerk van waterstofpijpleidingen in de Amerikaanse staat Louisiana. Het waterstofnetwerk wordt geschat op ongeveer 1.600 km in Europa en 1.100 km in Noord-Amerika. De meeste pijpleidingen bevinden zich op plaatsen waar grote hoeveelheden waterstof verbruikt worden door raffinaderijen en chemische bedrijven. Deze omvatten infrastructuur in het noorden van Europa (Nederland, Noord-Frankrijk en België), Duitsland (Roergebied en rond Leipzig), VK (Teesside) en in Noord-Amerika (Golf van Mexico, Texas-Louisiana, Californië, Alberta). Er zijn ook kleinere netwerken in Zuid-Afrika, Brazilië, Thailand, Korea, Singapore en Indonesië. Over het algemeen is de lengte van deze pijpleidingen beperkt in vergelijking met het wereldwijde netwerk van aardgaspijpleidingen, dat meer dan 2.000.000 km omvat.

Figuur 19 toont delen van het wereldwijde netwerk van waterstofpijpleidingen. De 240 km lange pijpleiding in het Duitse Roergebied bijvoorbeeld (**figuur 19 a**), die in 1998 door Air Liquide gekocht werd, is in gebruik sinds 1938. In het kader van het Europese project "Zero Region" voor energietoepassingen op basis van waterstof heeft Linde een waterstofpijpleiding van 900 bar (diameter 1") geïnstalleerd over een afstand van 1,7 km in het industrieterrein Frankfurt-Hoechst voor levering aan passagiersvoertuigen met brandstofcellen.





Figuur 19. Voornaamste waterstofpijpleidingen in de wereld: (a) waterstofpijpleidingen van Air Liquide in de Benelux, Frankrijk en Duitsland (Roergebied); (b) waterstofpijpleidingen van Air Liquide aan de Golfkust (VS); (c) waterstofpijpleidingen van Linde in Duitsland; (d) waterstofpijpleidingen van Praxair aan de Golfkust (VS); (e) waterstofpijpleidingen van Air Products aan de Golfkust (VS).

6. Stationaire toepassingen

6.1 Warmtekrachtkoppelingssystemen (WKK)

In traditionele warmtekrachtkoppelingssystemen worden elektriciteit en warmte geproduceerd door de verbranding van aardgas in de interne verbrandingsmotor of turbine. Bij WKK-systemen op basis van elektriciteit geproduceerd met brandstofcellen wordt water verwarmd via de reeds beschreven elektrochemische reactie. Er worden twee brandstofceltechnologieën in beschouwing genomen: de brandstofcel met een vast oxide en de PEM-brandstofcel. Aardgas wordt omgevormd zodat er waterstof wordt geproduceerd, en een mengsel van waterstof, kooldioxide en koolmonoxide (syngas genoemd) met onzuiverheden wordt rechtstreeks naar de brandstofcel gevoerd om energie op te wekken. Bij PEM-brandstofcel-systemen, die werken met lagere temperaturen, moet het syngas verder gezuiverd worden om het koolmonoxide en de zwavelhoudende verbindingen te verwijderen. In het kader van het Callux-project (<http://enefield.eu/>) zijn er in Europa micro-WKK-installaties ingevoerd.

6.2 Noodstroomvoorziening

Het voornaamste doel van dit soort technologie is om onmiddellijk voor stroom te zorgen in geval van een stroomuitval. De stroomcapaciteit van deze installatie ligt tussen 16 en 80 kW met tot negen waterstofcilinders. De voornaamste voordelen van deze toepassing zijn:

- Hoge betrouwbaarheid en snel opstarten.
- Schaalbare autonomie die enkel afhangt van het opgeslagen volume gas.
- Weinig onderhoud.
- Schone en stille werking [1].

Potentiële gebruikers van dit soort toepassing zijn onder andere telecombedrijven, datacenters, ziekenhuizen, het leger, de industrie en luxehotels. In [figuur 20](#) wordt een voorbeeld van het systeem getoond, met name een noodstroomvoorziening met brandstofcel die gebruikt wordt in het project van IP Energy (Aix-en-Provence, Frankrijk). Het in 2008 geïnstalleerde noodstroomstelsel van 30 kW is de eerste oplossing met een container. De interne gasopslag maakte de werking ervan gedurende 4 uur mogelijk.



Figuur 20. Een noodstroomvoorziening met brandstofcel verbonden met het datacenter van IP Energy.

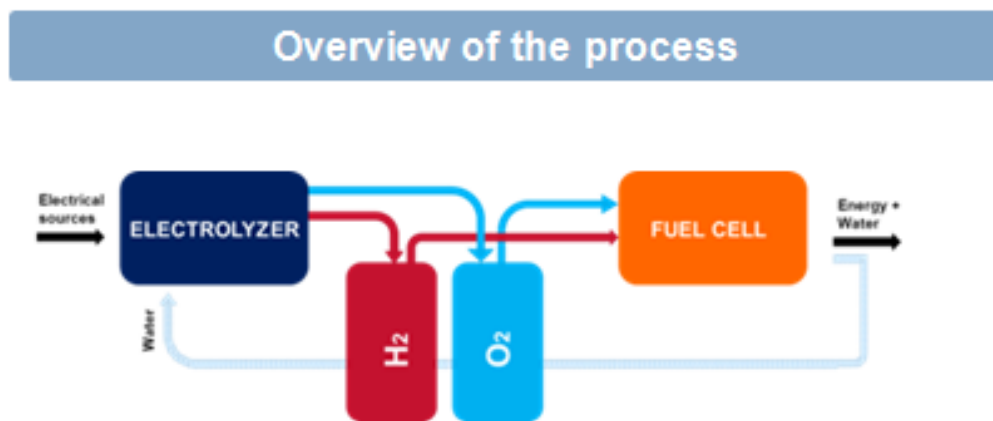
De veiligheidsinrichtingen en -concepten voor het systeem zijn de volgende:

- Het brandstofcelsysteem heeft twee afzonderlijke ontluchttingsleidingen, één voor zuurstof en één voor waterstof, die het gas op het dak van het vat op een veilige afstand afvoeren om de vermenging van zuurstof en waterstof tijdens het afvoeren te vermijden. Na het afvoeren blijven er resten van waterstof achter in het systeem.
- Het procescompartiment is uitgerust met twee waterstofsensoren die een noodstop kunnen activeren als de waterstofconcentratie in de vaten hoger is dan 0,4 volumepercent. Wanneer er een abnormale concentratie van waterstof wordt gedetecteerd, wordt er een veiligheidsstop geactiveerd en worden de volgende acties uitgevoerd:
 - Het stoppen van alle processen van het systeem.
 - Het activeren van de mechanische verluchtingen.
 - Het isoleren van de tanks door het sluiten van de solenoïdekleppen.
- De detectie van waterstof wordt continu gemonitord, zelfs wanneer het systeem stand-by is. In geval van een storing in de detectie activeert het systeem een veiligheidsstop.
- De vaten zijn uitgerust met branddetectoren. Wanneer deze geactiveerd worden, moeten de volgende acties worden uitgevoerd:
 - Het stoppen van alle processen van het systeem.
 - Het isoleren van de tanks door het sluiten van de solenoïdekleppen.
 - Het afsluiten van de verluchtingen.
- Gevaarlijke explosieve omgevingen als gevolg van het mogelijke lekken of vrijkomen van waterstof moeten voorkomen worden in de gesloten ruimte van de brandstofcel. Passieve preventiemaatregelen zijn onder andere: het gebruik van permanent veilige verbindingen die zo ontworpen zijn dat ze de maximale hoeveelheid die kan vrijkomen, tot een voorspelbare waarde beperken en natuurlijke ventilatie. Actieve preventiemaatregelen zijn onder andere: actieve ventilatie; een detectiesysteem voor brandbaar gas; andere methoden om lekken te detecteren (bv. via drukmetingen aan de hand van controlewaarden).
- Binnenin het vat, waar waterstof naartoe kan lekken of diffunderen, is er geen classificatie aangezien veiligheidsbarrières ervoor zorgen dat de waterstof geen explosiegevaarlijke omgeving creëert bij lekken of door accumulatie. Niettegenstaande wordt alle uitrusting die net onder de bovenkant van het vat is geïnstalleerd en in staat is om brandbare waterstof-luchtmengsels te ontsteken gecertificeerd voor ATEX-zone 2. In het bijzonder gaat het om de waterstof- en brandsensoren en het ventilatiesysteem. Verder wordt de elektrische kast systematisch van het procescompartiment gescheiden.
- Zuurstof is niet brandbaar in lucht maar ondersteunt het verbrandingsproces. Een zuurstoflek kan een oorzaak zijn van een brand. Het brandrisico is groter wanneer de atmosfeer verrijkt is met zuurstof. Elk contact tussen zuurstof en organische stoffen moet wegens het brandrisico vermeden worden.
- In het ontwerp en het gebruik van dit systeem moeten algemene methoden van risicobeperking worden toegepast:
 - Correcte materiaalkeuze (d.w.z. ontvet en roestvrij), gebruik van beschermde leidingen zonder scherpe bochten, stevige verbindingen enz.
 - Beperking van zuurstofstromen in functie van de druk.
 - Bescherming van de zuurstofleidingen door filters om stof tegen te houden dat tot ontsteking kan leiden.
 - Natuurlijke en geforceerde ventilatie in het procescompartiment.

- Beperking van de lengte van leidingen onder hoge druk, voldoende gevarenafstand tussen leidingen en elektrische onderdelen.
- Groepering van de onderdelen die zuurstof bevatten in een afgebakende zone (compartiment).
- Naleving van de controle- en onderhoudsprocedures (periodieke tests) van de installatie [1].

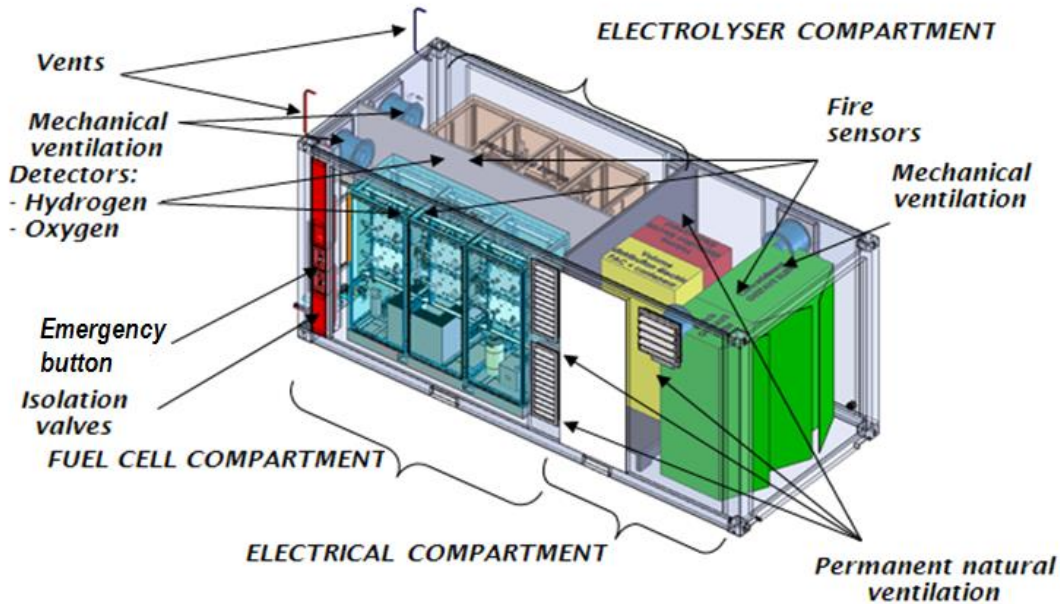
6.3 Opslagssystemen voor waterstofgebaseerde energie

Als voorbeeld van een opslagsysteem voor waterstofgebaseerde energie zullen we de Greenenergy Box onder de loep nemen. De Greenenergy BoxTM is een waterstofketen met een container die bestaat uit een elektrolyser, een brandstofcel, een beheersysteem voor water en warmte en elektrische omvormers die aangesloten zijn op opslagvaten voor waterstof en zuurstof. De Greenenergy BoxTM is een geïntegreerd modulair systeem dat een vermogen van 50 tot 500 kW kan bieden met een opslagcapaciteit van 0,2 tot 2 MW. Het principe wordt getoond in [figuur 21](#). Er kunnen meerdere systemen aangesloten worden om het vermogen en de energiec capaciteit te verhogen, waardoor het kan fungeren als back-upstelsysteem voor enkele uren met een hoog vermogen [1].



Figuur 21. Overzicht van het proces van de Greenenergy Box.

De fofovoltaïsche panelen leveren elektriciteit aan het elektrische netwerk en het overschot wordt gebruikt door de elektrolyser om gasvormige waterstof en zuurstof te produceren. Na de productie worden de gasvormige waterstof en de zuurstof opgeslagen in gescheiden tanks die zich naast de Greenenergy BoxTM bevinden. Dankzij het brandstofcelsysteem kunnen de opgeslagen waterstof en zuurstof gebruikt worden om elektriciteit te produceren om de gedeeltelijke energetische autonomie van de gebouwen en het back-upstelsysteem te verzekeren in geval van stroomonderbrekingen. De Greenenergy BoxTM beheert zelf de van de fofovoltaïsche panelen ontvangen elektriciteit voor de elektrolyse van water of om het netwerk van elektriciteit te voorzien. Verder wordt ook de warmte, die eveneens door het systeem wordt geproduceerd, zowel tijdens de elektrolyse als tijdens de processen van de brandstofcel, beheerd en gevaloriseerd voor de aangrenzende gebouwen. De waterdichte en windbestendige Greenenergy BoxTM heeft drie verschillende compartimenten: een elektrisch compartiment, een brandstofcelcompartiment en een elektrolysercompartiment, zoals getoond in [figuur 22](#).



Figuur 22. Schematische voorstelling van de Greenenergy Box™ [1]

De Greenenergy Box™ is CE-gecertificeerd door het volgen van de Laagspanningsrichtlijn 73/23/EEG, de Richtlijn inzake elektromagnetische compatibiliteit 89/336/EEG, de Machinerichtlijn 98/37/EG en de Richtlijn inzake drukapparatuur 97/23/EG. De risicobeoordeling voor dit systeem wordt in drie stappen uitgevoerd. Eerst wordt een document getiteld "Fundamentele veiligheidsoverwegingen" opgesteld, waarin de voornaamste veiligheidseisen beschreven worden waaraan moet worden voldaan in de fasen van de architectuur en het ontwerp van de waterstofketen. Eens de architectuur van het systeem voldoende is gedetailleerd, wordt voor elk subsysteem een HAZOP (HAZard and OPERability)-studie uitgevoerd om de potentiële oorzaken te bepalen van afwijkingen van het proces en de mogelijke gevolgen die eraan verbonden zijn en om de bestaande barrières te beoordelen. In de derde stap wordt de HAZOP-studie aangevuld met een foutenboomanalyse om defecten in het ontwerp, een ongeschikte systeemconfiguratie en externe gevarenbronnen te belichten. Alle veiligheidsstudies worden samengebracht in een document met de titel "Synthese van de veiligheidsstudies van de Greenenergy Box™ [1].

De algemene veiligheidsstrategie van de waterstofketen wordt in de onderstaande punten in detail besproken.

- Vermijden en beheersen van lekken.
 - De uitrusting en leidingen moeten zo gekozen worden dat ze geschikt zijn voor gebruik met waterstof en zuurstof. In het bijzonder moeten waterstofverbrossing en zuurstofcorrosie vermeden worden door materialen te kiezen volgens IGC15/06, ISO/TR 15916 en ISO 11114-4. Vaak worden stalen cilinders gebruikt voor de opslag van waterstof onder druk en zuurstof. Het maximale koolstofequivalent voor waterstof is 0,43, zoals beschreven in IGC 121/04, § 3.

- Gelaste verbindingen hebben de voorkeur en worden op een praktische manier gebruikt om mogelijke bronnen van lekken tot een minimum te beperken. Het aantal verbindingen en gemonteerde onderdelen moet tot een minimum worden beperkt.
- Zowel het elektrolyser- als het brandstofcelcompartiment van de Greenenergy BoxTM zijn uitgerust met twee waterstofsensoren en een zuurstofsensor. Een veiligheidsafsluitklep wordt geactiveerd op 10% van de onderste ontvlambaarheidsgrens van waterstof (0,4 volumepercent H₂ in lucht) en een noodafsluiting vindt plaats op 25% van de onderste ontvlambaarheidsgrens (1 volumepercent H₂ in lucht). De zuurstofsensor wordt geactiveerd zodra de zuurstofconcentratie meer dan 23 volumepercent in lucht bedraagt.
- Bovendien worden waterstof- en zuurstoflekken ook gedetecteerd door het drukverschil tijdens stand-byfasen. In geval van drukverlies in een tank of een deel van een leiding tijdens een stand-byfase wijst dit mogelijk op een lek. Bij een klein drukverlies tijdens de stand-byfase wordt er een alarm geactiveerd en als het drukverlies te groot is, zal het systeem niet opnieuw opgestart kunnen worden.
- Voor de ingebruikname worden hydraulische en lektests uitgevoerd, zoals voorgeschreven door de Richtlijn inzake drukapparatuur.
- Er worden regelmatige inspecties en een preventief onderhoudsprogramma georganiseerd om het hoogst mogelijke veiligheidsniveau te garanderen. In het bijzonder worden er regelmatig lektests uitgevoerd voor drukregelaars, kleppen, leidingen, verbindingen enz. Er vinden regelmatig visuele controles plaats om het niveau van corrosie te controleren. Informatie over de frequentie van controles en onderhoud is te vinden in de bijlagen F van IGC 121/04 en IGC 13/02.
- Voorkomen van de vorming van brandbare omgevingen of omgevingen met een te hoog zuurstofgehalte.
- Drie compartimenten van de Greenenergy BoxTM hebben natuurlijke ventilatie dankzij de openingen aan beide zijkanten van de container (figuur 22).
- Het brandstofcelcompartiment en het elektrolysercompartiment zijn beide uitgerust met ventilatie van het type ATEX die geactiveerd wordt wanneer de waterstof- en zuurstofconcentratie respectievelijk 0,4 volumepercent waterstof of 23 volumepercent zuurstof in lucht overschrijdt. Het maximumdebiet wordt ingesteld voor thermische dissipatie, d.w.z. 2.500 m³/u voor het brandstofcelcompartiment en 2.700 m³/u voor het elektrolysercompartiment.
- De modellering van een accidenteel waterstoflek met een debiet van 750 l/min aan de hand van de aan de Universiteit van Ulster ontwikkelde LES (Large Eddy Simulation)-methode toont dat het ongeveer 10 s duurt voordat een waterstofsensor een waterstofconcentratie boven 0,4 volumepercent detecteert in het natuurlijk geventileerde elektrolysercompartiment. Wanneer men uitgaat van een conservatieve hypothese van 30 s voor de responstijd van de waterstofsensor, dan ziet men dat na 40 s van ononderbroken constant vrijkomen de waterstof-luchtconcentratie die onder het dak gevormd wordt,

nog steeds lager is dan de onderste ontvlambaarheidsgrens van waterstof in lucht, d.w.z. minder dan 4 volumepercent in lucht. Vanaf dit moment stuurt de waterstofsensoren een signaal naar het besturingscommando waardoor de luchtinlaatventilator naar zijn maximumsnelheid wordt gebracht. Men zal zien dat de waterstof-lucht wolk volledig wordt verdund in minder dan 2 s.

- Elimineren/beperken van ontstekingsbronnen.
 - De binnenkant van het vat Greenenergy BoxTM, waar waterstof naartoe kan lekken of diffunderen, wordt niet geclassificeerd aangezien veiligheidsbarrières ervoor zorgen dat de waterstof geen explosiegevaarlijke omgeving creëert bij het lekpunt of door accumulatie. Niettegenstaande wordt alle uitrusting die net onder het dak van de container is geïnstalleerd en in staat is om brandbare waterstof-luchtmengsels te ontsteken gecertificeerd voor ATEX-zone 2. In het bijzonder gaat het om de branddetectoren, de waterstof- en zuurstofsensoren en het ventilatiesysteem.
 - De Greenenergy BoxTM en de reservoirs zijn geaard en verlijmd om bescherming te bieden tegen de gevaren van zwerfstromen en statische elektriciteit.
- Overdrukbeveiliging.
 - Elk reservoir en alle leidingen van de Greenenergy BoxTM naar de opslagtanks zijn uitgerust met een overdrukrichting. De tarradruk van het overdrukventiel is zo ingesteld dat het overdrukventiel geactiveerd wordt wanneer de druk in het reservoir 1,15 maal de maximale werkdruk bereikt.
 - De ventilatie-openingen van de opslagtank zijn verticaal gemonteerd op een hoogte van minimaal 3 m. Ze zijn uitgerust met een kapje, waarvan het gewicht gekalibreerd is om opgeheven te worden bij druk, om te vermijden dat er water binnenkomt door de ventilatie-opening.
 - De Greenenergy BoxTM is uitgerust met twee verschillende ventilatie-openingen voor waterstof en zuurstof die zich op een minimale hoogte van 1 m boven de bovenkant van de container bevinden en goed van elkaar gescheiden zijn om het ontstaan van een zuurstofrijk waterstof-luchtmengsel te voorkomen. Elke afzonderlijke ontluchtingsleiding is gemeenschappelijk voor de elektrolyser en de brandstofcel en laat toe het systeem drukloos te maken in minder dan 2 minuten in geval van een noodstop.
- Nood- en veiligheidsstop.
 - Het besturingscommando dat wordt gebruikt voor het automatisch sturen van het systeem wordt ook gebruikt om de veiligheidsfuncties te activeren. Het besturingscommando bevat een 70-tal veiligheidsfuncties om elke procesafwijking of gaslek of brand in het systeem te detecteren. Afhankelijk van de omvang van de afwijking in vergelijking met de veiligheidsdrempel voor de parameter wordt een nood- en/of veiligheidsstop geactiveerd, waarna de stroom wordt afgesloten, het systeem drukloos en inert wordt gemaakt en de ventilatie worden geactiveerd (behalve bij brand).
 - De belangrijkste veiligheidsfuncties, d.w.z. de detectie van waterstof, zuurstof en brand, de noodstopknop en de bewakingsfunctie van het besturingscommando, worden gerealiseerd met een logische kabel en volgens SIL (Safety Integrity Level) 1 [1].

7. Overzicht van incidenten en ongevallen

7.1 Incidenten en ongevallen bij systemen en infrastructuur op basis van brandstofcellen en waterstof

Een incident is een gebeurtenis die kan leiden tot de uitval of verstoring van handelingen, diensten of functies, en die, indien niet correct beheerd, kan escaleren tot een noodsituatie, crisis of ramp [43]. Een ongeval is een onverwachte en niet-geplande gebeurtenis of omstandigheid die schade of letsel veroorzaakt. Het melden van incidenten/ongevallen in verband met systemen of infrastructuur op basis van brandstofcellen en waterstof, evenals een gedetailleerde evaluatie van de voornaamste oorzaken ervan en de lessen die eruit worden getrokken, vormen een extreem waardevolle oefening voor zowel privé- als openbare sectoren. Informatie over ongevallen of incidenten in verband met systemen of infrastructuur op basis van brandstofcellen en waterstof kan gevonden worden in de volgende bekende databanken:

- Lessen in verband met waterstof getrokken uit incidenten en bijna-ongevallen: <http://h2tools.org/lessons/>
- Hydrogen Incidents and Accidents Database (HIAD): <https://odin.jrc.ec.europa.eu/odin/index.jsp>
- Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industries (BARPI): <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/the-barpi/?lang=enbarpi/>

Alle databanken moeten regelmatig bijgewerkt worden.

Zo werd bijvoorbeeld de H2Incidents Database (recent herdoopt tot Hydrogen Tools. Lessons Learned) gecreëerd door het Pacific Northwest National Laboratory met financiering van het Amerikaanse Departement van Energie (<https://h2tools.org/lessons>). In deze databank wordt informatie opgenomen over incidenten en bijna-ongevallen zonder de namen van de bedrijven en andere details te vermelden, zodat de vertrouwelijkheid aanmoedigt tot het aangeven van gebeurtenissen. De incidenten worden geclassificeerd volgens omgeving, uitrusting, schade en letsels, waarschijnlijke oorzaken en bijdragende factoren [3].

Rigas en Amyotte [3] hebben de volgende hoofdoorzaken van incidenten/ongevallen gedefinieerd:

- Mechanisch defect van materiaal of uitrusting.
- Aantasting door corrosie.
- Overdruk.
- Waterstofverbrossing bij lage temperaturen.
- Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion (BLEVE).
- Breuk van de opslagtank door de impact van schokgolven of projectielen van nabije explosies.
- Menselijke fout.

In deze eerste les zullen we slechts enkele voorbeelden van incidenten/ongevallen in verband met technologieën op basis van brandstofcellen en waterstof bespreken. In de volgende lessen daarentegen zullen we een aantal relevante voorbeelden opnemen voor elk besproken systeem op basis van brandstofcellen en waterstof.

7.2 Ongevallen tijdens de productie van waterstof



Bron: Millet et al, 2011 [45]

Figuur 23. Beschadigde delen van een PEM-elektrolyser onder hoge druk.

Op 7 december 2005 deed zich een explosie voor van een elektrolyser bij een werkdruk van 40 MPa bij een demonstratiestand voor waterstof aan de Universiteit van Kyushu (Japan) [19]. Mogelijk leidde een interne waterstof-zuurstof-fakkelflam na een lek van een membraan tot een metaalbrand (titanium) en de ontploffing of breuk van het omhulsel van de elektrolyser. De interne vloeistoffen en verbrandingsproducten kwamen vrij in de omgeving, waaronder de parking buiten het laboratoriumgebouw. De voorruit van verschillende voertuigen liepen schade op door de blootstelling aan waterstoffluoride die werd gevormd tijdens de ontbinding van het polymeermateriaal van een membraan [19]. Een Frans-Russische studie [20] bracht verslag uit over de analyse van de storingsmechanismen van cellen voor de PEM-elektrolyse van water, die uiteindelijk kunnen leiden tot de vernieling van de elektrolyser. Er zijn aanwijzingen voor een proces bestaande uit twee stappen waarbij er initieel een plaatselijke doorboring van een vaste polymeerelektrolyt is, gevolgd door een katalytische recombinitie van waterstof en zuurstof die opgeslagen zijn in de elektrolysecompartimenten. De foto's van een roestvrij stalen verbindingstuk en moer met perforatie door een waterstof-zuurstofvlam die zich binnenin de PEM-stapel heeft gevormd, worden getoond in [figuur 23](#).

7.3 Een incident in een tankstation

In het tankstation van Emeryville (VS) kwam er waterstofgas vrij [23]. Het overdrukventiel had niet correct gewerkt, waardoor er 300 kg waterstof vrijkwam, die vervolgens ontstak. Het gas ontstak aan de uitgang van de ontluuchtingsleiding en brandde gedurende 2,5 uur totdat technici toestemming kregen van de plaatselijke brandweer om het tankstation binnen te gaan en de gasstroom te stoppen. Tijdens dit incident evacueerde de brandweer bedrijven en scholen in de buurt en werden de omringende straten afgesloten.

De geïdentificeerde hoofdoorzaken van deze gebeurtenis zijn:

- het gebruik van incompatibele materialen voor de vervaardiging van het overdrukventiel.
- incorrecte assemblage die leidt tot een te grote torsie bij de binnenstructuur.
- te grote verharding van de materialen van de binnenstructuur door de klepfabrikant.

Deze problemen hadden kunnen worden vermeden door passende kwaliteitsborgings-/kwaliteitsbeheersingsprocedures tijdens het ontwerp en veiligheidscontroles.

8. Introductie tot e-Laboratory

Passende opleidingen voor de opkomende brandstofcel- en waterstofsector zijn cruciaal voor de professionele ontwikkeling van de huidige en toekomstige arbeidskrachten. Ze ondersteunen de leidende positie en het concurrentievermogen van Europese producten op basis van brandstofcellen en waterstof. De ontwikkeling van e-Laboratory, een online verzamelplaats voor digitale hulpmiddelen, werd gestart binnen het Europese project "Novel Education and Training Tools based on digital Applications related to Hydrogen and Fuel Cell Technology" (NET-Tools). Het oorspronkelijke NET-Tools e-Laboratory bevat een uitgebreide reeks digitale hulpmiddelen. De hulpmiddelen met betrekking tot de veiligheid van waterstof die het meest relevant worden geacht voor hulpverleners zijn ter beschikking gesteld via e-Laboratory, waartoe men toegang kan krijgen via het e-platform van HyResponder (<https://hyresponder.eu/e-platform/>) of rechtstreeks via <https://elab.hysafer.ulster.ac.uk/>.

De prestatiegebaseerde berekening van gevarenafstanden, de term die recent werd ingevoerd door ISO TC197 Hydrogen Technologies, is een sleutelement voor de veiligheid van waterstof bij het bouwen van systemen en infrastructuur op basis van brandstofcellen en waterstof, bv. tankstations. De principes achter het e-Laboratory voor de veiligheid van waterstof laten toe de gevarenafstanden te beoordelen voor niet-ontstoken vrijgekomen waterstof (omvang van brandbare zone); ontstoken vrijgekomen waterstof (fakkelbranden); afbraak door drukgolf ten gevolge van deflagraties, detonaties en breuk van een opslagtank voor waterstof onder hoge druk door brand, vuurballen enz. Deze door de waterstofindustrie langverwachte toolbox laat het bepalen van gevarenafstanden toe voor niet-ontstoken vrijgekomen waterstof en fakkelbranden in een interactief regime, bv. door de systeemp parameters zoals druk en diameter van de leiding (het lek) te variëren. De geavanceerde veiligheidshulpmiddelen van het e-Laboratory voor waterstofveiligheid zijn een vrij toegankelijke uitgebreide Europese analogie van de HyRAM (Hydrogen Risk Assessment Methods)-tool, die tijdens het vorige decennium werd ontwikkeld door Sandia National Laboratories (SNL) met financiering van het Amerikaanse Departement van Energie. e-Laboratory demonstreert de Europese leiderspositie op het vlak van ontwerp voor waterstofveiligheid, bv. door de mogelijkheid om gevarenafstanden te berekenen op basis van de thermische en drukeffecten van een vuurbal en een drukgolf na een tankbreuk in een brand, die ontbreekt in de HyRAM-tool en het gelijkaardige Canadese kader (UTRQ) wordt toegepast met gebruik van een Smalltalk Seaside-omgeving voor websiteontwikkeling.

Referenties

1. HyResponse Deliverable D2.1-Description of selected FCH systems and infrastructure, relevant safety features and concepts (2014). Available from: <http://www.hyresponse.eu> [accessed 10.10.20].
2. Mays, T. (2014). Scientific progress and technological bottlenecks in hydrogen storage. H2FC European Technical School on Hydrogen and Fuel Cells. 23-27 June 2014, Crete, Greece.
3. Rigas, F and Amyotte, P (2013). Hydrogen safety. Boca Raton: CRC press. Taylor and Francis Group.
4. Rigas, F and Amyotte, P (2013). Myths and facts about hydrogen hazards. Chemical Engineering Transactions. Vol. 31.
5. ENVIRONMENTAL GRAFFITI ALPHA (2010). The Hindenburg Disaster in Pictures. Available from: <http://www.environmentalgraffiti.com/anthropology-and-history/news-hindenburgdisaster-accident-waiting-happen>. [accessed 24.12.11].
6. World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations (WP.29), 160th Session, Geneva, 25-28 June 2013.
7. US DoE, US Department of Energy (2008). Hydrogen safety training for first responders. Available from: <http://hydrogen.pnl.gov/FirstResponders/> [accessed on 06.11.20].
8. CEP, Clean Energy Partnership, 2014. Available from: <http://www.cleanenergypartnership.de/tech/site.php?l=en> [accessed on 01.05.14].
9. HyFLEETE-CUTE (2006-2009). Available from: <https://www.fuelcellbuses.eu/wiki/history-fuel-cell-electric-buses/hyfleet-cute-2006-2009> [accessed on 04.11.2020].
10. Zaetta, R and Madden, B (2011). Next HyLights project. Deliverable 3.1: Hydrogen Fuel Cell Bus Technology State of the Art Review.
11. California Fuel Cells Partnership, 2014. Available from: <http://cafcp.org/> [accessed on 06.11.20].
12. Adams, P (2004). Identification of the optimum on-board storage pressure for gaseous hydrogen city buses. European Integrated Hydrogen project – Phase 2 (EIHP2), March 2004.
13. Şenel, K. (2007), Hidrojenin yakıt olarak uçaklarda kullanımı. yüksek lisans tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
14. <http://ram-home.com/ram-old/tu-155.html> [Accessed 06.11.2020]
15. Dincer, I., Acar, C. (2016). A review on potential use of hydrogen in aviation applications. International Journal of Sustainable Aviation, 2: 74-100.
16. <http://www.aerospace-technology.com/projects/hy4-aircraft/> [Accessed 06.11.2020].

17. Bicer, Y., Dincer, I. (2017). Life cycle evaluation of hydrogen and other potential fuels for aircrafts. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42: 10722-10738
18. Bird, L. (2011). *Dictionary of Business Continuity Management Terms*. Business Continuity Institute. Available from: <http://www.thebci.org/glossary.pdf> [accessed on 27.12.15].
19. Molkov, V (2012). *Fundamentals of hydrogen safety engineering, Part I and Part II*. Available from: www.bookboon.com, free download e-book.
20. CEP, Clean Energy Partnership, 2014. Available from: <http://www.cleanenergypartnership.de/tech/site.php?l=en>
21. Barthelemy H, Weber M, Barbier F. Hydrogen storage: recent improvements and industrial perspectives. *Int J Hydrogen Energy* (2017) 42:7254-7262.
22. Norwegian parliament adopts zero-emission regulations in World Heritage fjords. <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/norway-adopts-zero-emission-regulations-in-world-heritage-fjords-24820> [accessed on 04.11.2020]
23. Harris, AP, Marchi CWS. (2012). Investigation of the hydrogen release incident at the AC transit Emeryville facility (Revised). Sandia report. SAND2012-8642.