



Europees "Train the Trainer"-programma voor hulpverleners

Les 5

Vloeibare 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 PRESLHY 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. Er is ook gebruik gemaakt van het op te leveren product 6.1 – Handbook of hydrogen safety: Chapter on LH2 safety – van het project Pre-normative REsearch for Safe use of Liquid Hydrogen (PRESLHY) (subsidieovereenkomst nr. 779613).

Overzicht

Voor verschillende toepassingen van waterstof waarbij volume een essentieel aspect is, is vloeibare waterstof (LH₂) noodzakelijk om het volume te reduceren. Afhankelijk van de noden van de eindgebruiker zijn er nog andere redenen waarom waterstof in vloeibare toestand een zinvolle en voordelige oplossing voor de opslag en distributie van grote hoeveelheden waterstof biedt.

LH₂ heeft het voordeel dat het extreem schoon is, waardoor het geschikt is voor een groot aantal industriële toepassingen. Het voornaamste nadeel is de enorme hoeveelheid energie die nodig is om het waterstofgas vloeibaar te maken, wat een aanzienlijke impact heeft op de kostprijs van het gebruik van LH₂.

De gevaren die gepaard gaan met de aanwezigheid en het gebruik van systemen die LH₂ bevatten, vormen het onderwerp van veiligheids- en risicobeoordelingen. Een essentieel onderdeel van dergelijke analyses van ongevallen is de simulatie van de fysische fenomenen die zich voordoen in het kader van het onopzettelijk vrijkomen van LH₂ in het milieu aan de hand van rekenmodellen. Er is in principe een goed begrip van het verspreidings- en verdampingsgedrag via een cryogene plas op een vloeibare of vaste ondergrond, evenals van mogelijke plasbranden. Verder werden er geavanceerde computermodellen ontwikkeld en gevalideerd op basis van overeenkomstige experimentele gegevens. Er zijn echter nog steeds open vragen die verdere inspanningen vereisen om de nog zwakke experimentele gegevensbasis uit te breiden.

Deze les is gebaseerd op het op te leveren product 6.1 – Handbook of hydrogen safety: Chapter on LH₂ safety – van het project Pre-normative REsearch for Safe use of Liquid Hydrogen (PRESLHY). Het experimentele en theoretische onderzoek van de kenmerken van vloeibare waterstof, de gunstige en ongunstige eigenschappen ervan, en de lessen die werden geleerd uit ongevallen hebben geleid tot een reeks codes, normen, verordeningen en richtlijnen, waardoor er vandaag een hoog niveau van veiligheid bestaat. Dit geldt zowel voor de productie van LH₂ en de methoden voor mobiele of stationaire opslag en vervoer/distributie van LH₂, als voor de toepassing ervan in zowel de wetenschap als de industrie.

Trefwoorden

Vloeibare waterstof, vrijkomen van cryogene stoffen, per ongeluk morsen, verbranding, technologie met vloeibare waterstof

Inhoudstafel

Overzicht	3
Trefwoorden	3
1. Doelgroep	5
1.1 Taakomschrijving: brandweerman	5
1.2 Competentieniveau: brandweerman	5
1.3 Voorkennis: brandweerman	5
2. Inleiding en doelstellingen	6
3. Eigenschappen van vloeibare waterstof	7
3.1 Fysische eigenschappen	7
3.2 Chemische eigenschappen	7
4. Gevaren van vloeibare waterstof	9
4.1 Fysiologische problemen bij cryogene waterstof	10
4.2 Onmiddellijke ontsteking van vrijgekomen samengeperste LH ₂	11
5. Technologie met vloeibare waterstof	12
5.1 Productieproces en -infrastructuur voor vloeibare waterstof	12
5.2 Opslag en vervoer van vloeibare waterstof	12
5.2.1 Opslag van vloeibare waterstof	12
5.2.2 Cryostaat voor stationaire toepassingen	14
5.2.3 Opslag in bussen	14
5.3 Tankstations voor vloeibare waterstof	14
6. Gezondheidsrisico's voor hulpverleners	19
Referenties	20

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 van 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 reddingsuitrusting, in eender welke klimatologische omstandigheden, in zones en noodsituaties waarin redelijkerwijs kan worden verwacht dat een antwoord geboden moet worden.

1.2 Competentieniveau: 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.

1.3 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

Het gebruik van vloeibare waterstof (LH₂) in praktische toepassingen is zeer interessant door de hogere energiedichtheid van LH₂ in vergelijking met die van samengeperste gasvormige waterstof (cGH₂). LH₂ wordt meestal gebruikt als een geconcentreerde vorm van waterstof voor opslag. Zoals bij elk gas neemt de opslag als vloeistof minder ruimte in beslag dan de opslag als gas. De dichtheid van LH₂ is slechts 70,8 kg m⁻³ bij normale druk en kooktemperatuur (1 atm, 20,3 K). LH₂ vereist cryogene opslagtechnologie, zoals speciale thermisch geïsoleerde vaten, en een speciale behandeling die geldt voor alle cryogene brandstoffen, wat leidt tot mogelijke risico's bij de productie, het vervoer en het gebruik van LH₂.

Het doel van deze les is om hulpverleners voldoende kennis te geven en bewust te maken van de mogelijke gevaren van LH₂ door hen de eigenschappen en het gedrag van LH₂ te helpen begrijpen.

Aan het eind van deze les kunnen hulpverleners:

- De fysische en chemische eigenschappen van LH₂ begrijpen;
- De gevaren van cryogene waterstof kennen;
- Het vrijkomen en de verbranding van cryogene waterstof en de thermische en drukgerelateerde gevaren herkennen;
- Vertrouwd zijn met de technologieën voor de productie, de opslag en het vervoer van LH₂.
- Het voor hulpverleners relevante risico en gevaar van LH₂ identificeren.

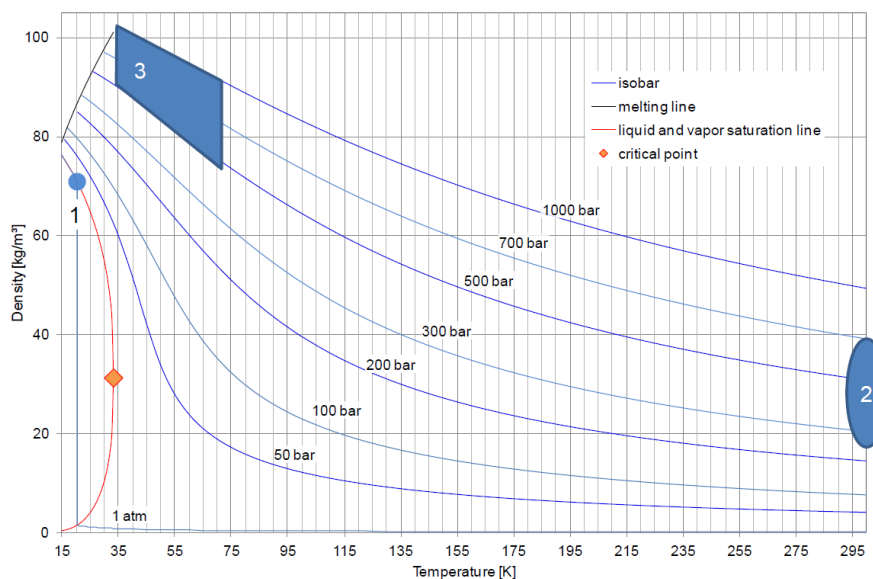
3. Eigenschappen van vloeibare waterstof

3.1 Fysische eigenschappen

Vloeibare waterstof (LH₂) is de vloeibare toestand van het element waterstof. Om te bestaan als vloeistof moet waterstof afgekoeld worden tot onder zijn kritisch punt van 33 K. Om echter in een volledig vloeibare toestand te zijn bij atmosferische druk moet waterstof afgekoeld worden tot 20,28 K (-252,87 °C) [1]. Het tripelpunt van waterstof bevindt zich op 13,81 K [1] en 7,042 kPa [2].

Vloeibare waterstof wordt meestal gebruikt als een geconcentreerde vorm van waterstof voor opslag. Zoals bij elk gas neemt de opslag als vloeistof minder ruimte in beslag dan de opslag als gas bij een normale temperatuur en druk. De dichtheid van de vloeistof is echter zeer laag in vergelijking met andere gangbare brandstoffen. Eens het gas vloeibaar is gemaakt, kan het als vloeistof bewaard worden in thermisch geïsoleerde drukvaten. De dichtheid van vloeibare waterstof bedraagt slechts 70,99 g/L (bij 20 K), een relatieve dichtheid van 0,07 (Figuur 1).

Vloeibare waterstof heeft een veel hogere specifieke energie dan benzine, aardgas of diesel. De energiedichtheid van waterstof is zeer hoog; 1 kg waterstof bevat ongeveer 2,5 keer meer energie dan 1 kg aardgas. Hoewel de specifieke energie die van andere brandstoffen meer dan het dubbel bedraagt, heeft het hierdoor een opmerkelijk lage volumetrische energiedichtheid, vele malen lager.



1 - vloeistof bij ~20 K; 2 - samengeperst gas bij ~300 K; 3 - cryogeen samengeperst gas

Figuur 1. Dichtheid van waterstof in het lage temperatuurbereik als functie van druk [3].

3.2 Chemische eigenschappen

Waterstof kan chemisch reageren met de meeste andere elementen. In combinatie met zuurstof is waterstof zeer brandbaar in een breed bereik van concentraties. Het verbrandt met een niet-oplichtende, hete vlam tot waterdamp waarbij de chemisch gebonden energie als warmte vrijkomt (bruto verbrandingswarmte: 286 kJ/mol). Een stoichiometrisch waterstof-

luchtmengsel bevat 29,5 vol% waterstof. Het ontstekingsgebied bedraagt 4-75 vol% concentratie in lucht, tot 95 vol% in zuurstof, en vergroot naarmate de temperatuur stijgt. De onderste ontvlambaarheidsgrens als de minimale hoeveelheid brandstof die tot ontsteking kan leiden, is meestal de belangrijkste grens voor het vrijkomen van kleine hoeveelheden, aangezien ze eerst bereikt zal worden bij een continue lekkage. Het belangrijkste is dat de wolk met een waterstofconcentratie van $> 4\%$ zich over grotere afstanden en een groter gebied kan verspreiden vanaf de plaats waar ze vrijkomt.

Een zwakke vonk of de elektrostatische ontlading van een menselijk lichaam, die zich in het bereik van 10 mJ bevindt, zou voldoende zijn voor een ontsteking; dit is echter niet anders dan bij andere brandbare gassen. De minimale ontstekingsenergie daalt nog verder naarmate de temperatuur, de druk of het zuurstofgehalte stijgt. Er zijn recent metingen gedaan bij cryogene temperaturen [6].

4. Gevaren van vloeibare waterstof

Vloeibare waterstof vereist cryogene opslagtechnologie, zoals speciale thermisch geïsoleerde vaten, en een speciale behandeling die geldt voor alle cryogene brandstoffen. Deze is gelijkaardig aan, maar strenger dan die voor vloeibare zuurstof. Zelfs met thermisch geïsoleerde vaten is het moeilijk om een dergelijke lage temperatuur in stand te houden en zal de waterstof geleidelijk aan weglekken. Bovendien spelen dezelfde veiligheidsproblemen als bij andere vormen van waterstof, evenals het feit dat de lage temperatuur de atmosferische zuurstof tot vloeistof of zelfs tot vaste stof kan maken, wat kan leiden tot ontploffingsgevaar.

Om de verschillende risicoscenario's en de eraan verbonden gevolgen te definiëren, wordt enkel de opslag van LH₂ in beschouwing genomen. Tabel 1 geeft een overzicht van deze gebeurtenissen, met de eerste oorzaken en de mogelijke uiteindelijke gevolgen.

Tabel 1. Beschrijving van potentieel gevaarlijke gebeurtenissen.

Gevreesde gebeurtenissen	Belangrijkste voorwaarden	Gevolgen
1 - Barsten van het opslagvat bij werkdruk (P_w) (inwerkende brand/fragmenten)	100% gasvormig H ₂ - 10 bar - drukvat van type I	Overdruk en fragmenten
2 - Ongewilde gebeurtenis bij opslag met vloeibare H ₂ (brand) bij $2P_w$	Barsten van opslagvat van LH ₂ Wolkbrand	"BLEVE" met thermische effecten
3 - Breuk van opslagvat (breuk of doorboring)	10 bar, snelle verspreiding en verdamping van vloeibare H ₂ op de grond	Verdamping van plas en cryogene wolkvorming met overdrukeffecten in geval van ontsteking van brandbare wolk
4 - Lek in leiding tussen opslagvat en pomp	10 bar, vloeibaar * vrijkomen als tweefasige straal * en/of vloeibare plas H ₂ , verdamping waarbij een brandbare wolk gevormd wordt	Straal van vloeibare waterstof en mogelijke neerslag waarbij op de grond een plas van LH ₂ wordt gevormd en overdrukeffecten door de ontsteking van het brandbare mengsel
5 - Lek in leiding tussen pomp en atm. verdamper	1000 bar, vloeibaar * vrijkomen als tweefasige straal maar met het gedrag van een gasvormige hogedrukstraal	Zeker gedrag van bijna gasvormige hogedrukstraal met overdrukeffecten door ontsteking
6 - Barsten van opslagvat bij breekdruk (P_R)	100% gasvormig - 10 bar, type I	Overdruk en fragmenten

Opmerking: BLEVE – boiling liquid expanding vapour explosion.

Met betrekking tot de hiervoor samengevatte scenario's kan benadrukt worden dat sommige hiervan specifiek zijn voor vloeibare waterstof, en dat het bij andere gaat om gevreesde gebeurtenissen voor gasvormige stoffen die reeds beschreven zijn, of gelijkaardig.

4.1 Fysiologische problemen bij cryogene waterstof

Waterstof wordt beschreven als een niet-toxische en niet-zure, niet-kankerverwekkende stof die enkel verstikkend is, zonder dat er een drempelwaarde of LD50 (dodelijke dosis 50%) is vastgesteld [7].

De verdamping van vrijgekomen vloeibare waterstof beïnvloedt de samenstelling van de atmosfeer, in het bijzonder in (gedeeltelijk) gesloten ruimtes, waarbij er verstikkingsgevaar is. De enorme expansieverhouding vloeistof/omgeving in combinatie met de condensatie van O₂ uit de omgevingslucht en de verbranding van ontvlambare H₂-luchtmengsels resulteert in een aanzienlijke verdunning van de plaatselijke atmosfeer. Een volumeconcentratie van zuurstof van minder dan 19,5% wordt door de NASA als gevaarlijk voor mensen beschouwd; minder dan 8% is dodelijk binnen enkele minuten (tabel 2). Het alarmniveau wordt meestal ingesteld op 19% zuurstof.

Tabel 2. Impact op mensen van een atmosfeer met een dalend zuurstofgehalte.

Zuurstofgehalte in lucht (%)	Symptomen
~21-19	Geen
~19-15	Verminderde reactietijden, geen zichtbare effecten
~15-12	Zware ademhaling, snelle hartslag, verminderde aandacht of coördinatie
~12-10	Duizeligheid, verkeerde inschatting, slechte spiercoördinatie, snelle vermoeidheid, lippen lichtjes blauw
~10-8	Misselijkheid, braken, onvermogen om te bewegen, bewustzijnsverlies gevolgd door de dood
~8-6	Hersenschade na 4-8 min., dood binnen 8 min.
< 6	Coma na 40 s., ademhalingsstilstand, dood

Rechtstreeks contact met vloeibare waterstof of met oppervlakken met een zeer lage temperatuur veroorzaakt cryogene "brandwonden" die lijken op thermische brandwonden. Levend weefsel zal bevriezen, behalve bij zeer korte periodes van contact waarbij het temperatuurverschil tussen de cryogene stof en de huid nog groot is (filmkoken) en de overdracht van warmte klein. Het bevriezen van de huid op een koud oppervlak kan leiden tot ernstige schade bij het wegnemen. Een langdurige blootstelling van de huid aan koude waterstof kan leiden tot bevriezing. Een symptoom is een kortdurende, lokale pijn. Bevroren weefsels zijn pijnloos en zien er wasachtig uit, met een bleke wit- of geelachtige kleur. Het ontdooien van het bevroren weefsel kan intense pijn veroorzaken. Er kan ook een schok optreden. Het langdurig inademen van koude damp of gas kan ernstige longschade veroorzaken. Vooral de ogen zijn gevoelig voor koude. Een langere blootstelling aan lage temperaturen na een groot lek doet de lichaamstemperatuur dalen, wat leidt tot onderkoeling, orgaanfunctie en ademhalingsdepressie [5].

Er zijn geen belangrijke milieुरisico's verbonden aan het accidenteel vrijkomen van vloeibare waterstof doordat deze niet toxisch is.

4.2 Onmiddellijke ontsteking van vrijgekomen samengeperste LH₂

De onmiddellijke ontsteking van een hogedrukstraal van LH₂ lijkt gelijkaardig aan een hogedrukstraal van gasvormige waterstof, met overdrukeffecten door de ontsteking.

5. Technologie met vloeibare waterstof

5.1 Productieproces en -infrastructuur voor vloeibare waterstof

Een van de uitdagingen bij het uitbouwen van een op waterstof gebaseerde economie is het creëren van een efficiënte productie- en toeleveringsinfrastructuur. Een voordeel bij de distributie op grote schaal is de relatief hoge dichtheid van de vloeibare fase van LH_2 , maar het vloeibaar maken gaat nog gepaard met een laag energetisch rendement. In het verleden werd LH_2 voornamelijk gebruikt als raketbrandstof, waarbij de lage efficiëntie bij de productie niet relevant was. Een belangrijk programma voor het vloeibaar maken van waterstof werd opgestart in de VS in het kader van ruimtevaartprogramma's, wat heeft geleid tot het ontwerp en de bouw van grootschalige installaties voor het vloeibaar maken van waterstof.

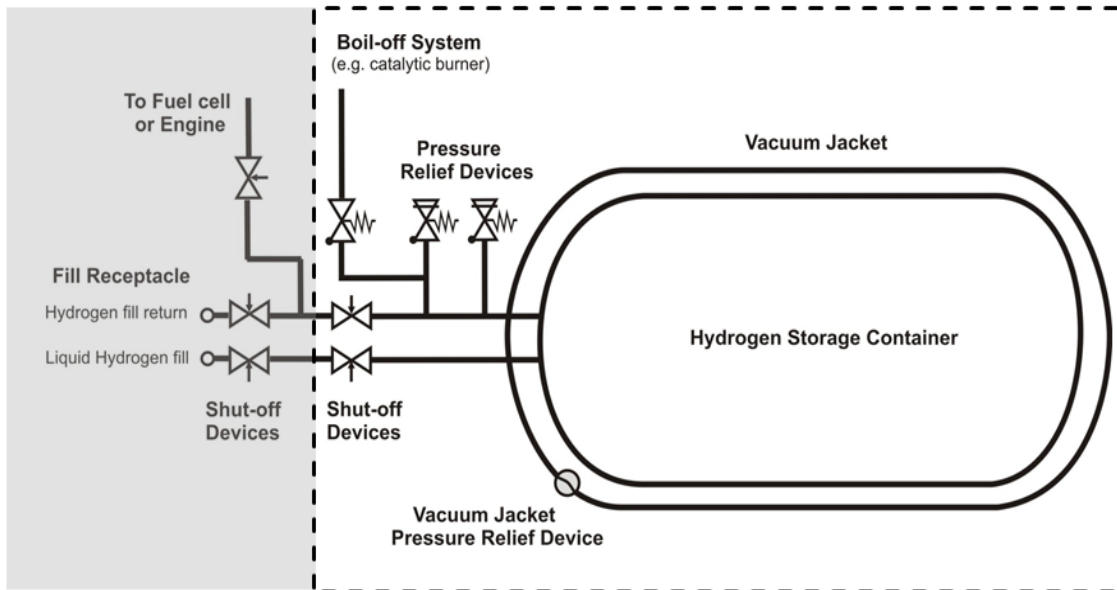
5.2 Opslag en vervoer van vloeibare waterstof

5.2.1 Opslag van vloeibare waterstof

De opslag van vloeibare waterstof voor professioneel gebruik bestaat al lang. Tot nu toe was er echter nog geen opslag van vloeibare waterstof in het publieke domein. Opslagtanks voor LH_2 kunnen een grotere hoeveelheid waterstof bevatten dan die voor GH_2 : de volumetrische capaciteit van LH_2 bedraagt 0,070 kg/L in vergelijking met 0,030 kg/L voor GH_2 -tanks bij 70 MPa. Er is echter een aanzienlijke hoeveelheid energie nodig om het vloeibaar te maken (ongeveer 30% van de energie die in waterstof zit). Waterstof kan vloeibaar gemaakt worden om het vervoer of de opslag ervan te vergemakkelijken. Alle grote industriële gasleveranciers beschikken over cryogene tankers voor de toelevering. LH_2 wordt gebruikt in tankstations voor waterstof en in luchtvaarttoepassingen.

De belangrijkste onderdelen van een tanker voor LH_2 worden getoond in [figuur 2](#). Het betreft:

- Opslagtank voor LH_2 ,
- Afsluitinrichtingen,
- Een verdampingssysteem,
- Thermisch geactiveerde overdrukrichtingen,
- De verbindende leidingen (indien aanwezig) en hulpstukken tussen de voormelde onderdelen.



Figuur 2. Schematische voorstelling van opslagsysteem voor LH₂ uit ref. [8]

Deze opslagsystemen kunnen zowel verticaal als horizontaal geplaatst worden. De vaste cryogene opslagtank heeft een volume van 10 m³ tot 300 m³ met een interne druk rond 12 bar.



Figuur 3. Horizontale en verticale opslagsystemen voor vloeibare waterstof. (Bron: Air Liquide).

In de meeste gevallen zijn deze opslagsystemen voor LH₂ bovengronds. Er bestaan echter enkele gevallen van ondergrondse opslag van LH₂, begraven of in een ondergrondse ruimte zoals geïllustreerd en gedefinieerd in [figuur 4](#).



Figuur 4. De twee voornaamste ontwerpen voor ondergrondse opslagsystemen voor LH₂.

5.2.2 Cryostaat voor stationaire toepassingen

Het gebruik van cryogene tanks is reeds 70 jaar gangbaar voor de opslag en het vervoer van vloeibare waterstof.

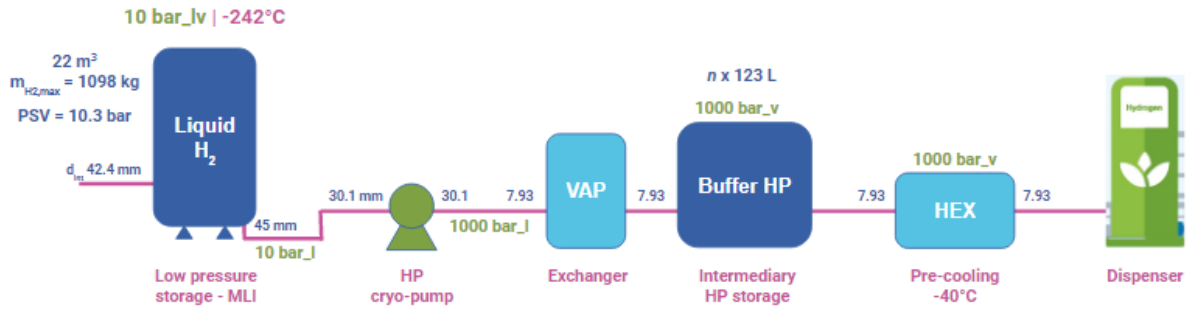
5.2.3 Opslag in bussen

De meeste bussen vervoeren de waterstof als samengeperst gas. Er zijn echter enkele voorbeelden waar de waterstof opgeslagen werd in vloeibare vorm.

5.3 Tankstations voor vloeibare waterstof

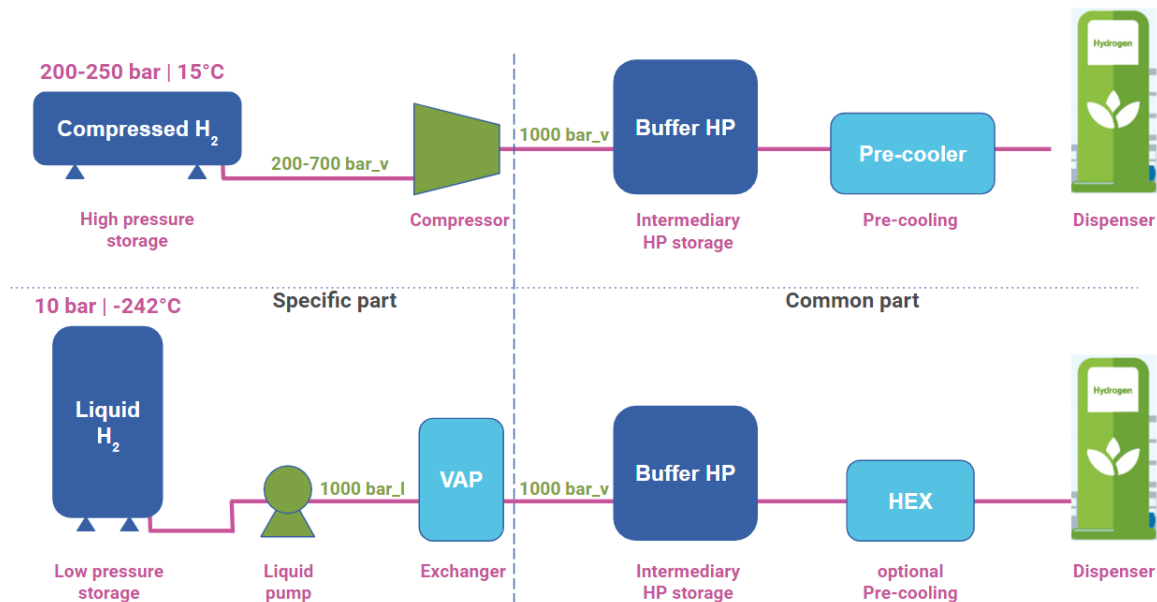
In essentie, zoals wordt getoond in [figuur 5](#), bestaat een tankstation voor LH₂ uit:

- een LH₂-tank (ongeveer 20 m³ - 1000 kg-H₂) met een maximale werkdruk van 10,3 bar,
- een geïsoleerde procesleiding van de onderkant van de opslagtank naar de LH₂-pomp, via dewelke LH₂ van de opslagtank naar een verdamper geleid wordt; dit toestel laat toe LH₂ te pompen tot 1000 bar,
- een verwarmingstoestel (VAP genoemd: hete olie, elektrisch om waterstof te verhitten bij 1000 bar),
- gasvormige buffers van 1000 bar (weinig m³); deze buffers zijn over het algemeen bundels van het type I of II (d.w.z. metalen cilinders of lange metalen buis).



Figuur 5. Vereenvoudigde schets van een tankstation voor vloeibare waterstof.

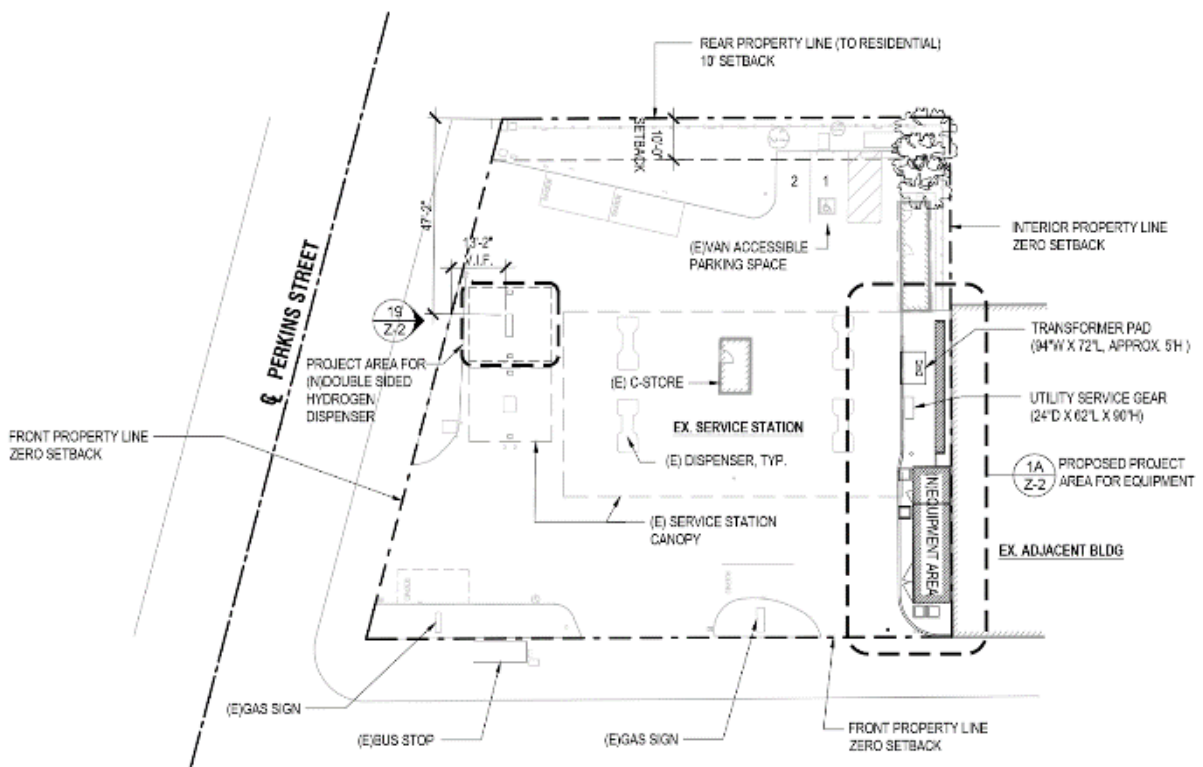
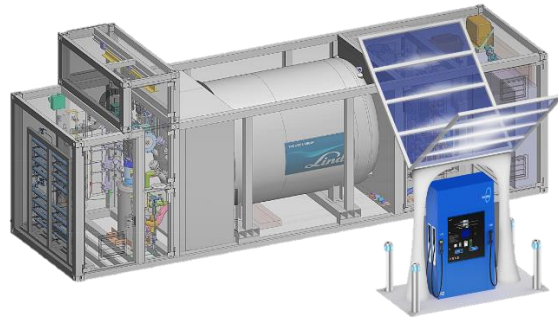
Alle andere onderdelen (bv. verdeelzuil, slang enz.) van het tankstation zijn gelijkaardig aan klassieke tankstations voor gas (zie vergelijking in [figuur 6](#)).



Figuur 6. Vereenvoudigde vergelijking tussen tankstations voor gas en vloeibare waterstof. Boven: tankstation voor gasvormige waterstof; onder: tankstation voor vloeibare waterstof.

De LH₂-tank wordt bevoorrad door een LH₂-vrachtwagen. Deze LH₂-vrachtwagen bestaat uit een horizontale tank van 40 m³ die werkt met een druk tussen 1 en 12 bar (voorraad: 4 t H₂). De verbinding tussen de opslagtank en de vrachtwagen wordt gemaakt met een flexibele leiding. Het overbrengen gebeurt zonder pomp. Er bevindt zich een kleine verdampert op de vrachtwagen om druk op te bouwen in de tank van de vrachtwagen, waardoor de vloeibare waterstof overgebracht wordt naar de stationaire verticale opslagtank.

Concreet wordt hieronder het in Oakland (VS) geïnstalleerde tankstation voor vloeibare waterstof van Linde getoond (zie [figuur 7](#)).



Figuur 7. Afbeelding en schets van tankstation voor vloeibare waterstof van Linde in Oakland. (Bron: Linde)

In Frankrijk moet een veiligheidsafstand van 20 m tussen openbare ruimte en een bron van vloeibare waterstof in acht genomen worden. De veiligheidsinrichtingen van een tankstation voor vloeibare waterstof zijn bijna dezelfde als voor een tankstation voor gasvormige waterstof (zie tabel 3).

Tabel 3. Veiligheidsinrichtingen van tankstations voor gasvormige/vloeibare waterstof.

Wat	Waar	Waarvoor
Geschikte en goedgekeurde slang en hulpstukken	Proces en verdeelzuil	Vermijden van accidentele lekken
Periodieke vervanging van de slang	Verdeelzuil	Vermijden van accidentele lekken
Detectie van H ₂	Binnenin de procescontainer Binnenin de verdeelzuil	Activeren van waarschuwing en afsluitklep indien nodig in geval van een accidenteel lek
Vlamdetector (UV/IR)	In de procescontainer Buiten, dichtbij de verdeelzuil	Activeren van waarschuwing en afsluitklep indien nodig bij accidentele ontsteking van vrijgekomen waterstof
Automatische afsluitklep	Meerdere tussen H ₂ -opslagtank en verdeelzuil	Beperken voorraad H ₂ bij accidenteel vrijkomen
Bewaking van procesdruk	Algemeen	Detecteren van abnormale drukdaling door lek of breuk in leiding
Natuurlijk geventileerde besloten ruimtes	Procescontainer Verdeelzuil	Vermijden de ontstekingsgrenzen van het H ₂ -luchtmengsel te bereiken bij accidenteel vrijkomen
Geforceerde ventilatie	Procescontainer voor sommige modellen	Vermijden de ontstekingsgrenzen van het H ₂ -luchtmengsel te bereiken bij accidenteel vrijkomen wanneer natuurlijke ventilatie onmogelijk of onvoldoende is
ATEX-gecertificeerde uitrusting	In besloten ruimtes waar lekken kunnen voorkomen (d.w.z. inbouwkasten en verdeelzuil)	Vermijden van ontstekingsbronnen
Gearde slang	Verdeelzuil	Voorkomen van vonken door statische elektriciteit tijdens het tanken
Automatische lekttest vóór het vullen	Algemeen	Vermijden van accidentele lekken
Debietbegrenzers	Algemeen	Het debiet begrenzen in geval van vrijkomen of een leidingbreuk
Automatische afsluittijd	Algemeen	Sluiten van de H ₂ -toevoerleppe in geval van een slangbreuk of lek
Bescherming tegen losrukken van slang	Verdeelzuil	Vermijden van een groot lek door de toevoerslang af te sluiten wanneer deze scheurt doordat men vergeet het voertuig los te koppelen

Botsbescherming (paaltje)	Verdeelzuil	Beschermen van de verdeelzuil tegen ernstige mechanische schade en een catastrofaal lek doordat een voertuig er per ongeluk tegen rijdt
Noodstop	Enkele meters van de verdeelzuil	Sluiten van de H ₂ -toevoerkleppen in geval van nood
Geleidende (geaarde) betonnen plaat	Verdeelzuil	Voorkomen van vonken door statische elektriciteit tijdens het tanken

6. Gezondheidsrisico's voor hulpverleners

De gezondheidsrisico's verbonden aan het vrijkomen van vloeibaar gemaakte waterstof worden hieronder opgesomd.

- Het contact met vloeibare waterstof of spatten ervan op de huid of in de ogen kunnen ernstige brandwonden door *bevriezing of onderkoeling* veroorzaken.
- *Er kunnen ook cryogene brandwonden* optreden door het contact van onbeschermde lichaamsdelen met koude vloeistoffen of oppervlakken.
- Het inademen van koude waterstofdampen kan leiden tot *een moeizame ademhaling en verstikking*.
- Direct fysiek contact met LH₂, koude dampen of koude voorwerpen kan ernstige *weefselschade* veroorzaken. Kortstondig contact met een kleine hoeveelheid van de vloeistof houdt mogelijk een minder groot gevaar in doordat er mogelijk een beschermende laag van verdampende gasvormige waterstof wordt gevormd. Er is een risico op bevriezing wanneer er grote hoeveelheden worden gemorst, waardoor er een grote blootstelling is¹.
- Het personeel mag de koude metalen delen niet aanraken en moet *beschermende kledij* dragen. De betrokken zone moet ook bedekt worden met een losse bedekking.
- *Hartproblemen* zijn frequent wanneer de interne lichaamstemperatuur zakt tot 27 °C of lager, en de dood kan optreden wanneer de interne lichaamstemperatuur zakt tot onder 15 °C.
- *Verstikking* is ook mogelijk bij het vrijkomen en verdampen van vloeibare waterstof in een binnenruimte.

¹ Effect van vloeibare waterstof: <https://www.youtube.com/watch?v=F9dhZJQk80A&feature=youtu.be&t=291>

Referenties

1. Rossini FD. A report on the international practical temperature scale of 1968. Commission I.2: Thermodynamics and thermochemistry. International union of pure and applied chemistry. P.557-P.570.
2. Cengel, Yunus A. and Turner, Robert H. (2004). Fundamentals of thermal-fluid sciences, McGraw-Hill, p.78.
3. Klier J., et al, A new cryogenic high-pressure H₂ test area: First results. Proc 12th IIR Int Conf, Dresden (2012).
4. Edeskuty F.J., Stewart W.F., Safety in the handling of cryogenic fluids. The International Cryogenics Monograph Series, Plenum Press, New York (1996).
5. Bonhoeffer, K.F., Harteck, P. Experimente über Para- und Orthowasserstoff. Naturwissenschaften 17, 182 (1929).
6. Proust C., INERIS research performed within PRESLHY. Presentation at the 13th Int Symp Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions (ISHPMIE), Braunschweig (2020).
7. NASA. Report of the Presidential Commission on the Space Shuttle Challenger accident (1986). (1997). Available at <http://science.ksc.nasa.gov/shuttle/missions/51-l/docs/rogers-commission/table-of-contents.html> [access 04.04.2021]
8. GTR, Proposal for a Global Technical Regulation (GTR) on hydrogen fuelled vehicles, 2013. ECE/TRANS/WP.29/GRSP/2013/41. United Nations. Economic Commission for Europe. Inland Transport Committee. World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations, 160th Session, Geneva, 25-28 June 2013.