



Europees "Train the Trainer"-programma voor hulpverleners

Les 12

Tankstations en infrastructuur voor 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.



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

In deze les wordt een gedetailleerde beschrijving gegeven van tankstations voor gasvormige en vloeibare waterstof en de eraan verbonden infrastructuur voor waterstofmobiliteit. Deze omvat de voornaamste elementen van de toeleveringsketen van vloeibare waterstof, van de productie van waterstof tot de eindgebruiker, voor een goed begrip van de werking van tankstations voor vloeibare waterstof. De uitdagingen en potentiële risico's verbonden aan vloeibare waterstof worden beschreven.

Trefwoorden

Vloeibare en gasvormige waterstof, tankstation, cryogene voorwaarden, proces, veiligheidsinrichtingen.

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. Inleiding tankstation.....	8
3.1 Tankstation voor gasvormige waterstof.....	8
3.2 Tankstation voor vloeibare waterstof	9
3.3 Vergelijking tussen tankstations met opslag van waterstof als vloeistof en als gas	10
3.4 Tankstation met opslag van waterstof als gas – Uitrusting.....	11
3.4.1 Buffervaten voor de opslag van gasvormige waterstof.....	11
3.4.2 Waterstofcompressor	13
3.4.3 Voorkoelinrichting	14
3.4.4 Verdeelzuil voor waterstof.....	17
3.5 Tankstation met opslag van vloeibare waterstof – Uitrusting.....	19
3.5.1 Opslag van vloeibare waterstof	21
3.5.2 Cryogene pomp.....	23
3.5.3 LH ₂ -verdamper	25
3.5.4 Kleppenpaneel	26
3.5.5 Gasvormige buffers.....	28
3.5.6 Aansluiting op de verdeelzuil.....	28
3.5.7 Verdeelzuil	29
4. Productie.....	32
4.1 Omzetting van methaan met stoom	32
4.2 Elektrolyser	33
4.3 Condensor	35
5. Pijpleidingen.....	37
6. Veiligheidsinrichtingen in waterstoftankstations en andere infrastructuur	38
Dankwoord	40
Referenties.....	41

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 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

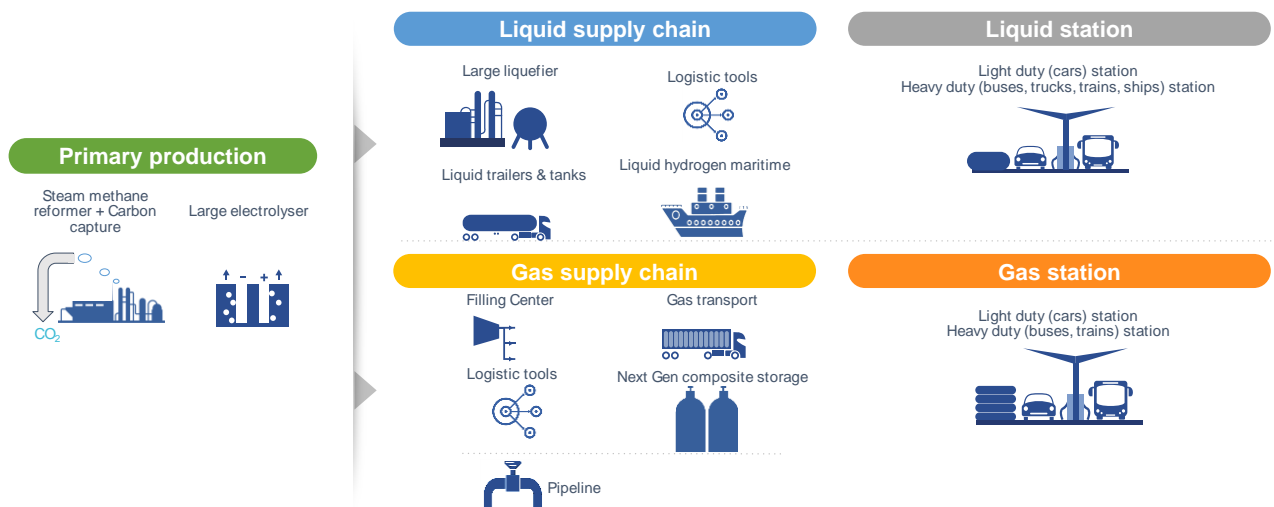
Het doel van deze les is om een beschrijving te geven van tankstations voor gasvormige en voor vloeibare waterstof en de eraan verbonden infrastructuur voor waterstofmobiliteit. In deze les wordt een vergelijking gemaakt tussen tankstations voor gasvormige en voor vloeibare waterstof. Verder worden de onderdelen van een tankstation voor vloeibare waterstof beschreven voor een goed begrip van de werking ervan en de uitdagingen en potentiële risico's.

De eerste vraag vóór de bespreking van tankstations voor vloeibare waterstof zou kunnen zijn: "Waarom zouden we vloeibare waterstof gebruiken?".

Feedback van HRS wees op de volgende voornaamste aspecten:

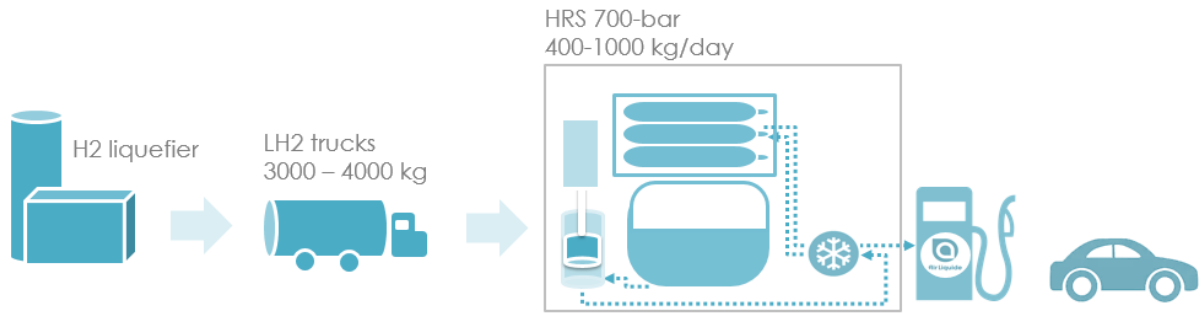
- een dure toeleveringsketen, waarbij gasvormige waterstof in aanmerking wordt genomen voor grootschalig gebruik,
- en een beperkte dagelijkse capaciteit.

Aangezien LH₂ een veel hogere dichtheid heeft dan GH₂, is het interessant om nieuwe producten te ontwikkelen om de capaciteit van een tankstation te verhogen en de totale eigendomskosten te verlagen door vloeibare waterstof als grondstof te gebruiken. Figuur 1 toont de verschillende elementen van de toeleveringsketen van waterstof – vloeibaar en gasvormig – van de productie tot het gebruik voor waterstofmobiliteit.



Figuur 1. Toeleveringsketen van waterstof, van productie tot gebruik voor H₂-mobiliteit.

Figuur 2 is een vereenvoudigd schema van de toeleveringsketen van vloeibare waterstof, dat toont dat na de productie van waterstof een condensor nodig is om waterstof op cryogene temperatuur vloeibaar te maken. Vervolgens zorgen LH₂-opleggers (met een capaciteit tot 4-t H₂) voor het transport van waterstof naar het tankstation voor vloeibare waterstof, waar het overbrengen van de oplegger naar de opslagtank van het tankstation gebeurt met behulp van een kleine verdampert. Maar de details van deze verschillende stappen en benodigde uitrusting zijn precies het onderwerp van deze les.



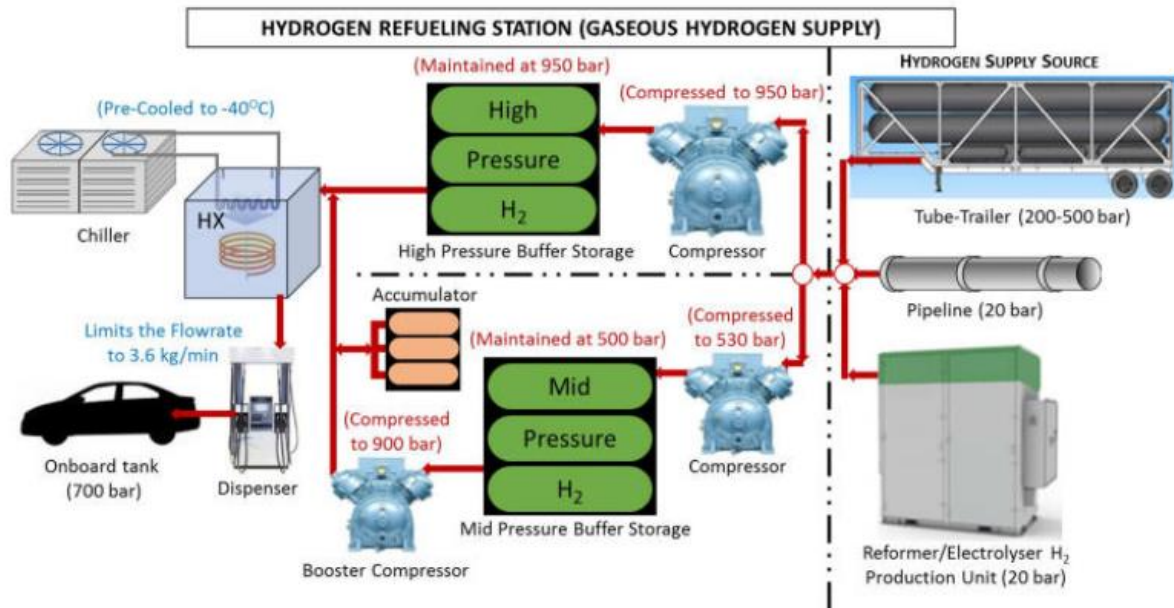
Figuur 2. Schema van toelevering van vloeibare waterstof voor waterstoftankstations.

Aan het eind van deze les zijn hulpverleners/opleiders zich bewust van:

- toeleveringsketen van waterstof – van productie tot gebruik,
- inrichting en werking van tankstations voor gasvormige en vloeibare waterstof,
- benodigde uitrusting van tankstations voor gasvormige en vloeibare waterstof,
- methoden voor de productie van waterstof,
- veiligheidsinrichtingen in tankstations voor gasvormige en vloeibare waterstof en andere infrastructuur.

3. Inleiding tankstation

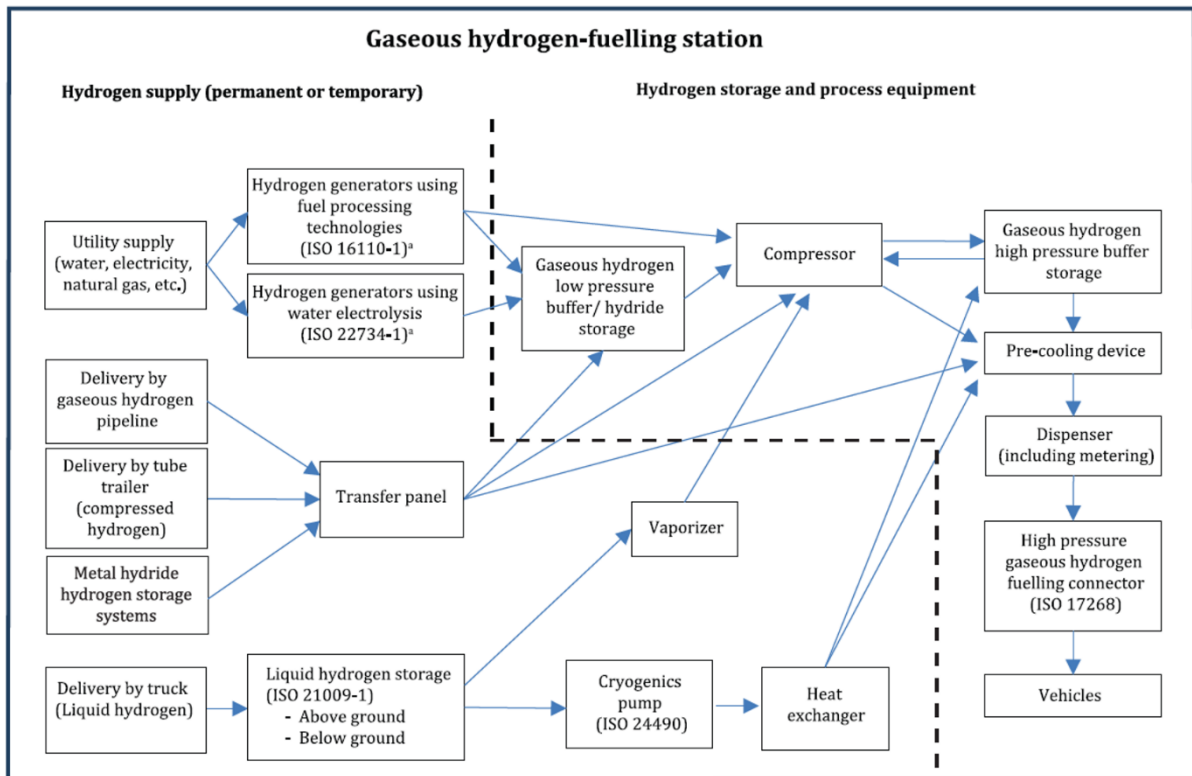
3.1 Tankstation voor gasvormige waterstof



Figuur 3. Afbeelding van een voorbeeld van een tankstation voor gasvormige waterstof [1]

Over het algemeen verloopt de reis van gasvormige waterstof van de toelevering naar de tank in het voertuig via een compressieproces om ofwel tot 950 bar te komen in een buffervat onder hoge druk, of tot 500 bar in een buffervat onder matige druk, waarna hij door een warmtewisselaar gaat en uiteindelijk de verdeelzuil bereikt voor het tanken van brandstofcelvoertuigen. Zoals getoond in figuur 3 omvat een typisch tankstation voor gasvormige waterstof buffervaten, waterstofcompressoren, voorkoelinrichtingen en een verdeelzuil voor waterstof. De minimale vereisten voor het ontwerp, de installatie, de inbedrijfstelling, de werking, inspecties en onderhoud, voor de veiligheid en desgevallend voor de prestaties van openbare en niet-openbare tankstations voor gasvormige waterstof die gasvormige waterstof verdelen aan lichte wegvoertuigen (bv. brandstofcelvoertuigen) zijn besproken in ISO 19880-1:200 (E) [2], die de minimale vereisten voor tankstations voor gasvormige waterstof bevat. Veel van de generische vereisten zijn van toepassing op tankstations voor andere waterstoftoepassingen, waaronder onder andere de volgende:

- Tankstations voor motoren, heftrucks, trams, treinen, binnenvaart- en zeevaarttoepassingen;
- Tankstations met overdekte verdeelzuilen;
- Residentiële toepassingen om landvoertuigen van brandstof te voorzien;
- Mobiele tankstations; en
- Niet-openbare demonstratietankstations.



Figuur 4. Voorbeeld van typische elementen van een tankstation met waterstoftoevoer [2]

Deze les concentreert zich op de uitrusting voor de opslag en verwerking van waterstof (rechts van de onderbroken streep in figuur 4), waaronder het buffervat voor gasvormige waterstof met lage en hoge druk/hydride-opslag, de compressor, de voorkoelinrichting, de verdeelzuil (met meter), het aansluitstuk voor het tanken van gasvormige waterstof onder hoge druk en voertuigen. Richtlijnen met betrekking tot het aansluitstuk voor het tanken van gasvormige waterstof onder hoge druk kunnen gevonden worden in ISO 17268.

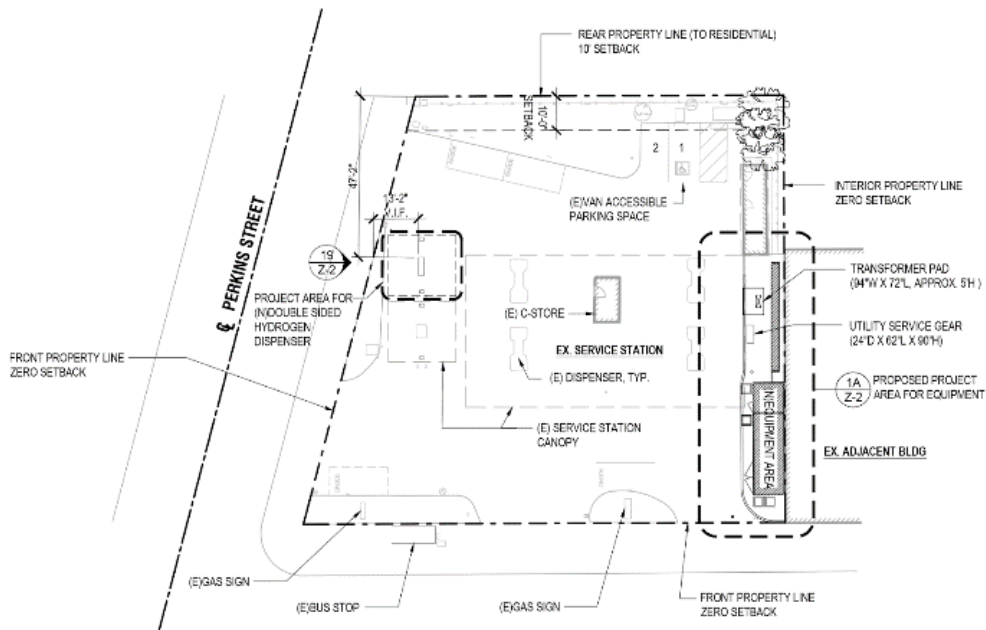
3.2 Tankstation voor vloeibare waterstof

Vooraleer over te gaan tot een meer gedetailleerde beschrijving van de voornaamste elementen van een tankstation waar vloeibare waterstof opgeslagen wordt, is het interessant om een bestaand, functionerend tankstation te tonen. Figuur 5 toont het in Oakland (VS) geïnstalleerde tankstation voor vloeibare waterstof van Linde.



Figuur 5. Tankstation voor vloeibare waterstof van Linde in Oakland.

De inrichting wordt getoond in figuur 6 om een idee te geven van het grondplan van een dergelijke installatie.

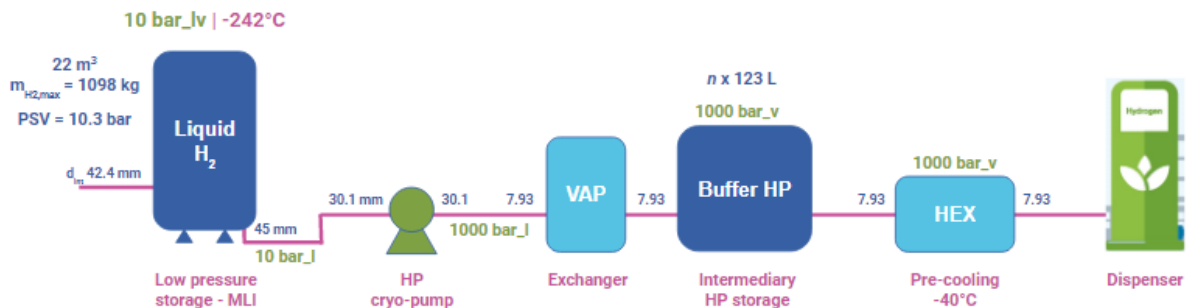


Figuur 6. Schets van het tankstation voor vloeibare waterstof van Linde.

3.3 Vergelijking tussen tankstations met opslag van waterstof als vloeistof en als gas

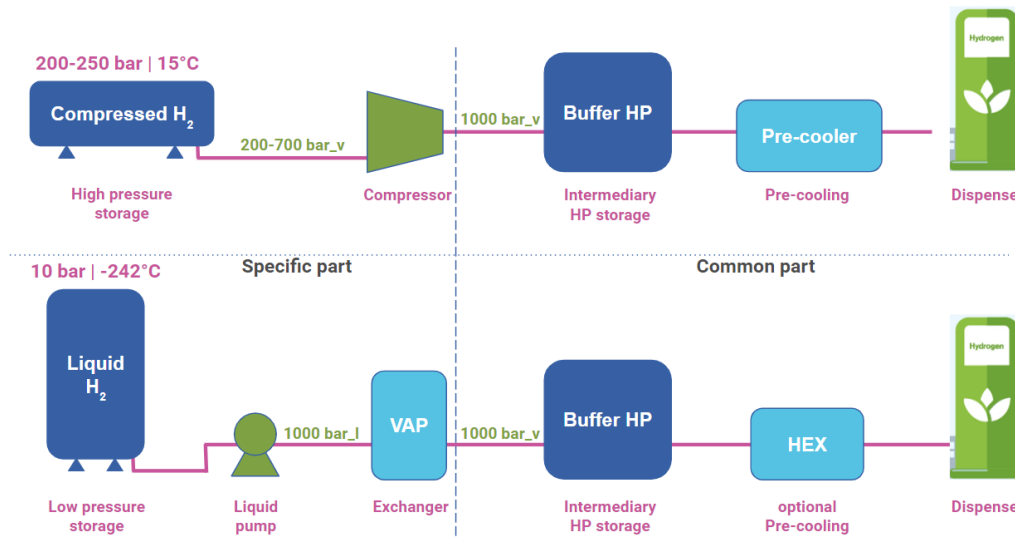
In essentie bestaat een tankstation met opslag van LH₂ uit:

- 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 verdampers geleid wordt; dit toestel laat toe LH₂ te pompen tot 1000 bar (100 MPa),
- een verwarmingstoestel (VAP genoemd: hete olie, elektrisch om waterstof te verhitten bij 1000 bar (100 MPa)),
- 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 7. 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 8).



Figuur 8. Vereenvoudigde vergelijking tussen tankstations voor gas en vloeibare waterstof. Boven: tankstation voor gasvormige waterstof; onder: tankstation voor vloeibare waterstof.

In onderstaande tabel worden de voornaamste verschillen tussen tankstations voor vloeibare en voor gasvormige waterstof samengevat.

Tabel 1. Vergelijking tussen tankstations voor vloeibare en voor gasvormige waterstof

Thema	Tankstation voor vloeibare waterstof	Tankstation voor gasvormige waterstof
Opslag	Vloeibare waterstof, cryogene temperatuur (-240 °C), lage druk (tot 10 bar)	Gasvormige waterstof, omgevingstemperatuur, hoge druk (van 200 tot 500 bar)
Bijvullen van het tankstation	Overbrengen van vloeibare waterstof van vrachtwagen naar opslagvat	Vooraf verwisseling (= vol in ruil voor leeg)
Samenpersen van waterstof	Vloeistofpomp en verdamper nodig voor de levering van gasvormige H ₂	Compressor

3.4 Uitrusting van tankstation met opslag van waterstof als gas

3.4.1 Buffervaten voor de opslag van gasvormige waterstof

De buffervaten, met hoge of lage druk, worden ontworpen voor de opslag van samengeperste waterstof en kunnen zich bevinden tussen een waterstofgenerator en een compressor voor een

onveranderlijke gasstroom naar de compressor, of tussen de compressor en het verdeelsysteem voor de accumulatie van gas onder druk voor de brandstofvoorziening aan voertuigen.

Opslagvaten voor waterstofgas moeten vervaardigd worden volgens een algemeen toegepaste nationale/regionale norm en ontworpen worden met het oog op de verwachte levensduur. De opslag in buffervaten kan de opslag door absorptie in metaalhydride omvatten.

Wanneer buffervaten met een verschillende ontwerpdruk onderling worden verbonden, moeten ze beschermd worden zodat vaten die ontworpen zijn voor een lage druk niet aan een te hoge druk onderworpen kunnen worden in geval van een defect.

Het ontwerp van het bufferopslagsysteem moet passende middelen bevatten om een defect in geval van brand te voorkomen indien dit nodig geacht wordt op basis van een risicobeoordeling. Geschikte preventiemethoden zijn onder andere één of meer van de volgende:

- Ontluchtingssystemen, zoals thermisch geactiveerde overdrukinrichtingen;
- Thermische afscherming of brandbarrière;
- Onmogelijkheid voor een brandbare vloeistof om zich onder het vat te verzamelen;
- Vaste bluswaterbescherming.

Er dient opgemerkt te worden dat opslagvaten uit composiet een grotere bescherming kunnen vereisen dan metalen vaten. De vaten moeten stevig vastgemaakt worden op de fundering, en de fundering en de ondersteunende structuur moeten bestand zijn tegen de krachten waaraan ze onderworpen kunnen worden. Het ontwerp van de buffervaten voor de opslag van gasvormige waterstof en de leidingen moet rekening houden met het risico van het rechtstreeks inwerken van straalvlammen uit mogelijke lekken of uitlaten op een aangrenzend vat. De risicobeoordeling van het tankstation moet beperkende maatregelen in aanmerking nemen met betrekking tot de overgang van deflagratie naar detonatie in de zone van de samengeperste waterstof. Elke groep buffervaten die geïsoleerd kan worden met manuele of automatische kleppen moet uitgerust worden met zijn eigen set van veiligheidsinrichtingen.

Merk op dat wanneer waterstof geleverd wordt in transporteerbare cilinders, opleggers met cilinders of gasopslagsystemen bestaande uit meerdere elementen¹ er niet altijd overdrukinrichtingen aanwezig zijn in de cilinder(groep). Wanneer transporteerbare cilinders, opleggers met cilinders of gasopslagsystemen bestaande uit meerdere elementen echter deel uitmaken van een tankstation, na een passende risicobeoordeling die de mogelijk verschillende ontwerpvoorwaarden in aanmerking neemt, in het bijzonder drukcycli, moet elk compressiesysteem ter plaatse dat waterstof kan samenpersen voor zo'n systeem beschikken over een aantal veiligheidsinrichtingen om de opslagcilinders te beschermen tegen te hoge druk.

¹ Multimodale combinatie van cilinders, buizen of cilinderbundels die onderling verbonden zijn door een verdeelstuk en binnen een frame gemonteerd zijn, met inbegrip van onderhoudsuitrusting en structurele uitrusting die nodig is voor het transport van gassen.

3.4.2 Waterstofcompressor

Elke compressor moet uitgerust zijn met overdrukrichtingen of equivalente veiligheidsinrichtingen om overdruk te voorkomen. De compressor en eventuele bijbehorende systemen moeten geschikt zijn voor gebruik in het leidingsysteem. Er moet voldoende compensatie zijn voor mogelijke trillingen of bewegingen van de compressor zodat de leidingen niet beschadigd worden en er geen lekken optreden. Compressoren moeten specifiek ontworpen worden voor waterstof en om het binnendringen van verontreinigende stoffen tot een minimum te beperken. De instroom van lucht aan de ingang van de compressor moet te allen tijde vermeden worden om de vorming van brandbare mengsels te voorkomen. De risico's verbonden aan de installatie, het onderhoud en de werking van compressoren moeten beoordeeld worden en er moeten tegenmaatregelen vastgesteld en toegepast worden om de uitrusting te beschermen en mogelijke gevaarssituaties te voorkomen. Elke compressor moet uitgerust worden met middelen om druk af te laten uit alle delen van het systeem voor onderhoudsdoeleinden. Wanneer de risicobeoordeling van een compressorsysteem spoelen met een inert gas aanbeveelt, moeten middelen ter beschikking gesteld worden, waaronder een schriftelijke procedure, om de compressor vóór onderhoudswerkzaamheden doeltreffend te spoelen met een inert gas.

Er moet voldoende compensatie zijn voor mogelijke trillingen of bewegingen tussen onderling verbonden systemen in een waterstoftankstation en tussen het leidingwerk voor de toevoer van waterstofgas en voor de compressor om lekken door trillingen of bewegingen te voorkomen. Eventuele trillingen die de sterkte van de leidingen, de verbindingstukken en de onderdelen kunnen aantasten, mogen niet op de leidingen overgebracht worden.

Er moeten beveiligingsinrichtingen geïnstalleerd worden om ervoor te zorgen dat de temperatuur en druk niet hoger of lager worden dan de ingestelde niveaus, bijvoorbeeld voor de ingangsdruk, de uitlaattemperatuur en -druk, waarbij het beveiligingssysteem een alarm, de stillegging van het systeem of andere passende maatregelen activeert. Behalve de instrumenten en inrichtingen waarmee gascompressiesystemen normaal uitgerust zijn, moeten de volgende specifieke beveiligingen in aanmerking genomen worden voor waterstof.

De instroom van lucht aan de ingang van de compressor moet te allen tijde vermeden worden om de vorming van een brandbaar mengsel te voorkomen. Indien niet langer aan deze voorwaarde wordt voldaan, wordt de compressor stilgelegd. De ingangsdruk moet bijvoorbeeld bewaakt worden door een drukindicator/-schakelaar, waarbij het beveiligingssysteem wanneer nodig een alarm en/of de stillegging van het systeem activeert, om een vacuüm in de ingangsleding en een daarop volgende instroom van lucht te voorkomen. Deze drukindicator/-schakelaar moet ervoor zorgen dat de compressor stilgelegd wordt voordat de ingangsdruk de atmosferische druk bereikt.

Indien er in normale werkingsomstandigheden een mogelijkheid is van verontreiniging door zuurstof door een lage ingangsdruk, dan kan het meten van het zuurstofgehalte in de waterstof in een risicobeoordeling als risicobeperkende maatregel beschouwd worden. Wanneer het zuurstofgehalte bijvoorbeeld een volumeconcentratie van 1% bereikt, kan de compressor automatisch stilgelegd worden. Er kunnen ook alternatieve middelen worden gebruikt om kritieke situaties te voorkomen.

De temperatuur na het laatste stadium van compressie, of de temperatuur na de koelinrichting, wanneer die aanwezig is, moet bewaakt worden door een indicator/schakelaar, waarbij het beveiligingssysteem wanneer nodig een alarm en/of de stillegging van het systeem activeert bij een vooraf ingestelde maximumtemperatuur.

De druk na het laatste stadium van compressie moet bewaakt worden door een indicator/schakelaar, waarbij het beveiligingssysteem wanneer nodig een alarm en/of de stillegging van het systeem of andere maatregelen, zoals recycling, activeert, bij een vooraf ingestelde maximumdruk die lager is dan die van de overdrukbeveiliging.

Het koelwatersysteem moet bewaakt worden door een indicator/schakelaar, waarbij het beveiligingssysteem wanneer nodig een alarm en/of de stillegging van het systeem activeert in geval van een lage druk, een klein debiet of een hoge temperatuur.

Wanneer de motor en randapparatuur gespoeld worden met een inert gas, of beschermd door het onder druk brengen met perslucht of een inert gas, wordt een lage druk/debiet aangegeven door een alarm, dat ingesteld wordt om de motor en randapparatuur stil te leggen zoals vereist door IEC 60079-2.

Wanneer het carter van de compressor gespoeld wordt met een inert gas, of beschermd door het onder druk brengen met perslucht of een inert gas, wordt een lage druk/debiet aangegeven door een alarm, dat ingesteld wordt om de compressor stil te leggen.

3.4.3 Voorkoelinrichting

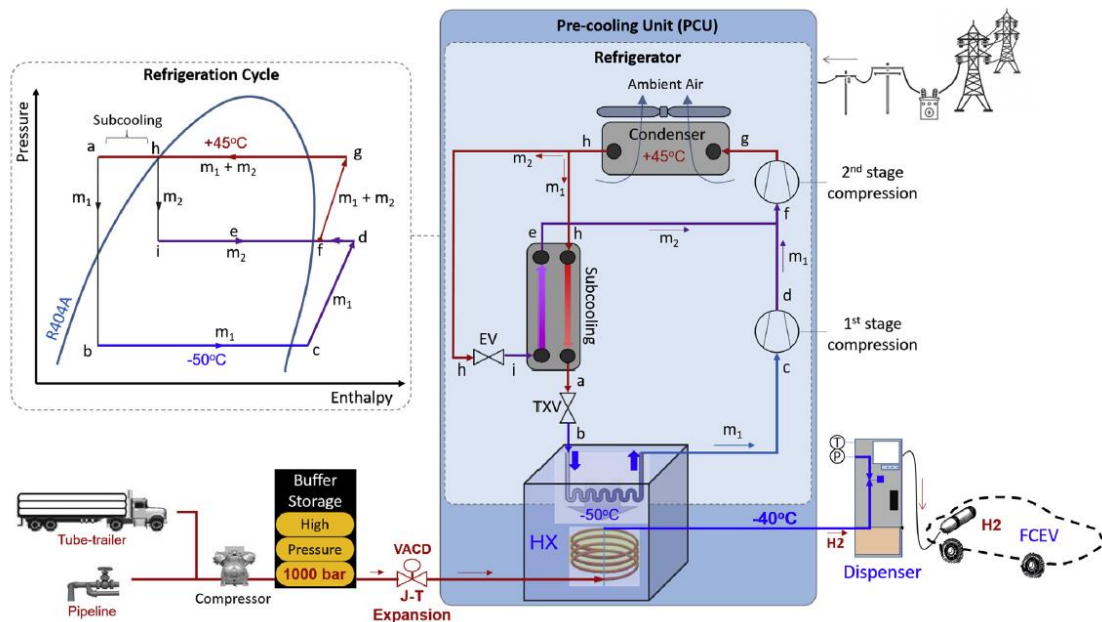
Voorkoelen is het proces van het afkoelen van de temperatuur van de waterstofbrandstof voordat deze verdeeld wordt. De kostprijs van de voorkoelinrichting vertegenwoordigt ongeveer 10% van de totale kostprijs van de uitrusting van het tankstation voor gasvormige waterstof [3]; een dieper begrip van deze component van de kosten is nodig om de kosten van het tankstation zoveel mogelijk te beperken. In tegenstelling tot de studies over compressoren en opslagsystemen is de beschikbare informatie over de voorkoelinrichting eerder beperkt. Het voorkoelen van de waterstofbrandstof voordat ze naar de tank van het voertuig wordt overgebracht is cruciaal om oververhitting van de tank te voorkomen. Het tankprotocol SAE J2601 stelt grenzen vast voor het tankproces om een veilig en snel tankproces bij brandstofcelvoertuigen te garanderen [4].

Het tankprotocol SAE J2601 bepaalt een temperatuurbereik voor het voorkoelen van waterstof voor elk type waterstoftankstation. Zo moet een tankstation van het type T40 de waterstof bijvoorbeeld koelen tot tussen -33 en -40 °C voordat deze aan de brandstofcelvoertuigen verdeeld wordt. De voorkoelinrichting bevindt zich tussen het hogedrukbuffervat en de verdeelzuil en koelt de gasvormige waterstof voor tot een temperatuur van ten minste -33 °C binnen 30 s na aanvang van het tanken. Daarna wordt tijdens het hele tankproces een temperatuur binnen het voorgeschreven bereik in stand gehouden.

De snelheid waarmee brandstofcelvoertuigen kunnen tanken houdt rechtstreeks verband met onder andere de voorkoeltemperatuur van de waterstof, de omgevingstemperatuur en de bij aanvang in de tank van het voertuig aanwezige druk [5]. Hoe hoger de omgevingstemperatuur, hoe langer het zal duren om de tank te vullen, en omgekeerd. Van deze drie sleutelfactoren heeft het voorkoelen echter de grootste impact op de tijd die nodig is voor het tanken. Omdat de tijd die nodig is voor het tanken één van de kritieke parameters is voor de tankervaring van

een brandstofcelvoertuig, moet het voorkeelsysteem zo ontworpen zijn dat het kan voldoen aan de vereiste tanksnelheid en -capaciteit in extreme omstandigheden, en tegen de laagst mogelijke kosten.

Een typische voorkeelinrichting in een tankstation voor gasvormige waterstof maakt gebruik van een thermodynamische koelcyclus; er circuleert een koelmiddel door een compressor met twee stappen, condensor, thermostatische expansieklep en warmtewisselaar van de verdamper (figuur 9). Deze koelcyclus omvat het nakoelen van het koelmiddel om te zorgen voor een zo groot mogelijk koeffect bij de verdamper door een deel van het koelmiddel dat uit de condensor komt te laten circuleren door de expansieklep, de warmtewisselaar van de voorkeeler en de tweede stap van de compressor. De verdeelde waterstof wordt voorgekoeld door energie te laten vrijkomen naar het koude koelmiddel via de warmtewisselaar van de verdamper. De warmtewisselaar van de verdamper kan ontworpen worden met een grote thermische massa (voornamelijk om als buffer te fungeren en zo de vereiste koelcapaciteit te reduceren), of hij kan compact ontworpen worden voor verpakkingsdoeleinden.



Figuur 9. Schema van de werking van de voorkeelinrichting in een tankstation voor gasvormige waterstof dat bestaat uit een compressor, een hogedrukbuffervat, een voorkeelinrichting en een verdeelzuil.

Twee belangrijke factoren die de koelprestatie en de afmetingen van de voorkeelinrichting bepalen: het Joule-Thompson-expansieproces bij de regelklep stroomopwaarts van de warmtewisselaar van de voorkeeler en de vereiste dat het tankstation in staat is om een aantal voertuigen na elkaar te laten tanken. Het JOULE-THOMPSON-effect houdt verband met de ingangstemperatuur van de waterstofbrandstof die de voorkeeler instroomt, terwijl de vereiste capaciteit om voertuigen na elkaar te laten tanken verband houdt met de vraag aan de verdeelzuil tijdens piekmomenten [6].

Het JOULE-THOMPSON-effect verwijst naar de temperatuursveranderingen van een gas wanneer het door een klep wordt geforceerd en uitzet. Elk gas heeft een "inversietemperatuur" waaronder de temperatuur daalt tijdens het JOULE-THOMPSON-expansieproces. De

inversietemperatuur houdt rechtstreeks verband met de kritische temperatuur van het gas. Stoffen met een extreem lage kritische temperatuur (bv. waterstof, helium en neon) hebben inversietemperaturen die veel lager liggen dan de omgevingstemperatuur, waardoor hun temperatuur stijgt tijdens de expansie tot boven hun inversietemperatuur (< 224 K voor waterstof). Wanneer de waterstof onder hoge druk uit het buffervat door een regelklep stroomt, ondergaat hij een drukdaling terwijl hij expandeert. Door de expansie en drukdaling van de waterstof in de regelklep stijgt de temperatuur van het waterstofgas omdat waterstof bij de expansiedruk en -temperatuur negatieve JOULE-THOMPSON-coëfficiënten heeft (ongeveer $-0,05$ K/bar bij 900 bar en $-0,03$ K/bar bij 1 bar en 25 °C) [7]. Dit gezegd zijnde, zou de maximale drukdaling door de regelklep in theorie kunnen leiden tot een stijging van de temperatuur van de waterstofbrandstof met 40 °C voordat ze de warmtewisselaar van de voorcoeler binnengaat. Deze significante temperatuurstijging zou aanleiding kunnen geven tot een bijkomende belasting van de voorcoelinrichting, doordat er een groter koelvermogen nodig zal zijn om de grotere vereiste temperatuurdaling door de warmtewisselaar te compenseren. Op dezelfde manier kan een hoger aantal voertuigen dat na elkaar moet kunnen tanken leiden tot een grotere vereiste capaciteit van de voorcoelinrichting, omdat de omvang van de warmtewisselaar afgestemd zal zijn op de vraag om na elkaar te kunnen tanken tijdens piekmomenten, ook al is de vraag tijdens het grootste deel van de dag veel lager.

Het gewenste aantal voertuigen dat na elkaar moet kunnen tanken heeft een grote invloed op de capaciteit en de kostprijs van de onderdelen van het tankstation. Bij aansluitend tanken rijdt het ene brandstofcelvoertuig na het andere tot bij de verdeelzuil, met een korte pauze van ongeveer 2 minuten tussen twee tankbeurten [6]. Doordat de installatie niet stilstaat tijdens een reeks aansluitende tankbeurten is er weinig herstel- en oplaadtijd voor de onderdelen van het tankstation. Een groot aantal aansluitende tankbeurten (bv. 5) zal de belasting van de warmtewisselaar vergroten, waardoor het vermogen van zijn thermische massa om de temperatuur van de waterstof onder -33 °C te houden, in gevaar gebracht wordt. In dergelijke gevallen is het mogelijk dat het koelsysteem onvoldoende tijd heeft om de warmtewisselaar af te koelen tussen twee tankbeurten. Wanneer men in het ontwerp van de onderdelen van het tankstation geen rekening houdt met de piekvraag bij aansluitend tanken, is het mogelijk dat de voorcoelinrichting te klein is, waardoor de tankprestaties en de klanttevredenheid op de helling komen.

Behalve het JOULE-THOMPSON-effect en aansluitend tanken is het belangrijk om de verschillende ontwerpconcepten van de voorcoelinrichting tegen elkaar af te wegen. Een voorcoelinrichting kan gebruik maken van een warmtewisselaar met een grotere thermische massa die in staat is een kleine temperatuurverandering in stand te houden tijdens het koelen van de waterstof, waardoor er een minder koelvermogen geleverd wordt van het koelsysteem. Anderzijds moet een compacte warmtewisselaar in overeenstemming zijn met een koelcapaciteit die voldoet aan de onmiddellijke koelbelasting (d.w.z. koelt volgens vraag). Bovendien zal door zijn kleinere buffereffect (door zijn kleinere thermische massa) de koelcapaciteit bij een compacte warmtewisselaar gevoeliger zijn voor factoren die invloed hebben op de ingangstemperatuur, zoals de omgevingstemperatuur en het JOULE-THOMPSON-effect stroomopwaarts van de warmtewisselaar.

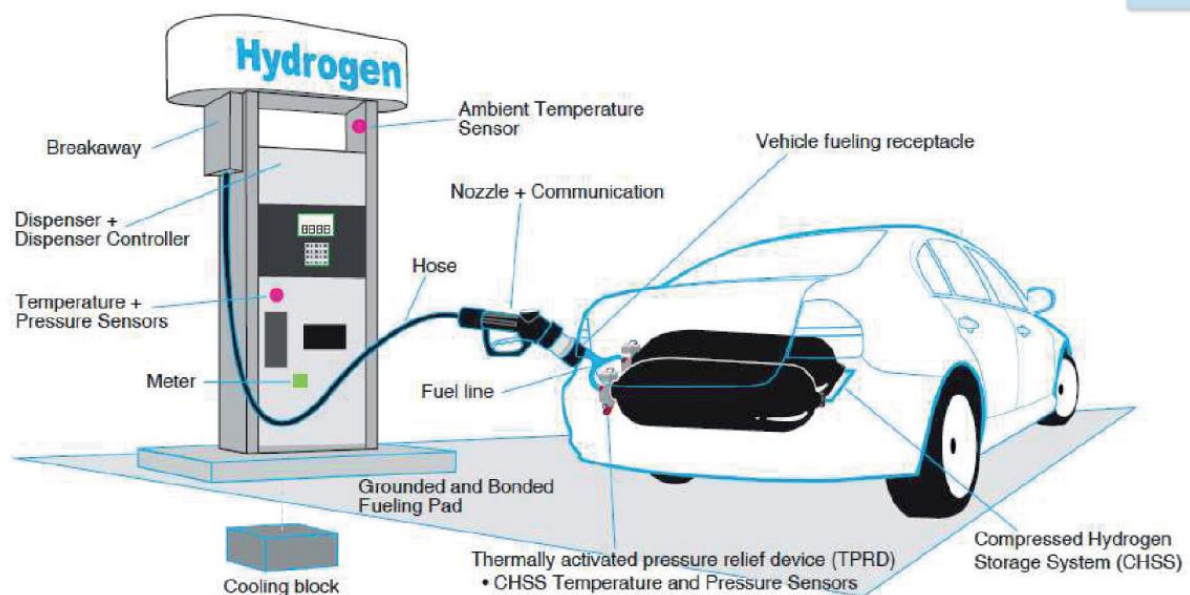
Bij hogere omgevingstemperaturen zal de temperatuur van de waterstof bij de ingang van de warmtewisselaar stijgen, waardoor het kan zijn dat een warmtewisselaar met een grotere thermische massa zijn temperatuur binnen het ontwerpbereik moet houden. Bij een compacte

warmtewisselaar daarentegen moet een hogere omgevingstemperatuur gecompenseerd worden met een groter koelvermogen volgens de vraag. Eén van de thermodynamische nadelen van een warmtewisselaar met een grote thermische massa is dat deze meer energie verbruikt voor de basiskoeling (om de warmtewisselaar op -40 °C te houden) dan zijn compacte tegenhanger. Anderzijds heeft een koelconfiguratie met een compacte warmtewisselaar die werkt volgens vraag een krachtiger koelsysteem nodig maar verbruikt deze minder energie voor de basiskoeling. De koelcapaciteit en de thermische massa van de warmtewisselaar moeten dus tegen elkaar afgewogen worden. Wat de kostprijs betreft, heeft een compacte warmtewisselaar vaak een complexere structuur voor een snelle warmteoverdracht volgens de vraag, waardoor de fabricagekosten waarschijnlijk hoger liggen dan voor een warmtewisselaar met een grote thermische massa. Het kleine systeem zorgt er echter voor dat de kosten van het materiaal, de verzending en de installatie van compacte warmtewisselaars laag zijn in vergelijking met warmtewisselaars met een grote thermische massa.

Wanneer de verdeelde waterstof voorgekoeld wordt, moet het verdeelsysteem uitgerust zijn met een middel om te bevestigen dat de temperatuur van de voorgekoelde brandstof in de verdeelzuil correct is en dat de beveiliging voldoet aan zowel de maximum- als de minimumtemperatuur die in het tankprotocol vastgesteld zijn. Indien het tankprotocol gebruik maakt van de communicatie van de tanktemperatuur in het voertuig en er een storing optreedt in deze communicatie, dan moet het protocol het systeem stilleggen of overgaan op tanken zonder communicatie indien het protocol dit toelaat.

3.4.4 Verdeelzuil voor waterstof

Het verdeelsysteem bevindt zich stroomafwaarts van het waterstoftoevoersysteem en omvat alle nodige uitrusting voor het tanken van het voertuig, waarbij de samengeperste waterstof aan het voertuig geleverd wordt. De verdeelzuil voor waterstof maakt deel uit van het verdeelsysteem, dat de verdeelkast en de ondersteunende structuur omvat en zich fysiek in de tankzone bevindt.



Figuur 10. Voorbeeld van de voornaamste elementen van het verdeelsysteem van een tankstation [2]

Figuur 10 toont de voornaamste elementen van het verdeelsysteem van een tankstation, waaronder het systeem voor waterstof onder hoge druk voor brandstofcelvoertuigen, dat onder ander de tank en het opslagsysteem voor samengeperste waterstof omvat, met sensoren en overdruk-inrichtingen. Het opslagsysteem voor samengeperste waterstof beschikt over een thermisch geactiveerde overdruk-inrichting om te beschermen tegen overdruk door een brand. Aan de kant van het tankstation is er een automatisch regelsysteem voor het verdeelsysteem (bv. met een programmeerbare logische sturing (PLC)) voor het uitvoeren van het tanken en voor de detectie en het beheer van storingen. Het tankstation beschikt ook over een overdrukbeveiliging, zoals een overdruk-inrichting of equivalent, om te beschermen tegen een te hoge druk in het verdeelsysteem en het voertuig.

De verdeelzuil van een openbaar tankstation voor lichte voertuigen wordt gewoonlijk ontworpen met afzonderlijke vulpistolen voor het tanken van voertuigen met een nominale werkdruk tot 35 MPa en/of 70 MPa. Het vulpistool van het tankstation kan een communicatieontvanger bevatten en het voertuig kan een communicatiezender bevatten (bv. SAE J2799). Het communicatiesysteem van het voertuig volgens de protocollen van de Infrared Data Association (IrDA) kan het protocol SAE J2799 gebruiken om de gemeten temperatuur en druk van het opslagsysteem voor samengeperste waterstof in het voertuig door te geven naar de verdeelzuil. Het regelsysteem voor het verdeelsysteem kan deze gegevens gebruiken voor het regelsysteem om het tankproces te beheren.

De aanbevolen minimale drukwaarden voor de onderdelen die nodig zijn voor het verdeelsysteem in functie van het serviceniveau van de verdeelzuil, de drukklasse (zoals gedefinieerd in ISO 17268) en de maximaal toegestane werkdruk van het verdeelsysteem om tot de maximale werkdruk te komen die nodig is om het opslagsysteem voor samengeperste waterstof van het waterstofvoertuig in alle werkingsomstandigheden te voeden, worden getoond in tabel 2.

Tabel 2 Drukniveaus voor het verdeelsysteem en aanbevolen minimale drukwaarden voor de onderdelen

Serviceniveau	Drukklasse	Maximale werkdruk	Maximaal toegestane werkdruk van het verdeelsysteem
Gelijk aan nominale werkdruk van het te bedienen voertuig		1,25 × serviceniveau Hoogste druk tijdens normaal tankproces	1,375 × serviceniveau Hoogst toegestane instelwaarde voor drukbeveiliging van verdeelsysteem
25 MPa	H25	31,25 MPa	34,375 MPa
35 MPa	H35	43,75 MPa	48,125 MPa
50 MPa	H50	62,5 MPa	68,75 MPa
70 MPa	H70	87,5 MPa	96,25 MPa

Indien onderdelen worden gebruikt met lagere drukwaarden dan deze in tabel 2, dan moet de maximaal toegestane werkdruk van het verdeelsysteem verlaagd worden in functie van het onderdeel met de laagste drukwaarde. Het verdeelsysteem moet ook beschermd worden tegen overdruk.

Behalve de drukwaarde moeten de onderdelen van het verdeelsysteem voor waterstof aan de volgende eisen voldoen:

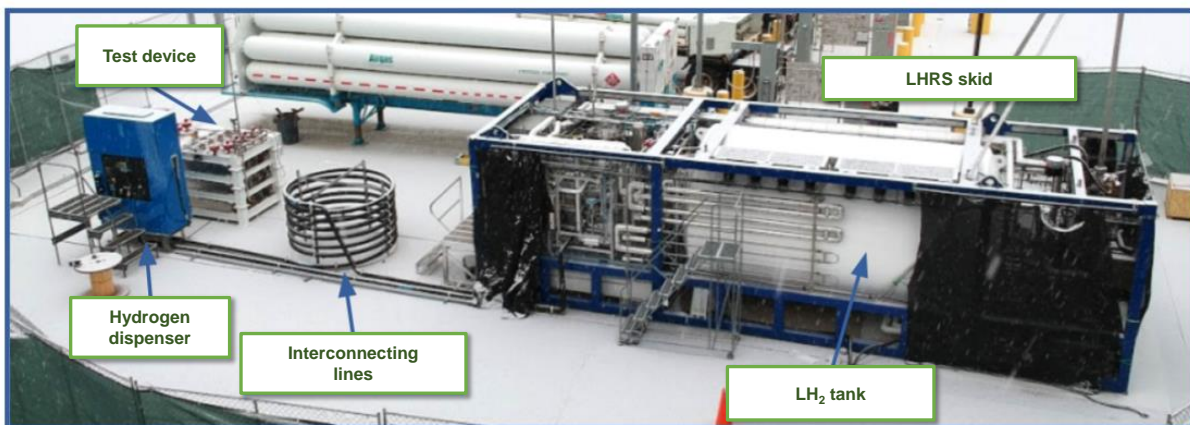
- een omgevingstemperatuurbereik van -40 °C tot $+50\text{ °C}$, tenzij de plaatselijke voorwaarden andere temperatuurgrenzen mogelijk maken of vereisen;
- de compatibiliteit van de materialen die normaal in contact komen met waterstof;
- een bepaalde levensduur vóór onderhoud of vervanging.

De vooropgestelde levensduur van de tankinstallatie zou 100.000 cycli moeten bedragen, maar ongeacht of dit doel wordt bereikt, moet de levensduur bepaald en vermeld worden zodat geplande onderhoudsactiviteiten een uitval kunnen voorkomen.

Onderdelen van het systeem voor het verdelen van waterstof onder hoge druk moeten enkel gemarkeerd worden met de drukklasse indien de onderdelen ontworpen en goedgekeurd zijn voor het voldoen aan of overschrijden van de vereisten wat betreft druk, temperatuur, materiaalcompatibiliteit en levensduur zoals hierboven gedefinieerd. Bij de montage van onderdelen onderworpen aan hoge druk moeten de instructies van de leverancier en een vastgestelde montageprocedure strikt gevolgd worden. Bij de fabricage moet gegarandeerd worden dat de drukkaling tussen de druksensor voor de brandstof van de verdeelzuil, waarmee de druk in het voertuig bewaakt wordt, en het vulpistool de in het tankprotocol bepaalde waarde niet overschrijdt tijdens de toevoer van de waterstof naar het voertuig.

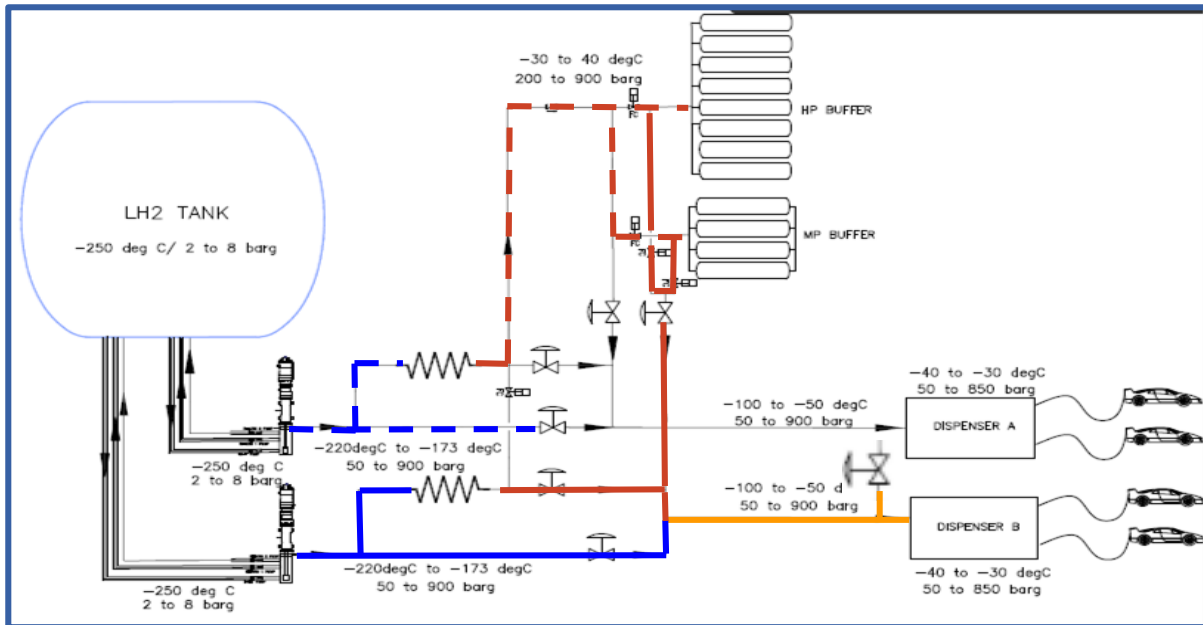
3.5 Tankstation met opslag van vloeibare waterstof – Uitrusting

Een tankstation voor vloeibare waterstof beschikt meestal over een geïntegreerd LH₂-opslagsysteem, bestaande uit een inbouwkast, een LH₂-tank, verbindingsleidingen, een verdeelzuil en een testinrichting als voornaamste onderdelen (zie figuur 11).



Figuur 11. Overzicht van de voornaamste onderdelen van een type tankstation voor vloeibare waterstof met geïntegreerd LH₂-opslagsysteem.

Het algemene stroomschema voor het proces van een tankstation voor vloeibare waterstof wordt getoond in figuur 12.



Figuur 12. Proces van een tankstation op basis van LH₂.

De voornaamste uitrusting van het tankstation voor vloeibare waterstof is:

- de LH₂-tank,
- de cryogene pomp,
- de verdamper,
- het kleppenpaneel,
- de buffers,
- de aansluiting op de verdeelzuil,
- de verdeelzuil.

In onderstaande afbeelding wordt een type inbouwkast voor een tankstation voor vloeibare waterstof getoond, waarbij de voornaamste functionele uitrusting wordt benoemd:

- in figuur 13 voor de "cryogene" kant,
- in figuur 14 voor de "warme" kant.

De uitrusting wordt in de volgende onderdelen met meer details en informatie over de functionaliteiten beschreven.



Figuur 13. Overzicht inbouwkast tankstation vloeibare waterstof – "cryogene" kant.

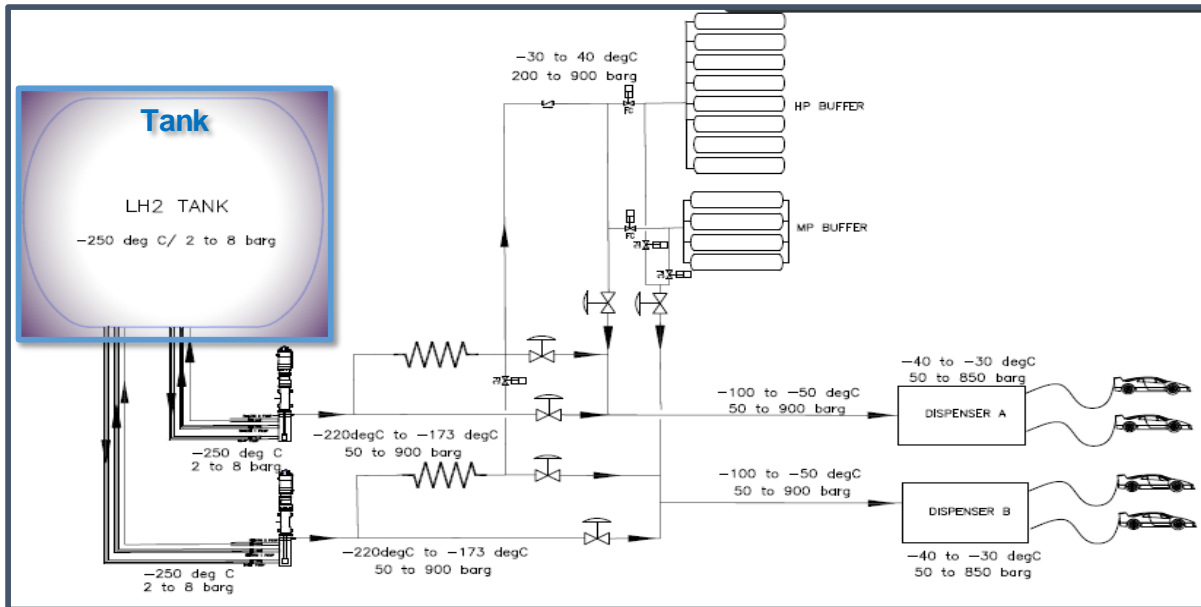


Figuur 14. Overzicht inbouwkast tankstation vloeibare waterstof – "warme" kant.

3.5.1 Opslag van vloeibare waterstof

Bij tankstations voor vloeibare waterstof kan de tank met vloeibare waterstof in een inbouwkast geïntegreerd worden, zoals getoond in dit document en in het tankstation voor vloeibare waterstof van Linde in Oakland. De opslag van LH₂ kan echter ook gebeuren in een vrijstaand vat, dat verticaal of horizontaal geplaatst kan worden.

Voor tankstations voor vloeibare waterstof zoals getoond in figuur 15 bedraagt het opslagvolume van LH₂ ongeveer 20 m³. De opslagtemperatuur ligt rond -250 °C en de opslagdruk tussen 2 en 8 bar.



Figuur 15. Proces van een tankstation op basis van LH₂ – Opslagtank voor LH₂

De belangrijkste parameters van dit deel van het tankstation voor vloeibare waterstof zijn:

- De gekozen isolatie is een meerlaagse isolatie met vacuüm om de cryogene temperatuur in stand te houden (zie figuur 16),
- De tank is horizontaal om geïntegreerd te worden in een inbouwkast en te voldoen aan de vereisten (andere configuraties zijn mogelijk, bijvoorbeeld met een vrijstaande tank met een grotere capaciteit),
- Alle interfaces bevinden zich aan één kant van de tank,
 - Toevoer- en retourleidingen voor elke pomp (en een derde om het niveau in de put van de LH₂-pomp te beheersen)
 - Ofwel conventionele modus ofwel thermosifonmodus
 - Veiligheid, ontluchtingsleidingen
 - Vulleidingen (onderaan en bovenaan)
- Het frame is uitgerust met een botsbescherming (zie figuur 17).



Figuur 16. Meerlaagse isolatie.

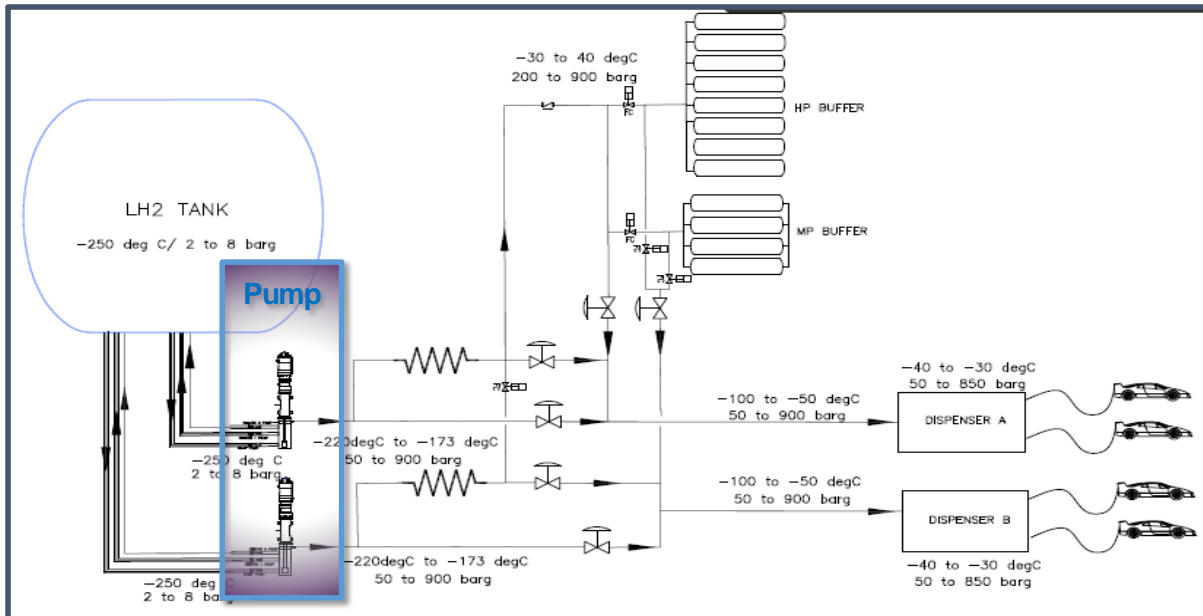


Figuur 17. Botsbescherming (in het blauw) onderaan.

De LH₂-tank wordt gevuld 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 ton 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 verdamper 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.

3.5.2 Cryogene pomp

De in tankstations voor vloeibare waterstof geïnstalleerde cryogene pompen worden getoond in figuur 18.



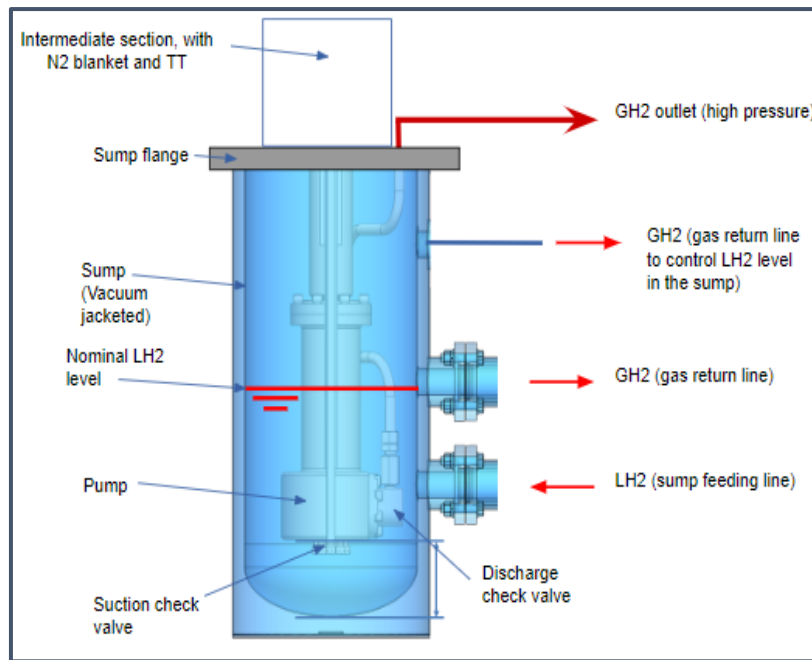
Figuur 18. Proces van een tankstation op basis van LH₂ – LH₂-pomp.

De cryogene pomp, zoals getoond in figuur 19, laat toe vloeistof over te brengen van de opslagtank naar de warmtewisselaar. De druk van de vloeibare waterstof wordt licht verhoogd tussen de opslagtank en de warmtewisselaar.



Figuur 19. Cryogene pomp.

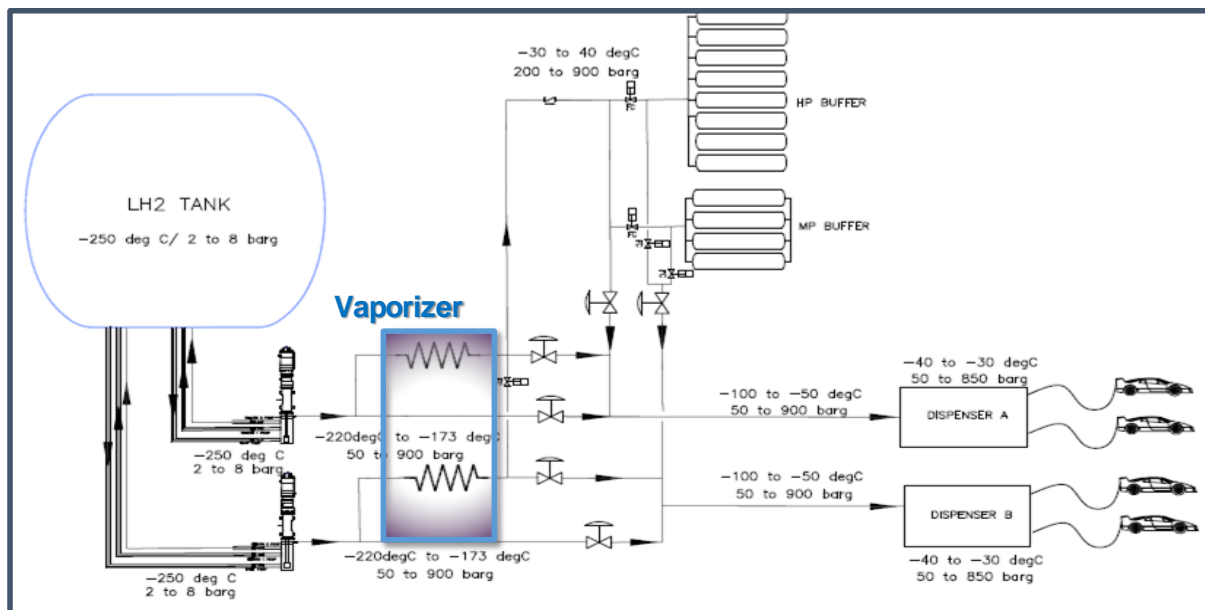
De pomp wordt in een vacuümpot ingebracht, zoals geïllustreerd in figuur 20.



Figuur 20. Pomp in vacuümpot.

3.5.3 LH₂-verdamper

De verdamper in tankstations voor vloeibare waterstof wordt getoond in figuur 21.



Figuur 21. Proces van een tankstation op basis van LH₂ – Verdamper.

Het doel van de verdamper is om de druk te verhogen van de gasvormige waterstof die in tussenbuffers opgeslagen zal worden met een druk tot 900 bar. De temperatuur van de waterstof wordt eveneens verhoogd van -220 tot -30 °C.

Er bestaan verschillende technologieën voor deze warmtewisselaar. De voornaamste zijn:

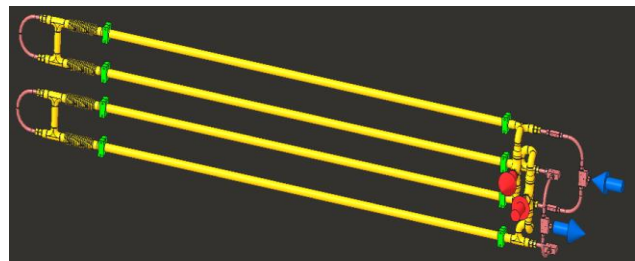
- atmosferische verdamper,
- en verdamper met dubbele buis.

De verdamper met dubbele buis, zoals weergegeven in figuur 22, heeft de voorkeur voor tankstations om de volgende redenen:

- eenvoudig en gemakkelijk te produceren,
- compacte oplossing in vergelijking met atmosferische verdamper,
- er wordt geen verrijkte O₂-zone gecreëerd,
- laag energieverbruik in vergelijking met elektrisch verwarmingstoestel (8 keer minder).



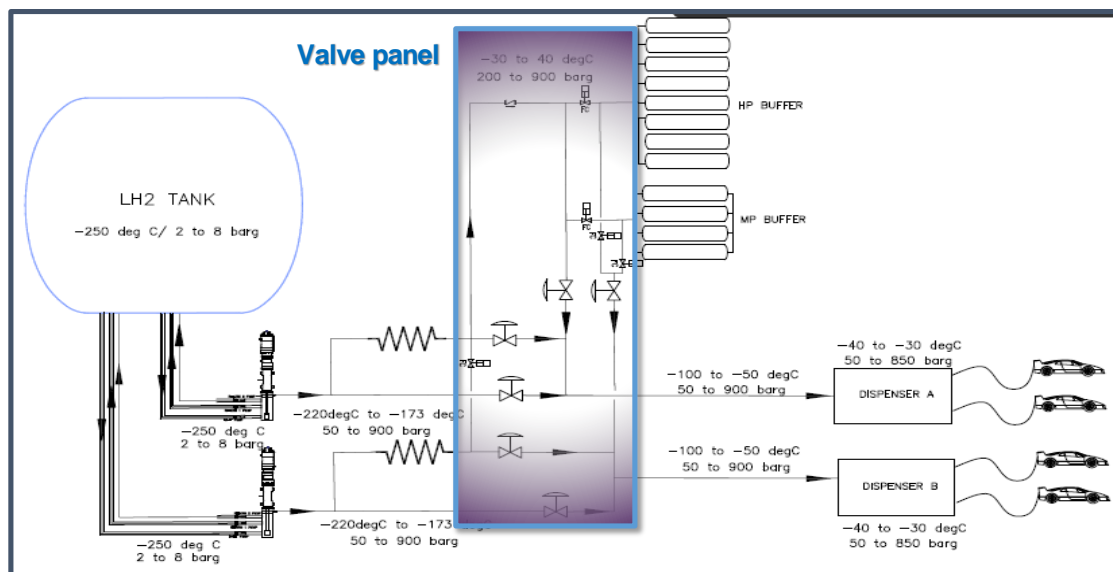
(A)



(B)

Figuur 22. (A) Warmtewisselaar met dubbele buis in inbouwkast van tankstation voor vloeibare waterstof, (B) Principe van verdamping van LH₂ (blauwe pijlen).

3.5.4 Kleppenpaneel



Figuur 23. Proces van een tankstation op basis van LH₂ – Kleppenpaneel.

Het kleppenpaneel in tankstations voor vloeibare waterstof wordt getoond in figuur 23.

Een afbeelding van een kleppenpaneel wordt getoond in figuur 24. Dit deel van het proces is tamelijk eenvoudig, maar is een mogelijke bron van lekken van gasvormige waterstof door het grote aantal aansluitingen voor kleppen, druktransmitters en andere uitrusting die nodig is voor de werking van het tankstation.

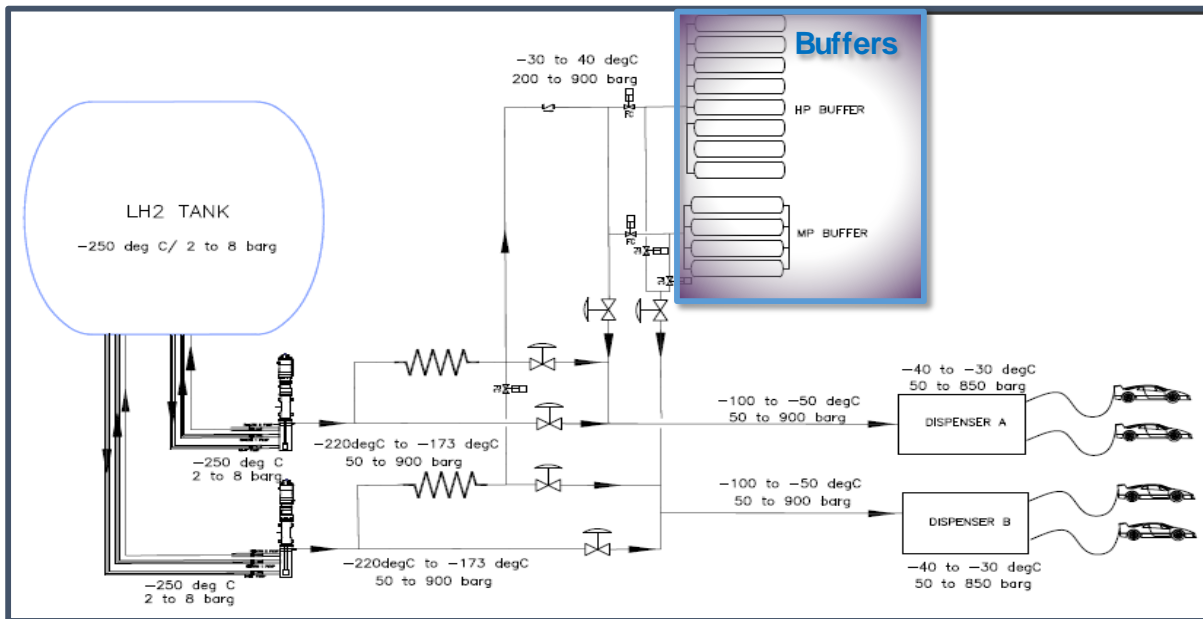


Figuur 24. Kleppenpaneel.

In deze fase is de waterstof gasvormig en gaat de maximale druk tot 900 bar.

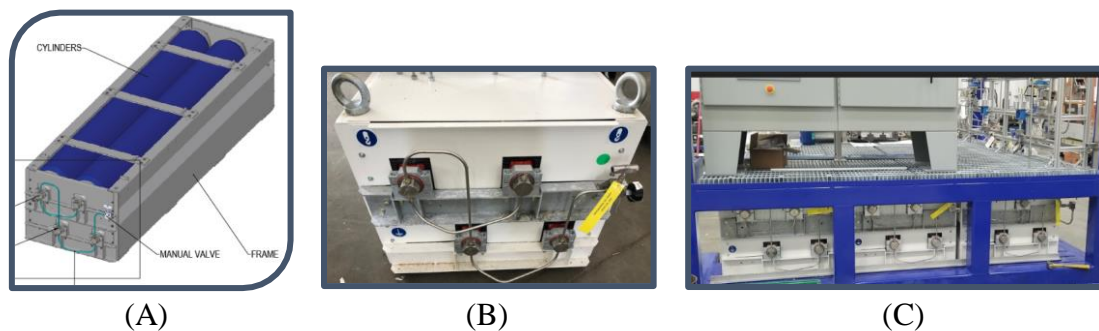
3.5.5 Gasvormige buffers

De gasvormige buffers in tankstations voor vloeibare waterstof worden getoond in figuur 25.



Figuur 25. Proces van een tankstation op basis van LH2 – Gasvormige buffers.

De maximaal toegestane werkdruk van de buffers is 1000 bar (100 MPa). Er worden cilinders van het type II gebruikt, gemaakt uit staal en omwonden met koolstofvezel om de mechanische sterkte van de cilinders te vergroten. In de voorgestelde tankstationconfiguratie hebben de gekozen cilinders een volume van 123 l. Deze cilinders worden per 4 gegroepeerd in 3 bundels zoals getoond wordt in figuur 26 en in het hoofdframe geïntegreerd.

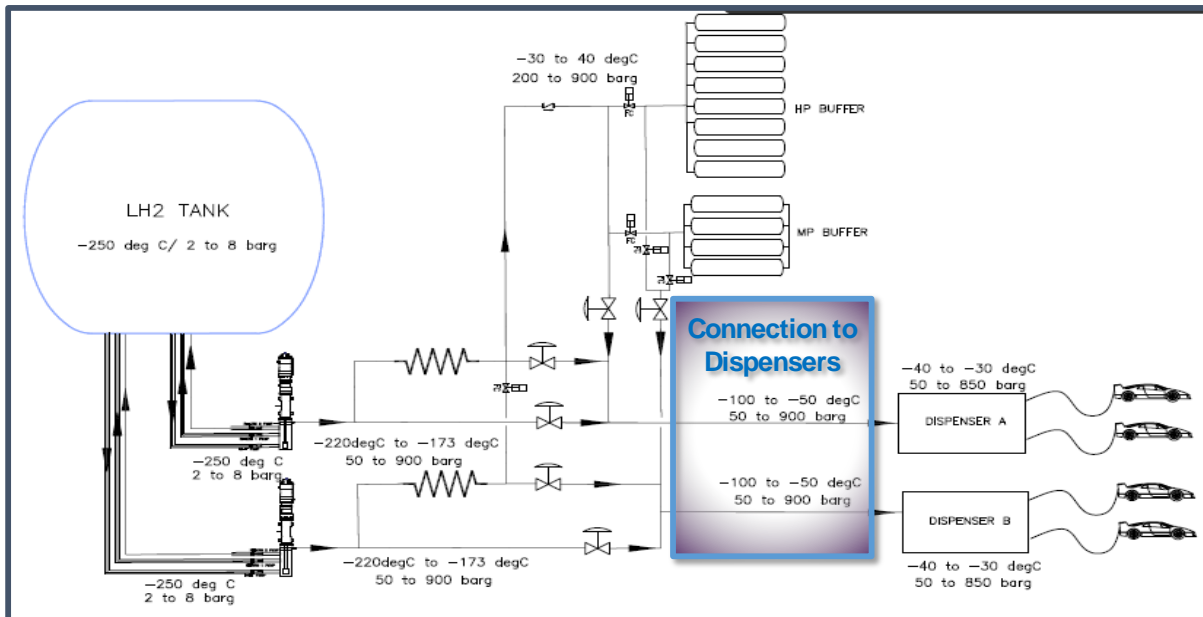


Figuur 26. Hogedrukbuffers. (A) 4 buffers van het type II in een bundel, (B) Verbindingen aan de uiteinden van de buffers, (C) Integratie van de bundels in de inbouwkast van het tankstation voor vloeibare waterstof.

Elke bundel heeft een gewicht van 3 t. De buffers zijn beschermd tegen brand dankzij specifieke isolatie.

Aansluiting op de verdeelzuil

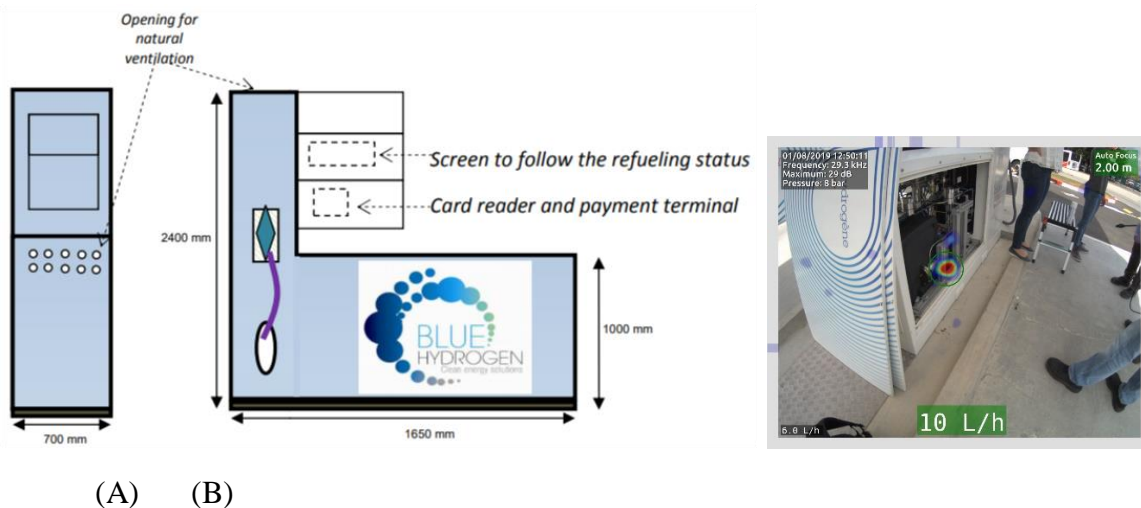
De aansluiting op de verdeelzuil in tankstations voor vloeibare waterstof wordt getoond in figuur 27.



Figuur 27. Proces van een tankstation op basis van LH₂ – Aansluiting op verdeelzuil.

De leidingen kunnen meer dan 60 m lang zijn. Deze moeten koud gehouden worden voor een succesvol tankproces. Om een antwoord te bieden op de opwarming werd een gecombineerde oplossing gevonden en werden specifieke slimme tankprocessen gecreëerd in functie van de variaties in de belasting van het station in de loop van de dag.

Verdeelzuil



Figuur 28. (A) Voornaamste elementen en indicatieve afmetingen verdeelzuil, (B) kleppenkast.

De verdeelzuil maakt een snelle, gemakkelijke en veilige aansluiting mogelijk tussen het tankstation en het voertuig voor het tanken. De configuratie van een typische verdeelzuil wordt getoond in figuur 28.

De verdeelzuil bestaat uit deelsystemen:

- Verdeling: zuil en kleppenpaneel met automatische vulklep, vulpistool en veiligheidskoppeling,
- Bediening: gebruikersinterface – automatische tankbediening – elektrisch paneel – toegangscontrole.

Zoals getoond in figuur 29 kunnen van alle technische kenmerken van de verdeelzuil de volgende worden vermeld:

- Het tanken is automatisch en vereist minimale handelingen van de klant (vulpistool + startknop),
- Het aansluitstuk op het voertuig of het vulpistool zijn gemakkelijk te gebruiken en goedgekeurd volgens de norm SAE J2600,
- Een veiligheidskoppeling zorgt voor een mechanische onderbreking van het tanken in het geval dat het voertuig wegrijdt van de verdeelzuil zonder het vulpistool te verwijderen,
- IR vulpistool (in overeenstemming met SAE J2799) voor een leiding van 700 bar.



(A)



(B)

Figuur 29. (A) Zicht van dubbele verdeelzuil, (B) vulpistool.

Met de dubbele verdeelzuil kan het tankstation gelijktijdig waterstof verdelen aan twee lichte voertuigen (2-10 kg).

De verdeeldruk volgens de soort verdeelzuil bedraagt:

- 350 bar voor auto met bereikvergroter,
- 700 bar voor brandstofcelauto,
- 350 bar voor bussen en vrachtwagens.

De maximale debieten zijn:

- 60 l voor het tanken van auto's,
- en 120 l voor het tanken van bussen en vrachtwagens met 350 bar.

De leveringstemperatuur gaat van -30 °C tot $+40\text{ °C}$ (tankprotocol: SAE J2601 H70 T40).

Met betrekking tot de veiligheid zijn de volgende elementen zeer dicht bij of in de verdeelzuil aanwezig:

- H₂-detector binnenin de verdeelzuil,
- Natuurlijke ventilatie van de verdeelzuil,
- Vlamdetector dichtbij de verdeelzuil,
- Afsluitknoppen voor noodsituatie.

4. Productie

4.1 Omzetting van methaan met stoom

Het proces van omzetting van methaan met stoom gebruikt stoom en een katalysator om waterstof te maken van een lichte koolwaterstof zoals methaan of propaan (zie figuur 30 en figuur 31). Het proces verwijdert de waterstof van de koolwaterstof en van het water dat nodig is om alle resulterende koolstof en zuurstof in CO₂ om te zetten.



Figuur 30. Installatie voor omzetting van methaan met stoom van Air Liquide.

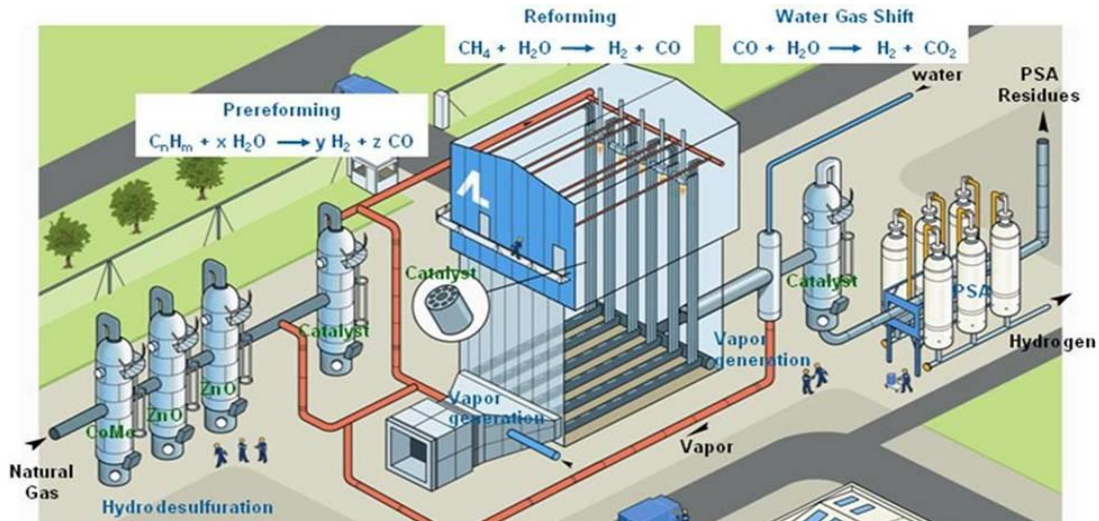
De twee voornaamste stappen van de omzetting zijn de volgende:

$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{H}_2 + \text{CO}$ - omzetting van methaan met stoom

- Endotherme reactie: $\Delta H^\circ = + 206 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$
- Katalytische reactie: Ni/Al₂O₃
- 20-30 bar, 900-1000 °C, enkele minuten

$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ - omzetting van koolstofmonoxide

- Licht exotherme reactie
- Katalytische reactie: CuO; Fe₂O₃; Cr₂O₃
- 20-30 bar, 400 °C (hoge temperatuur) / 200 °C (lage temperatuur)



Figuur 31. Schets van een installatie voor omzetting van methaan met stoom.

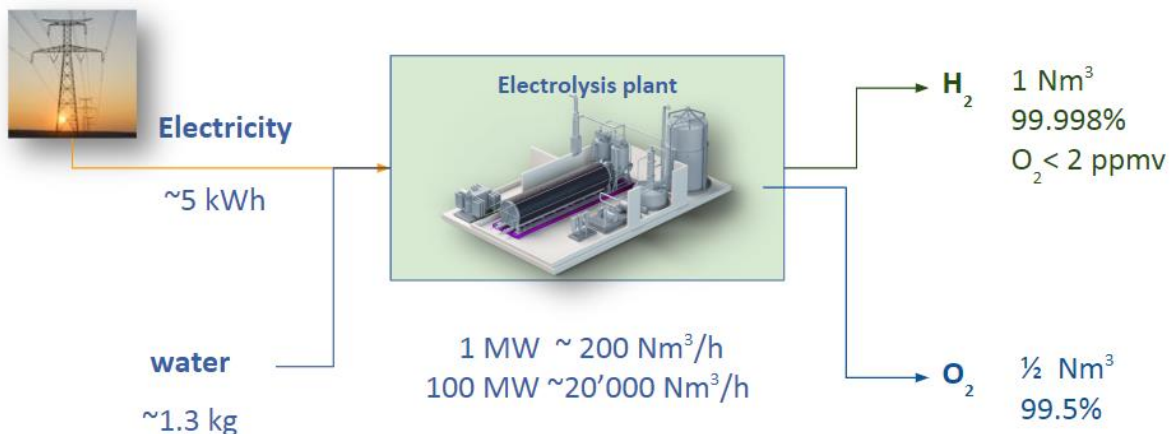
4.2 Elektrolyser

Bij de elektrolyse van water worden watermoleculen opgesplitst in hun bestanddelen (H₂ en O₂) door het doorlaten van elektrische stroom (zie figuur 32).



Figuur 32. Principe van het elektrolyseproces.

In figuur 33 wordt de volgende schets van het proces gegeven. Water wordt door middel van elektriciteit opgesplitst in waterstof en zuurstof. De zuiverheid van de gegenereerde waterstof is zeer hoog.



Figuur 33. Elektrolysesysteem.

Er zijn een aantal bestaande elektrolysetechnologieën met verschillende maturiteitsniveaus (hiernaar wordt ook verwezen met de term Technology Readiness Level (TRL)):

- Elektrolyser met een protonuitwisselingsmembraan (PEM) – TRL 8
- Alkaline-elektrolyser – TRL 9
- Elektrolyser met een vast oxide – TRL 6

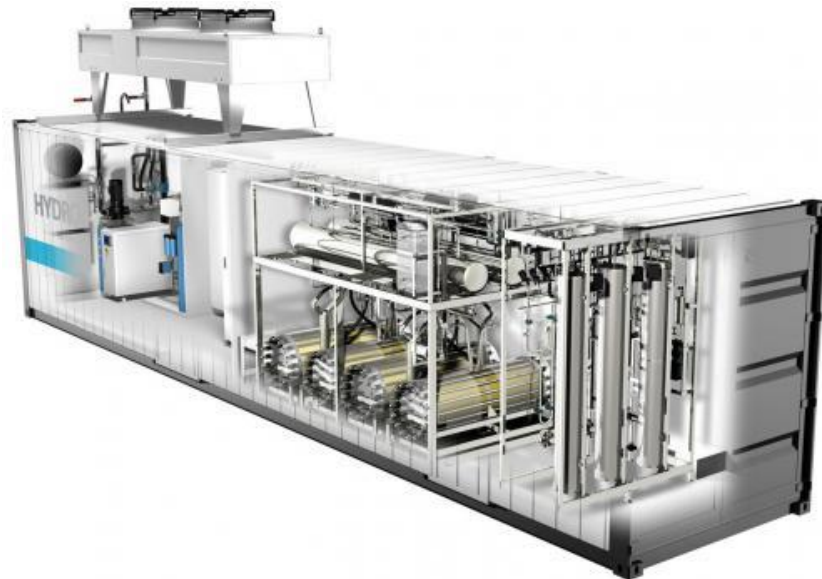
De voornaamste elektrolysertechnologieën zijn echter alkaline, op basis van vloeibare elektrolyten (kalium- of natriumhydroxide), en elektrolyzers met vaste elektrolyten op basis van polymeren, bv. PEM. De voornaamste reacties van verschillende elektrolyzers worden getoond in figuur 34.

	Proton Exchange Membrane	Alkaline Electrolysis	Solid Oxide Electrolysis
Cathode	$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$	$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$	$\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}^{2-}$
Anode	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	$2\text{HO}^- \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$	$\text{O}^{2-} \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{e}^-$
	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2$	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2$	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2$

Figuur 34. Voornaamste reacties voor verschillende elektrolysetechnologieën.

De voornaamste verschillen tussen deze technologieën zijn:

- De afscheider: diafragma of membraan.
- De elektrolyt: vloeibaar, vast, zuur of basisch.



Figuur 35. Schets van elektrolyserkast van Hydrogenics.

Behalve de elektrolyser vereist het ter plaatse in het tankstation genereren van waterstof door elektrolyse waterzuiveringssystemen en een zuiverings- en droogstelsel om de geproduceerde waterstof te behandelen. Veel elektrolyzers produceren waterstof bij een relatief lage druk, bv. 10 tot 25 bar, zodat verdere compressie nodig is om de druk te verhogen tot de druk vereist voor de opslag.

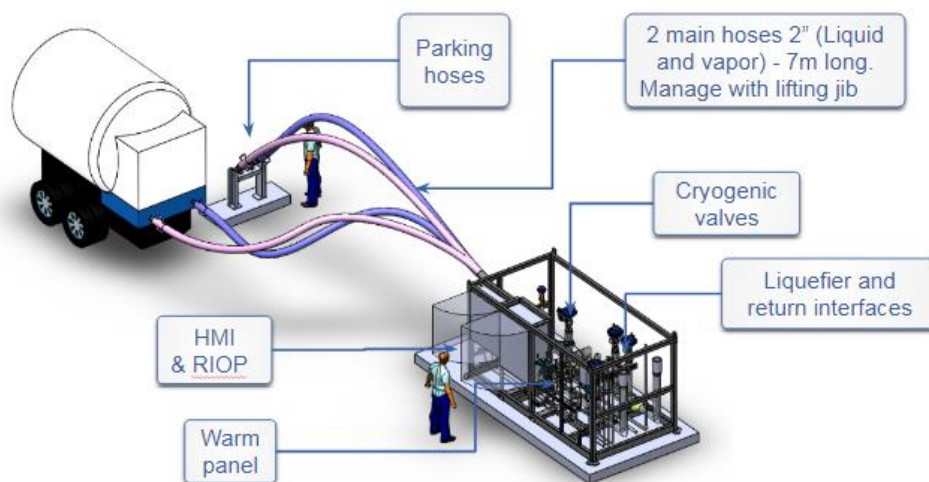
4.3 Condensator

Het vloeibaar maken van H_2 is een zeer energie-intensief proces. De minimale energie nodig voor het vloeibaar maken van waterstof is 3,92 kWh elektriciteit /kg H_2 of 0,12 kWh /kWh H_2 . Typische waarden voor het volledige proces liggen echter in het bereik van 8-14 kWh/kg voor relatief grote vloeibaarmakingsinstallaties. Het reduceren van het energieverbruik van vloeibaarmakingsinstallaties is een onderwerp dat in volle ontwikkeling is in de LH_2 -industrie (zie bijvoorbeeld het FCH JU-project IDEALHy (<https://www.idealhy.eu/>)).

De meeste installaties (11) bevinden zich in Noord-Amerika. In Europa zijn er installaties (3) in Frankrijk (zie figuur 36), Nederland en Duitsland met een totale capaciteit van 19 t.dag⁻¹. De op dit moment grootste installatie produceert 68 t/d (New Orleans, VS). De meest recent (2017) opgestarte vloeibaarmakingsinstallatie (10 t.dag⁻¹) is eigendom van Airgas (nu Air Liquide) in Calvert City (VS).



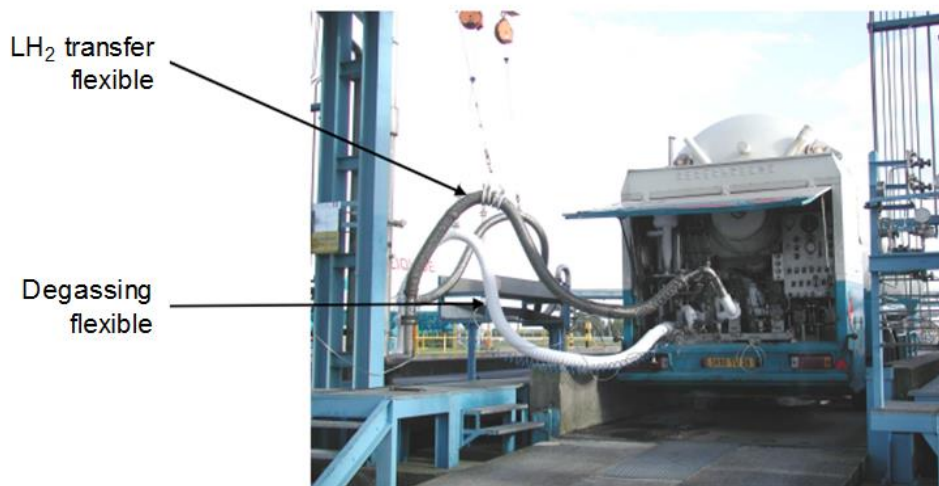
Figuur 36. LH_2 -tankstations van Air Liquide
(links: Little Town, VS; rechts: Bécancour, Canada).



Figuur 37. Generische ergonomie van laadkade voor het vullen van een oplegger met LH_2 .

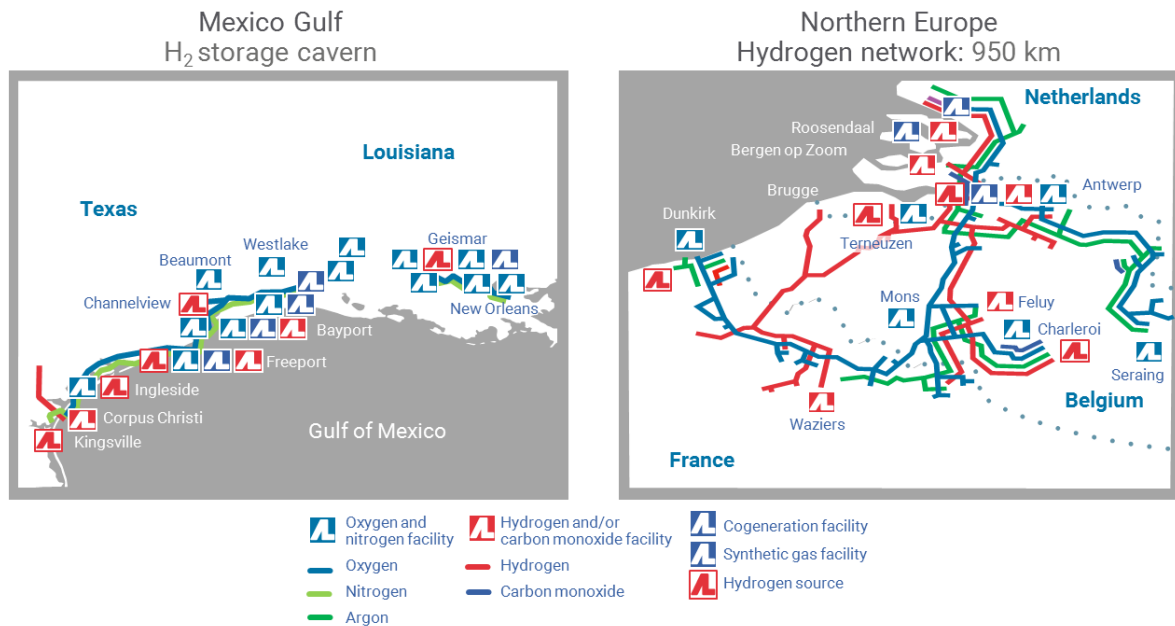
Figuur 37 toont de ergonomie van het vullen van een oplegger met LH₂. Er zijn twee methoden voor het overbrengen van LH₂ van het ene opslagsysteem naar het andere (bijvoorbeeld van een grote opslagtank naar een vrachtwagen of van een oplegger naar het opslagvat op de plaats van gebruik):

- drukopbouw (natuurlijke drukopbouw of vrijwillige verdamping van LH₂ via een kleine warmtewisselaar). Hierdoor wordt de druk in het "moedervat" groter dan die in het "dochtervat" en is het overbrengen van LH₂ gemakkelijk. De voornaamste nadelen van deze methode zijn een lange werktijd en een verhoging van de druk in het moedervat die het soms nodig maakt om druk af te laten;
- pompen in het moedervat met een geschikte centrifugale cryogene pomp voor het overbrengen. De voornaamste nadelen van deze methode zijn de kostprijs van de pomp en de nood aan frequent onderhoud van de pomp, voornamelijk door cavitatie (lage beschikbare NPSH - Net Positive Suction Head: verschil tussen vloeistofdruk en verzadigde dampspanning van de betrokken verbinding - door de lage dichtheid van LH₂).



Figuur 38. LH₂-oplegger tijdens overbrenging.

5. Pijpleidingen



Figuur 39. Bronnen van waterstof en netwerk van Air Liquide.

Er worden pijpleidingen gebruikt om grote hoeveelheden gasvormige verbindingen te transporteren. De druk in de pijpleidingen kan variëren afhankelijk van de eigenschappen van het getransporteerde gas en de noden van de klanten. Voor het transport van waterstof kan de druk in de pijpleidingen oplopen tot 100 bar. Figuur 39 toont het netwerk van pijpleidingen en productie-installaties van Air Liquide voor waterstof, syngas en andere gassen in de VS en Noord-Europa.

Zoals geïllustreerd in figuur 39 zijn deze pijpleidingen relatief dicht bij de productie-installaties geïnstalleerd. Afhankelijk van de afstand tussen de productie-installatie en de klant kunnen op het netwerk van pijpleidingen inrichtingen nodig zijn voor het opvoeren van de druk om de in de pijpleiding vereiste druk in stand te houden. Het is belangrijk op te merken dat slechts weinig tankstations rechtstreeks op pijpleidingen aangesloten zijn. Opleggers zijn het voornaamste vervoermiddel. In sommige gevallen kan de productie ter plaatse interessant zijn.

6. Veiligheidsinrichtingen in waterstoftankstations en andere infrastructuur

(Wat/waar/waarvoor/normale en abnormale (nood-) werking/te doen – te vermijden tijdens interventie)

Tabel 3. Veiligheidsinrichtingen voor elektrolyser.

Wat	Waar	Waarvoor
Procesbewaking (druk, temperatuur)	Algemeen	Detecteren van lekken en storingen
ATEX-gecertificeerde uitrusting	In de inbouwkast, die een besloten ruimte is waar lekken kunnen optreden	Vermijden van ontstekingsbronnen
Detectie van H ₂	In de inbouwkast	Activeren van waarschuwing en afsluitklep indien nodig in geval van een accidenteel lek
Vlamdetector (UV/IR)	Buiten de inbouwkast	Activeren van waarschuwing en afsluitklep indien nodig bij accidentele ontsteking van vrijgekomen waterstof

Tabel 4. Veiligheidsinrichtingen voor oplegger met gasvormige waterstof.

Wat	Waar	Waarvoor
Isolatiekleppen	Cilinders	Volgens het ADR moeten tijdens het transport alle opslagvaten afgesloten zijn met een klep
Thermisch geactiveerde overdrukinrichting	Specifiek bij opleggers met cilinders van het type IV Op het dak van de oplegger geplaatst en naar boven gericht	Vermijden van het onder druk komen en barsten van de cilinder bij brand NB: niet verplicht maar geïnstalleerd op sommige opleggers met een grote capaciteit met cilinders van het type IV
Lekdichtheidstest	Opslag in de oplegger	Vermijden van grote lekken na bijtanken van oplegger

Tabel 5. Veiligheidsinrichtingen voor pijpleidingen voor waterstof onder hoge druk.

Wat	Waar	Waarvoor
Drukbewaking	Pijpleiding	Detecteren van grote lekken in het netwerk

Periodieke controle	Pijpleiding	Detecteren van gebreken in de deklaag en vermijden van grote lekken
Kathodische bescherming	Pijpleiding	Vermijden van corrosie van de pijpleiding

Tabel 6. Veiligheidsinrichtingen van tankstations voor gasvormige 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 -toevoerkleppen 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

Tabel 7. Veiligheidsinrichtingen voor opleggers met vloeibare waterstof.

Wat	Waar	Waarvoor
Twee veiligheidskleppen waarvan minstens één pneumatische	Tank	Volgens het ADR moeten tijdens het transport alle opslagvaten afgesloten zijn met een klep
Wegveiligheidsklep	Tank	Overdruk aflaten
Breekplaat	Tank	Vermijden van het barsten van het opslagvat bij een stijging van de druk
Overdruk-inrichting	Tank	Het risico op verdamping beperken

Tabel 8. Veiligheidsinrichtingen voor opslagvaten voor vloeibare waterstof.

Wat	Waar	Waarvoor
Druk- en temperatuurbewaking	Tank	Detecteren van gebreken van de isolatie
Niveaubewaking	Tank	Vermijden van te vol vullen
Breekplaat	Tank	Vermijden van het barsten van het opslagvat bij een stijging van de druk
Overdruk-inrichting	Tank	Het risico op verdamping beperken

Dankwoord

Het HyResponse-project wordt hier vermeld omdat het hier voorgestelde materiaal gebaseerd is op de originele lessen van HyResponse.

Referenties

1. Hydrogen refueling station analysis model (HRSAM). Argonne National Laboratory. <https://hdsam.es.anl.gov/index.php?content=hrsam> [access on 26.05.2021]
2. Gaseous hydrogen – Fuelling stations. Part 1: General requirements. BSI Standards Publication. BS ISO 19880-1: 2020.
3. Reddi K, Elgowainy A, Rustagi N, Gupta E. Impact of hydrogen refueling configurations and market parameters on the refueling cost of hydrogen. *Int J Hydrogen Energy* 2017;42:21855-21865.
4. Reddi K, Elgowainy A, Rustagi N, Gupta E. Impact of hydrogen SAE J2601 fueling methods on fueling time of light-duty fuel cell electric vehicles. *Int J Hydrogen Energy* 2017;42:16675-16685.
5. SAE (Society of Automotive Engineers). Fueling protocols for light duty gaseous hydrogen surface vehicles. *Surface Vehicle Standard. J2601*. July 2014.
6. Elgowainy A, Reddi K, Sutherland E, Joseck F. Tube-trailer consolidation strategy for reducing hydrogen refueling station costs. *Int J Hydrogen Energy* 2014;39:20197-20206.
7. NIST (National Institute of Standards and Technology). Thermophysical properties of fluid systems. 2016. Retrieved from: <http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>. [Accessed 26 May 2021].