



Evropský program školení školitelů pro zásahové jednotky

Přednáška 12

Vodíkové čerpací stanice a infrastruktura

ÚROVEŇ I

Hasič

Informace uvedené v této přednášce jsou určeny pro úroveň **Hasič** a vyšší.

Toto téma je vhodné i pro úrovně II (velitel posádky) až IV (důstojník specialista).

Tato přednáška je součástí balíčku školicích materiálů s materiály na úrovních I–IV: Hasič, velitel posádky, velitel zásahu a důstojník specialista. Viz úvod k přednášce týkající se kompetencí a očekávaných výsledků studia

Poznámka: tyto materiály jsou majetkem konsorcia HyResponder a měly by být podle toho uváděny.





Upozornění

Navzdory pečlivosti, která byla věnována přípravě tohoto dokumentu, platí následující odmítnutí odpovědnosti: informace v tomto dokumentu jsou poskytovány, jak stojí a leží, a jejich autoři neposkytují jakoukoli záruku, že tyto informace jsou vhodné pro jakýkoli konkrétní účel. Uživatel využívá tyto informace na vlastní nebezpečí a odpovědnost.

Dokument vyjadřuje pouze názory autorů. Společný podnik pro palivové články a vodík a Evropská unie nenesou žádnou odpovědnost za případné použití informací uvedených v tomto dokumentu.

Poděkování

Projekt byl financován Společným podnikem pro palivové články a vodík 2 na základě grantové dohody č. 875089. Společný podnik získává podporu z programu Evropské unie pro výzkum a inovace Horizont 2020 a z Velké Británie, Francie, Rakouska, Belgie, Španělska, Německa, Itálie, Česka, Švýcarska a Norska.

Souhrn

Tato přednáška poskytuje podrobné informace o čerpacích stanicích na plynný a kapalný vodík (LHRS) a související infrastruktuře pro vodíkovou mobilitu. Pro dobré pochopení fungování systému LHRS jsou zahrnuty hlavní prvky dodavatelského řetězce kapalného vodíku od jeho výroby až po koncového spotřebitele. Přednáška obsahuje i popis problémů s kapalným vodíkem a možných rizik.

Klíčová slova

Kapalný a plynný vodík, čerpací stanice, kryogenní podmínky, proces, bezpečnostní prvky.

Obsah

Souhrn.....	3
Klíčová slova.....	3
1. Cílové publikum.....	5
1.1 Popis úlohy: Hasič.....	5
1.2 Úroveň odborné způsobilosti: Hasič.....	5
1.3 Předchozí učení: Hasič.....	5
2. Úvod a cíle.....	5
3. Představení čerpací stanice.....	7
3.1 Čerpací stanice na plyný vodík (GHRS).....	7
3.2 Čerpací stanice na zkapalněný vodík (LHRS).....	8
3.3 Srovnání čerpacích stanic na zkapalněný a plyný vodík.....	9
3.4 Čerpací stanice na plyný vodík – vybavení.....	11
3.4.1 Vyrovnávací zásobníky ke skladování plyného vodíku.....	11
3.4.2 Vodíkový kompresor.....	12
3.4.3 Předchlazovací zařízení.....	13
3.4.4 Výdej vodíku.....	16
3.5 Čerpací stanice na bázi skladování zkapalněného vodíku – vybavení.....	19
3.5.1 Skladování kapalného vodíku.....	21
3.5.2 Kryogenní čerpadlo.....	23
3.5.3 Výparník LH ₂	24
3.5.4 Panel s ventily.....	26
3.5.5 Vyrovnávací zásobníky na plyný vodík.....	27
3.5.6 Připojení k výdejnímu stojanu.....	28
3.5.7 Výdejní stojan.....	29
4. Výroba.....	30
4.1 Parní reformování metanu.....	30
4.2 Elektrolyzér.....	32
4.3 Zkapalňovací zařízení.....	34
5. Potrubí.....	36
6. Bezpečnostní prvky v HRS a další infrastruktura.....	37
Poděkování.....	40
Literatura a odkazy.....	40

1. Cílové publikum

Informace uvedené v této přednášce jsou určeny pro ÚROVEŇ 1: Hasič. K dispozici jsou také přednášky na úrovních II, III a IV: velitel posádky, velitel zásahu a důstojník specialista.

Níže je uveden popis úlohy, úrovně odborné způsobilosti a očekávané znalosti na úrovni velitele posádky.

1.1 Popis úlohy: Hasič

Hasič je zodpovědný a očekává se, že bude schopen bezpečně provádět zásahy v osobních ochranných prostředcích, včetně dýchacích přístrojů, za použití poskytnutého vybavení, jako jsou vozidla, žebříky, hadice, hasicí přístroje, komunikační a záchranné prostředky, a to za každých klimatických podmínek, v oblastech a v nouzových situacích, u nichž lze důvodně předpokládat, že vyžadují zásah.

1.2 Úroveň odborné způsobilosti: Hasič

Školení v bezpečném a správném používání OOP, BA a dalšího vybavení, které se očekává, musí být podpořeno odpovídajícími znalostmi a praxí. Chování, které zajistí bezpečnost hasiče a bezpečnost ostatních kolegů, by mělo být popsáno ve standardních operačních postupech (SOP). Je vyžadována praktická schopnost dynamicky vyhodnocovat rizika pro vlastní bezpečnost a bezpečnost ostatních.

1.3 Předchozí učení: Hasič

EQF 2 Základní faktické znalosti v oboru práce nebo studia. Základní kognitivní a praktické dovednosti potřebné k využívání relevantních informací při plnění úkolů a řešení běžných problémů s využitím jednoduchých pravidel a nástrojů. Práce nebo studium pod dohledem s určitou mírou samostatnosti.

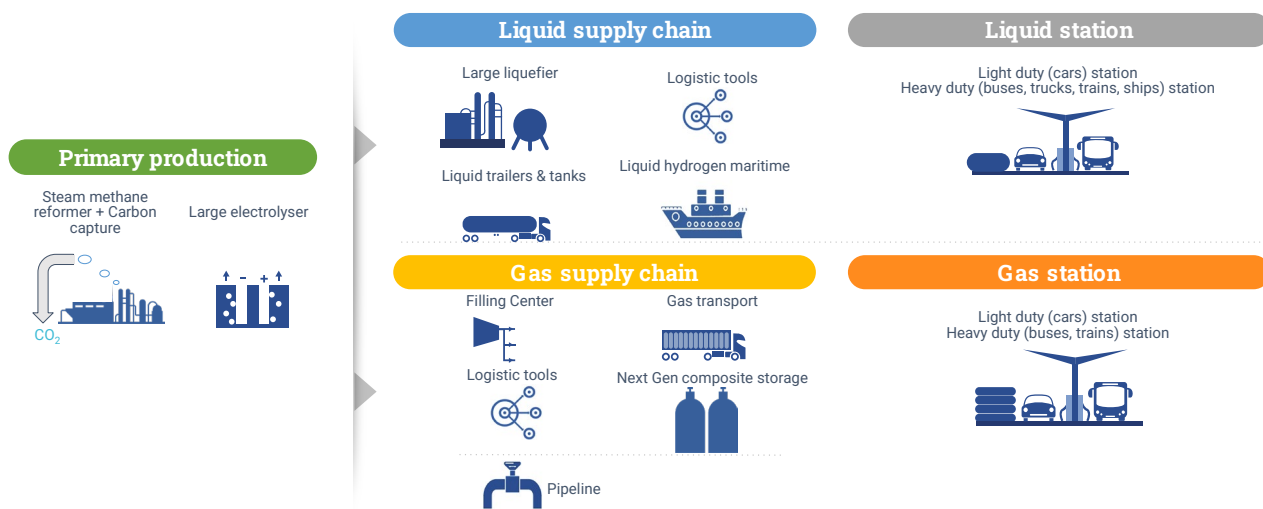
2. Úvod a cíle

Cílem dokumentu je představit čerpací stanice na plynný vodík (GHRS) a čerpací stanice na kapalný vodík (LHRS) a související infrastrukturu pro vodíkovou mobilitu. V této přednášce je provedeno porovnání mezi GHRS a LHRS a jsou popsány součásti LHRS, aby bylo možné dobře pochopit fungování LHRS, její problémy a potenciální rizika.

První otázka před čerpací stanice na kapalný vodík (LHRS) by mohla znít: „proč používat kapalný vodík?“ Zpětná vazba od HRS ukázala, že hlavní problémy jsou následující:

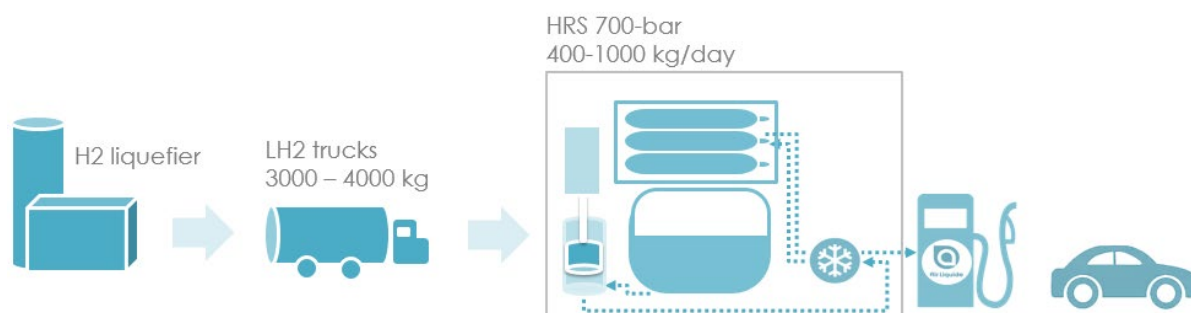
- nákladný dodavatelský řetězec velkých objemů plynného vodíku,
- omezená denní kapacita.

Vzhledem k tomu, že LH₂ je mnohem hustší než GH₂, existuje zájem vyvíjet nové produkty s cílem zvýšit kapacitu stanic a snížit TCO (celkové náklady na vlastnictví) použitím kapalného vodíku coby vstupní suroviny. Obrázek 1 ukazuje různé prvky dodavatelského řetězce vodíku – kapalného a plynného – od výroby až po jeho využití k vodíkové mobilitě.



Obrázek 1. Dodavatelský řetězec vodíku od výroby až po využití H₂ k mobilitě.

Figure 2 obsahuje zjednodušené schéma dodavatelského řetězce kapalného vodíku, které ukazuje, že po výrobě vodíku je třeba využít zkapalňovací zařízení, které zkapalní vodík při kryogenní teplotě. Následuje přeprava LH₂ návěsem (s kapacitou až 4 t H₂) do LHRS, kde se přečerpání z návěsu do nádrže LHRS provádí pomocí malého odpařovače. Podrobnosti o těchto jednotlivých úkonech a potřebném vybavení jsou právě předmětem této přednášky.



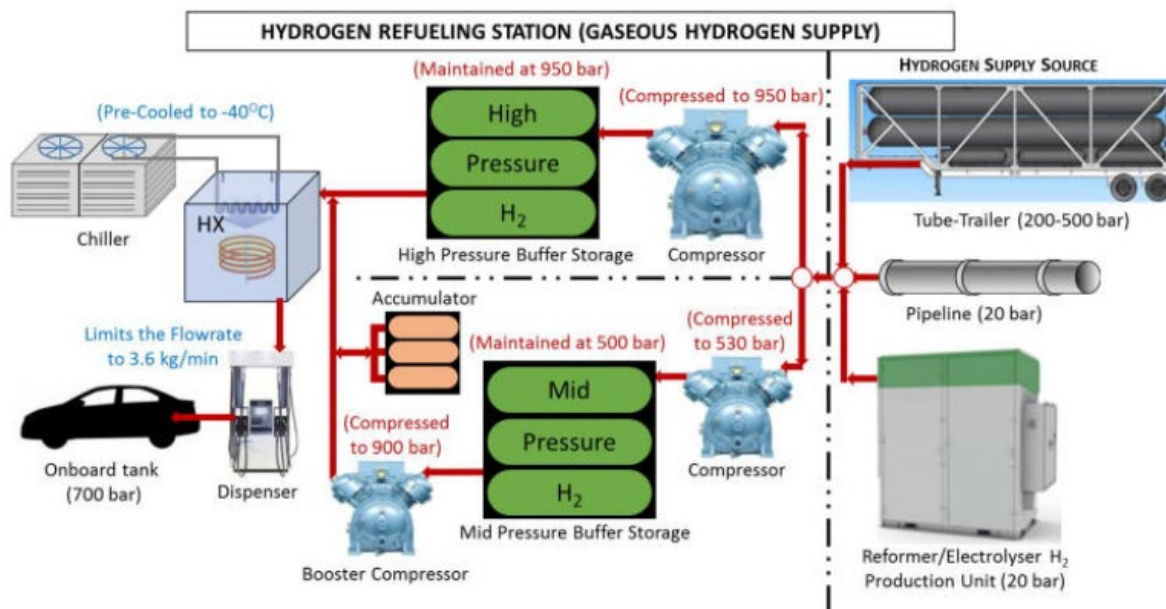
Obrázek 2. Zaměření na dodávku kapalného vodíku do vodíkových čerpacích stanic.

Na konci této přednášky budou členové zásahové jednotky / školitelé disponovat potřebnými znalostmi těchto tematických okruhů:

- vodíkový dodavatelský řetězec – od výroby vodíku až po jeho spotřebu,
- uspořádání a provoz GHRS a LHRS,
- požadované vybavení GHRS a LHRS,
- metody výroby vodíku,
- bezpečnostní prvky v systémech GHRS a LHRS a další infrastruktura.

3. Představení čerpací stanice

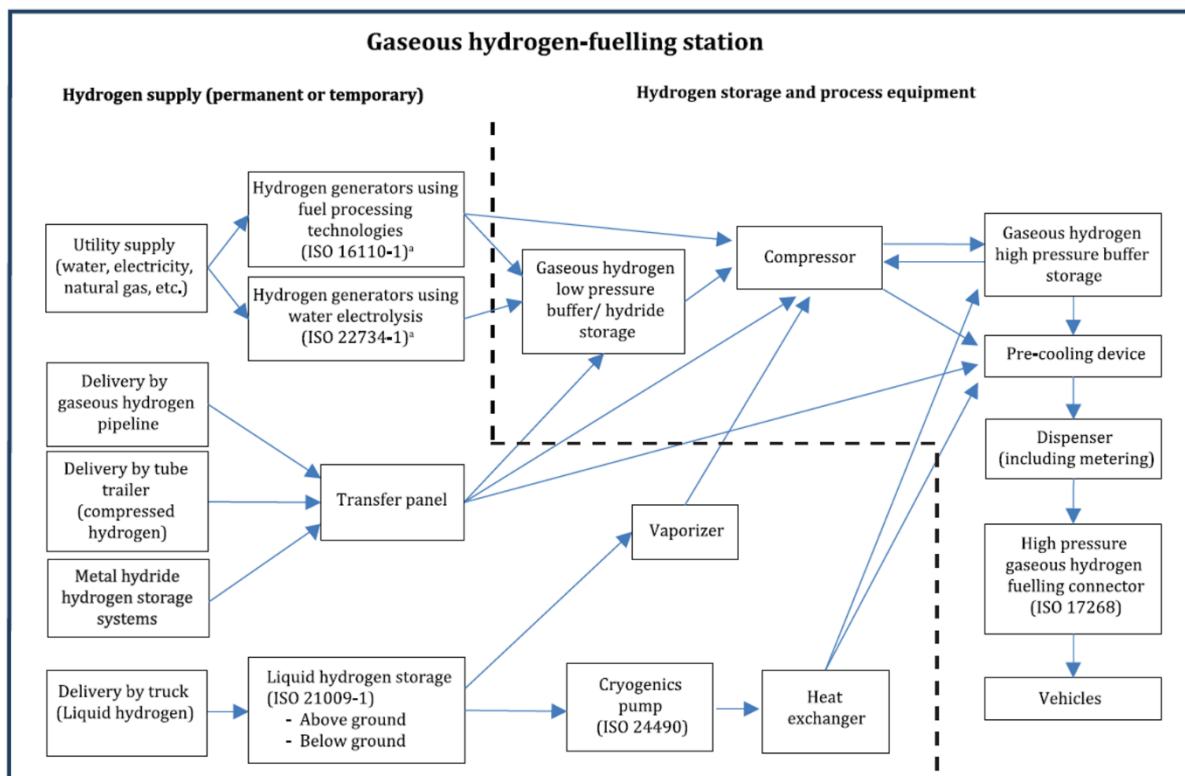
3.1 Čerpací stanice na plynný vodík (GHRS)



Obrázek 3. Obrázek s příkladem čerpací stanice na plynný vodík (GHRS) [1]

Obecně se plynný vodík z cisterny do palubní přečerpává tak, že se nejprve stlačí, aby dosáhl tlaku 950 bar ve vysokotlakém vyrovnávacím zásobníku nebo 500 bar ve středotlakém vyrovnávacím zásobníku. Poté prochází tepelným výměníkem a dostává se do výdejního stojanu pro doplňování paliva do vozidel s palivovými články (FCV). Jak je znázorněno na obrázku 3, typický systém GHRS obsahuje vyrovnávací nádrže na plynný vodík, vodíkové kompresory, předchlazovací zařízení a výdejní zařízení. Minimální požadavky na konstrukci, instalaci, uvedení do provozu, provoz, kontrolu, údržbu, bezpečnost a případně výkon veřejných i neveřejných čerpacích stanic na plynný vodík (GHRS) pro lehká silniční vozidla (např. FCV), jsou uvedeny v normě ISO 19880-1:200 (E) [2], kterou se stanoví požadavky na čerpací stanice GHRS. Mnohé z obecných požadavků se vztahují i na čerpací stanice pro jiné vodíkové aplikace, mimo jiné:

- čerpací stanice pro motocykly, vysokozdvížné vozíky, tramvaje, vlaky, říční a námořní plavidla,
- čerpací stanice s výdejem v interiéru,
- použití v obytných budovách pro pohon pozemních vozidel,
- mobilní čerpací stanice,
- neveřejné, ukázkové čerpací stanice.



a – Může obsahovat vyrovnávací zásobník (nebo akumulátor) pro tlumení nebo regulaci průtoku na sání kompresoru.

Obrázek 4. Příklad typických součástí čerpací stanice, včetně zásobování vodíkem [2]

Tato přednáška se zaměřuje na zařízení pro skladování a zpracování vodíku (na obrázku 4 na pravé straně od čárkované čáry), včetně nízkotlakého a vysokotlakého zásobníku na plynný vodík/hydrid, kompresoru, předchlazovacího zařízení, výdejního zařízení (včetně měřidla), vysokotlakého konektoru pro tankování plynného vodíku a samotných vozidel. Pokyny k vysokotlakému konektoru k výdeji plynného vodíku jsou uvedeny v normě ISO 17268.

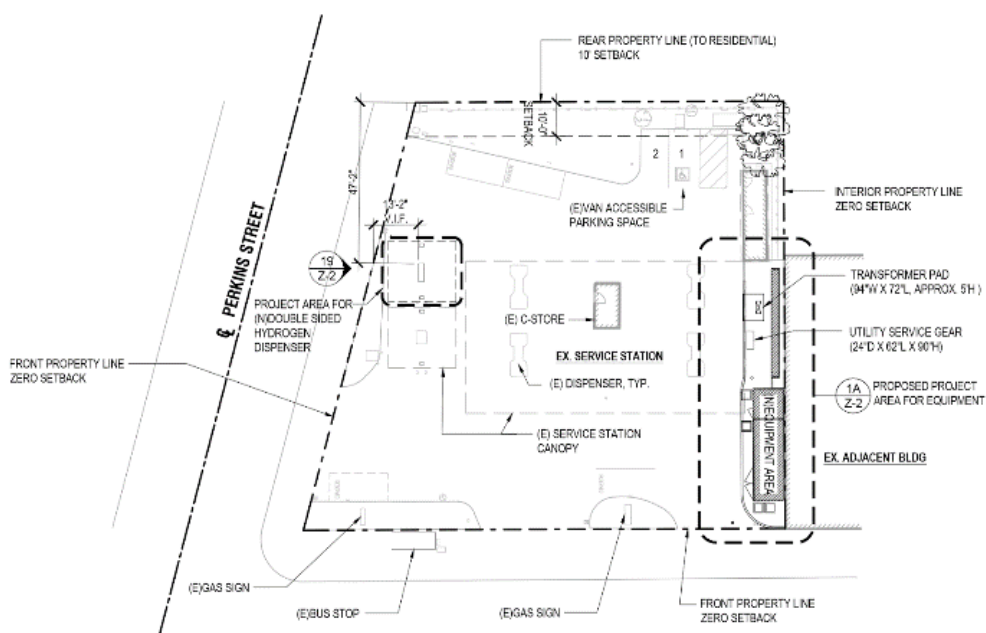
3.2 Čerpací stanice na zkvalněný vodík (LHRS)

Než podrobněji představíme hlavní součásti čerpací stanice na zkvalněný vodík, bude zajímavé ukázat stávající a provozovanou stanici. Obrázek 5 obsahuje příklad čerpací stanice společnosti Linde na zkvalněný vodík v Oaklandu (USA).



Obrázek 5. LHRS společnosti Linde v Oaklandu.

Uspořádání je uvedeno na schématu: obrázek 6. Dle něj lze odvodit potřebnou podlahovou plochu celého zařízení.

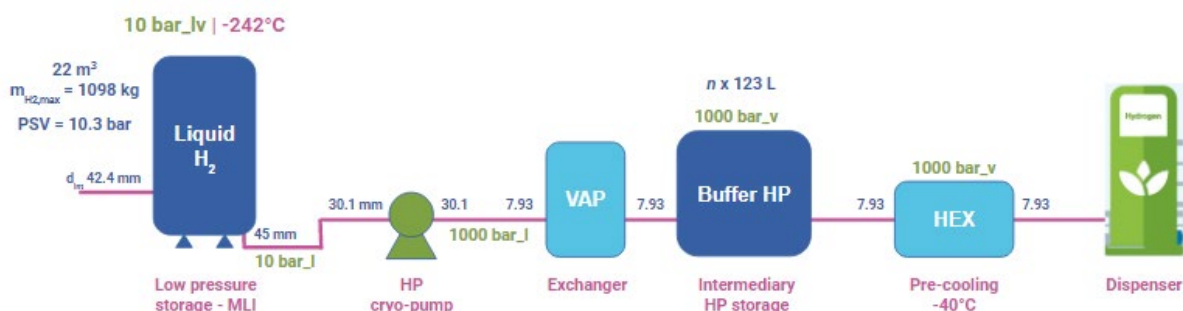


Obrázek 6. Uspořádání LHRS společnosti Linde.

3.3 Srovnání čerpacích stanic na zkapalněný a plyný vodík

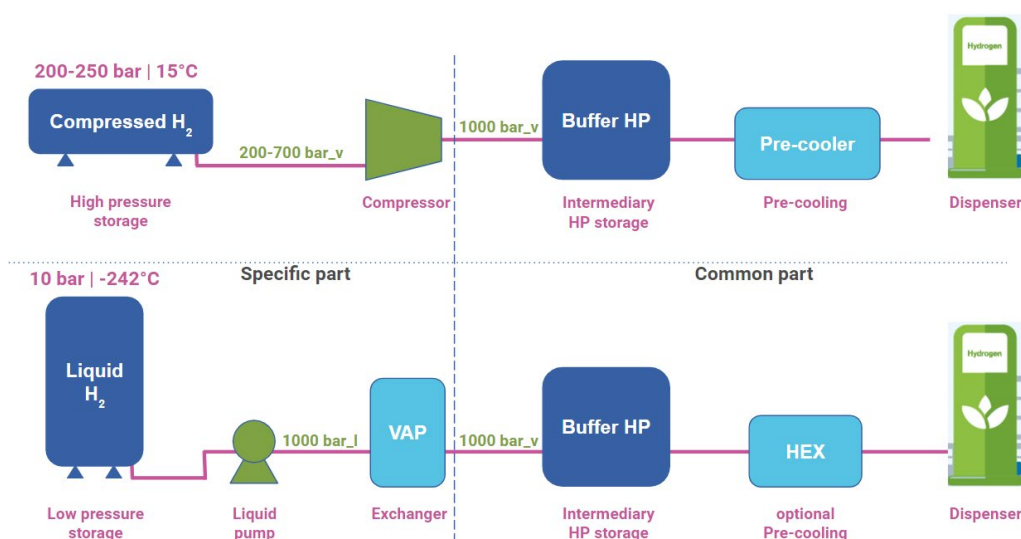
Čerpací stanice na LH₂ se skládá zejména z těchto součástí:

- nádrž na LH₂ (cca 20 m³ – 1 000 kg H₂) s maximálním provozním tlakem 10,3 bar,
- izolované technologické potrubí ze dna zásobníku k čerpadlu LH₂, které žene LH₂ ze zásobníku do odpařovače; toto zařízení umožňuje čerpat LH₂ až do tlaku 1 000 bar (100 MPa),
- ohřívač (pojmenovaný VAP: horký olej, elektrický pro ohřev vodíku při tlaku 1 000 bar (100 MPa)),
- vyrovnávací zásobníky 1 000 bar (jednotky m³); tyto vyrovnávací zásobníky jsou obvykle svazky typu I nebo II (tj. kovové válce nebo dlouhé kovové trubky).



Obrázek 7. Zjednodušené schéma čerpací stanice na kapalný vodík.

Všechny ostatní části (např. výdejní stojan, plnicí hadice atd.) čerpací stanice jsou podobné klasické plynové čerpací stanici (viz srovnání na obrázku 8).



Obrázek 8. Zjednodušené srovnání čerpacích stanic na plyný a kapalný vodík. Nahoře čerpací stanice na plyný vodík, dole čerpací stanice na kapalný vodík.

Níže uvedená tabulka shrnuje hlavní rozdíly mezi LHRS a HRS.

Tabulka 1. Srovnání LHRS a HRS

Téma	LHRS	HRS
Skladování	Kapalný vodík, kryogenní teplota (-240 °C), nízký tlak (do 10 bar)	Plyný vodík, okolní teplota, vysoký tlak (200 až 500 bar)
Doplňování čerpací stanice	Přenos kapalného vodíku z cisterny na návěsu do skladovací nádrže	Převážně výměna (= plná za prázdnou)
Tlakování vodíku	Kapalinové čerpadlo a odpařovač potřebné k dodávce plyného H ₂	Kompresor

3.4 Čerpací stanice na plynný vodík – vybavení

3.4.1 Vyrovnávací zásobníky ke skladování plynného vodíku

Vysokotlaké nebo nízkotlaké vyrovnávací zásobníky jsou určeny ke skladování stlačeného vodíku, který může být umístěn mezi generátorem vodíku a kompresorem pro rovnoměrný tok plynu do kompresoru, nebo mezi kompresorem a výdejním systémem pro akumulaci zásob stlačeného plynu pro tankování vozidel.

Zásobníky pro skladování plynného vodíku by měly být vyrobeny v souladu s běžně používanou národní/místní normou a měly by být navrženy na předpokládanou životnost. Vyrovnávací skladovací zásobníky mohou obsahovat vodík absorbovaný v systému skladování hydridů kovů.

Pokud jsou propojeny vyrovnávací skladovací zásobníky s různým konstrukčním tlakem, musí být chráněny tak, aby zásobníky dimenzované na nízký tlak nemohly být v důsledku poruchy přetlakovány.

Konstrukce vyrovnávacích tlakových zásobníků musí být vybavena vhodnými prostředky pro prevenci selhání v případě požáru, pokud to posouzení rizik považuje za nezbytné. Vhodné metody prevence mohou obsahovat jednu nebo více z následujících možností:

- systémy ventilace skladovaného produktu, například zařízení TPRD,
- tepelné stínění nebo protipožární stěna,
- nemožnost hromadění hořlavé kapaliny pod nádobou,
- pevná ochrana požární vodou.

Je třeba pamatovat, že kompozitní skladovací zásobníky mohou vyžadovat vyšší úroveň ochrany než kovové zásobníky. Nádoby musí být připevněny k základu, přičemž základ a nosné konstrukce musí být schopny odolat silám, které lze v daném místě předpokládat. Při návrhu uspořádání zásobníků a potrubí pro skladování plynného vodíku je třeba zohlednit riziko přímého dopadu tryskových plamenů z možných míst úniku nebo ventilačních otvorů na sousedící nádobu. Posouzení rizik stanice musí zahrnovat úvahy o zmírnění následků deflagrace až detonace (přechod DDT) v úseku se stlačeným vodíkem. Každá skupina vyrovnávacích zásobníků, kterou lze izolovat ručními nebo automatickými ventily, by měla být vybavena vlastní sadou bezpečnostních zařízení.

Upozorňujeme, že pokud je vodík dodáván v přepravních lahvích, na trubkových návěsech nebo víceprvkových zásobnících plynu (MEGC)¹, bezpečnostní odlehčovací zařízení uvnitř lahve/skupiny nádob není vždy jejich součástí. Pokud jsou však přepravní lahve, trubkové

¹ multimodální sestava lahví, trubek nebo svazků lahví, které jsou vzájemně propojeny potrubím a sestaveny v rámcové konstrukci, včetně obslužného zařízení a konstrukčního vybavení nezbytného k přepravě plynů.



návěsy nebo MEGC začleněny do čerpací stanice, měl by každý kompresní systém na místě, který může stlačovat vodík do takového systému, po příslušném posouzení rizik, jež se zabývá potenciálně odlišnými konstrukčními aspekty, zejména cyklickým tlakem, obsahovat soubor bezpečnostních zařízení na ochranu zásobních trubek proti nadměrnému tlaku.

3.4.2 Vodíkový kompresor

Každý kompresor musí být vybaven přetlakovým zařízením nebo rovnocenným bezpečnostním systémem, který předchází vzniku přetlaku. Kompresor a případné pomocné systémy musí být v souladu s použitím v potrubním systému. Měla by být zajištěna dostatečná kompenzace případných vibrací nebo pohybu kompresoru, aby nedošlo k poškození potrubních systémů a k únikům. Kompresory by měly být konstruovány zejména s ohledem na vodíkový provoz a s cílem minimalizovat vnášení nečistot. Na vstupu do kompresoru se musí vždy předcházet pronikání vzduchu, aby se zabránilo vzniku hořlavých směsí. Je třeba posoudit rizika spojená s instalací, údržbou a provozem kompresorů a definovat a zavést protipatření na ochranu zařízení a prevenci vzniku potenciálně nebezpečných událostí. Každý kompresor by měl být vybaven prostředky pro úplné odstranění tlaku ze všech částí systému pro účely údržby. Pokud se při přezkoumání systému kompresoru pro zmírnění rizik doporučí použití profouknutí inertním plynem, musí být k dispozici prostředky pro profouknutí kompresoru inertním plynem před údržbou, včetně písemného postupu, který umožní účinné profouknutí.

Mezi propojenými systémy v čerpací stanici vodíku a mezi potrubím pro přívod vodíkového plynu a sacím potrubím kompresoru by měla být zajištěna dostatečná kompenzace vibrací a pohybu, aby se předešlo únikům způsobeným vibracemi a pohybem. Jakékoli vibrace, které mohou ovlivnit pevnost potrubí, armatur a součástí, se nesmí přenášet na potrubí.

Musí být nainstalovány bezpečnostní řídicí prvky, které zajistí, že úroveň teploty a tlaku nepřekročí nebo neklesnou pod stanovené provozní úrovně, například pro vstupní tlak, teplotu a tlak na výtlaku, přičemž řídicí systém dle potřeby spustí poplach a/nebo vypnutí, případně vhodná náhradní opatření. Kromě přístrojů a kontrolních prvků, které se běžně používají u systémů stlačování plynu, je třeba u vodíku zvážit následující specifická ochranná opatření.

Vždy je třeba předejít pronikání vzduchu na vstupu do kompresoru, aby se zabránilo vzniku hořlavé směsi. Pokud tato podmínka není splněna, kompresor se vypne. Například vstupní tlak by měl být monitorován indikátorem tlaku/spínačem, přičemž řídicí systém by měl dle potřeby aktivovat alarm a/nebo vypnutí, aby se předešlo vzniku podtlaku ve vstupním potrubí s následným vniknutím vzduchu. Tento indikátor tlaku/spínač by měl způsobit vypnutí kompresoru dříve, než vstupní tlak dosáhne atmosférického tlaku.

Pokud existuje možnost kontaminace kyslíkem za běžných provozních podmínek v důsledku nízkého vstupního tlaku, lze při posuzování rizik coby zmírňující opatření zvážit měření obsahu kyslíku ve vodíku. Pokud například obsah kyslíku dosáhne objemového podílu 1 %, kompresor se může automaticky vypnout. Kritickým situacím lze předcházet i alternativními prostředky.



Teplota za posledním stupněm komprese nebo teplota za chladičem, je-li v soustavě použit, se sleduje pomocí indikátoru teploty/spínače, přičemž řídicí systém při předem stanovené maximální teplotě aktivuje poplach a/nebo vypnutí.

Tlak za posledním stupni komprese musí být monitorován indikátorem/spínačem, přičemž řídicí systém aktivuje poplach a/nebo vypnutí, případně zahájí alternativní akce, jako je například oběh média, při předem stanoveném maximálním tlaku, který je nižší než tlak ochrany proti přetlaku.

Systém chladicí vody by měl být monitorován indikátorem/spínačem, přičemž řídicí systém by měl v případě nízkého tlaku, průtoku nebo vysoké teploty aktivovat alarm a/nebo vypnout systém.

Pokud jsou motor a pomocná zařízení profukována inertním plynem nebo chráněny přetlakovým stlačeným vzduchem nebo inertním plynem, musí být nízký tlak/průtok signalizován poplachem, který musí být zařízen tak, aby vypnul motor a pomocné zařízení podle požadavků normy IEC 60079-2.

Pokud je kliková skříň kompresoru profukována inertním plynem nebo chráněna přetlakovým stlačeným vzduchem nebo inertním plynem, musí být nízký tlak/průtok signalizován poplachem, který musí být zařízen tak, aby způsobil vypnutí kompresoru.

3.4.3 Předchlazovací zařízení

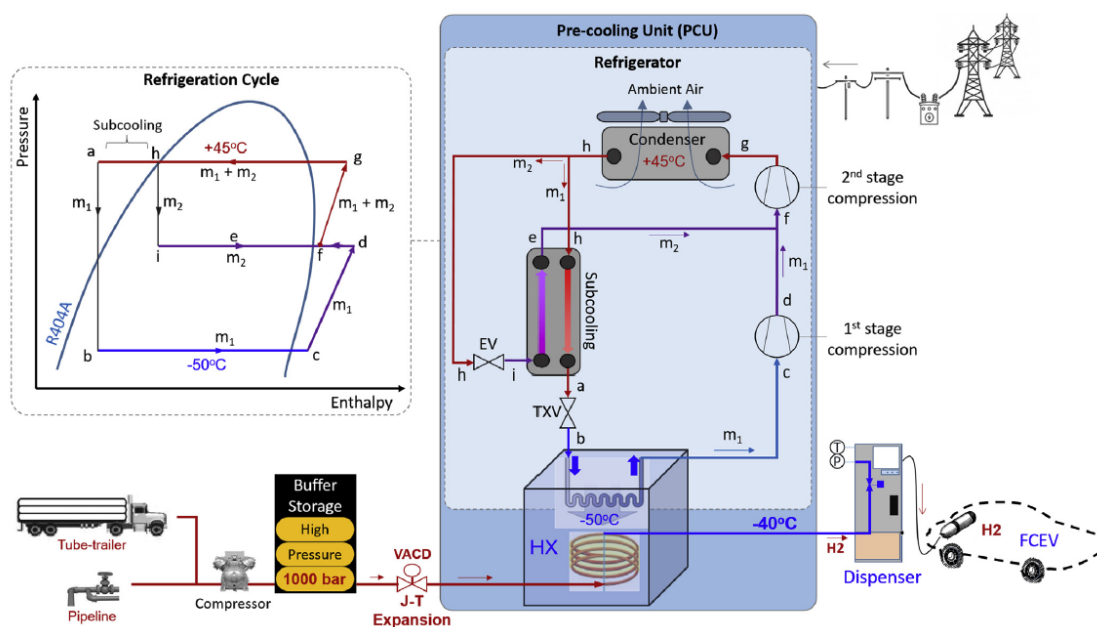
Předchlazením se rozumí snížení teploty vodíkového paliva před zahájením výdeje. Náklady na předchlazovací jednotku tvoří přibližně 10 % celkových nákladů na zařízení GHRS [3] a pro dosažení maximálního možného snížení nákladů na GHRS je nezbytné hlubší pochopení její nákladové složky. Narozdíl od studií o kompresorových a skladovacích systémech je o předchlazovací jednotce k dispozici poměrně málo informací. Předchlazení vodíkového paliva před jeho výdejem do nádrže vozidla je velmi důležité, aby se zabránilo přehřátí nádrže. Protokol SAE J2601 o čerpání paliva stanovuje omezení procesu čerpání paliva tak, aby bylo zajištěno bezpečné a rychlé plnění vozidel s FC [4].

Protokol SAE J2601 o čerpání paliva stanoví pro každý typ vodíkové čerpací stanice rozsah teplot předchlazení vodíku: například stanice T40 musí před výdejem do vozidel FCV zchladit vodík na teplotu mezi -33 a -40 °C. Předchlazovací jednotka umístěná mezi vysokotlakým vyrovnávacím zásobníkem a výdejním stojanem předchladí plynný vodík na teplotu alespoň -33 °C do 30 sekund od zahájení výdeje paliva. Poté udržuje teplotu v předepsaném rozmezí po celou dobu výdeje paliva.

Rychlost, s jakou mohou být vozidla s FC doplněna, přímo souvisí mimo jiné s teplotou předchlazení vodíku, teplotou okolí a počátečním tlakem v nádrži vozidla [5]. Čím vyšší je okolní teplota, tím déle trvá naplnění nádrže a naopak. Z těchto tří klíčových faktorů má však nejvýznamnější vliv na dobu doplňování paliva předchlazení. Protože doba tankování představuje jeden z kritických parametrů, které ovlivňují zkušenost s tankováním FCV, měl by

být systém předchlazení navržen tak, aby poskytoval požadovanou rychlost a kapacitu tankování za extrémních podmínek a s co nejnižšími náklady.

Typická předchlazovací jednotka v čerpacích stanicích na plynný vodík (GHRS) využívá termodynamický chladicí cyklus: chladivo v ní cirkuluje přes dvoustupňový kompresor, kondenzátor, termostatický expanzní ventil a tepelný výměník s výparníkem (obrázek 9). Tento chladicí cyklus zahrnuje podchlazení chladiva pro maximalizaci chladicího účinku na výparníku cirkulací části chladiva vystupujícího z kondenzátoru přes expanzní ventil, tepelný výměník a druhý stupeň kompresoru. Vydávaný vodík se předchlazuje uvolňováním energie do nízkoteplotního chladiva prostřednictvím tepelného výměníku s výparníkem. Tepelný výměník s výparníkem může být navržen s vysokou tepelnou setrvačností (především proto, aby fungoval jako vyrovnávací nádrž, a snížil tak potřebný chladicí výkon), nebo může mít kompaktní konstrukci pro účely snadného balení.



Obrázek 9. Schéma provozu předchlazovací jednotky na GHRS, která se skládá z kompresoru, vysokotlakého vyrovnávacího zásobníku, předchlazovací jednotky a výdejního zařízení.

Chladicí výkon a dimenzování předchlazovací jednotky ovlivňují dva hlavní faktory: proces J-T expanze (přednáška 2) v zařízení pro regulaci s proměnnou plochou (VACD) před výměníkem tepla pro předchlazení, jakož i požadavek čerpací stanice, aby byla schopna plnit daný počet vozidel po sobě. Jev J-T souvisí se vstupní teplotou vodíkového paliva proudícího do předchlazovací jednotky, zatímco požadavek na plnění daného počtu vozidel po sobě souvisí se špičkovou hodinovou potřebou tankování u výdejního stojanu [6].

Jev J-T označuje změnu teploty plynu, který je při konstantní entalpii protlačován ventilem (adiabatická expanze). Všechny plyny mají „inverzní teplotu“, pod kterou dochází k poklesu teploty během procesu J-T expanze. Inverzní teplota přímo koreluje s kritickou teplotou plynu. Látky s extrémně nízkou kritickou teplotou (např. vodík, helium a neon) mají inverzní teploty

výrazně nižší, než je teplota okolí, a proto se jejich teploty během izoentalpické expanze zvyšují nad inverzní teplotu ($<224\text{ K}$ v případě vodíku). Když vysokotlaký vodík z vyrovnávacího zásobníku proudí přes VACD, dochází při jeho rozpínání k poklesu tlaku. Expanze vodíku a pokles tlaku ve VACD způsobují zvýšení teploty plynného vodíku, protože vodík má při expanzním tlaku a teplotě záporné koeficienty JT (přibližně $-0,05\text{ K/bar}$ při tlaku 900 bar a $-0,03\text{ K/bar}$ při tlaku 1 bar a teplotě 25 °C) [7]. Maximální tlaková ztráta přes VACD by teoreticky mohla vést ke zvýšení teploty vodíkového paliva o 40 °C před vstupem do tepelného výměníku pro předchlazení. Toto výrazné zvýšení teploty by mohlo znamenat další zatížení dochlazovací jednotky, takže by byl třeba větší chladicí výkon, aby se vyrovnal větší požadovaný teplotní spád na tepelném výměníku. Obdobně může zvýšení počtu po sobě jdoucích výdejů, které musí čerpací stanice uspokojit, zvýšit požadovanou kapacitu předchlazovací jednotky, protože tepelný výměník musí být dimenzován na špičkovou poptávku, i když je poptávka po většinu dne mnohem nižší.

Požadovaný počet po sobě jdoucích výdejů výrazně ovlivňuje kapacitu a náklady na součásti pro výdej paliva. Při po sobě jdoucích výdejích přijíždí k výdejnímu stojanu jedno vozidlo FCV za druhým, přičemž mezi jednotlivými plněními je pouze krátká přestávka, přibližně 2 minuty [6]. Nedostatek doby nečinnosti během série po sobě jdoucích výdejů poskytuje součástí stanice GHRS velmi málo času na zotavení a dobití. Vysoký počet po sobě jdoucích výdejů (např. 5) zvýší zatížení tepelného výměníku tak, že je ohrožena schopnost jeho tepelné setrvačnosti udržet teplotu vodíku pod úroveň -33 °C . V takových případech může mít chladicí systém nedostatek času na ochlazení tepelného výměníku mezi jednotlivými výdeji paliva. Bez zohlednění špičkové poptávky spojené s po sobě jdoucími výdeji paliva při projektování součástí pro výdej paliva může být jednotka pro předběžné chlazení poddimenzována, což ohrožuje výkonnost výdeje paliva a spokojenost zákazníků.

Kromě jevu J-T a po sobě jdoucích výdejů paliva je důležité zvážit i kompromis mezi různými koncepcemi konstrukce předchlazovací jednotky. Předchlazovací jednotka může využívat tepelný výměník s vyšší tepelnou setrvačností, který je schopen udržovat malou změnu teploty při chlazení proudu vodíku, a proto vyžaduje nižší chladicí výkon celého chladicího systému. Na druhou stranu je třeba sladit kompaktní tepelný výměník s chladicím výkonem, který odpovídá okamžitému chladicímu zatížení (tj. poskytuje chlazení podle potřeby). Dále bude chladicí výkon kompaktního tepelného výměníku kvůli jeho menšímu vyrovnávacímu účinku (v důsledku nižší tepelné setrvačnosti) citlivější na faktory, které ovlivňují teplotu na vstupu, jako jsou teplota okolí a jev J-T před výměníkem tepla.

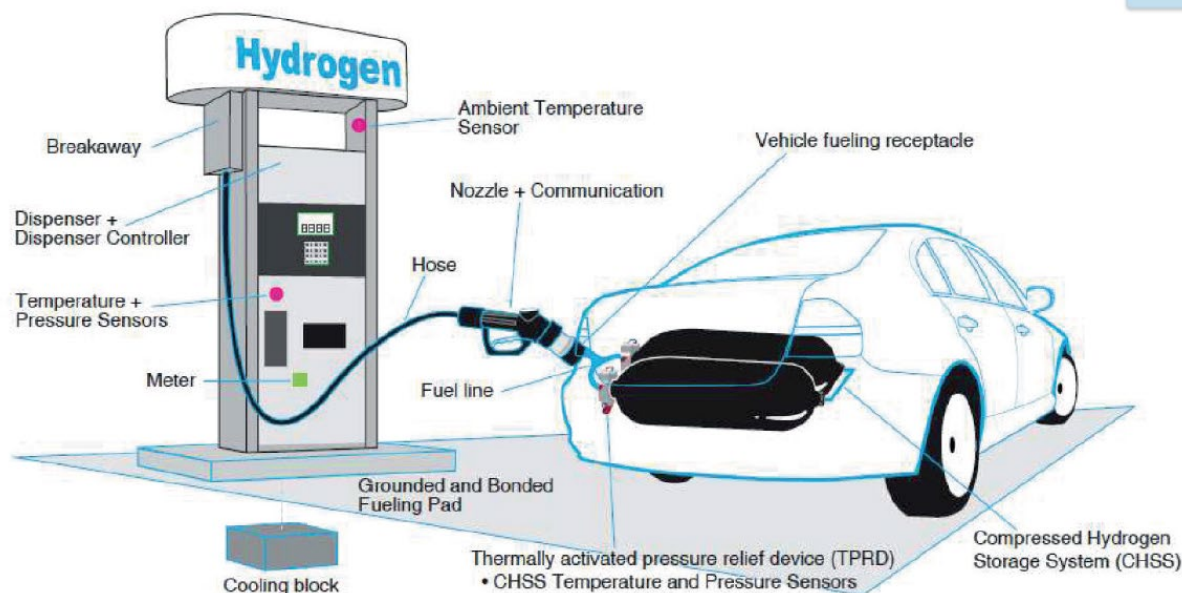
Při vyšších okolních teplotách se teplota vodíku na vstupu do tepelného výměníku zvýší, takže může být zapotřebí použít blok tepelného výměníku s vyšší tepelnou setrvačností, aby se jeho teplota udržela v projektovaném rozsahu. V kompaktním systému s tepelným výměníkem však musí být vyšší teplota okolí kompenzována vyšším chladicím výkonem v okamžiku, kdy je ho třeba. Jednou z termodynamických nevýhod tepelného výměníku s vysokou tepelnou

setrvačností je skutečnost, že spotřebovává více energie na chlazení (na udržení teploty výměníku $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) než jeho kompaktní protějšek. Na druhé straně kompaktní konfigurace chlazení s výměníkem, který chladí dle potřeby, potřebuje výkonnější chladicí systém, ale spotřebovuje celkově méně energie. Jinými slovy, existuje kompromis mezi chladicím výkonem a tepelnou setrvačností tepelného výměníku. Z hlediska nákladů má kompaktní tepelný výměník obvykle složitější konstrukci pro rychlý přenos tepla v případě potřeby, takže jeho výrobní náklady bývají vyšší než v případě výměníku s vysokou tepelnou setrvačností. Nicméně díky malé velikosti systému jsou náklady na materiál, dopravu a instalaci kompaktních výměníků tepla v porovnání s velkými tepelnými výměníky nižší.

Pokud se používá předchlazování vydávaného vodíku, musí být výdejní systém vybaven prostředky pro potvrzení, že teplota předchlazeného paliva ve výdejním stojanu je správná a že kontrola splňuje horní i dolní teplotní limity dle protokolu výdeje paliva. Pokud protokol výdeje paliva používá komunikaci o teplotě nádrže vozidla a dojde k výpadku komunikace, měl by protokol provést vypnutí, nebo pokračovat ve výdeji bez komunikace, jestliže to protokol umožňuje.

3.4.4 Výdej vodíku

Výdejní systém je umístěn za vodíkovým zásobovacím systémem, který obsahuje veškerá zařízení potřebná k provozu výdeje paliva do vozidla a jehož prostřednictvím je stlačený vodík dodáván do vozidla. Výdejní stojan na vodík je zařízením výdejního systému. Jeho součástmi jsou výdejní stojan a nosná konstrukce, které jsou fyzicky umístěny v čerpacím prostoru.



Obrázek 10 Příklad klíčových součástí výdejního systému čerpací stanice [2]

Obrázek 10 znázorňuje příklad klíčových součástí výdejního systému čerpací stanice, včetně vysokotlakého vodíkového systému FCV, který obsahuje mimo jiné skladovací nádrž a systém skladování stlačeného vodíku (CHSS) se snímači, jakož i zařízení pro uvolnění přetlaku.

Systém CHSS je vybaven tepelně aktivovaným zařízením pro uvolnění přetlaku, které chrání proti přetlaku způsobenému požárem. Na straně stanice je k dispozici automatizovaný řídicí systém výdejního systému (např. prostřednictvím programovatelného logického automatu (PLC)) pro čerpání paliva. Jeho součástí jsou rovněž postupy detekce a řízení poruch. Stanice je rovněž vybavena zařízením na ochranu proti přetlaku, například zařízením pro uvolnění přetlaku nebo obdobným zařízením, které chrání výdejní systém a vozidlo proti případnému přetlaku.

Výdejní stojan na veřejné čerpací stanici pro lehká užitková vozidla je obvykle navržen se samostatnými tryskami pro čerpání paliva do vozidel s jmenovitým pracovním tlakem 35 MPa a/nebo 70 MPa. Plnicí tryska stanice může obsahovat komunikační přijímač a vozidlo může obsahovat komunikační vysílač (např. SAE J2799). Komunikační systém infračerveného přenosu dat (IrDA) ve vozidle může používat protokol SAE J2799 k přenosu naměřené teploty a tlaku systému skladování stlačeného vodíku ve vozidle do výdejního stojanu. Řídicí systém výdejního systému může tyto údaje použít pro řízení procesu výdeje paliva.

Aby bylo dosaženo maximálního provozního tlaku (MOP) potřebného k doplnění paliva do systému CHSS vodíkového vozidla v celém rozsahu provozních podmínek, jsou v tabulce 2 uvedeny doporučené minimální hodnoty tlaku součástí potřebné pro systém výdeje vodíku vzhledem k provozní úrovni výdeje vodíku (HSL), tlakové třídě (dle definice v normě ISO 17268) a maximálnímu přípustnému pracovnímu tlaku (MAWP) výdejního systému.

Tabulka 2 Úrovně tlaku ve výdejním systému a doporučené minimální jmenovité hodnoty tlaku součástí

Úroveň vodíkových služeb (HSL)	Tlaková třída	Maximální provozní tlak (MOP)	Maximální přípustný pracovní tlak (MAWP) ve výdejním systému
Rovná se NWP vozidla, do kterého se vydává vodík		1,25 × HSL Nejvyšší tlak při běžném výdeji	1,375 × HSL Nejvyšší přípustná požadovaná hodnota pro tlakovou ochranu výdejního systému
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

Pokud jsou použity součásti s nižším tlakem, než je jmenovitý tlak uvedený v tabulce 2, pak se MAWP výdejního systému sníží dle součásti s nejnižším jmenovitým tlakem. Výdejní systém musí být rovněž chráněn proti přetlaku.

Kromě jmenovitého tlaku by měly součásti systému pro výdej vodíku splňovat následující požadavky:



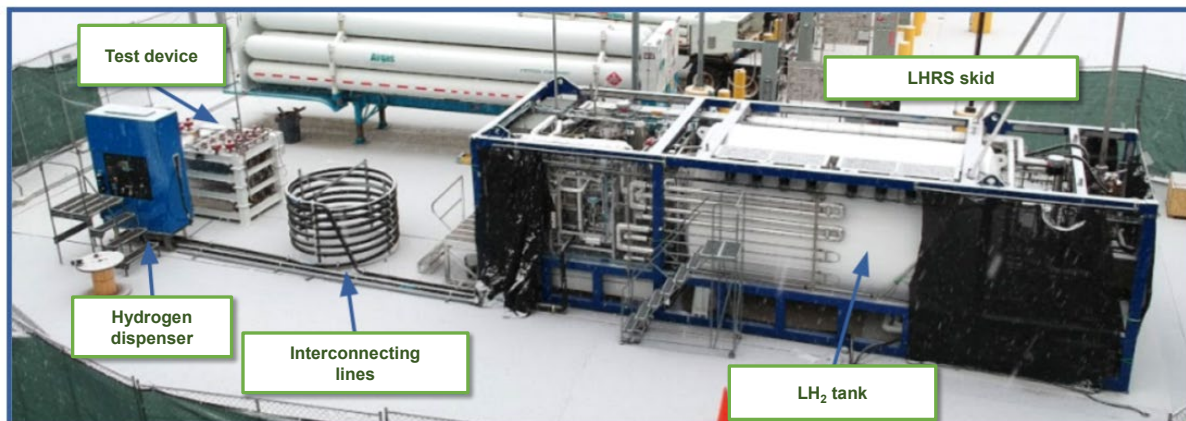
- rozsah okolních teplot od -40 °C do $+50\text{ °C}$, pokud místní podmínky nedovolují nebo nevyžadují jiné teplotní limity,
- kompatibilita materiálů, které běžně přicházejí do styku s vodíkem,
- stanovená životnost před provedením údržby nebo výměny.

Cílová životnost by měla být 100 000 cyklů pro výdejní soustavu, ale bez ohledu na to, zda je tento cíl splněn, by měla být životnost definována a uvedena tak, aby plánované činnosti údržby mohly účinně předcházet poruchám.

Součásti vysokotlakého systému výdeje vodíku musí být označeny tlakovou třídou pouze v případě, že jsou navrženy a ověřeny tak, aby splňovaly nebo překračovaly výše definované požadavky na tlak, teplotu, kompatibilitu materiálů a životnost. Vysokotlaké součásti se montují v přísném souladu s pokyny dodavatele a podle přesně stanoveného montážního postupu. Výrobce zajistí, aby pokles tlaku mezi snímačem tlaku paliva výdejního stojanu, který monitoruje tlak ve vozidle, a tryskou nepřekročil hodnotu definovanou v protokolu o tankování po celou dobu trvání průtoku vodíku do vozidla.

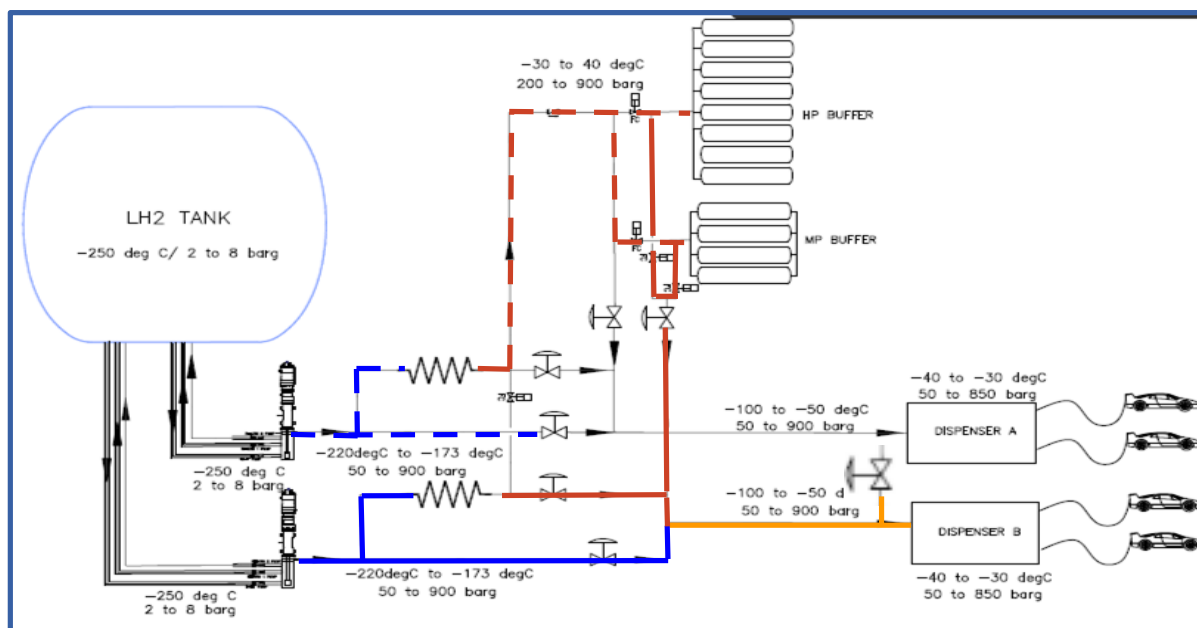
3.5 Čerpací stanice na bázi skladování zkvalněného vodíku – vybavení

Systém LHRS je obvykle integrován do zásobníku LH₂ a skládá se z hlavní skříně LHRS, nádrže LH₂, propojovacího potrubí, výdejního stojanu a zkušebního zařízení (viz obrázek 11).



Obrázek 11. Přehled hlavních částí typu LHRS s integrovaným zásobníkem LH₂.

Obecné schéma procesu čerpací stanice kapalného vodíku: obrázek 12.



Obrázek 12. Průběh procesu u čerpací stanice na LH₂.

Hlavními součástmi LHRS jsou:

- nádrž na LH₂,
- kryogenní čerpadlo,
- výparník,
- panel s ventily,
- vyrovnávací zásobníky,
- propojovací potrubí k výdejnímu stojanu,
- výdejní stojan.

Na následujícím obrázku je znázorněn typ hlavní skříně LHRS s označením hlavního funkčního vybavení:

- na obrázku 13, pro „kryogenní“ stranu,
- na obrázku 14, pro „teplou“ stranu.

Podrobný popis vybavení je uveden v následujících podkapitolách.



Obrázek 13. Přehled skříně LHRS – „kryogenní“ strana.

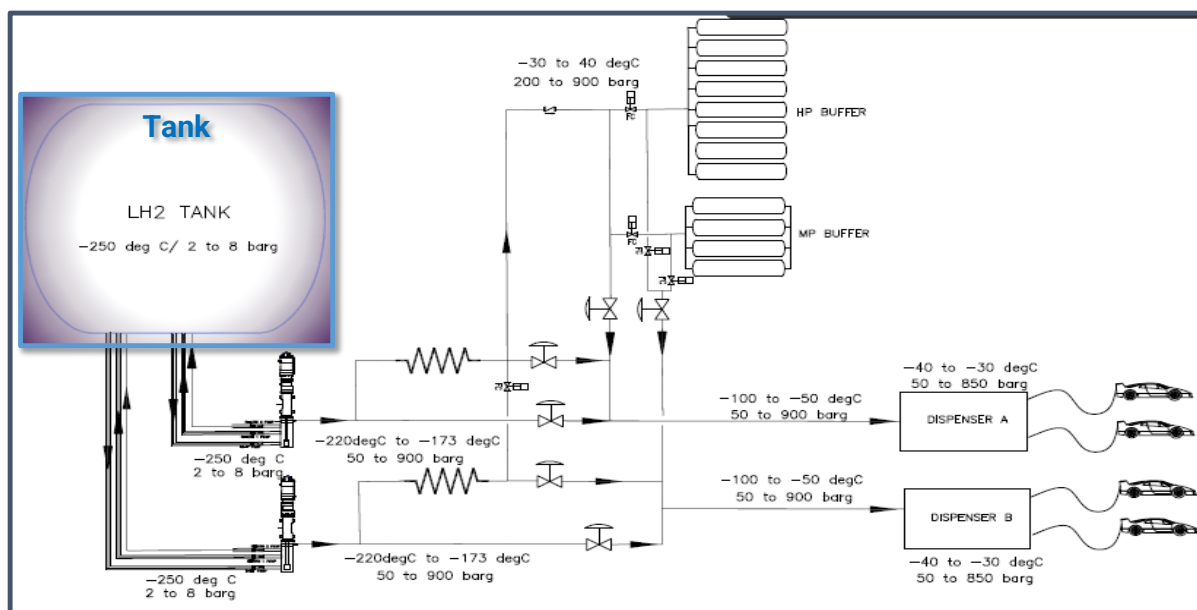


Obrázek 14. Přehled skříně LHRS – „teplá“ strana.

3.5.1 Skladování kapalného vodíku

Pokud jde o LHRS, nádrž na kapalný vodík může být integrována do hlavní skříně, jak je znázorněno v tomto dokumentu a jak ukazuje čerpací stanice společnosti Linde v Oaklandu. Nicméně pro skladování LH₂ může být určena i samostatná nádoba, vertikálně nebo horizontálně postavená.

Pro LHRS, jak je znázorněno na obrázku 15, činí objem zásobníku na LH₂ přibližně 20 m³, což poskytuje kapacitu 1-t H₂. Skladovací teplota se pohybuje okolo -250 °C a skladovací tlak od 2 do 8 bar.



Obrázek 15. Průběh procesu u čerpací stanice na LH₂ – zásobník na LH₂.

Hlavními parametry LHRS jsou:

- pro udržení kryogenní teploty je zvolena vícevrstvá izolace (MLI) s vakuem (viz obrázek 16),
- nádrž je horizontální, aby mohla být integrována do hlavní skříně a vyhovovalo požadavkům na povolení (jsou možné i jiné konfigurace, například se samostatnou nádrží s větším objemem),
- všechna rozhraní se nacházejí na jedné straně nádrže,
 - o napájecí a vratné potrubí pro každé čerpadlo (+ třetí pro kontrolu hladiny v jímce na čerpadlo LH₂),
 - o buď konvenční režim, nebo režim termosifonu,
 - o bezpečnost, ventilační potrubí,
 - o plnicí potrubí (dole a nahoře),
- ochrana proti nárazu je vestavěná do rámu (viz obrázek 17).



Obrázek 16. Vícevrstvá izolace.



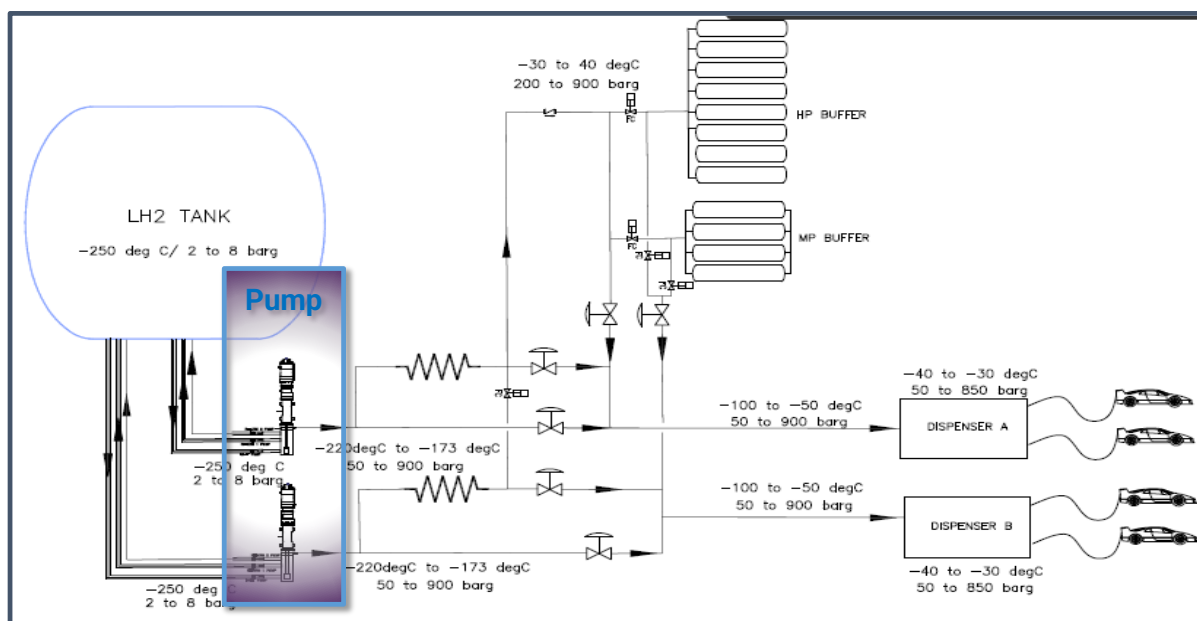
Obrázek 17. Ochrana proti nárazu (modře) ve spodní části.

LH₂ je doplňováno nákladním vozidlem s LH₂. Toto nákladní vozidlo s LH₂ se skládá z horizontální nádrže s objemem 40 m³ a pracovním tlakem 1 až 12 bar (zásoba: 4 t H₂). Spojení

mezi zásobníkem a nákladním vozidlem se provádí pomocí flexibilního přečerpávacího vedení. Přečerpávání probíhá bez čerpadla. Na návěsu se nachází malý odpařovač, který vytváří tlak v nádrži nákladního vozidla a umožňuje přečerpávání kapalného vodíku do stacionárního vertikálního zásobníku.

3.5.2 Kryogenní čerpadlo

Kryogenní čerpadla instalovaná v LHRS jsou znázorněna na obrázku 18.



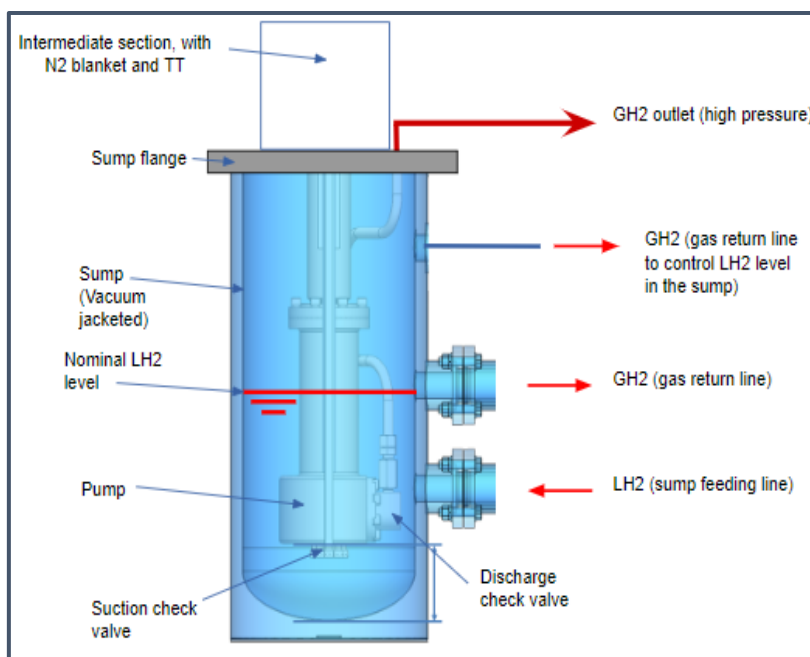
Obrázek 18. Průběh procesu u čerpací stanice na LH₂ – čerpadlo LH₂.

Kryogenní čerpadlo, jak je znázorněno na obrázku 19, umožňuje přečerpávat kapalinu ze zásobníku do tepelného výměníku. Tlak kapalného vodíku se mezi zásobníkem a tepelným výměníkem mírně zvýší.



Obrázek 19. Kryogenní čerpadlo.

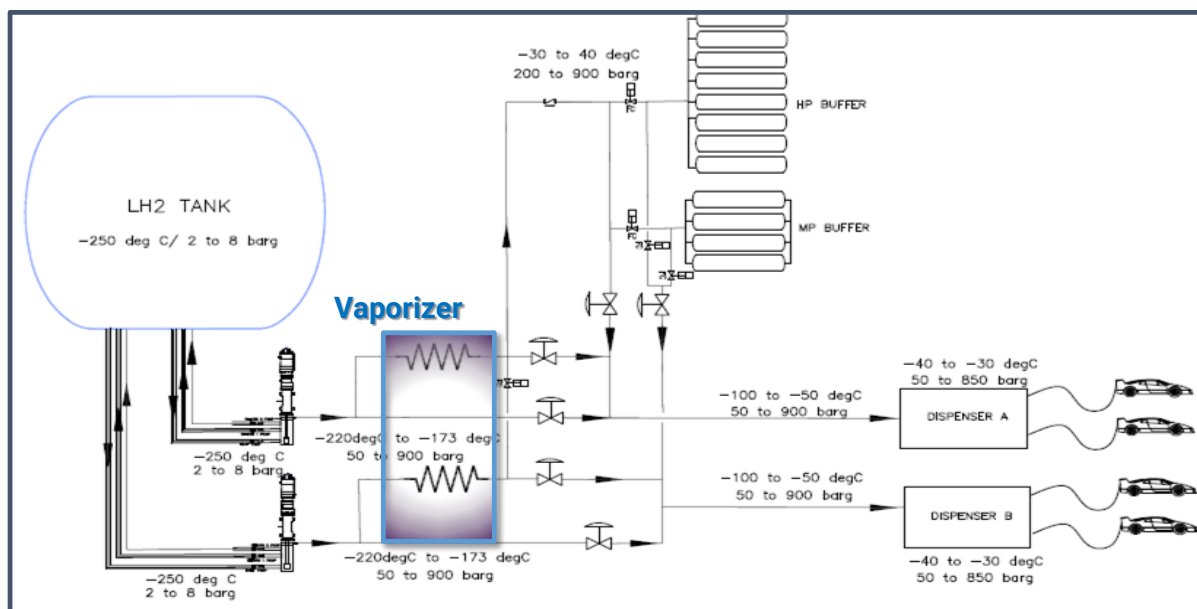
Čerpadlo je ponořeno ve vakuové jímnici s pláštěm, jak je znázorněno na obrázku 20.



Obrázek 20. Čerpadlo ve vakuové jímnici s pláštěm.

3.5.3 Výparník LH₂

Výparník v LHRS je uveden na obrázku 21.



Obrázek 21. Průběh procesu u čerpací stanice na LH₂ – výparník.

Cílem výparníku je zvýšit tlak plynného vodíku, který se ukládá do vyrovnávacích zásobníků pod tlakem až 900 bar. Teplota vodíku se rovněž zvyšuje z -220 na -30 °C.

Pro tento tepelný výměník je k dispozici několik technologií. Těmi hlavními jsou:



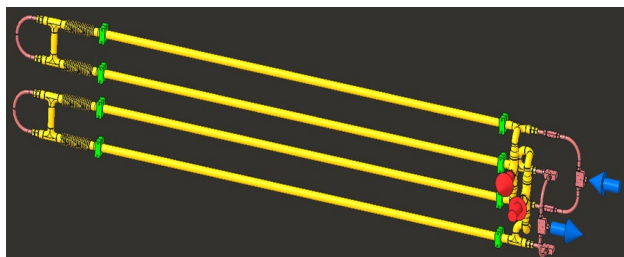
- atmosférický výparník,
- a výparník typu trubka v trubce.

Výparník typu trubka v trubce, jak je znázorněno na obrázku 22, se pro čerpací stanice upřednostňuje z níže uvedených důvodů:

- jednoduchá a snadná výroba,
- kompaktní řešení v porovnání s atmosférickým výparníkem,
- nevytváří se zóna obohacené O_2 ,
- nízká spotřeba energie v porovnání s elektrickým ohřevačem (8krát nižší).



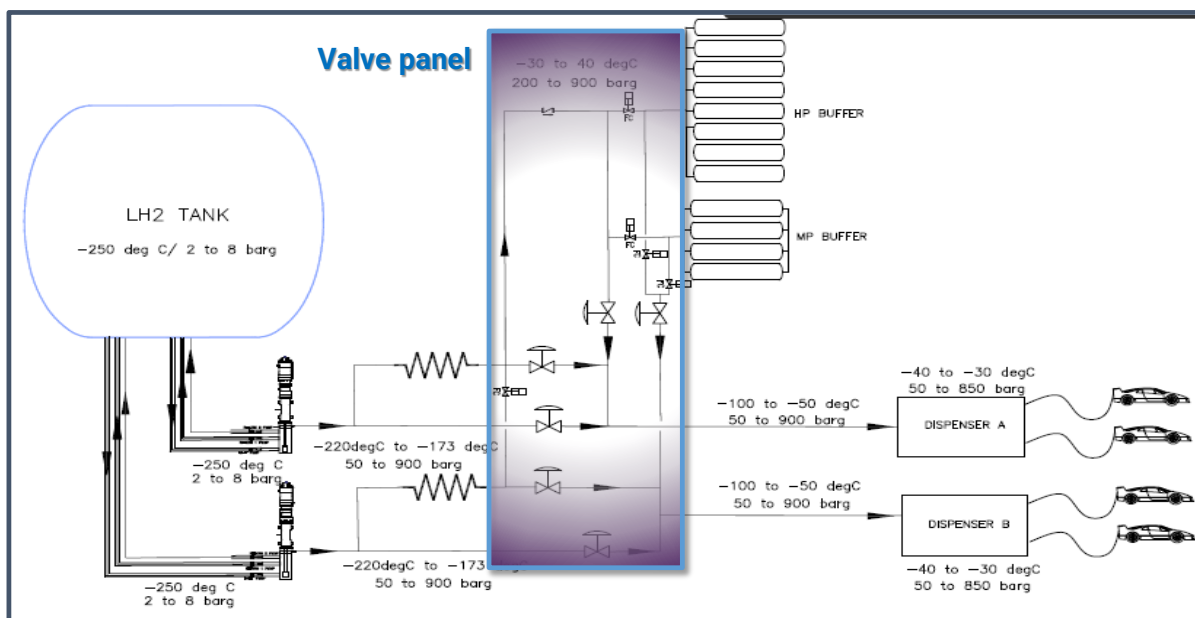
(A)



(B)

Obrázek 22. (A) Tepelný výměník typu „trubka v trubce“ v hlavní skříni LHRS, (B) princip odpařování LH₂ (modré šipky).

3.5.4 Panel s ventily



Obrázek 23. Průběh procesu u čerpací stanice na LH₂ – panel s ventily.

Panel s ventily v systému LHRS je znázorněn na obrázku 23.

Pohled na panel s ventily je znázorněn na obrázku 24. Tato část procesu je poměrně jednoduchá, ale je potenciálním zdrojem úniků plynného vodíku kvůli velkému počtu přípojek ventilů, převodníkům tlaku a dalším zařízením potřebným pro provoz stanice.

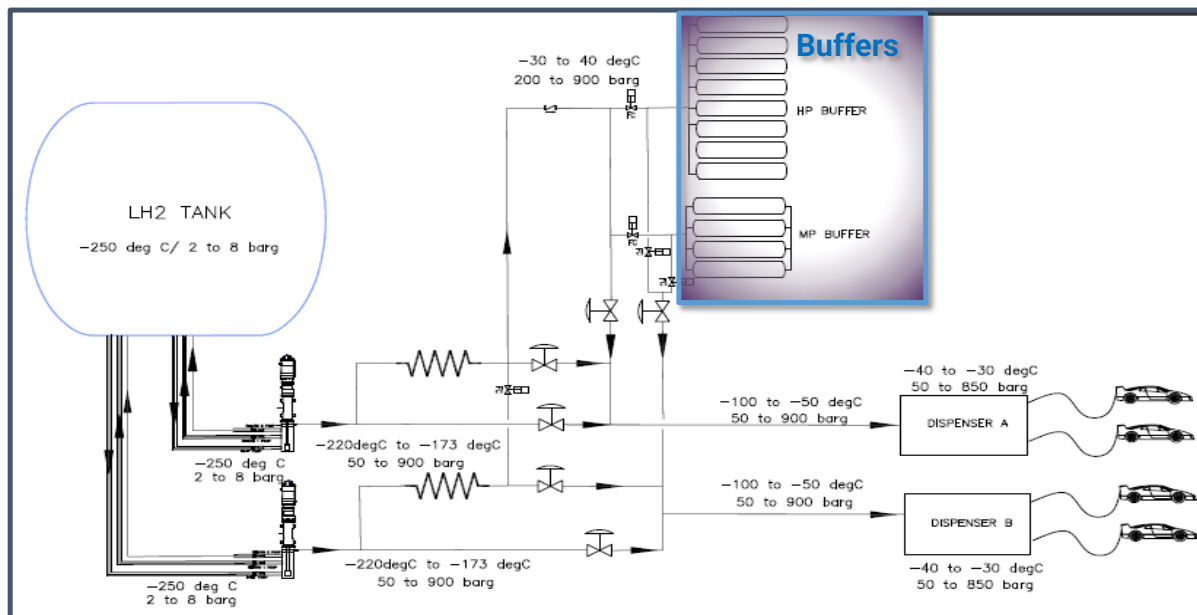


Obrázek 24. Panel s ventily.

V této fázi je vodík plynný a maximální tlak dosahuje hodnoty 900 bar.

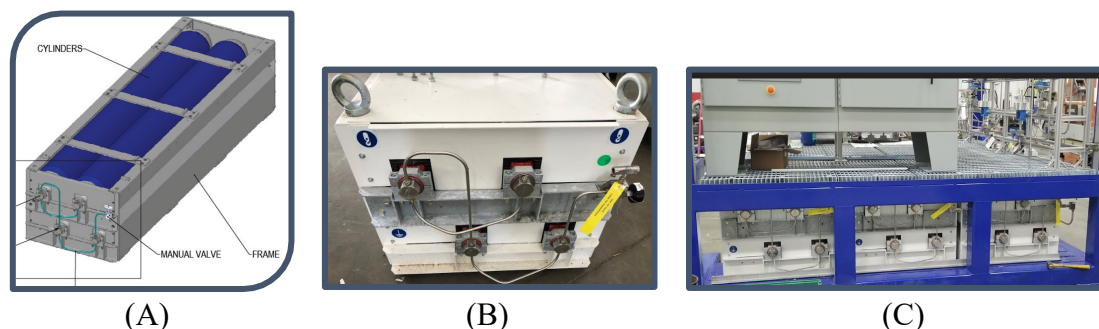
3.5.5 Vyrovnávací zásobníky na plynný vodík

Vyrovnávací zásobníky na plynný vodík v systému LHRS jsou znázorněny na obrázku 25.



Obrázek 25. Průběh procesu u čerpací stanice na LH₂ – vyrovnávací zásobníky na plynný vodík.

Maximální přípustný pracovní tlak (MAWP) vyrovnávacích zásobníků činí 1 000 bar (100 MPa). Pro posílení mechanické pevnosti válců se používají válce typu II z oceli obalené uhlíkem. V předložené konfiguraci stanice činí objem vybraných lahví 123 l. Tyto lahve jsou sdruženy po čtyřech do 3 svazků, jak je znázorněno na obrázku 26, a začleněny do hlavního rámu.

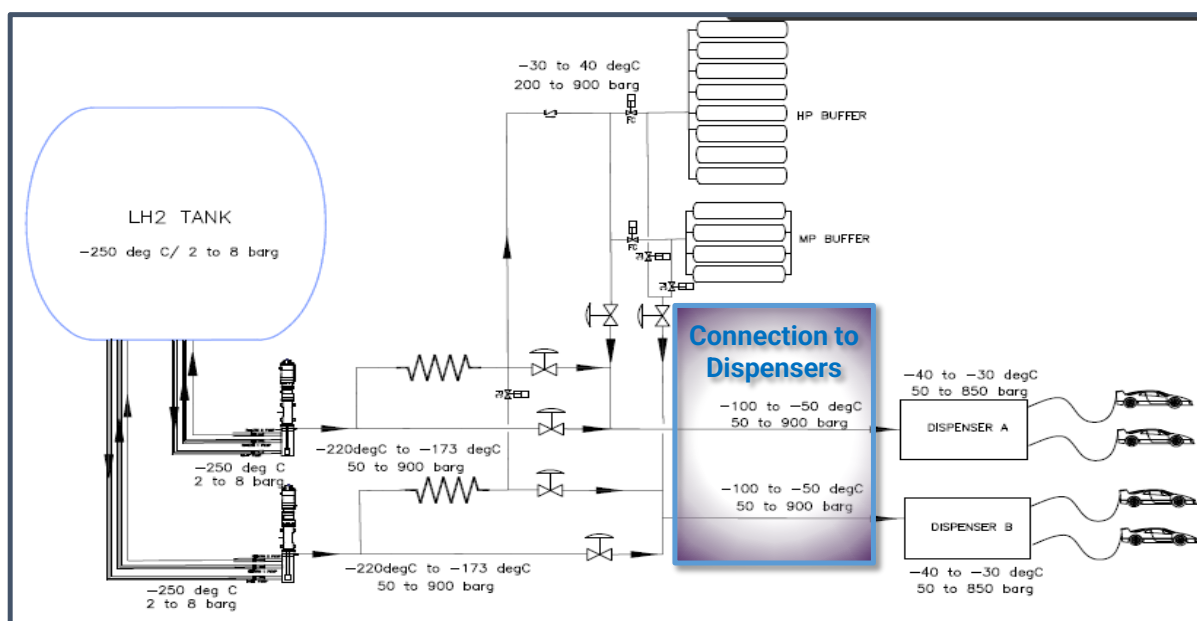


Obrázek 26. Vysokotlaké vyrovnávací zásobníky. (A) 4 vyrovnávací zásobníky typu II ve svazku, (B) propojení na hlavách vyrovnávacích zásobníků, (C) integrace svazků do hlavní skříně LHRS.

Každý svazek má hmotnost 3 t. Vyrovnávací zásobníky jsou díky izolaci chráněny proti požáru.

3.5.6 Připojení k výdejnímu stojanu

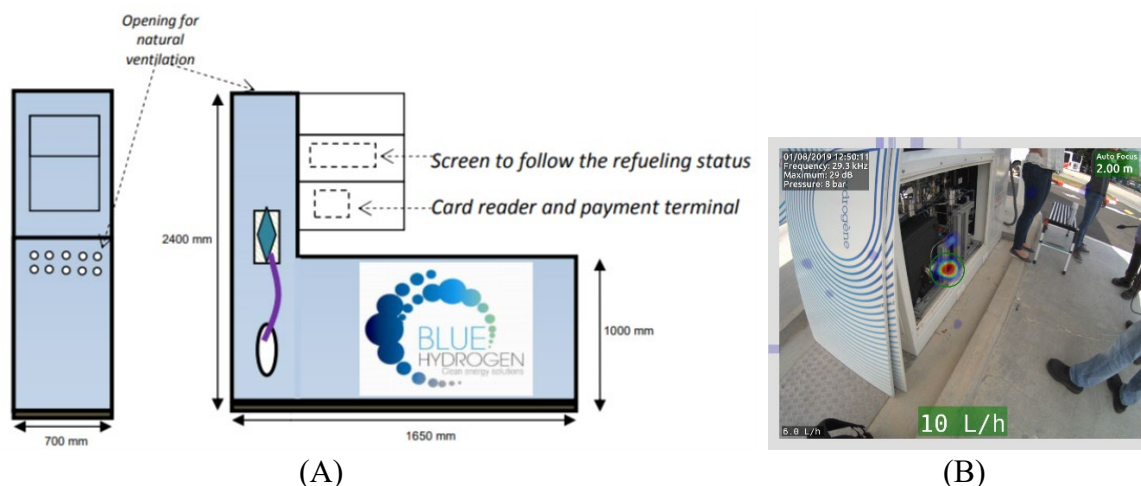
Připojení k výdejnímu stojanu v systému LHRS je znázorněno na obrázku 27.



Obrázek 27. Průběh procesu u čerpací stanice na LH₂ – připojení k výdejnímu stojanu (výdejním stojanům).

Vedení může být delší než 60 m (200 stop). Pro úspěšné doplnění paliva je nutné udržovat vedení v chladu. Aby bylo možné předejít oteplování, bylo nalezeno řešení pomocí křížení a byly stanoveny specifické inteligentní procesy plnění podle změn vytížení stanice během dne.

3.5.7 Výdejní stojan



Obrázek 28. (A) Hlavní prvky a orientační rozměry výdejního stojanu, (B) ventilová skříň.

Výdejní stojan umožňuje rychlé, snadné a bezpečné spojení mezi čerpací stanicí a vozidlem pro účely čerpání paliva. Uspořádání typického výdejního stojanu je uvedeno na obrázku 28.

Výdejní stojan se skládá z dílčích celků:

- Výdej: Stožár a panel s ventily obsahujícím automatický plnicí ventil, trysku a odpojovačem,
- Řízení: HMI – Plnicí automatika – Elektrický panel – Řízení přístupu.

Jak je znázorněno na obrázku 29, v rámci všech technických vlastností výdejního stojanu lze vyzdvihnout následující vlastnosti:

- Doplnění paliva je automatické a vyžaduje minimální manipulaci na straně zákazníka (tryska + spouštěcí tlačítko).
- Konektor nebo tryska pro vozidla umožňují snadné používání a jsou schváleny podle normy SAE J2600.
- Odpojovací spojka zajišťuje mechanické přerušení výdeje paliva v případě, že vozidlo odjede od výdejního stojanu bez odpojení trysky.
- Infračervená tryska (v souladu s normou SAE J2799) pro vedení 700 bar.



(A)



(B)

Obrázek 29. (A) Pohled na dvojitý výdejní stojan, (B) tryska pro doplňování paliva.

Stanice je schopna vydávat vodík do lehkých užitkových vozidel (2–10 kg) pomocí dvojitého výdejního stojanu na dvou tankovacích místech současně.

Výdejní tlak podle druhu výdejního stojanu činí:

- 350 bar pro vozidla se zařízením pro prodloužení dojezdu,
- 700 bar pro vozidla s palivovými články,
- 350 bar pro autobusy a nákladní vozidla.

Maximální průtoky činí:

- 60 g.s⁻¹ při tankování osobních vozidel,
- a 120 g.s⁻¹ při tankování autobusů a nákladních vozidel při tlaku 350 bar.

Teplota při výdeji se pohybuje od –30 °C do +40 °C (výdejní protokol: SAE J2601 H70 T40).

Z hlediska bezpečnosti se v bezprostřední blízkosti nebo uvnitř výdejního stojanu nacházejí tato zařízení:

- detektor H₂ uvnitř výdejního stojanu,
- přirozená ventilace výdejního stojanu,
- detektor plamene v blízkosti výdejního stojanu,
- tlačítkové nouzové vypínače.

4. Výroba

4.1 Parní reformování metanu

Proces parního reformování metanu (SMR) využívá páru a katalyzátor k výrobě vodíku z lehkého uhlovodíku, jako jsou metan nebo propan (viz obrázky 30 a 31). Tento proces v

podstatě zbavuje uhlovodík a vodu vodíku, který je nutný k přeměně veškerého vzniklého uhlíku a kyslíku na CO₂.

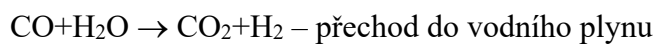


Obrázek 30. Závod společnosti Air Liquide na parní reformování metanu.

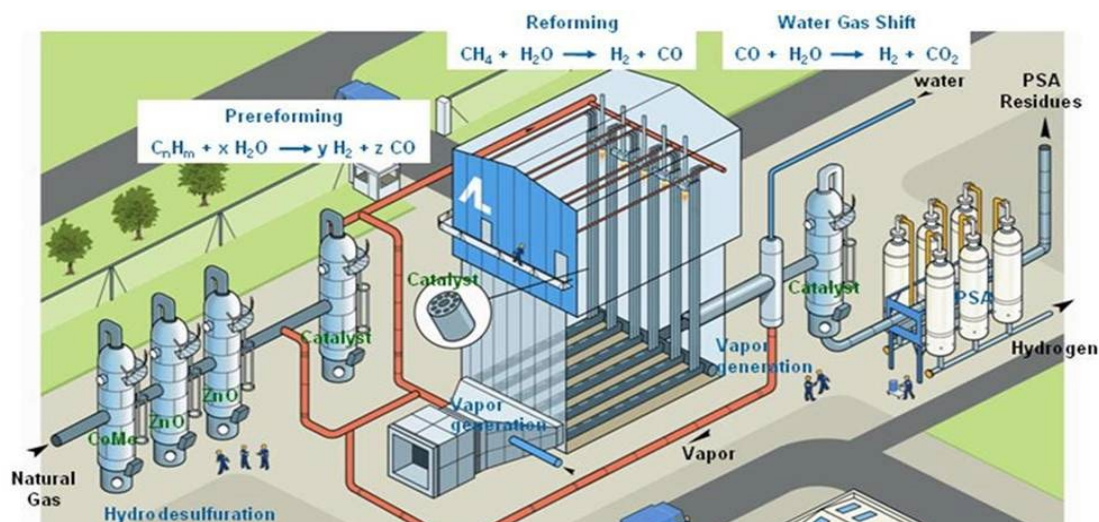
Dva hlavní kroky konverze jsou:



- Endotermní reakce: $\Delta H^\circ = +206 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$
- Katalytická reakce: Ni/Al₂O₃
- 20–30 bar, 900–1 000 °C, několik minut



- Mírně exotermní reakce
- Katalytická reakce: CuO; Fe₂O₃; Cr₂O₃
- 20–30 bar, 400 °C (vysoká teplota) / 200 °C (nízká teplota)



Obrázek 31. Schéma zařízení na parní reformování metanu.

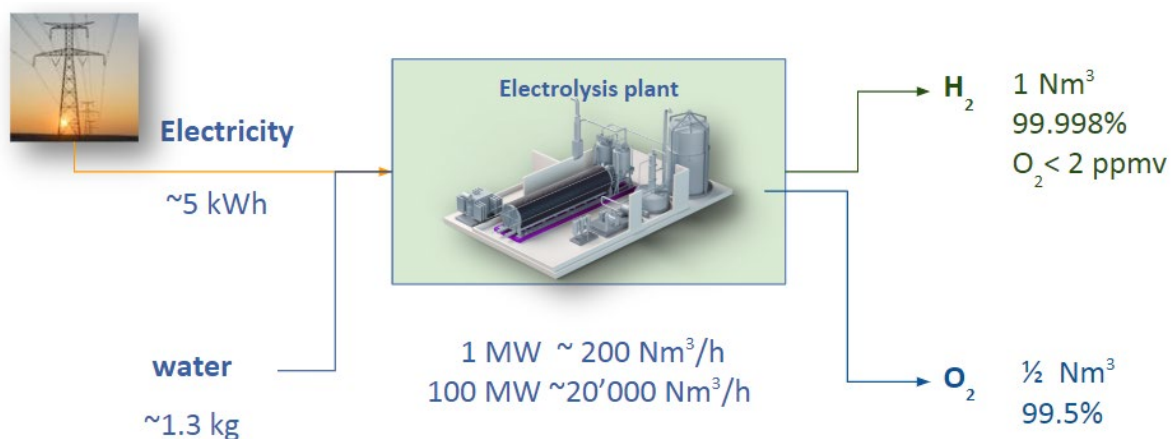
4.2 Elektrolyzátor

Elektrolýza vody spočívá ve štěpení molekul vody na jednotlivé složky (H_2 a O_2) průchodem elektrického proudu (viz obrázek 32).



Obrázek 32. Princip elektrolýzy.

Na obrázku 33 je uvedeno schéma tohoto procesu. Voda se štěpí pomocí elektřiny za vzniku vodíku a kyslíku. Čistota takto získaného vodíku je mimořádně vysoká.



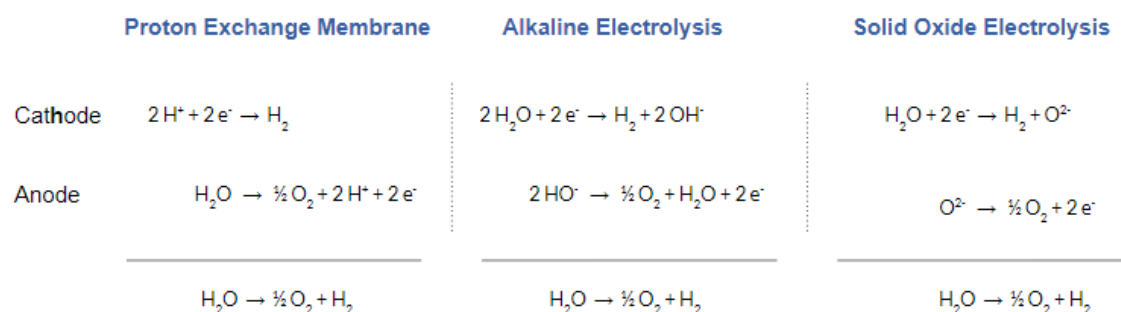
Obrázek 33. Systém elektrolýzy.



V současné době existuje několik různých technologií elektrolýzy s různou úrovní vyspělosti (označovanou také jako úroveň technologické připravenosti (TRL)):

- elektrolýzér s protonovou výměnnou membránou (PEM) – TRL 8,
- alkalický elektrolýzér – TRL 9,
- elektrolýzér na bázi pevných oxidů – TRL 6.

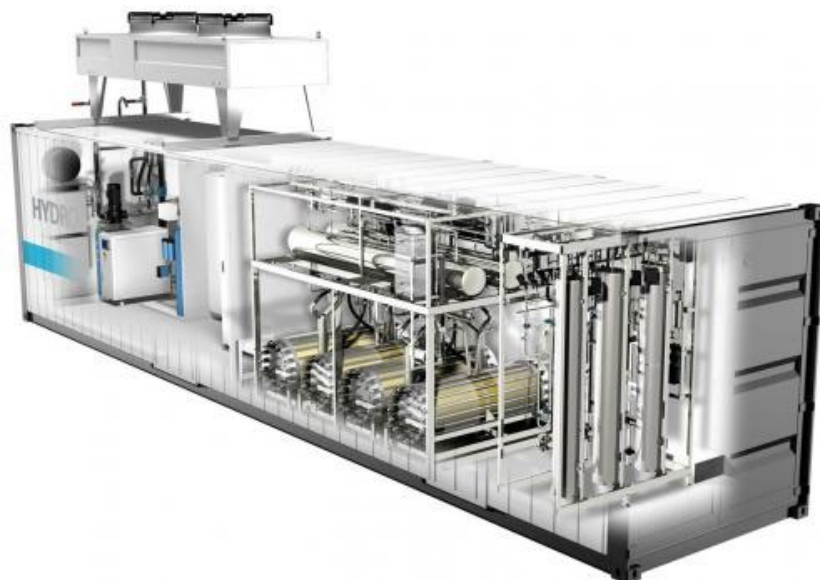
Hlavními technologiemi elektrolýzy jsou však alkalická elektrolýza, která funguje na principu kapalných elektrolytů (hydroxid draselný nebo sodný), a elektrolýza s pevným polymerním elektrolytem, např. PEM. Hlavní reakce probíhající v různých elektrolýzerech jsou uvedeny na obrázku 34.



Obrázek 34. Hlavní reakce dle technologie elektrolýzy.

Hlavní rozdíly mezi těmito technologiemi jsou:

- Separátor: diafragma nebo membrána.
- Elektrolyt: kapalný, pevný, kyselý nebo zásaditý.



Obrázek 35. Schéma elektrolyzéru společnosti Hydrogenics.

Stanice vyrábějící vodík elektrolýzou na místě vyžaduje kromě elektrolyzéru také zařízení na čištění vody a jednotku na čištění a sušení vodíku, ve které se upravuje vyrobený vodík. Mnoho elektrolyzérů vyrábí vodík při relativně nízkém tlaku, např. 10–25 bar, takže pro zvýšení tlaku na skladovací tlak je nezbytná dodatečná komprese.

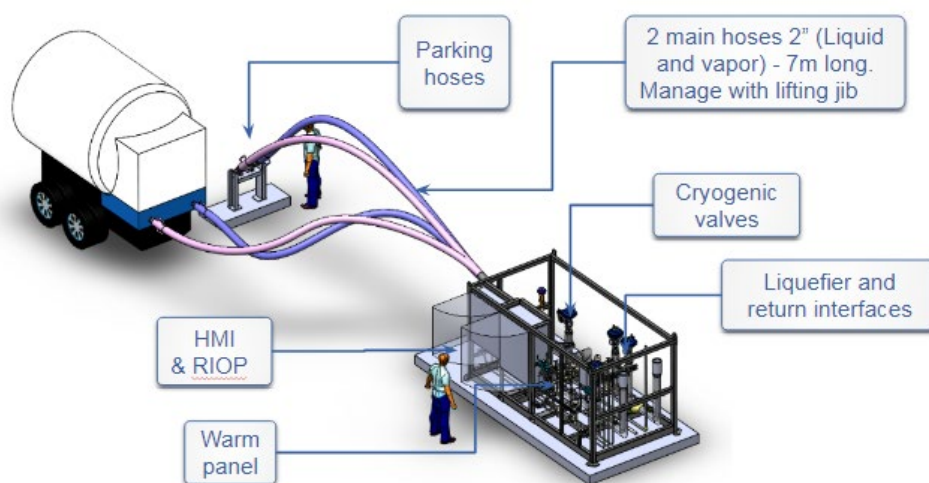
4.3 Zkapalňovací zařízení

Zkapalňování H_2 je energeticky velmi náročný proces. Minimální práce potřebná ke zkapalnění vodíku (při rovnováze orthovodíku a paravodíku) je 3,92 kWh elektriny/kg H_2 neboli 0,12 kWh / kWh H_2 . Typické hodnoty pro celý proces se však u relativně velkých zkapalňovacích jednotek pohybují v rozmezí 8–14 kWh/kg. Snižování spotřeby energie ve zkapalňovacích zařízeních je předmětem aktivního vývoje v odvětví LH_2 (viz například projekt IDEALHy společného podniku FCH (<https://www.idealhy.eu/>)).

Nejvíce zkapalňovacích závodů (11) se nachází v Severní Americe. V Evropě jsou v provozu zařízení (3) ve Francii (viz obrázek 36), Nizozemsku a Německu s celkovou kapacitou 19 t.den⁻¹. Největší zařízení má v současnosti kapacitu 68 t/den (New Orleans, USA). Nejnovější (2017) zkapalňovací zařízení (10 t.den⁻¹) vlastní společnost Airgas (nyní Air Liquide) v Calvert City.



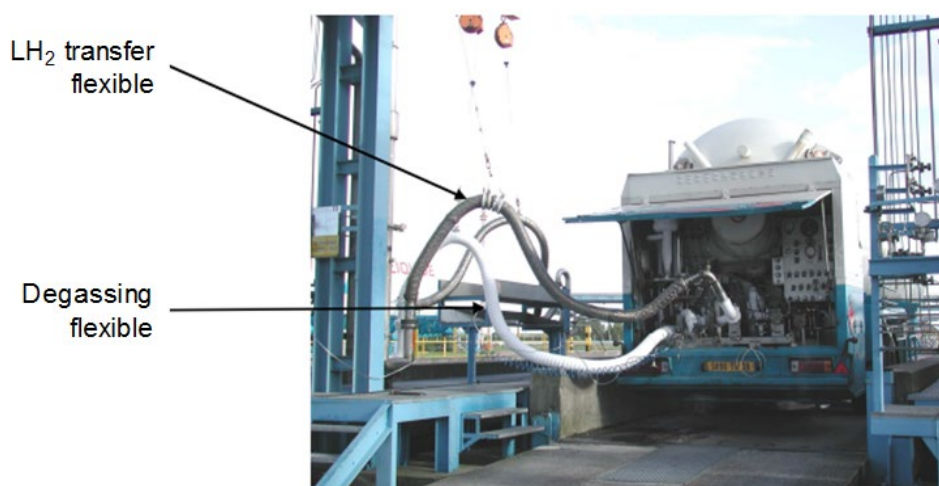
Obrázek 36. Plnicí stanice společnosti Air Liquide na LH₂
(vlevo: Little Town, USA; vpravo: Becancour, Kanada).



Obrázek 37. Obecná ergonomie nakládací rampy pro plnění návěsu LH₂.

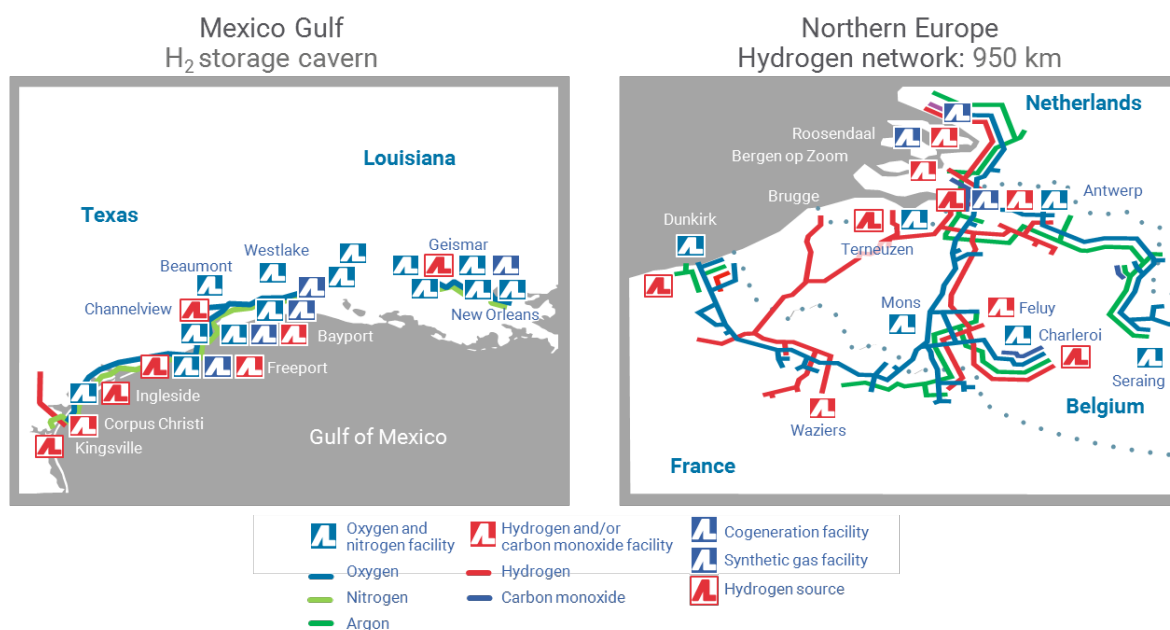
Obrázek 37 obsahuje ergonomii plnění návěsu zkapalněným vodíkem LH₂. Pro přepravu LH₂ potrubím ze skladu do jiného úložiště (například z velkého skladu do nákladního vozidla nebo z návěsu do skladovacího zásobníku v místě použití) existují dva způsoby:

- zvýšení tlaku (přirozené zvýšení tlaku nebo úmyslné odpařování LH₂ prostřednictvím malého externího tepelného výměníku). Tlak v „mateřském zásobníku“ je tedy vyšší než tlak v „dceřiném zásobníku“ a přeprava LH₂ je snadná. Hlavní nevýhodou této metody je časová náročnost a zvýšení tlaku v „mateřském“ skladu, což někdy vede k nutnosti odtlakování;
- čerpání v „mateřském skladu“ pomocí vhodného odstředivého kryogenního čerpadla. Hlavními nevýhodami této metody jsou cena čerpadla a nutnost jeho časté údržby, většinou z důvodu kavitace (nízká dostupná NPSH – čistá kladná sací výška: rozdíl mezi tlakem kapaliny a tlakem nasycených par uvažované sloučeniny – v důsledku nízké hustoty LH₂).



Obrázek 38. Návěs LH₂ během čerpání.

5. Potrubí



Obrázek 39. Vodíkové zdroje a síť společnosti Air Liquide.

Potrubí se používá k přepravě velkého množství plynných látek. Tlak v potrubí se může měnit podle vlastností přepravovaného plynu a požadavků zákazníků. Při přepravě vodíku může tlak v potrubí dosahovat hodnotu až 100 bar. Na obrázku 39 je znázorněna potrubní síť a výrobní závody společnosti Air Liquide na výrobu vodíku, syntetických plynů a dalších plynů v USA a severní Evropě.

Jak je znázorněno na obrázku 39, tato potrubí jsou instalována relativně blízko výrobních závodů. V potrubní síti mohou být v závislosti na vzdálenosti mezi výrobním závodem a zákazníkem vyžadovány tlakové stanice, aby se udržel cílový tlak v potrubí. Je důležité si

uvědomit, že pouze velmi málo stanic je přímo propojeno potrubím. Hlavní dopravní prostředek představují nákladní návěsy. V některých případech může být zajímavá i výroba na místě.

6. Bezpečnostní prvky v HRS a další infrastruktuře

(Co/kde/proč/normální a abnormální (nouzový) provoz / co dělat a čeho se vyvarovat při zásahu.)

Tabulka 3. Bezpečnostní prvky elektrolyzéro.

Co	Kde	Proč
Monitorování procesu (tlak, teplota)	Obecné	Detekce úniku a dysfunkce
Zařízení s certifikací ATEX	V hlavní skříni, která je uzavřeným prostorem, kde může dojít k úniku	Předejít přítomnosti zdrojů zapálení
Detekce H ₂	Uvnitř hlavní skříně	Aktivace výstrahy a případně uzavíracích ventilů v případě náhodného úniku
Detektor plamene (UV/IR)	Mimo hlavní skříň	Aktivace výstrahy a případně uzavíracích ventilů v případě náhodného zapáleného uvolnění

Tabulka 4. Bezpečnostní prvky návěsů na plynný vodík.

Co	Kde	Proč
Izolační ventily	Lahve	Podle směrnice ADR jsou všechna úložiště po dobu přepravy izolována ventilem
Zařízení TPRD	Zejména v případě návěsů s lahvemi typu IV Nachází se na střeše návěsu a směřuje vzhůru	Prevence natlakování a roztržení tlakové lahve v případě požáru Poznámka: není povinné, ale je nastaveno na některých vysokokapacitních návěsech s lahvemi typu IV
Zkouška těsnosti	Skladování na návěsu	Prevence rozsáhlých úniků po naplnění návěsu palivem

Tabulka 5. Bezpečnostní prvky pro vysokotlaké vodíkové potrubí.

Co	Kde	Proč
Monitorování tlaku	Potrubí	Detekce rozsáhlých úniků v síti
Pravidelná kontrola	Potrubí	Odhalení vad pláště a prevence rozsáhlých úniků
Katodická ochrana	Potrubí	Prevence koroze potrubí

Tabulka 6. Bezpečnostní prvky čerpacích stanic na plynný HRS.

Co	Kde	Proč
Kvalifikované a validované hadice a armatury	Proces a výdejní stojan	Prevence náhodných úniků
Pravidelná výměna hadice	Výdejní stojan	Prevence náhodných úniků
Detekce H ₂	Uvnitř procesního zásobníku Uvnitř výdejního stojanu	Aktivace výstrahy a případně uzavíracích ventilů v případě náhodného úniku
Detektor plamene (UV/IR)	V procesním zásobníku Venku, v blízkosti výdejního stojanu	Aktivace výstrahy a případně uzavíracích ventilů v případě náhodného zapáleného uvolnění
Automatický uzavírací ventil	Několik mezi zásobníkem H ₂ a výdejním stojanem	Omezení zásobního objemu H ₂ pro případ náhodného úniku
Sledování procesního tlaku	Obecné	Detekce abnormálního poklesu tlaku v důsledku netěsnosti nebo prasknutí potrubí
Uzavřené prostory s přirozenou ventilací	Procesní zásobník Výdejní stojan	V případě náhodného úniku H ₂ do vzduchu předejít dosažení meze hořlavosti
Nucená ventilace	Procesní zásobník u některých modelů	V případě náhodného úniku H ₂ do vzduchu, pokud není možné nebo není dostatečně účinné přirozené větrání, předejít dosažení meze hořlavosti směsi
Zařízení s certifikací ATEX	V uzavřených prostorách, kde může dojít k úniku (např. výdejní stojany)	Předejít přítomnosti zdrojů zapálení
Uzemněná hadice	Výdejní stojan	Předejít jiskření způsobenému statickou elektřinou při doplňování paliva
Automatická zkouška těsnosti před plněním	Obecné	Prevence náhodných úniků
Omezovače průtoku	Obecné	Omezení průtoku v případě úniku nebo prasknutí potrubí
Automatická doba zavírání	Obecné	Uzavření přívodních ventilů H ₂ v případě prasknutí hadice nebo úniku paliva z ní

Zařízení pro odpojení hadice	Výdejní stojan	Prevence rozsáhlého úniku uzavřením flexibilního přívodu v případě jeho roztržení, jestliže odběratel zapomene před opuštěním výdejního stojanu odpojit čerpací hadici od vozidla
Ochrana proti nárazu (sloupek stojanu)	Výdejní stojan	Ochránit výdejní stojan proti rozsáhlému mechanickému poškození náhodným nárazem vozidla a předejít katastrofálnímu úniku
Nouzový vypínač	Několik metrů od výdejního místa	Zavření přívodních ventilů H ₂ v případě nouze
Vodivá (uzemněná) betonová deska	Výdejní stojan	Předejít jiskření způsobenému statickou elektřinou při doplňování paliva

Tabulka 7. Bezpečnostní prvky návěsů na zkapalněný vodík.

Co	Kde	Proč
Dva bezpečnostní ventily, z nichž alespoň jeden je pneumatický	Nádrž	Podle směrnice ADR jsou všechna úložiště po dobu přepravy izolována ventilem
Bezpečnostní ventil pro silniční vozidla	Nádrž	Odpuštění přetlaku
Průtržný kotouč	Nádrž	Prevence protržení nádrže v případě zvýšení tlaku
PRD	Nádrž	Omezení rizika odpaření varem

Tabulka 8. Bezpečnostní prvky zásobníků na zkapalněný vodík.

Co	Kde	Proč
Monitorování tlaku a teploty	Nádrž	Odhalení vad izolace
Monitorování hladiny	Nádrž	Prevence přeplnění
Průtržný kotouč	Nádrž	Prevence protržení nádrže v případě zvýšení tlaku
PRD	Nádrž	Omezení rizika odpaření varem

Poděkování

Projekt HyResponse je všeobecně uznáván, protože zde prezentované materiály staví na původní sérii přednášek HyResponse.

Literatura a odkazy

1. Model analýzy vodíkové čerpací stanice (HRSAM). Argonne National Laboratory. <https://hdsam.es.anl.gov/index.php?content=hrsam> [přístup k datu 26.05.2021]
2. Plyný vodík – čerpací stanice. 1. část: Všeobecné požadavky Publikace norem BSI. 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 (Vliv konfigurací pro výdej vodíku na čerpacích stanicích a parametrů trhu na náklady na výdej vodíku). Mezinárodní časopis o vodíkové energii 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 (Vliv výdeje vodíku dle normy SAE J2601 na dobu čerpání do lehkých nákladních elektrických vozidel s palivovými články). Mezinárodní časopis o vodíkové energii 2017; 42:16675–16685.
5. SAE (Společnost automobilových inženýrů). Čerpací protokoly pro lehká povrchová vozidla na plyný vodík. Norma pro pozemní vozidla. J2601 Červenec 2014
6. Elgowainy A, Reddi K, Sutherland E, Joseck F. Tube-trailer consolidation strategy for reducing hydrogen refueling station costs (Strategie konsolidace trubkových návěsů pro snížení nákladů na vodíkové čerpací stanice). Mezinárodní časopis o vodíkové energii 2014; 39:20197–20206.
7. NIST (Národní institut pro normy a technologie). Thermophysical properties of fluid systems (Termofyzikální vlastnosti kapalných systémů). 2016. Převzato z: <http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>. [Přístup k datu 26.5.2021].