



Evropský program školení školitelů pro zásahové jednotky

Přednáška 5

Bezpečnost kapalného vodíku

ÚROVEŇ I

Hasič

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

Toto téma je k dispozici také na úrovních II a IV

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, výstupy PRESLHY byly použity coby základ



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, České republiky, Švýcarska a Norska. Důležitý je rovněž výstup 6.1 – Příručka vodíkové bezpečnosti: kapitola o bezpečnosti LH2 z projektu Prenormativní výzkum bezpečného používání kapalného vodíku (PRESLHY) (číslo grantové dohody 779613).

Souhrn

Pro různé aplikace vodíku, kde je zásadním problémem objem, je kapalný vodík (LH₂) nezbytný z důvodu snížení objemu. Existují však i další situace, kdy kapalný stav představuje rozumné a hospodárné řešení pro skladování a distribuci velkého množství vodíku v závislosti na požadavcích koncového uživatele. Kromě toho je výhodou LH₂ jeho extrémní čistota, takže je vhodný do mnoha průmyslových aplikací. Hlavní nevýhodou je enormní spotřeba energie potřebná ke zkapalnění plynného vodíku, což má významný dopad na hospodárnost nakládání s LH₂.

Nebezpečí související s přítomností a provozem systémů obsahujících LH₂ jsou předmětem posouzení bezpečnosti a rizik. Podstatnou součástí těchto analýz průběhu nehod je simulace fyzikálních jevů, které se vyskytují v souvislosti s neúmyslným únikem LH₂ do okolního prostředí, pomocí výpočetních modelů. Šíření a vypařování kryogenní kaluže na kapalném nebo pevném podkladu, jakož i případné hoření kaluže je v zásadě již dobře pochopeno. Dále byly vyvinuty nejmodernější počítačové modely, které byly ověřeny na základě příslušných experimentálních údajů. Stále však zůstávají otevřené otázky, které vyžadují další práci, aby se rozšířila dosud nedostatečná základna experimentálních údajů.

Tato přednáška vychází z dokumentu Výstup 6.1 – Příručka vodíkové bezpečnosti: kapitola o bezpečnosti LH₂ z projektu Prenormativní výzkum bezpečného používání kapalného vodíku (PRESLHY). Experimentální a teoretické zkoumání charakteristik kapalného vodíku, jeho příznivých i nepříznivých vlastností, jakož i poznatky získané při nehodách vedly k vytvoření souboru předpisů, norem, nařízení a směrnic, které přispěly k současné vysoké úrovni bezpečnosti. To platí jak pro výrobu LH₂, tak pro metody mobilního nebo stacionárního skladování a přepravy/distribuce LH₂ a jeho využití ve vědě i v průmyslu.

Klíčová slova

Kapalný vodík, kryogenní únik, náhodný únik, spalování, technologie kapalného vodíku

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. Vlastnosti kapalného vodíku.....	6
3.1 Fyzikální vlastnosti	6
3.2 Chemické vlastnosti	7
4. Nebezpečnost kapalného vodíku	7
4.1 Fyziologické problémy s kryogenním vodíkem.....	8
4.2 Okamžité zapálení uvolněného tlakového LH ₂	9
5. Technologie kapalného vodíku	9
5.1 Proces výroby kapalného vodíku a infrastruktura.....	9
5.2 Skladování a přeprava kapalného vodíku.....	10
5.2.1 Skladování kapalného vodíku	10
5.2.2 Kryostat pro stacionární aplikace.....	11
5.3 Čerpací stanice na zkapalněný vodík	11
5.3.1 Autobusy	15
6. Nebezpečí kapalného vodíku a související rizika pro členy zásahových jednotek 15	
Literatura a odkazy	16

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

Využití kapalného vodíku (LH_2) v praktických aplikacích je velmi zajímavé vzhledem k vyšší hustotě energie LH_2 v porovnání se stlačeným plynným vodíkem (cGH_2). LH_2 se zpravidla používá jako koncentrovaná forma skladování vodíku. Skladování plynu v kapalném stavu zabere méně místa než skladování v plynném stavu. Hustota LH_2 činí při standardním tlaku a bodu varu (1 atm, 20,3 K) pouze $70,8 \text{ kg m}^{-3}$. LH_2 vyžaduje kryogenní technologie skladování, jako jsou speciální tepelně izolované zásobníky, a vyžaduje zvláštní manipulaci společnou pro všechny druhy skladování kryogenních paliv, což přináší potenciální rizika pro výrobu, přepravu i použití LH_2 .

Cílem této přednášky je poskytnout členům zásahových jednotek dostatečné znalosti a informace o potenciálním nebezpečí souvisejícím s LH_2 a pomoci jim pochopit vlastnosti a chování LH_2 .

Na konci této přednášky budou členové zásahové jednotky:

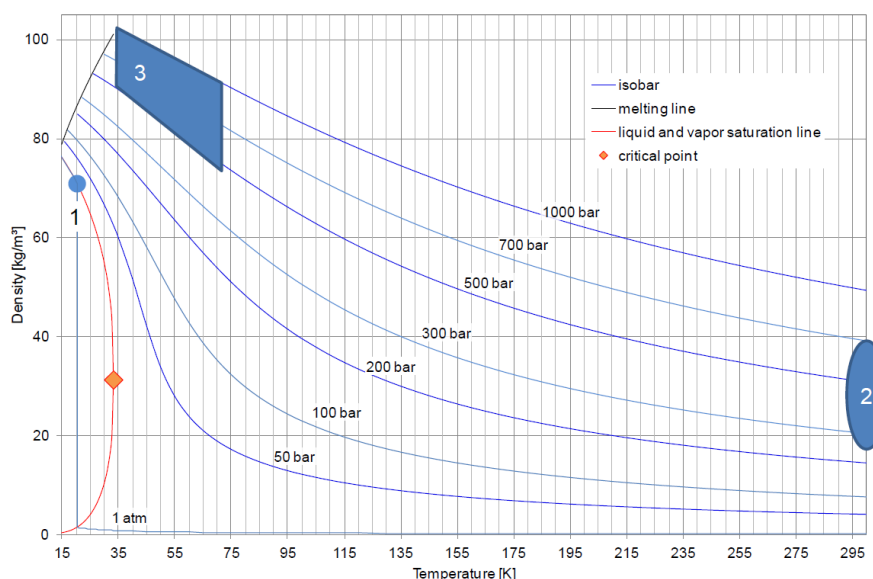
Přednáška 5: Kapalný vodík

- chápat fyzikální a chemické vlastnosti LH_2 ,
- znát nebezpečí kryogenního vodíku,
- dokázat rozpoznat uvolňování a hoření kryogenního vodíku a tepelná a tlaková rizika,
- znát technologie výroby, skladování a přepravy LH_2 ,
- identifikovat riziko a nebezpečí LH_2 relevantní pro členy zásahových jednotek.

3. Vlastnosti kapalného vodíku

3.1 Fyzikální vlastnosti

Kapalný vodík (LH_2) je kapalný stav prvku vodík. Aby mohl vodík existovat jako kapalina, musí být ochlazen pod svoji kritickou teplotu 33 K. Aby však byl v plně kapalném stavu při atmosférickém tlaku, musí být vodík ochlazen na teplotu 20,28 K ($-252,87^\circ\text{C}$) [1]. Trojný bod vodíku je při teplotě 13,81 K [1] a tlaku 7,042 kPa [2]. Kapalný vodík má také mnohem vyšší specifickou energii než benzín, zemní plyn nebo nafta. Kapalný vodík se zpravidla používá jako koncentrovaná forma pro skladování vodíku. Skladování plynu v kapalném stavu zabere méně místa než skladování plynu v plynném stavu při normální teplotě a tlaku. Hustota kapaliny je však ve srovnání s jinými běžnými palivy velmi nízká. Po zkapalnění může být vodík uchovávan jako kapalina v tlakových a tepelně izolovaných nádobách. Hustota kapalného vodíku je pouze 70,99 g/l (při teplotě 20 K), a relativní hustota pouhých 0,07 (obrázek 1). Energetická hustota vodíku je velmi vysoká: 1 kg vodíku obsahuje přibližně 2,5krát více energie než 1 kg zemního plynu. Přestože specifická energie vodíku je více než dvakrát vyšší než u jiných paliv, má pozoruhodně nízkou objemovou energetickou hustotu, mnohonásobně nižší. Hlavní vlastnosti LH_2 jsou shrnuty v tabulce 1.



1 – kapalina při ~20 K; 2 – stlačený plyn při ~300 K; 3 – kryogenní stlačený plyn

Obrázek 1. Hustota vodíku v oblasti nízkých teplot v závislosti na tlaku [3].

Přednáška 5: Kapalný vodík

3.2 Chemické vlastnosti

Vodík je schopen chemicky reagovat s většinou ostatních prvků. Ve spojení s kyslíkem je vodík vysoce hořlavý v širokém rozsahu koncentrací. Hoří nesvitivým horkým plamenem a spaluje se na vodní páru, přičemž se uvolňuje chemicky vázaná energie jako teplo (spalné teplo: 286 kJ/mol). Stechiometrická směs vodíku se vzduchem obsahuje 29,5 % objemových vodíku. Rozsah hořlavosti je 4–75 % obj. koncentrace ve vzduchu, až 95 % obj. v kyslíku a rozšiřuje se s rostoucí teplotou. Dolní mez hořlavosti (LFL) jako minimální množství paliva, které podporuje spalování, je obvykle důležitějším limitem pro úniky s nízkou rychlostí, protože při kontinuálním úniku bude dosažena jako první. Nejdůležitější je, že mrak s >4% koncentrací vodíku může pokrývat větší vzdálenost a větší plochu od místa uvolnění.

K jeho zapálení stačí slabá jiskra nebo elektrostatický výboj lidského těla, který se pohybuje v rozmezí 10 mJ; tím se však vodík neliší od jiných hořlavých plynů. Minimální zápalná energie se dále snižuje s rostoucí teplotou, tlakem nebo obsahem kyslíku. Nedávno byla provedena měření při kryogenních teplotách [6].

4. Nebezpečnost kapalného vodíku

Kapalný vodík vyžaduje kryogenní technologie skladování, jako jsou speciální tepelně izolované nádoby, a vyžaduje speciální manipulaci, která je společná pro skladování všech kryogenních paliv. V případě vodíku jsou podmínky podobné, ale důsledky mohou být závažnější než u kapalného kyslíku. I v tepelně izolovaných nádobách je obtížné udržet tak nízkou teplotu a vodík postupně uniká. S kapalným vodíkem souvisí mnoho stejných bezpečnostních problémů jako v případě jiných forem vodíku. Kapalný vodík je navíc dostatečně chladný na to, aby dokázal zkapalnit, případně dokonce způsobit ztuhnutí kyslíku, což může představovat nebezpečí výbuchu.

Za účelem definování různých nebezpečných scénářů a souvisejících důsledků se uvažuje pouze o skladování LH₂. **Tabulka 1** shrnuje tyto události s uvedením počátečních příčin a možných konečných důsledků.

Přednáška 5: Kapalný vodík

Tabulka 1. Popis možných nebezpečných událostí.

Obávané události	Hlavní podmínky	Důsledky
1 – Protržení zásobníku při pracovním tlaku (P_W) (dopadající oheň/fragment)	100% plyný H_2 – 10 bar – nádoba typu I	Přetlak a fragmenty
2 – Havarijní událost při skladování kapalného H_2 (případ požáru) na $2P_W$	Výbuch zásobníku LH_2 Zášlehový požár	„BLEVE“ s tepelnými účinky
3 – Porucha skladovacího zařízení (protržení nebo proražení)	10 bar, rychlé šíření a odpařování kapalného H_2 na podlaze	Odpařování kaluže a tvorba kryogenního mraku s účinky přetlaku v případě vznícení hořlavého mraku
4 – Netěsnost potrubí mezi zásobníkem a čerpadlem	10 bar, kapalina * dvoufázové tlakové uvolňování * a/nebo kaluž kapalného H_2 , odpařování tvořící hořlavý mrak	Proud kapalného vodíku a potenciální srážky, které na podlaze vytvoří kaluž LH_2 , a účinky přetlaku v důsledku vznícení hořlavé směsi
5 – Netěsnost potrubí mezi čerpadlem a odpařovačem atm.	1 000 bar, kapalina * dvoufázové tlakové uvolňování, které se však chová jako vysokotlaký proud plynu	Chování takřka vysokotlakého proudu plynu s účinky přetlaku v důsledku vznícení
6 – Protržení zásobníku při tlaku prasknutí (P_R)	100% plyn – 10 bar, typ I	Přetlak a fragmenty

Poznámka: BLEVE– výbuch expandující páry vroucí kapaliny.

Pokud jde o výše uvedené situace, lze zdůraznit, že některé z nich jsou specifické pro kapalný vodík a jiné obávané události v souvislosti s plynem jsou již popsány.

4.1 Fyziologické problémy s kryogenním vodíkem

Vodík je klasifikován jako nejedovatý a nekyselý, nekarcinogenní, je to jednoduchá dusivá látka, u níž není stanovena prahová limitní hodnota (TLV) ani hodnota LD50 (smrtelná dávka 50 %) [7].

Odpařování uvolněného kapalného vodíku ovlivňuje složení atmosféry, zejména v (částečně) uzavřených prostorech, a hrozí tak nebezpečí udušení. Obrovská rychlost expanze kapaliny a okolního vzduchu v kombinaci s kondenzací O_2 z okolního vzduchu a hořením hořlavých směsí H_2 se vzduchem vede ke značnému zředění místní atmosféry. Objemový podíl kyslíku nižší než 19,5 % považuje NASA za nebezpečný pro člověka; podíl nižší než 8 % je smrtelný do několika minut (tabulka 2). Úroveň aktivace poplašné signalizace bývá obvykle nastavena na 19 % kyslíku.

Přednáška 5: Kapalný vodík

Tabulka 2. Vliv atmosféry s klesajícím obsahem kyslíku na člověka.

Obsah kyslíku ve vzduchu (%)	Příznaky
~21–19	Žádné
~19–15	Zkrácení reakční doby, žádné viditelné účinky
~15–12	Ztížené dýchání, zrychlený srdeční tep, poruchy pozornosti nebo koordinace
~12–10	Závratě, chybný úsudek, špatná svalová koordinace, rychlá únava, lehce namodralé rty
~10–8	Nevolnost, zvracení, neschopnost pohybu, ztráta vědomí s následnou smrtí
~8–6	Poškození mozku po 4–8 minutách, smrt do 8 minut
<6	Bezvědomí po 40 s, respirační selhání, smrt

Přímý kontakt s kapalným vodíkem nebo s povrchem s velmi nízkou teplotou způsobuje kryogenní „popáleniny“ podobné popáleninám teplem. Živá tkáň zmrzne s výjimkou velmi krátkých kontaktních období, kdy je teplotní rozdíl mezi kryogenem a kůží stále vysoký (režim varu filmu) a přenos tepla malý. Přimrznutí kůže k chladnému povrchu může vést k jejímu vážnému poškození při odstraňování. Dlouhodobé vystavení kůže studenému vodíku může způsobit omrzliny. Příznakem je krátkodobá lokální bolest. Zmrzlé tkáně jsou nebolestivé, mají voskový vzhled a světle bělavou nebo nažloutlou barvu. Rozmrazování zmrzlé tkáně může způsobit intenzivní bolest. Může nastat též šok. Dlouhodobé vdechování studených par nebo plynu může způsobit závažné poškození plic. Zejména oči jsou citlivé na chlad. Delší vystavení nízkým teplotám po velkém úniku snižuje tělesnou teplotu, což vede k podchlazení, poruchám orgánových funkcí a k dechovému útlumu [5].

S náhodným únikem kapalného vodíku nejsou spojena žádná významná rizika pro životní prostředí, protože není toxický.

4.2 Okamžité zapálení uvolněného tlakového LH₂

Zdá se, že okamžité zapálení vysokotlakého proudu LH₂ je podobné jako u vysokotlakého proudu plynného vodíku, přičemž v důsledku vznícení vzniká přetlak.

5. Technologie kapalného vodíku

5.1 Proces výroby kapalného vodíku a infrastruktura

Jednou z výzev při budování vodíkového hospodářství je vytvoření efektivní výrobní a dodavatelské infrastruktury. Velkoobjemová distribuce upřednostňuje relativně hustou kapalnou fázi LH₂, ovšem nevýhodou zkapalňování je stále její nízká energetická účinnost. Historicky se LH₂ používal zejména jako raketové palivo, kde nízká účinnost výroby nepředstavovala překážku. V USA byl v rámci kosmických programů zahájen rozsáhlý

Přednáška 5: Kapalný vodík

program zkapalňování vodíku, který vedl ke konstrukci a výstavbě velkých zkapalňovacích závodů.

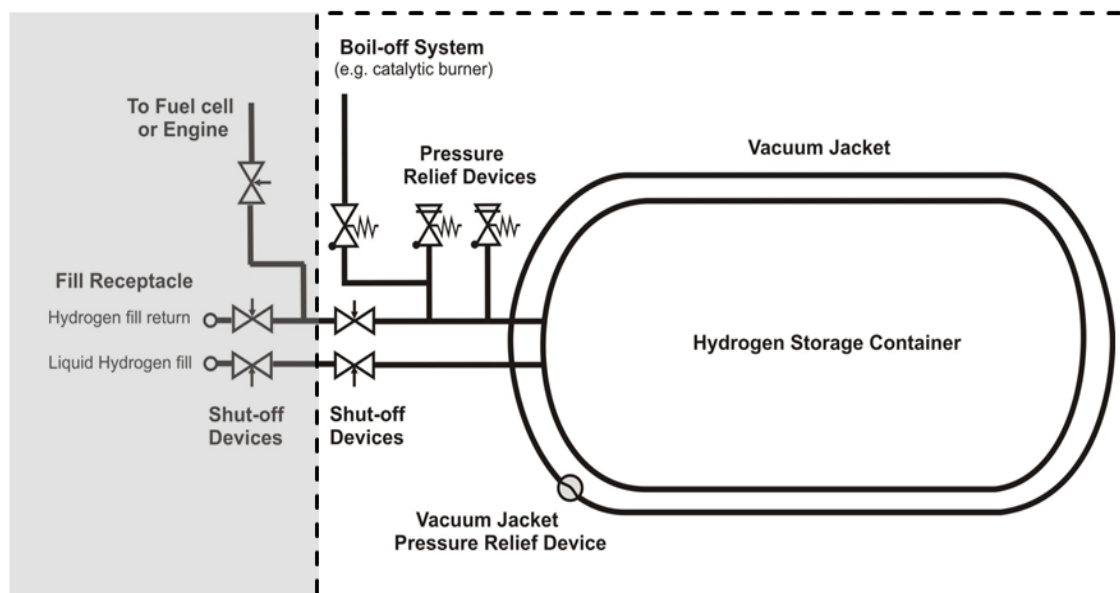
5.2 Skladování a přeprava kapalného vodíku

5.2.1 Skladování kapalného vodíku

Zásobníky kapalného vodíku již dávno existují v profesionálním použití. Doposud však neexistuje žádné veřejně dostupné úložiště kapalného vodíku. Zásobníky na LH₂ pojmu více vodíku než zásobníky na GH₂: objemová kapacita LH₂ činí 0,070 kg/l oproti 0,030 kg/l u zásobníků na GH₂ při tlaku 70 MPa. Ke zkapalnění je však zapotřebí značné množství energie (přibližně 30 % energie obsažené ve vodíku). Vodík může být zkapalněný pro zjednodušení přepravy nebo skladování. Všichni významní dodavatelé průmyslových plynů používají kryogenní cisterny. LH₂ se používá na vodíkových čerpacích stanicích a v leteckých aplikacích.

Hlavní součásti nádrže LH₂ jsou znázorněny na [obrázku 2](#). Patří mezi ně:

- skladovací nádrž na LH₂,
- uzavírací zařízení,
- systém odpařování varem,
- teplotou ovládaná zařízení pro uvolnění přetlaku (TPRD),
- případná propojovací potrubí a armatury mezi výše uvedenými součástmi.



Obrázek 2. Schematické znázornění systému skladování LH₂ z odkazu [8]

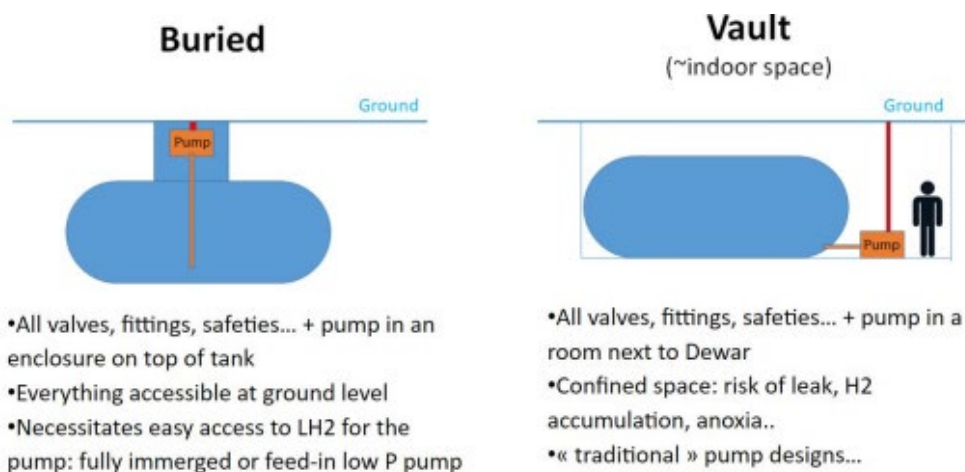
Tato skladovací zařízení mohou být svislá i vodorovná. Stacionární kryogenní zásobníky mají objem od 10 m³ do 300 m³ s vnitřním tlakem okolo 12 bar.

Přednáška 5: Kapalný vodík



Obrázek 3. Horizontální a vertikální zásobníky kapalného vodíku. (Zdroj Air Liquide).

Většina zásobníků na LH₂ je nadzemní. Existuje však i několik případů podzemních úložišť LH₂, zapuštěných nebo komorových, jak je znázorněno a uvedeno na [obrázku 4](#).



Obrázek 4. Dvě hlavní konstrukce podzemních úložišť LH₂.

5.2.2 Kryostat pro stacionární aplikace

Kryogenní nádoby se ke skladování a přepravě kapalného vodíku běžně používají již déle než 70 let.

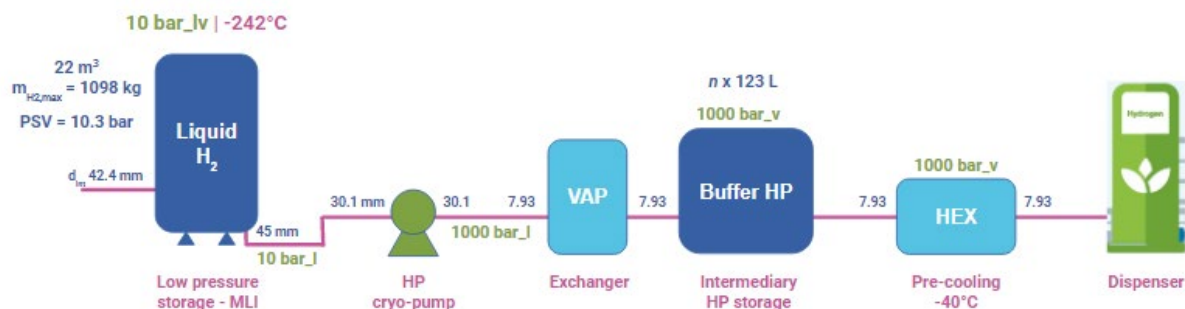
5.3 Čerpací stanice na zkapalněný vodík

Čerpací stanice na LH₂ se skládá v zásadě ze součástí uvedených na [obrázku 5](#):

- 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,
- ohřívač (pojmenovaný VAP: horký olej, elektrický pro ohřev vodíku při tlaku 1 000 bar),

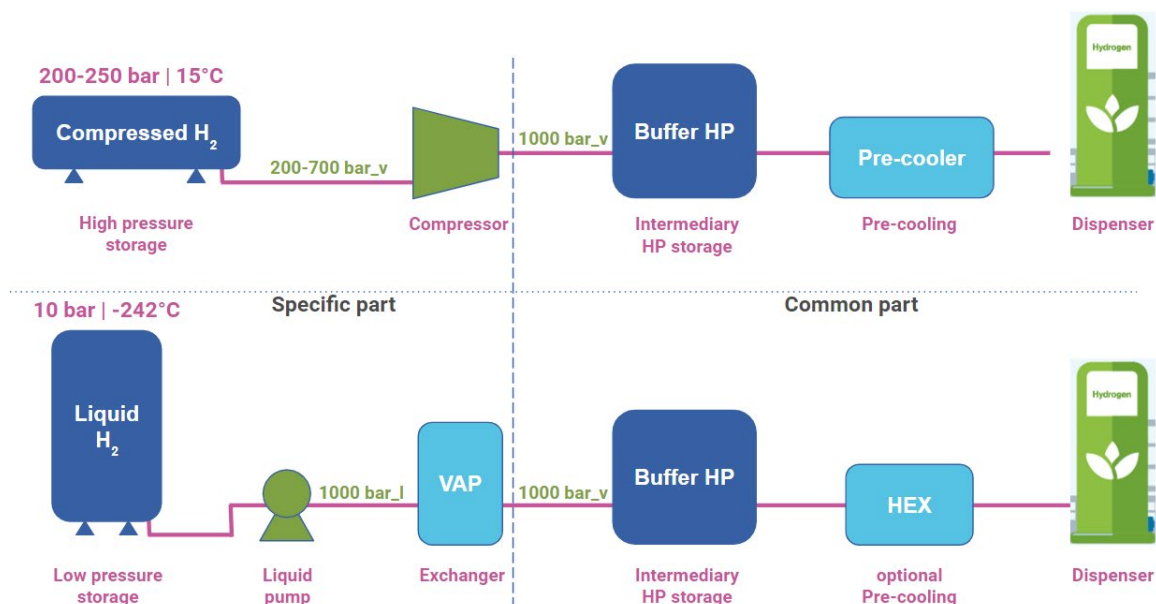
Přednáška 5: Kapalný vodík

- Tlumiče 1 000 bar (několik m³); tyto tlumiče jsou obvykle svazky typu I nebo II (tj. kovové válce nebo dlouhé kovové trubky).



Obrázek 5. 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 6](#)).

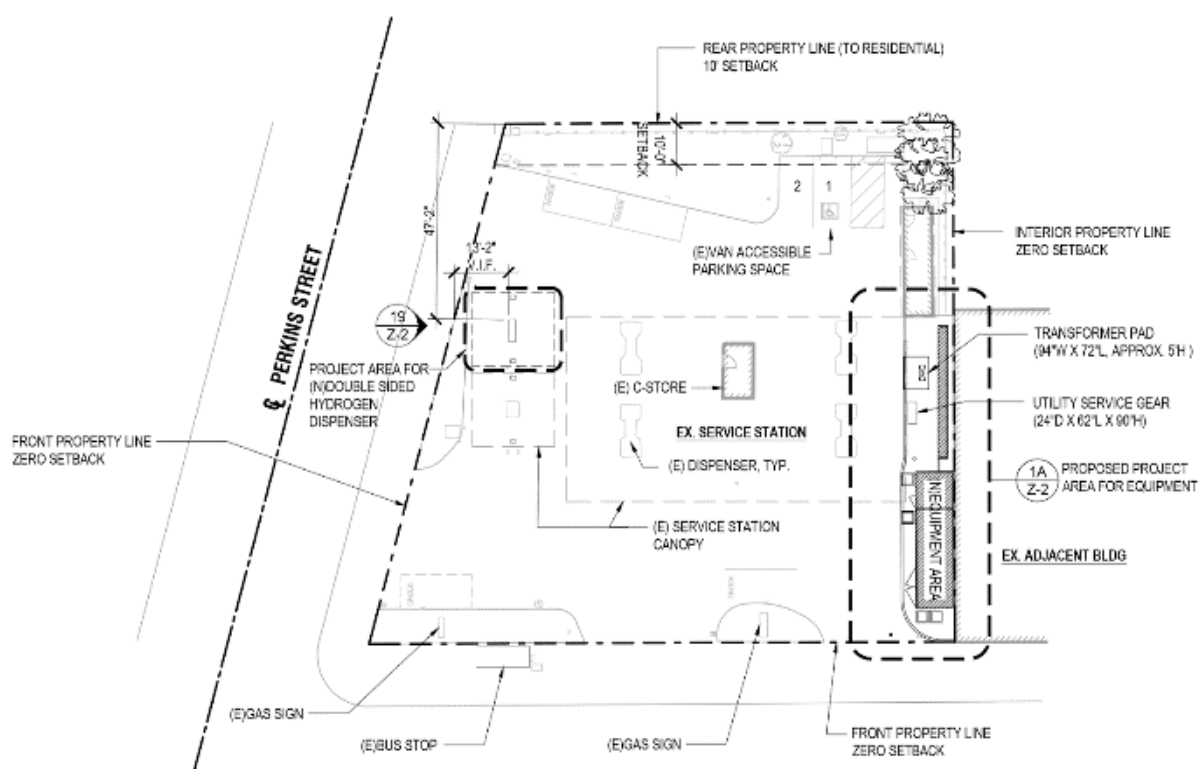
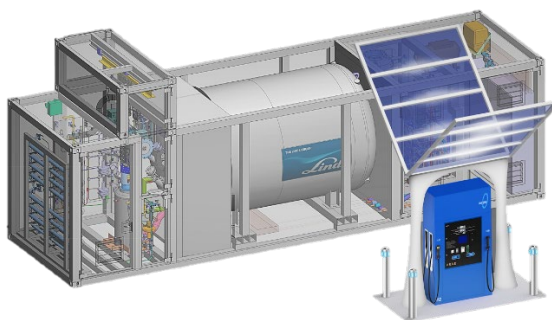


Obrázek 6. Zjednodušené srovnání čerpacích stanic na plyný a kapalný vodík. Nahoře čerpací stanice na plyný vodík, dole čerpací stanice na kapalný vodík.

LH₂ je doplňováno nákladním vozidlem s LH₂. Toto nákladní vozidlo s LH₂ se skládá z horizontální nádrže o objemu 40 m³ a pracovním tlaku 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.

Konkrétní příklad čerpací stanice na kapalný vodík Linde v Oaklandu (USA) (viz [obrázek 7](#)).

Přednáška 5: Kapalný vodík



Obrázek 7. Uspořádání čerpací stanice Linde na kapalný vodík v Oaklandu. (Zdroj: společnost Linde)

Ve Francii se mezi veřejným prostranstvím a zdrojem kapalného vodíku vyžaduje bezpečnostní vzdálenost 20 m. Bezpečnostní prvky čerpacích stanic na kapalný vodík jsou takřka stejné jako u čerpacích stanic na plyný vodík (viz [tabulku 3](#)).

Přednáška 5: Kapalný vodík

Tabulka 3. Bezpečnostní prvky čerpacích stanic na plyný/kapalný vodík.

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
Uzemňená 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

Přednáška 5: Kapalný vodík

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

5.3.1 Autobusy

Většina autobusů používá vodík ve formě stlačeného plynu. Existuje však několik příkladů, kdy byl vodík skladován i v kapalném stavu.

6. Nebezpečí kapalného vodíku a související rizika pro členy zásahových jednotek

Zdravotní rizika související s únikem zkapalněného vodíku jsou uvedena níže.

- Styk s kapalným vodíkem nebo potřísnění kůže či očí může způsobit vážné popáleniny v důsledku *omrznutí nebo podchlazení*.
- Ke *kryogenním popáleninám* může dojít také v důsledku styku nechráněných částí lidského těla s chladnými tekutinami nebo chladnými povrchy.
- Vdechování studených vodíkových par může způsobit *dýchací potíže* a může vést až k *udušení*.
- Přímý fyzický kontakt s LH₂, chladnými výpary nebo chladným zařízením může způsobit vážné *poškození tkání*. Chvilkový kontakt s malým množstvím kapaliny nemusí představovat tak velké nebezpečí popálení, protože odpařující plynný vodík může vytvořit ochranný film. Nebezpečí umrznutí hrozí při úniku velkého množství a dlouhodobé expozici¹.
- Zaměstnanci by se neměli dotýkat studených kovových částí a měli by nosit *ochranný oděv*. Postiženou oblast musí také chránit volným krytím.
- Při poklesu vnitřní tělesné teploty na 27 °C a méně hrozí *srdeční poruchy* a při poklesu vnitřní tělesné teploty pod 15 °C může dojít k úmrtí.
- *Udušení* je možné také v případě, že se zkapalněný vodík uvolní a vypaří v interiéru.

¹ Účinek kapalného dusíku: <https://www.youtube.com/watch?v=F9dhZJQk80A&feature=youtu.be&t=291>

Literatura a odkazy

1. Rossini FD. Zpráva o mezinárodní praktické teplotní stupnici z roku 1968. Komise I.2: Termodynamika a termochemie. Mezinárodní unie pro čistou a užitou chemii. Odst.557–Odst.570.
2. Cengel, Yunus A. a Turner, Robert H. (2004). Fundamentals of thermal-fluid sciences (Základy nauky o termice a tekutinách), McGraw-Hill, s. 78.
3. Klier J. a kol., A new cryogenic high-pressure H₂ test area: First results (Nová kryogenní vysokotlaká zkušební oblast H₂: První výsledky). Sborník příspěvků 12. mezinárodní konference IIR, Drážďany (2012).
4. Edeskuty F.J., Stewart W.F., Safety in the handling of cryogenic fluids (Bezpečnost při manipulaci s kryogenními kapalinami). The International Cryogenics Monograph Series, Plenum Press, New York (1996).
5. Bonhoeffer, K.F., Harteck, P. Experimente über Para- und Orthowasserstoff (Experimenty s paravodíkem a orthovodíkem). Naturwissenschaften 17, 182 (1929).
6. Proust C., (INERIS research performed within PRESLHY (Výzkum INERIS prováděný v rámci projektu PRESLHY). Prezentace na 13. mezinárodním sympóziu o nebezpečí, prevenci a zmírňování následků průmyslových výbuchů (ISHPMIE), Braunschweig (2020).
7. NASA. Zpráva prezidentské komise o nehodě raketoplánu Challenger (1986). (1997). K dispozici na adrese <http://science.ksc.nasa.gov/shuttle/missions/51-l/docs/rogers-commission/table-of-contents.html> [přístup k datu 04.04.2021]
8. GTR, Návrh globálního technického předpisu (GTR) o vozidlech na vodíkové palivo, 2013. ECE/TRANS/WP.29/GRSP/2013/41. Organizace spojených národů. Ekonomická komise OSN pro Evropu. Výbor pro vnitrostátní dopravu. Světové fórum pro harmonizaci předpisů pro vozidla, 160. zasedání, Ženeva, 25.–28. června 2013.