



European Train the Trainer Program for Responders

Leksjon 5

Sikkerhet for flytende hydrogen

NIVÅ I

Brannkonstabel

Informasjonen i denne leksjonen er tilegnet **brannkonstabler (og tilsvarende)** og høyere nivåer.

Dette emnet er også tilgjengelig på nivå II og IV.

Denne leksjonen er en del av et opplæringsmaterieell med nivåer I–IV: Brannkonstabel, utrykningsleder, innsatsleder og spesialist. Les introduksjonen til leksjonen for forventet forkunnskap og læringsutbytte

Merk: Dette materiellet tilhører HyResponder Consortium og skal krediteres deretter, resultatene fra PRESHLY har blitt brukt som grunnlag



Leksjon 5: Flytende hydrogen

Ansvarsfraskrivelse

Til tross for at dette dokumentet er nøye utarbeidet, gjelder følgende ansvarsfraskrivelse: Informasjonen i dette dokumentet er gitt som den er, og det gis ingen garanti om at informasjonen er egnet for et bestemt formål. Brukeren av den tar i bruk informasjonen på egen risiko og ansvar.

Dokumentet gjenspeiler bare forfatterens syn. FCH JU og EU er ikke ansvarlig for bruk av informasjonen i det.

Takk

Prosjektet har fått finansiering fra Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (JU) (now Clean Hydrogen Partnership) under bevilgningsavtale nr. 875089. JU mottar støtte fra EUs forsknings- og innovasjonsprogram Horizon 2020 samt fra Storbritannia, Frankrike, Østerrike, Belgia, Spania, Tyskland, Italia, Tsjekkia, Sveits og Norge. Deliverable 6.1 – Handbook of hydrogen safety: Chapter on LH2 safety – fra prosjektet Pre-normative REsearch for Safe use of Liquid Hydrogen (PRESLHY) (bevilgningsavtale nr. 779613) takkes også.



Leksjon 5: Flytende hydrogen

Sammendrag

For ulike bruksområder for hydrogen der volum spiller en viktig rolle, er flytende hydrogen (LH₂) nødvendig for å redusere volumet. Det finnes også andre situasjoner der den flytende tilstanden er en fornuftig og økonomisk løsning for lagring og distribusjon av store mengder hydrogen avhengig av sluttbrukerens krav. Videre har LH₂ fordelen av ekstrem renhet, noe som gjør den egnet for mange industrielle bruksområder. En stor ulempe er den enorme energitilførselen som kreves for å gjøre hydrogengass flytende, noe som har en betydelig innvirkning på økonomien av håndtering av LH₂.

Farene forbundet med nærværet til og driften av systemer som inneholder LH₂, er underlagt sikkerhets- og risikovurderinger. En viktig del av slike ulykkesekvensanalyser er simuleringen av de fysiske fenomenene som oppstår i forbindelse med utilsiktet utslipp av LH₂ i miljøet, ved hjelp av beregningsmodeller. Det er hovedsakelig god forståelse av oppførselen til spredningen og fordampningen av en kryogen dam på enten væske eller fast grunn samt potensiell forbrenning av dammen. Videre har toppmoderne datamodeller blitt utviklet og validert mot respektive eksperimentelle data. Det er imidlertid fortsatt åpne spørsmål som krever ytterligere innsats for å utvide det fortsatt mangelfulle eksperimentelle datagrunnlaget.

Denne leksjonen er basert på Deliverable 6.1 – Handbook of hydrogen safety: Chapter on LH₂ safety – fra prosjektet Pre-normative REsearch for Safe use of Liquid Hydrogen (PRESLHY). Den eksperimentelle og teoretiske undersøkelsen av egenskapene til flytende hydrogen, dets gunstige og ugunstige egenskaper samt lærdommene fra ulykker har ført til et sett med retningslinjer, standarder og reguleringer som har gitt et høyt sikkerhetsnivå i dag. Dette gjelder både LH₂-produksjon og metodene for mobil eller stasjonær LH₂-lagring og transport/distribusjon og hydrogenets anvendelse i både vitenskap og industri.

Nøkkelord

Flytende hydrogen, kryogent utslipp, utilsiktet søl, forbrenning, flytende hydrogen-teknologi

Leksjon 5: Flytende hydrogen

Innhold

Sammendrag.....	3
Nøkkelord	3
1. Målgruppe.....	5
1.1 Rollebeskrivelse: Brannkonstabel.....	5
1.2 Kompetansenivå: Brannkonstabel	5
1.3 Tidligere opplæring: Brannkonstabel	5
2. Innledning og mål.....	5
3. Egenskapene til flytende hydrogen	6
3.1 Fysiske egenskaper	6
3.2 Kjemiske egenskaper	7
4. Farer med flytende hydrogen	7
4.1 Fysiologiske problemer med kryogent hydrogen	8
4.2 Umiddelbar antenning av utslipp av trykksatt LH ₂	9
5. Flytende hydrogen-teknologi	9
5.1 Produksjonsprosess og infrastrukturer for flytende hydrogen.....	9
5.2 Lagring og transport av flytende hydrogen.....	10
5.2.1 Lagring av flytende hydrogen.....	10
5.2.2 Kryostat for stasjonær bruk.....	11
5.3 Tankstasjon for flytende hydrogen	11
5.3.1 Busser.....	15
6. Farer ved flytende hydrogen og tilhørende risiko for nødetatene	15
Referanser.....	16

Leksjon 5: Flytende hydrogen

1. Målgruppe

Informasjonen i denne leksjonen er rettet mot NIVÅ 1: brannkonstabel Leksjoner er også tilgjengelige på nivå II, III og IV: utrykningsleder, innsatsleder og spesialist .

Rollebeskrivelser, kompetansenivå og læringsutbytter for brannkonstabel er beskrevet nedenfor.

1.1 Rollebeskrivelse: Brannkonstabel

En brannkonstabel er ansvarlig for og kompetent til å utføre oppgaver sikkert, iført korrekt bekledning inkludert pusteluft. Konstabelen kan anvende tilgjengelig utstyr som kjøretøy, stiger, slanger, slukkere, kommunikasjon og redningsverktøy under alle klimatiske forhold i områder og nødssituasjoner som krever respons.

1.2 Kompetansenivå: Brannkonstabel

Nødetatene må ha støtte i riktig kunnskap og praksis og er opplært i sikker og korrekt bruk av personlig verneutstyr, pusteluftutstyr og annet utstyr som det forventes at de skal bruke. Atferd som holder dem og andre kolleger trygge, skal beskrives i en standardprosedyre (SOP). Øvet evne til dynamisk å vurdere risiko for seg selv og andre er påkrevd.

1.3 Tidligere opplæring: Brannkonstabel

I henhold til det europeiske rammeverket for kvalifikasjon (EQF) er denne leksjonen tilegnet nivå 2 Faktabasert grunnkunnskap på et arbeids- eller studiefelt. Grunnleggende kognitive og praktiske ferdigheter som er nødvendig for å bruke relevant informasjon til å utføre oppgaver og løse rutinemessige problemer ved hjelp av enkle regler og verktøy. Arbeide eller studere under veiledning med noe autonomi.

2. Innledning og mål

Bruken av flytende hydrogen (LH_2) i praktiske anvendelser er av stor interesse på grunn av den høye energitettheten til LH_2 sammenlignet med den til komprimert gassformig hydrogen (cGH_2). LH_2 brukes vanligvis som en konsentrert form for hydrogenlagring. Som for enhver gass tar det mindre plass å lagre den som væske enn å lagre den som gass. Tettheten til LH_2 er bare $70,8 \text{ kg m}^{-3}$ ved standardtrykk og koketemperatur (1 atm, 20,3 K). LH_2 krever kryogen lagringsteknologi som spesielle varmeisolerte beholdere, og krever spesialhåndtering som er felles for alle kryogene drivstoff, noe som medfører potensiell risiko for LH_2 -generering, -transport og -bruk.

Målet med denne leksjonen er å gi nødetatene tilstrekkelig kunnskap om de potensielle farene ved LH_2 , og hjelpe nødetatene til å forstå egenskapene og oppførselen til LH_2 .

Ved slutten av denne leksjonen skal du kunne

- forstå egenskapene, fysiske og kjemiske, for LH_2

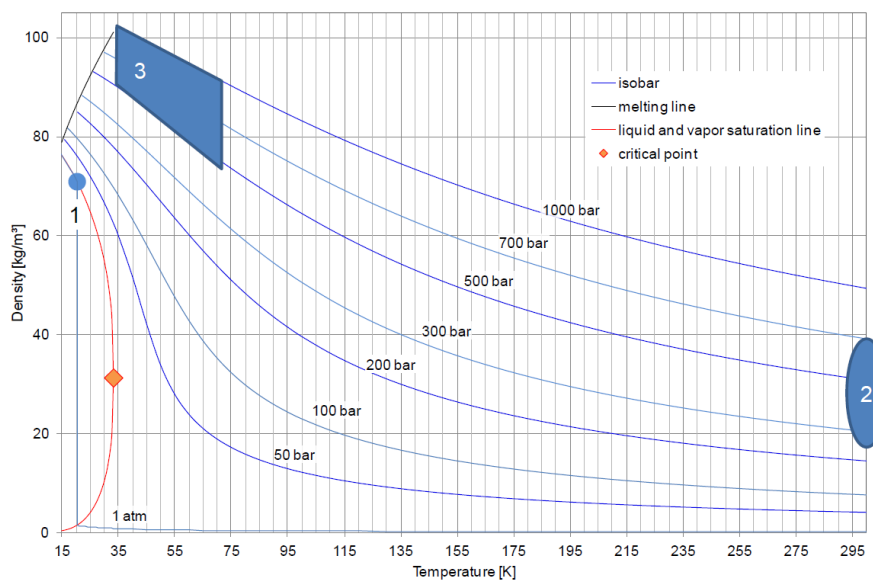
Leksjon 5: Flytende hydrogen

- kjenne til farene ved kryogent hydrogen
- kjenne til utslipp og forbrenning av kryogent hydrogen og termiske og trykkmessige farer
- kjenne til teknologiene for LH₂-generering, -lagring og -transport.
- identifisere risikoen og faren ved LH₂ som er relevante for nødetatene.

3. Egenskapene til flytende hydrogen

3.1 Fysiske egenskaper

Flytende hydrogen (LH₂) er den flytende tilstanden til grunnstoffet hydrogen. For å eksistere som væske må hydrogen kjøles ned til under det kritiske punktet på 33 K. Men for at det skal være i en fullstendig flytende tilstand ved atmosfærisk trykk, må hydrogen kjøles ned til 20,28 K (-252,87 °C) [1]. Trippelpunktet til hydrogen er ved 13,81 K [1] og 7,042 kPa [2]. Flytende hydrogen har også en mye høyere spesifikk energi enn bensin, naturgass eller diesel. Flytende hydrogen brukes vanligvis som en konsentrert form for hydrogenlagring. Som for enhver gass tar det mindre plass å lagre hydrogen som væske enn å lagre det som gass ved normal temperatur og trykk. Væsketettheten er imidlertid veldig lav sammenlignet med andre vanlige drivstoff. Når hydrogenet er gjort flytende, kan det opprettholdes som væske i trykksatte og varmeisolererte beholdere. Tettheten til flytende hydrogen er bare 70,99 g/L (ved 20 K), en relativ tetthet på bare 0,07 (figur 1). Energitettheten til hydrogen er svært høy: 1 kg hydrogen inneholder omtrent 2,5 ganger mer energi enn 1 kg naturgass. Selv om den spesifikke energien er mer enn det dobbelte av andre drivstoff, gir dette en bemerkelsesverdig lav volumetrisk energitetthet, mange ganger lavere. Hovedegenskapene til LH₂ er oppsummert i tabell 1.



1 – væske @ ~ 20 K; 2 – trykksatt gass @ ~ 300 K; 3 – kryogen komprimert gass

Figur 1. Tettheten til hydrogen i det lave temperaturområdet som en funksjon av trykk [3].

Leksjon 5: Flytende hydrogen

3.2 Kjemiske egenskaper

Hydrogen kan reagere kjemisk med de fleste andre grunnstoffer. Sammen med oksygen er hydrogen svært brannfarlig i et bredt spekter av konsentrasjoner. Den brenner med en ikke-lysende varm flamme til vanndamp som frigjør den kjemisk bundne energien som varme (brutto forbrenningsvarme: 286 kJ/mol). En støkiometrisk hydrogen-luft-blanding inneholder 29,5 volumprosent hydrogen. Brennbarhetsområdet er 4–75 volumprosent av konsentrasjonen i luft, opptil 95 volumprosent i oksygen, og utvides med økende temperaturer. Den nedre brennbarhetsgrensen (LFL) som den minste mengden drivstoff som støtter forbrenning, er vanligvis den viktigste grensen for små utslipp, siden den vil nås først ved en kontinuerlig lekkasje. Viktigst av alt kan skyen med > 4 % hydrogenkonsentrasjon dekke lange avstander og store områder fra utslippspunktet.

En svak gnist eller elektrostatisk utladning fra en menneskekropp i området 10 mJ, ville være tilstrekkelig for antenning. Dette er imidlertid ikke forskjellig fra andre brennbare gasser. Minste antenningsenergi reduseres ytterligere med økende temperatur, trykk eller oksygeninnhold. Målinger ved kryogene temperaturer har kommet nylig [6].

4. Farer med flytende hydrogen

Flytende hydrogen krever kryogen lagringsteknologi som spesielle varmeisolerte beholdere, og krever spesialhåndtering som er felles for alle kryogene drivstoff. Dette ligner på, men er mer alvorlig enn flytende oksygen. Selv med varmeisolerte beholdere er det vanskelig å holde en så lav temperatur, og hydrogenet vil gradvis lekke. Det deler også mange av de samme sikkerhetsutfordringene som andre former av hydrogen, i tillegg til at den er kald nok til å kondensere eller til og med størkne atmosfærisk oksygen, noe som kan være en eksplosjonsfare.

For å definere de ulike farescenarioene og tilhørende konsekvenser vurderes kun, LH₂-lagring. **Tabell 1** oppsummerer disse hendelsene, med opprinnelige årsaker og potensielle endelige konsekvenser.

Leksjon 5: Flytende hydrogen

Tabell 1. Beskrivelse av potensielt farlige hendelser.

Fryktede hendelser	Hovedvilkår	Konsekvenser
1 – Revne i beholder ved arbeidstrykk (P_w) (treffer brann/fragment)	100 % gassformig H_2 – 10 bar – type I-beholder	Overtrykk og fragmenter
2 – Utsiktet hendelse på beholder med væske H_2 (branntilfelle) ved $2P_w$	Revne i LH_2 -beholder Flash-brann	«BLEVE» med termiske effekter
3 - Feil på beholder (revne eller hull)	10 bar, hurtig spredning og fordampning av flytende H_2 på bakken	Fordampning av dam og kryogen skydannelse med overtrykkseffekter ved brannfarlig skyantennelse
4 – Lekkasje på røret mellom lagring og pumpe	10 bar, flytende * tofasert trykksatt utslipp * og/eller H_2 væskedam, fordampning som danner en brannfarlig sky	Flytende hydrogenstråle og potensiell nedfall som danner en LH_2 -dam på bakken og overtrykkseffekter på grunn av antennelse av brannfarlig blanding
5 - Lekkasje på røret mellom pumpe og atm. fordamper	1000 bar, væske * tofasert trykksatt utslipp, men oppfører seg som en høytrykksgasstråle	Sikkert nesten-gassformig høytrykksstråleoppførsel med overtrykkseffekter på grunn av antennelse
6 – Revne i beholderen ved bruddtrykk (P_R)	100 % gassformet – 10 bar, type I	Overtrykk og fragmenter

Merk: BLEVE – «boiling liquid expanding vapour explosion» (eksplosjon av ekspanderende damp fra kokevende væske).

Når det gjelder scenarier som tidligere er oppsummert, kan det fremheves at noen av dem er spesifikke for flytende hydrogen, og andre er fryktede gasshendelser som allerede er beskrevet, eller lignende.

4.1 Fysiologiske problemer med kryogent hydrogen

Hydrogen er klassifisert som ikke-giftig, syrefri og ikke-kreftfremkallende, og er en enkel kvelegass uten fastsatt grenseverdi (TLV) eller LD50 (dødelig dose 50 %) [7].

Fordampning av flytende hydrogen påvirker atmosfærens sammensetning, spesielt i (delvis) lukkede områder, og medfører fare for kvelning. Den store ekspansjonsraten for væske/omgivelser kombinert med kondensering av O_2 fra omgivelsesluften og brenningen av brennbare H_2 -luft-blandinger fører til en betydelig fortykning av den lokale atmosfæren. En oksygenindeks på mindre enn 19,5 % regnes av NASA som farlig for mennesker; mindre enn 8 % vil være dødelig i løpet av minutter (tabell 2). Alarmnivået er vanligvis satt til 19 % oksygen.

Leksjon 5: Flytende hydrogen

Tabell 2. Påvirkning på mennesker ved en atmosfære med redusert oksygeninnhold.

Oksygeninnhold i luft (%)	Symptomer
~21-19	Ingen
~19-15	Redusert reaksjonsevne, ingen synlige effekter
~15-12	Tung pust, rask hjerterytme, nedsatt oppmerksomhet eller koordinasjon
~12-10	Svimmelhet, nedsatt vurderingsevne, dårlig muskelkoordinasjon, blir raskt utmattet, litt blåaktige lepper
~10-8	Kvalme, oppkast, manglende evne til å bevege seg, bevissthetstap etterfulgt av død
~8-6	Hjerneskada etter 4-8 minutter, død innen 8 minutter
< 6	Koma etter 40 sekunder, respirasjonssvikt, død

Direkte kontakt med flytende hydrogen eller overflater med svært lav temperatur forårsaker kryogene «brannskader» som ligner på termiske forbrenninger. Levende vev vil fryse unntatt ved svært korte kontaktperioder der temperaturforskjellen mellom kryogen og hud fortsatt er høy (filmkoking) og varmeoverføringen liten. Når hud fryses fast i en kald overflate, kan det gi alvorlig skade ved fjerning. Langvarig eksponering av hud for kaldt hydrogen kan føre til frostskafer. Et symptom er kortvarig lokal smerte. Frossent vev er smertefritt og ser voksaktig ut, med en blek hvitaktig eller gulaktig farge. Tining av det frosne vevet kan forårsake intens smerte. Sjokk kan også forekomme. Langvarig innånding av kald damp eller gass kan forårsake alvorlig lungeskade. Spesielt øynene er følsomme for kulde. Lang eksponering for kalde temperaturer etter et stort utslipp senker kroppstemperaturen, noe som resulterer i hypotermi, organdysfunksjon og hypoventilasjon[5].

Det er ingen vesentlige miljøfarer forbundet med utilsiktet utslipp av flytende hydrogen siden hydrogen ikke er giftig.

4.2 Umiddelbar antenning av utslipp av trykksatt LH₂

Umiddelbar antenning av en LH₂ høytrykksstråle ser ut til å ligne en gassformig hydrogenhøytrykksstråle, med overtrykkseffekter på grunn av antenning.

5. Flytende hydrogen-teknologi

5.1 Produksjonsprosess og infrastrukturer for flytende hydrogen

En av utfordringene ved å bygge opp en hydrogenøkonomi er etablering av en effektiv produksjons- og forsyningsinfrastruktur. Storskaladistribusjon favoriserer den relativt tette væskefasen LH₂, men kondensering lider fortsatt av lav energieffektivitet. Historisk sett ble LH₂ hovedsakelig brukt som rakettbrensel, der den lave effektiviteten i produksjonen ikke

Leksjon 5: Flytende hydrogen

spilte noen rolle. Et stort program for hydrogenkondensering ble startet i USA innenfor romprogrammer og førte til design og konstruksjon av store kondenseringsanlegg.

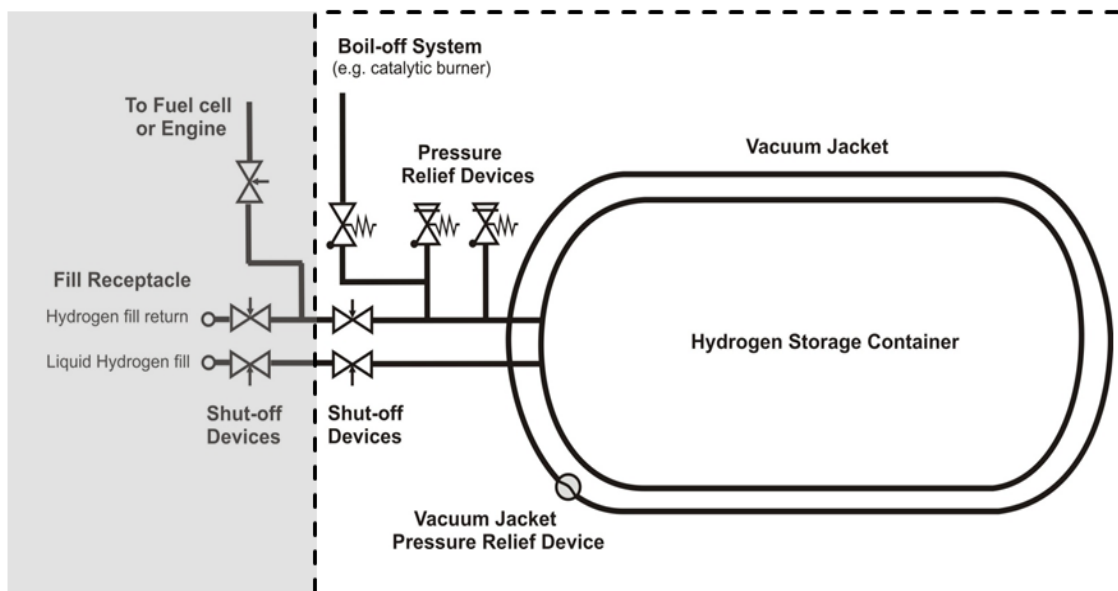
5.2 Lagring og transport av flytende hydrogen

5.2.1 Lagring av flytende hydrogen

Lagre med flytende hydrogen har funnets lengde for profesjonelle. Men så langt er det ingen lagre for flytende hydrogen som er offentlig tilgjengelig. Lagertanker for LH₂ kan inneholde mer hydrogen sammenlignet med de for GH₂: Volumetrisk kapasitet for LH₂ er 0,070 kg/L sammenlignet med 0,030 kg/L for GH₂-tanker ved 70 MPa. Imidlertid kreves en betydelig mengde energi (rundt 30 % av energien i hydrogen) for kondensering. Hydrogen kan kondenseres for en forenklet transport eller lagring. Alle de store industrigassleverandørene har kryogene leveringstankskip. LH₂ brukes på hydrogenstasjoner og i luftfart.

Hovedkomponentene i den innebygde LH₂-tanken vises i figur 2. De omfatter:

- LH₂ oppbevaringsbeholder
- avstengingsenheter
- fordampningstapsystem,
- termisk aktivert trykkavlastningsutstyr (TPRD),
- forbindelsesrør (om noen) og beslag mellom de ovennevnte komponentene



Figur 2. Skjematisk fremstilling av LH₂ lagringssystem fra Ref. [8]

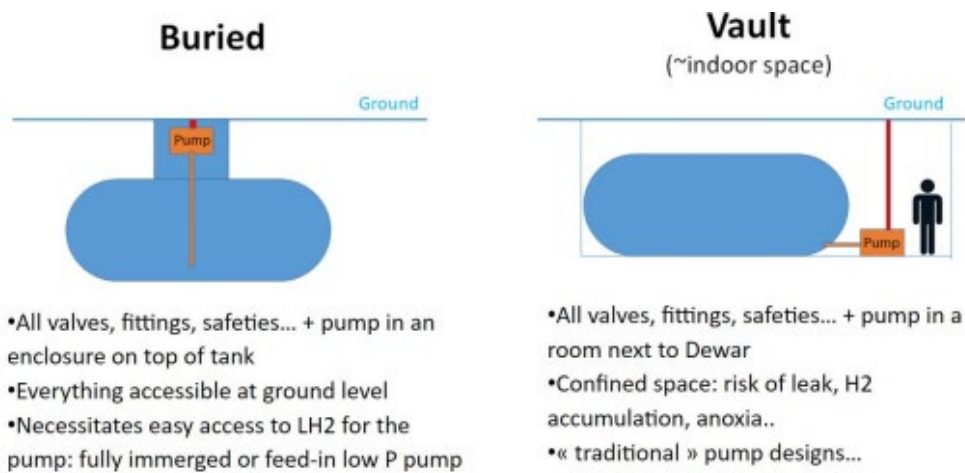
Disse lagrene kan være i vertikal eller horisontal posisjon. Kryogen fast lagring har et volum fra 10 m³ til 300 m³ med et indre trykk rundt 12 bar.

Leksjon 5: Flytende hydrogen



Figur 3. Horisontale og vertikale flytende hydrogen-lagre. (Kilde Air Liquide).

I de fleste tilfeller er LH₂ -lagre over bakken. Men det finnes noen få underjordiske LH₂-lagre, begravet eller hvelv som illustrert og definert i figur 4.



Figur 4. De to hoveddesignene for underjordiske LH₂-lagre.

5.2.2 Kryostat for stasjonær bruk

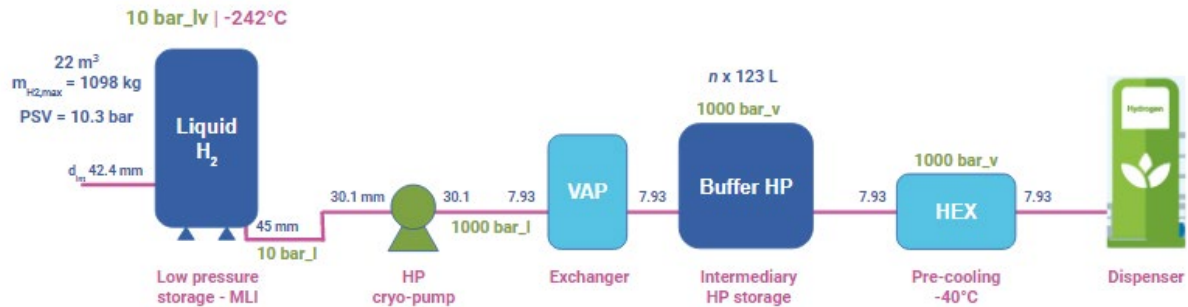
Kryogene beholdere har blitt brukt i mer enn 70 år til lagring og transport av flytende hydrogen.

5.3 Tankstasjon for flytende hydrogen

Som vist i figur 5 består en LH₂-basert tankstasjon i hovedsak av

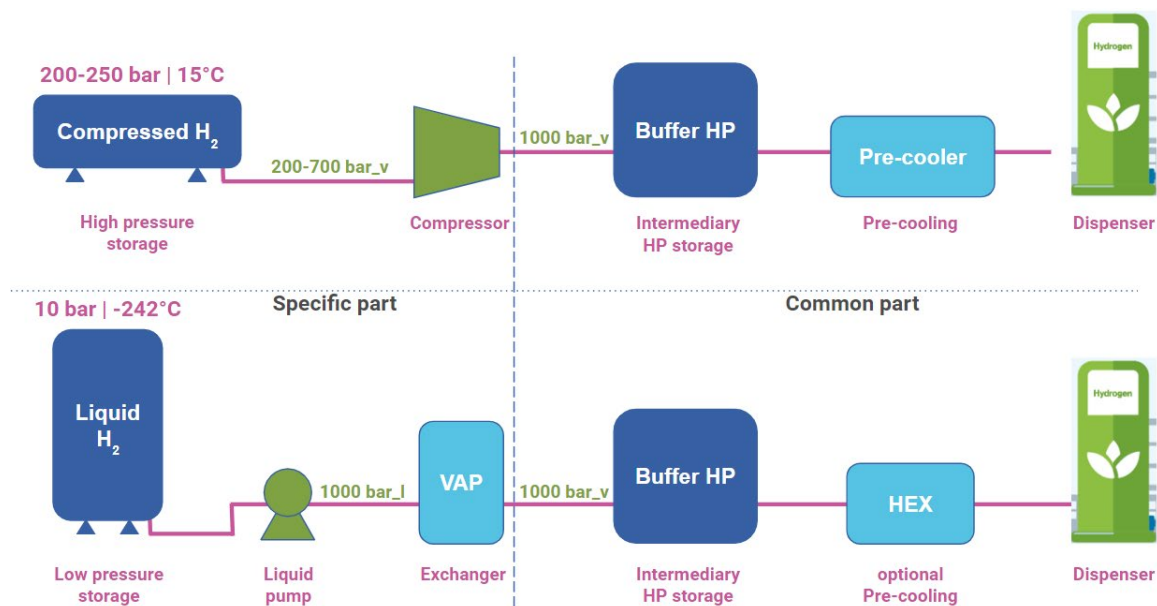
- en LH₂-tank (rundt 20 m³ - 1000 kg -H₂) med et maksimalt driftstrykk på 10,3 bar
- en isolert prosesslinje fra bunnen av tanken til LH₂-pumpen som driver LH₂ fra tanken til en fordamper: Denne enheten lar deg pumpe LH₂ opptil 1000 bar
- et varmeapparat (kalt VAP: varm olje, elektrisk for å varme opp hydrogen ved 1000 bar)
- 1000 bar gassformige buffere (få m³): Disse bufferne er vanligvis bunter av type I eller II (dvs. metalliske sylindere eller lange metallrør).

Leksjon 5: Flytende hydrogen



Figur 5. Forenklet skisse av en tankstasjon for flytende hydrogen.

Alle de andre delene (f.eks. dispenser, påfyllingslange osv.) på tankstasjonen ligner klassiske gasstankstasjoner (se sammenligning i figur 6).

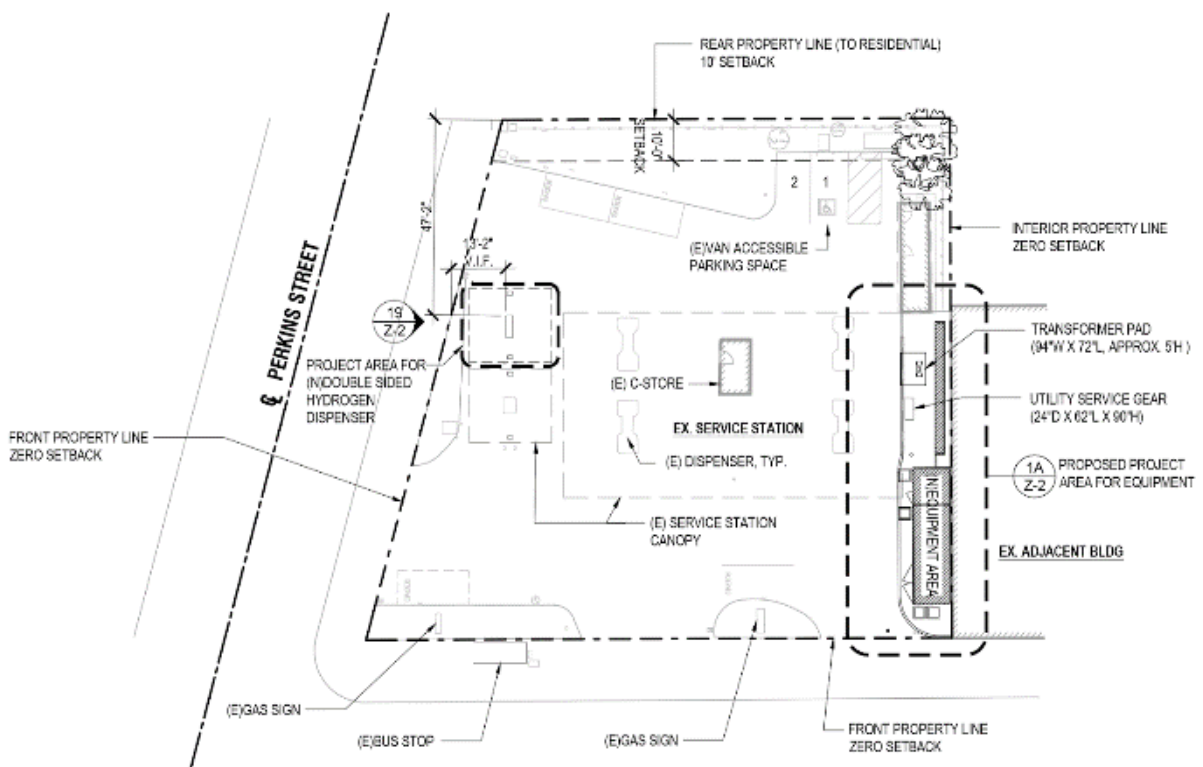
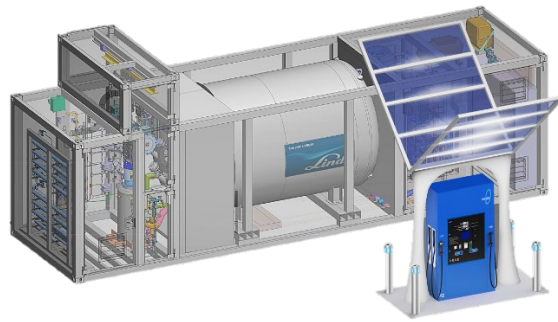


Figur 6. Forenklet sammenligning mellom tankstasjoner for gassformig og flytende hydrogen. Topp: gassformig HRS, bunn: flytende HRS.

LH₂-tanken leveres av en LH₂-lastebil. LH₂-lastebilen består av en 40 m³ horisontal tank som er i drift mellom 1 og 12 bar (inventar: 4 t-H₂). Tilkoblingen mellom tanken og lastebilen utføres av en fleksibel overføringsledning. Overføringen utføres uten pumpe. En liten fordampner er på tilhengeren for å produsere en trykkoppbygging i lastebiltanken og tillate overføring av flytende hydrogen til den stasjonære vertikale tanken.

Mer konkret nedenfor: Linde Liquid hydrogentankstasjon montert i Oakland (US) (se figur 7).

Leksjon 5: Flytende hydrogen



Figur 7. Linde LHRS og layout i Oakland. Kilder: Linde)

I Frankrike kreves en sikkerhetsavstand på 20 m mellom offentlig eiendom og flytende hydrogen-kilde. Sikkerhetsfunksjoner på tankstasjoner for væske er nesten de samme som for en tankstasjon for gass (se tabell 3).

Leksjon 5: Flytende hydrogen

Tabell 3. Sikkerhetsfunksjoner for gassformet/flytende HRS.

Hva	Hvor	For hva
Kvalifisert og validert slange og beslag	Prosess og dispenser	Unngå utilsiktede lekkasjer
Periodisk bytte av slange	Dispenser	Unngå utilsiktede lekkasjer
H ₂ -registrering	Inni prosessbeholderen Inni dispenseren	Aktivere varsel og avstengingsventiler ved behov ved utilsiktet lekkasje
Flammedetektor (UV/IR)	I prosessbeholderen Utenfor, i nærheten av dispenseren	Aktivere varsel og avstengingsventiler ved behov ved utilsiktet antent utslipp
Automatisk avstengningsventil	Flere mellom H ₂ -tank og dispenser	Begrense H ₂ -beholdningen ved utilsiktet utslipp
Overvåking av prosessstrykk	Generelt	Oppdage unormalt trykkfall på grunn av lekkasje eller rørbrudd
Naturlig ventilerte lukkede rom	Prosessbeholder Dispenser	Unngå å nå brennbarhetsgrensene for H ₂ -luft-blanding ved utilsiktet utslipp
Tvunget ventilasjon	Prosessbeholder for noen modeller	Unngå å nå brennbarhetsgrensene for H ₂ -luft-blanding ved utilsiktet utslipp hvis naturlig ventilasjon ikke er mulig eller ikke er effektiv nok
ATEX-sertifisert utstyr	I lukkede rom hvor det kan oppstå lekkasjer (dvs. transportramme og dispenser)	Unngå antenneskilder
Jording av slange	Dispenser	Forhindre gnister forårsaket av statisk elektrisitet under tanking
Automatisk lekkasjetest før fylling	Generelt	Unngå utilsiktede lekkasjer
Strømningsbegrensere	Generelt	Begrense strømningshastigheten ved utslipp eller rørbrudd
Automatisk stengetid	Generelt	Lukke H ₂ -mateventiler ved slangebrudd eller lekkasje
Enhet for løsriving av slange	Dispenser	Unngå større lekkasjer ved å lukke forsyningen hvis den rives opp fordi man glemte å koble den bilen
Støtbeskyttelse (pullert)	Dispenser	Beskytte dispenseren mot større mekanisk støt ved utilsiktede slag i kjøretøy og unngå katastrofal lekkasje
Nødstoppeknap	Noen meter fra dispenseren	Lukke H ₂ -mateventiler i nødstilfeller

Leksjon 5: Flytende hydrogen

Ledende (jordet) betongplate	Dispenser	Forhindre gnister forårsaket av statisk elektrisitet under tanking
------------------------------	-----------	--

5.3.1 Busser

De fleste busser frakter hydrogenet som komprimert gass. Det fins imidlertid noen eksempler der hydrogenet ble lagret i flytende form.

6. Farer ved flytende hydrogen og tilhørende risiko for nødetatene

Helsefarer forbundet med utslipp av flytende hydrogen er beskrevet nedenfor.

- Kontakt med flytende hydrogen eller sprut på huden eller i øynene kan forårsake alvorlige kuldeskader fra *forfrysninger* eller *nedkjøling*.
- *Kryogene forbrenninger* kan også skyldes kontakt mellom ubeskyttede deler av menneskekroppen og kalde væsker eller kalde overflater.
- Innånding av kald hydrogendamp kan forårsake *ubehag i luftveiene* og kan føre til *kvelning*.
- Direkte fysisk kontakt med LH₂, kald damp eller kaldt utstyr kan forårsake alvorlig *vevsskade*. Kortvarig kontakt med en liten mengde væske utgjør ikke nødvendigvis en like stor fare for forbrenning fordi det kan dannes en beskyttende film av fordampende gassformig hydrogen. Fare for frysing oppstår når store mengder søles, og eksponeringen er omfattende¹.
- Personer må ikke berøre kalde metalleder, og de skal bruke *vernetøy*. De må også beskytte det berørte området med et løst deksel.
- *Hjertefeil* er sannsynlig når kroppstemperaturen synker til 27 °C eller lavere, og død kan oppstå når kroppstemperaturen synker lavere enn 15 °C.
- *Kvelning* er også mulig hvis flytende hydrogen frigjøres og fordampes innendørs.

¹ Effekt av flytende nitrogen: <https://www.youtube.com/watch?v=F9dhZJQk80A&feature=youtu.be&t=291>

Referanser

1. Rossini FD. A report on the international practical temperature scale of 1968. Commission I.2: Thermodynamics and thermochemistry. International union of pure and applied chemistry. s.557–570.
2. Cengel, Yunus A. og Turner, Robert H. (2004). Fundamentals of thermal-fluid sciences, McGraw-Hill, s.78.
3. Klier J., et al, A new cryogenic high-pressure H₂ test area: First results. Proc 12th IIR Int Conf, Dresden (2012).
4. Edeskuty F.J., Stewart W.F., Safety in the handling of cryogenic fluids. The International Cryogenics Monograph Series, Plenum Press, New York (1996).
5. Bonhoeffer, K.F., Harteck, P. Experimente über Para- und Orthowasserstoff. Naturwissenschaften 17, 182 (1929).
6. Proust C., INERIS research performed within PRESLHY. Presentation at the 13th Int Symp Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions (ISHPMIE), Braunschweig (2020).
7. NASA. Report of the Presidential Commission on the Space Shuttle Challenger accident (1986). 1997 Tilgjengelig på <http://science.ksc.nasa.gov/shuttle/missions/51-l/docs/rogers-commission/table-of-contents.html> [4.4.2021]
8. GTR, Proposal for a Global Technical Regulation (GTR) on hydrogen fuelled vehicles, 2013. ECE/TRANS/WP.29/GRSP/2013/41. De forente nasjoners økonomiske kommisjon for Europa. Inland Transport Committee. World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations, 160th Session, Geneve, 25.–28. juni 2013.