



Education in Hydrogen Technologies Area

LAGRING OCH TRANSPORT AV VÄTGAS



Co-funded by
the European Union

Project is supported
within the Erasmus+ programme
2021-1-CZ01-KA220-VET-000028073

Introduktion	4
1 Arbets säkerhet vid lagring och transport av vätgas	4
2 Transport av vätgas	7
2.1 Transport av komprimerad vätgas i containrar på väg eller järnväg	8
2.2 Transport av flytande väte i behållare på väg, järnväg eller fartyg	9
2.3 Transport av vätgas i rörledning med naturgasblandning	11
2.4 Avskiljning av väte från naturgasblandningen med hjälp av membrangasavskiljning	12
2.5 Transport av rent väte genom en befintlig gasledning anpassad till rent väte	14
2.6 Ren vätgastransport genom en nykonstruerad pipeline	15
2.6.1 Den europeiska ryggraden för vätgas	16
2.6.2 Exempel på förverkligande av ett nationellt vätgasnätverk	19
2.7 LOHC	19
2.7.1 Exempel på användning av LOHC i praktiken	20
3 Lagring av vätgas	24
3.1 Lagring av komprimerat väte	25
3.2 Lagring av flytande väte	28
3.3 Vätgaslagring i underjordiska behållare i en blandning med metan eller ammoniak	29
3.4 Lagring av väte i hydrider	31
3.4.1 Metallhydrider	32
3.5 VÄTGASLAGRING I KOLBASERADE BEHÅLLARE	33
4 Komponenter	38
4.1 Tryckbehållare	38
4.2 KRYOGENA TANKAR	40
4.3 Lagringstankar för högt tryck	42
5 Referenser	44
6 Lista över bilder och tabeller	46
7 Förkortningar	47

Finansieras av Europeiska unionen. De synpunkter och åsikter som uttrycks är endast upphovsmannens [upphovsmännens] och utgör inte Europeiska unionens eller Europeiska genomförandeorganet för utbildning och kulturs (EACEA) officiella ståndpunkt. Varken Europeiska unionen eller EACEA tar något ansvar för dessa.

INTRODUKTION

Väte kan lagras på många olika sätt, t.ex. som gas, vätska eller i fast form som metallhydrid eller kemisk förening. Den vanligaste metoden för vätgaslagring är som komprimerad gas i högtryckstankar. Denna metod har fördelen att den är relativt enkel och billig. Däremot är lagringsdensiteten är relativt låg, så det krävs stora tankar för att lagra en användbar mängd vätgas.

Väte kan också lagras som vätska i kryotankar, d.v.s. tankar som är konstruerade för att lagra material vid extremt låga temperaturer. Flytande vätgas har en mycket högre lagringsdensitet än gasformig vätgas, så den kan lagras i mindre tankar. De tankar och den utrustning som behövs för att lagra och hantera flytande väte är dock dyrare och mer komplexa än de som behövs för lagring av komprimerad gas.

En annan metod för vätgaslagring är att lagra den i fast form, t.ex. i en metallhydrid eller kemisk förening. Denna metod har fördelen att man kan lagra stora mängder väte på liten yta. Den är i allmänhet dyrare och mindre effektiv än de andra metoderna.

Det finns flera metoder för att transportera vätgas, bland annat med lastbil, tåg, fartyg och pipeline. Den vanligaste metoden är lastbilstransport, med tankar som liknar dem som används för lagring av vätgas. Vätgas kan också transporteras med tåg eller fartyg i kryotankar, eller genom rörledningar som naturgas.

Sammantaget är utvecklingen av effektiva och ändamålsenliga metoder för lagring och transport av vätgas ett viktigt forsknings- och utvecklingsområde, eftersom vätgas har potential att bli ett sätt att lagra energi.

1 ARBETSSÄKERHET VID LAGRING OCH TRANSPORT AV VÄTGAS

Väte är en mycket brandfarlig gas och måste hanteras med försiktighet för att garantera säkerheten. Vid lagring eller transport måste vätgas hållas vid höga tryck eller extremt låga temperaturer för att minska risken för explosion. Detta kan göra lagring och transport mer utmanande och dyrare än för andra typer av bränsle.

Ett av de största problemen med vätgaslagring är risken för läckage. Vätgas kan läcka ut från lagringstankar och rörledningar, vilket kan leda till att brandfarliga eller explosiva blandningar bildas. För att minimera risken för läckage måste lagringstankar och rörledningar utformas och konstrueras enligt

strikt säkerhetsstandarder. Regelbundna inspektioner och underhåll är också avgörande för att säkerställa att dessa system förblir i gott skick.

När vätgas transporteras sker det vanligtvis med lastbil, järnväg eller fartyg. Lastbils- och järnvägstransporter sker vanligtvis i stora, specialdesignade tankar eller behållare som klarar de höga tryck eller låga temperaturer som krävs för vätgaslagring. Transport av vätgas sker vanligtvis i kryogen vätskeform, vilket kräver isolerade behållare som är utformade för att hålla vätgasen vid extremt låga temperaturer.

Ett annat viktigt säkerhetsproblem är risken för bränder och explosioner i vätgas. Vätgas är en mycket brandfarlig gas, och om den läcker ut och kommer i kontakt med en antändningskälla kan den orsaka en brand eller explosion. För att minimera risken för vätgasbränder och explosioner måste lagrings- och transportanläggningar placeras på avstånd från befolkade områden och ha brandbekämpningssystem på plats.

Sammantaget kräver lagring och transport av vätgas strikt efterlevnad av säkerhetsprotokoll, korrekt utformning och underhåll av utrustning samt att det finns beredskapsplaner för att minimera potentiella faror. Även om vätgas har potential att bli ett sätt att lagra energi är det viktigt att lämpliga säkerhetsåtgärder vidtas för att skydda människor och egendom.

Potentiella risker i samband med lagring av komprimerad vätgas:

- Svårt att identifiera vätgasutsläpp eftersom gasen är luktfri, färglös och smaklös.
- Väte kan orsaka försprödning av metaller. Detta kan leda till en minskning av materialets hållfasthet och därefter till att behållaren brister, vilket resulterar i ett vätgasläckage.
- Ackumulering av väte under långa tidsperioder i trånga utrymmen, t.ex. garage eller mekaniska verkstäder, passagerarutrymmen i fordon. Kvävning kan uppstå på grund av att vätgas tränger undan luft.
- Bildning av brandfarliga blandningar av väte och syre eller väte och luft. Sugning av brandfarlig blandning in i ventilationssystemet i en byggnad kan leda till detonation.
- Explosion av behållaren åtföljd av en tryckvåg kan leda till skador på trumhinnan, bristning av behållaren, flygande skräp, glaskross etc.
- Väte är lättantändligt eftersom dess MIE är 0,017 mJ (vilket är 10 gånger lägre jämfört med andra bränslen). En statisk gnista kan antända det frigjorda vätet.

- När rent väte brinner är lågorna osynliga i dagsljus.
- Väte brinner snabbt och avger ingen rök.
- Extern eld, värme eller termisk strålning kan orsaka mekaniskt brott i tanken på grund av termisk nedbrytning av polymer och kompositmaterial (Hy Responder Lecture 3: Hydrogen storage, 2021, s. 13-14).

Allmänna riktlinjer för säkert arbete med vätgas:

- Följ alla säkerhetsföreskrifter och riktlinjer för hantering av vätgas. Detta kan innefatta personlig skyddsutrustning som handskar, skyddsglasögon och flamskyddade kläder.
- Var försiktig vid hantering av vätgasflaskor eller andra behållare. Dessa ska hanteras med försiktighet för att undvika skador på behållaren, vilket kan leda till läckage eller utsläpp av vätgas.
- Håll vätgas borta från antändningskällor, t.ex. öppen eld, gnistor och elektrisk utrustning.
- Vid transport av vätgas, se till att gasen finns i en lämplig behållare som är konstruerad för vätgas och är i gott skick.
- Förvara vätgasen på en väl ventilerad plats, på avstånd från antändningskällor.
- Var försiktig vid överföring av vätgas från en behållare till en annan. Se till att behållarna är ordentligt säkrade och att överföringen sker långsamt för att undvika spill eller läckage.
- Vid vätgasläckage eller spill, evakuera omedelbart området och ventilerat området för att sprida gasen. Försök inte reparera läckan eller spillet själv, utan kalla på professionell hjälp.
- Kontrollera regelbundet vätgasbehållare och utrustning för att säkerställa att de är i gott skick och inte utgör en säkerhetsrisk.
- Se till att alla arbetstagare som hanterar vätgas är ordentligt utbildade och bekanta med de faror som är förknippade med gasen.



Bild nr. 1: Varningsskylt.

2 TRANSPORT AV VÄTGAS

INTRODUKTION

Vätgas kan transporteras på flera olika sätt, bland annat med lastbil, fartyg, järnväg och rörledning.

En vanlig metod för att transportera vätgas är med lastbil, med hjälp av kryogena vätsketankvagnar. Dessa trailers är konstruerade för att transportera flytande vätgas vid extremt låga temperaturer (-253 °C), vilket minskar vätgasens volym och möjliggör effektivare transporter.

Ett annat alternativ är att transportera vätgas med fartyg, antingen som en kryogen vätska eller som en komprimerad gas. Kryogen flytande vätgas kan transporteras i specialiserade tankfartyg, liknande de som används för transport av flytande naturgas (LNG). Komprimerad vätgas kan också transporteras i behållare som är konstruerade för att klara höga tryck.

Slutligen kan vätgas också transporteras genom rörledningar, precis som naturgas. Denna metod är i allmänhet bara praktisk på korta avstånd, eftersom vätgas tenderar att läcka ut ur rörledningarna lättare

än naturgas. Det kan dock vara ett effektivt alternativ för att flytta vätgas från en produktionsplats till ett närliggande lagrings- eller distributionscenter.

NYCKELORD: BEHÅLLARE, FARTYG, FLYTANDE VÄTGAS, GAS, KOMPRIMERAD VÄTGAS PIPELINE, LASTBIL, LOHC, MEMBRANSEPARATION, TANKBIL, TÅG, TRANSPORT

2.1 TRANSPORT AV KOMPRIMERAD VÄTGAS I CONTAINRAR PÅ VÄG ELLER JÄRNVÄG

Vätgas kan transporteras i containrar på väg, antingen som komprimerad gas eller som vätska. När vätgas transporteras som komprimerad gas lagras den vanligtvis i högtryckstankar som är monterade på en trailer eller lastbil. Tankarna är vanligtvis tillverkade av kolfiber eller stål och är konstruerade för att klara de höga tryck som vätgasen lagras vid.

Det finns ett antal faktorer att ta hänsyn till vid vägtransport av vätgas, bland annat behållarnas storlek och vikt, risken för läckage eller olyckor samt behovet av att följa säkerhetsföreskrifterna. Det är viktigt att se till att behållarna är korrekt utformade och underhållna, och att förarna är utbildade för att hantera behållarna på ett säkert sätt. Dessutom är det viktigt att följa alla relevanta föreskrifter och riktlinjer.

Det finns ett antal fördelar med att transportera vätgas med tåg, inklusive möjligheten att transportera stora mängder vätgas över långa avstånd. Fördelar är t.ex. den relativt låga kostnaden för järnvägstransporter jämfört med andra transportsätt och den minskade miljöpåverkan jämfört med andra transportsätt. Det finns också en del utmaningar att ta hänsyn till, t.ex. behovet av att följa säkerhetsföreskrifter och risken för olyckor eller läckage. Det är viktigt att se till att behållarna är korrekt utformade och underhållna, och att järnvägsvagnarna är utrustade med lämpliga säkerhetsanordningar.

Väte kan transporteras i tre olika tillstånd. I gasform kan det huvudsakligen transporteras i ett stort antal små cylindrar eller lagras i flera långa horisontella behållare.

Platts data visar att medan en enskild lastbil kan transportera mellan 500 kg och 1 100 kg vätgas i gasform, kan en lastbil som transporterar flytande vätgas transportera upp till 3 500 kg (S&P Global Commodity Insights, 2021).

Idag transporteras vätgas oftast som komprimerad gas i tryckbehållare tillverkade av järn eller kolrörskompositer. Vätgas i tryckkärl kan transporteras i tryckcylindrar med ett tryck på 200-300 bar. Vätgasdrivna fordon använder mindre trycktankar med ett tryck på 350 eller 700 bar för sin användning.



Bild nr. 2: Transport av vätgas i containrar på väg.

2.2 TRANSPORT AV FLYTANDE VÄTE I BEHÅLLARE PÅ VÄG, JÄRNVÄG ELLER FARTYG

Vätgas kan transporteras i flytande form, vilket kallas kryogen flytande vätgas (LH2). Det måste lagras och transporteras vid extremt låga temperaturer, vanligtvis runt -253°C . LH2 har ett antal fördelar som transportbränsle. Det har en hög energidensitet, vilket innebär att en relativt liten mängd LH2 innehåller en stor mängd energi. Det är också ett bränsle med ren förbränning, eftersom det bara bildas vatten när det förbränns.

Det finns dock också ett antal utmaningar i samband med transport av LH2. Det krävs specialiserad och dyr infrastruktur för lagring och transport, eftersom det måste förvaras vid extremt låga temperaturer för att förbli flytande. Det är också ett mycket flyktigt bränsle, som kan utgöra en säkerhetsrisk om det inte hanteras på rätt sätt. Trots dessa utmaningar har LH2 potential att bli ett viktigt transportbränsle i framtiden, särskilt för transporter av varor över långa avstånd.

Väte kan transporteras på väg i flytande form i specialiserade kryogena tankbilar, som är konstruerade för att transportera vätskor som är extremt kalla, t.ex. flytande väte. Dessa tankbilar är vanligtvis tillverkade av rostfritt stål och är isolerade för att bibehålla den extremt låga temperaturen hos det flytande vätet. Själva tankarna är konstruerade för att klara det höga tryck som uppstår när det flytande vätet expanderar när det värms upp.

När det flytande vätet ska lastas på tankbilen överförs det från en lagringstank till tankbilen med hjälp av en överföringsledning. Överföringsledningen är utrustad med en rad ventiler och säkerhetsanordningar för att förhindra spill och olyckor. Tankbilen har också sina egna säkerhetssystem, t.ex. övertrycksventiler, för att förhindra olyckor under transporten.

När tankbilen har lastats med flytande väte kan den transporteras till sin destination på samma vägar som andra fordon. Föraren av tankbilen måste vara specialutbildad för att hantera de unika egenskaperna hos flytande vätgas och följa alla säkerhetsprotokoll. Tankbilen måste också köras försiktigt för att undvika stötar mot tanken, vilket kan leda till att det flytande vätet kokar och förvandlas till gas, vilket ökar trycket inuti tanken.

Det är viktigt att notera att transport av vätgas i alla former, inklusive flytande vätgas, medför vissa risker och kräver att strikta säkerhetsåtgärder vidtas för att förhindra olyckor.

Att transportera vätgas med fartyg är ett potentiellt alternativ för att flytta stora mängder vätgas över långa avstånd. Det finns dock flera utmaningar som måste hanteras för att göra detta till ett genomförbart alternativ. En utmaning är utformningen av de kryogena behållarna som kan klara de tuffa förhållanden som råder vid sjötransport. Dessutom finns det säkerhetsaspekter att ta hänsyn till vid hantering och lagring av kryogena vätskor, till exempel risken för spill och läckage.

Trots dessa utmaningar pågår det ett arbete med att utveckla säkra och kostnadseffektiva metoder för att transportera vätgas med fartyg. Europeiska unionens HYFLEET:CUTE-projekt visade till exempel att det är möjligt att använda ett småskaligt fartyg för att transportera vätgas från offshore-produktionsanläggningar till hamnar för distribution. I framtiden är det möjligt att vätgas kan transporteras i större mängder med hjälp av specialfartyg som är särskilt utformade för transport av kryogena vätskor.



Bild nr. 3: Transport av flytande väte i containerfartyg.

2.3 TRANSPORT AV VÄTGAS I RÖRLEDNING MED NATURGASBLANDNING

Väte kan transporteras i rörledningar i en blandning med naturgas, men det kräver en särskild infrastruktur och noggrann hantering. När vätgas blandas med naturgas kallas blandningen för "vätgasberikad naturgas" eller "HENG". Koncentrationen av vätgas i blandningen är vanligtvis mellan 10% och 20%.

En fördel med att transportera vätgas på det här sättet är att man kan använda befintliga naturgasledningar, vilket kan vara mer kostnadseffektivt än att bygga nya ledningar specifikt för vätgas. Men det finns också flera utmaningar och överväganden att ta hänsyn till när man använder HENG för transport.

En utmaning är att vätgas är mycket reaktivt och kan korrodera vissa material, t.ex. vissa typer av stål. Det innebär att de rörledningar som används för HENG måste vara tillverkade av material som är kompatibla med vätgas, eller så måste de vara belagda med ett skyddande skikt. Dessutom har vätgas ett lägre energiinnehåll än naturgas, vilket innebär att värmeverdets för HENG är lägre. Det innebär att HENG kräver en större volym för att ge samma mängd energi som ren naturgas.

En annan aspekt är att HENG måste hanteras och förvaras varsamt för att förhindra läckage eller olyckor. Till exempel måste HENG hållas under högt tryck för att minska dess volym och göra den lättare att transportera. Detta innebär att de lagrings- och hanteringsanläggningar som används för HENG måste vara utformade för att klara de höga tryck som krävs.

Även om vätgasberikad naturgas kan vara ett effektivt sätt att transportera vätgas, krävs det specialiserad infrastruktur och noggrann hantering för att säkerställa processens säkerhet och effektivitet.

Vätgas har ett lägre värmevärde än naturgas vid samma tryck och volym. Dess värmevärde är ca 30 % av naturgasens. Det kommer inte att orsaka några problem vid försäljning av gas till kunder eftersom det nuvarande priset för gasdistribution debiteras i energienheter (distribuerade kWh) enligt värmevärde och de använda faktureringsystemen måste ändra gasens värmevärde på grundval av faktiska mätningar.

För att tillhandahålla samma mängd värme är det nödvändigt att leverera mer vätgas än naturgas. En fördel med vätgas är att den har ett lägre motstånd när den flödar genom rörledningar, vilket innebär att blandningen av naturgas och vätgas därför kan flöda snabbare. Rörledningarnas nuvarande flödeskapacitet utgör ingen begränsning för naturgas- och vätgasblandningen när det gäller den transporterade värmemängden (Vodíková strategie České republiky, 2021, s. 77-78).

2.4 AVSKILJNING AV VÄTE FRÅN NATURGASBLANDNINGEN MED HJÄLP AV MEMBRANGASAVSKILJNING

Membrangasseparation är en process där en gasblandning separeras i sina enskilda beståndsdelar med hjälp av ett membran. Membranet släpper igenom vissa gaser medan det hindrar andra från att passera. Om man vill separera vätgas från en naturgasblandning kan man använda ett membran som är selektivt för vätgas.

Det finns flera olika typer av membran som kan användas för vätgasseparation, bland annat polymermembran, oorganiska membran och metallorganiska ramverk (MOF). Polymermembran tillverkas av polymerer som polysulfoner och polyamider, och de används ofta för att separera vätgas från naturgasblandningar på grund av sin höga selektivitet för vätgas. Oorganiska membran, som keramik- och glasmembran, används också för vätgasseparation, men de är i allmänhet mindre selektiva än polymermembran. MOF är en relativt ny typ av membran som har hög ytarea och justerbara porstorlekar, vilket gör dem mycket effektiva för att separera gaser.

Processen för att separera vätgas från en naturgasblandning med hjälp av ett membran innebär vanligtvis att gasblandningen trycksätts på ena sidan av membranet, medan ett lägre tryck upprätthålls på den andra sidan. Vätgasmolekylerna kan sedan passera genom membranet och in på sidan med lägre tryck,

medan de andra gaserna inte kan passera. Det separerade vätet kan sedan samlas upp och användas som bränsle eller råvara i kemiska processer.

Det är viktigt att notera att separationsprocessens effektivitet kan påverkas av ett antal faktorer, inklusive vilken typ av membran som används, tryckskillnaden över membranet och gasblandningens temperatur. Dessutom beror renheten hos det separerade vätet på membranets selektivitet och sammansättningen hos den ursprungliga gasblandningen.

Det är fortfarande en ganska ny och inte särskilt välbeprövad process. Att använda den nuvarande gasinfrastrukturen är dock en stor möjlighet och det möjliggör en betydande sänkning av kostnaderna för H₂-transport och sänkning av slutpriset för kunden. En membranseparator i sig är en relativt billig enhet som har potential att bli skalbar. Tyvärr stöter vi även här på vissa brister, till exempel en ofullständig gasseparation. Denna teknik är också svår att använda i sektioner som är förgrenade. I det här fallet talar vi om ett problem som är kopplat till ojämn fördelning av vätgas i de ingående grenarna. Det kan leda till att vissa kunder får en otillräcklig mängd vätgas. En risk för brist på levererad energi är i allmänhet uppenbar redan från början av ett sådant system. Om det till exempel bara fanns 20 % av rörledningarna "reserverade" för vätgas, dvs. för det enda medium som transporterar energi till slutkunden, skulle det ske en betydande minskning av en sådan rörlednings ackumulerings- och överföringsförmåga (Galík, 2021, s. 63).

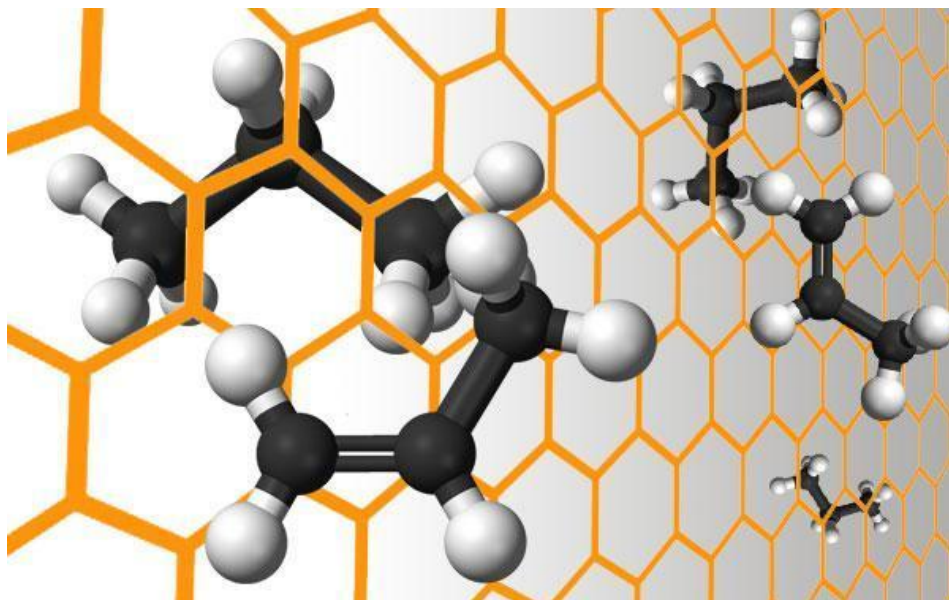


Bild nr. 4: Gasavskiljning med membran.

2.5 TRANSPORT AV RENT VÄTE GENOM EN BEFINTLIG GASLEDNING ANPASSAD TILL RENT VÄTE

Det är möjligt att transportera vätgas genom en befintlig naturgasledning genom att justera ledningen så att den kan hantera vätgas. Detta kan göras genom att minska trycket i rörledningen, öka rörledningens vägg tjocklek för att klara vätgasens högre tryck och lägga till vätgasspecifika material i rörledningen för att förhindra korrosion. Processen att anpassa en befintlig naturgasledning för vätgastransport kallas "återanvändning".

Denna process omfattar ett antal steg, bland annat:

- Rengöring och rensning av rörledningen: Innan vätgas kan transporteras genom rörledningen måste den rengöras och rensas från eventuella rester av naturgas eller andra föroreningar.
- Inspektion av rörledningen: Rörledningen måste inspekteras för eventuella defekter eller skador som kan äventyra dess integritet under vätgasöverföringen.
- Utföra nödvändiga reparationer: Eventuella defekter eller skador som upptäcks under inspektionsprocessen måste repareras innan rörledningen kan användas för vätgasöverföring.
- Justering av rörledningens drift: Rörledningens drifttryck och flödes hastighet kan behöva justeras för att möjliggöra vätgasöverföring.
- Lägga till vätgasspecifik infrastruktur: Rörledningen kan behöva utrustas med ytterligare infrastruktur, t.ex. vätgasspecifika pumpar och kompressorer, för att underlätta överföringen av vätgas.
- Säkerställande av säkerhet: Det är viktigt att genomföra säkerhetsåtgärder, såsom att installera vätgasdetektorer och nödavstängningssystem, för att säkerställa en säker överföring av vätgas genom rörledningen.
- Byt ut instrumentering mot elektrisk utrustning av ATEX IIC-klass i vätgasanläggningen/rörledningen.

En potentiell fördel med att använda en befintlig rörledning för vätgastransport är att det kan spara tid och pengar jämfört med att bygga en ny rörledning specifikt för vätgas. Det finns dock också vissa utmaningar och risker förknippade med att återanvända en rörledning för vätgas. Det är till exempel viktigt att noggrant bedöma rörledningens skick och säkerställa att den är lämplig för vätgastransport. Det är också viktigt att ta hänsyn till påverkan på lokalsamhället och miljön under återanvändningsprocessen.

Studien European Hydrogen Backbone räknar med att 75 procent av vätgasdistributionsnätet bör baseras på befintlig infrastruktur, de återstående 25 procenten kommer att behöva byggas upp. EU räknar med en brist på ren vätgas åtminstone fram till 2030, vilket kommer att innebära ett behov av import (Galík, 2021, s. 62).

Vätgas kan komma från många fler länder än naturgas. Detta gör importen mindre geopolitiskt beroende.

2.6 REN VÄTGASTRANSPORT GENOM EN NYKONSTRUERAD PIPELINE

Väte kan transporteras genom rörledningar i gasform, precis som naturgas. Konstruktionen av en vätgasledning liknar den för en naturgasledning, med några viktiga skillnader för att ta hänsyn till vätgasens unika egenskaper.

Här är några viktiga överväganden för konstruktionen av en vätgasledning:

- **Material:** De material som används för att bygga rörledningen måste kunna motstå vätgasens frätande egenskaper. Kolstål är till exempel inte lämpligt att använda i vätgasledningar, eftersom det kan korrodera med tiden. Istället kan material som rostfritt stål, aluminium eller speciallegeringar som inconel eller hastelloy användas.
- **Rörets diameter:** Rörets diameter bör väljas utifrån vätgasens önskade flödeshastighet och tryck. Eftersom vätgas har en lägre densitet än naturgas kan den erforderliga rördiametern vara större för en given flödeshastighet.
- **Svetsning:** Svetsning är ett kritiskt steg i konstruktionen av alla rörledningar, och särskilda försiktighetsåtgärder måste vidtas vid svetsning av vätgasrörledningar. Väte kan bilda brandfarliga blandningar med luft, så det är viktigt att rena luften runt svetsområdet och använda skyddsgaser för att förhindra att explosiva blandningar bildas.
- **Säkerhetssystem:** Vätgasledningar måste ha ett antal säkerhetssystem på plats för att förhindra olyckor och läckage. Dessa kan omfatta övertrycksskydd, läckagedetekteringssystem och nödavstängningssystem.
- **Tillståndsprovning:** Som med alla större byggprojekt kommer byggandet av en vätgasledning att kräva att nödvändiga tillstånd och godkännanden erhålls från relevanta myndigheter.

Sammantaget kräver byggandet av en vätgasledning noggrann planering och uppmärksamhet på detaljer för att säkerställa en säker och effektiv transport av vätgas.

Transport genom gasledningar realiserar om många producenter och kunder samlas på en plats. I världen finns det många ganska stora nätverk, det viktigaste förmodligen i Tyskland där den totala längden på nätverket överstiger 200 km. Det operativa trycket i detta nätverk är 2,5 MPa, nätverkets transportkapacitet är 50 mil. m³ per timme. Rörledningen har en diameter på 20 cm och den är placerad en meter under marken. Den operativa förlusten är cirka 1%. I USA (Texas) finns ett 96 km långt nätverk med liknande parametrar. Andra, två mindre, finns t.ex. i Frankrike, Storbritannien och andra länder. Det finns mer än 1000 km vätgasledningar i drift i världen (Šváab, 2006, s. 25-26).



PBild nr. 5: Transport av vätgas via rörledning.

2.6.1 DEN EUROPEISKA RYGGRADEN FÖR VÄTGAS

European Hydrogen Backbone (EHB) är ett föreslaget infrastrukturprojekt som syftar till att stödja användningen av vätgas som en ren energikälla i Europa. Det är tänkt att bli ett omfattande nätverk av anläggningar för produktion, lagring och distribution av vätgas som kommer att byggas i hela Europeiska unionen (EU). Målet med European Hydrogen Backbone är att möjliggöra ett brett införande av vätgasteknik i EU, särskilt inom sektorer där det är svårt att minska koldioxidutsläppen med hjälp av annan teknik. Den europeiska ryggraden för vätgas förväntas bli en viktig del av EU:s insatser för att minska koldioxidutsläppen i sitt energisystem och för att uppfylla sina klimat- och energimål. Den är avsedd att stödja utvecklingen av ett antal sektorer, inklusive transport, industri och kraftproduktion. De specifika detaljerna för det europeiska vätgasnätet, inklusive den exakta placeringen av produktions-, lagrings- och distributionsanläggningar, har ännu inte slutförts. Europeiska kommissionen har dock identifierat ett antal viktiga utmaningar som måste lösas för att den europeiska ryggraden för vätgas ska kunna bli verklighet. Dessa utmaningar omfattar följande:

- Utveckla kostnadseffektiva och ändamålsenliga produktionstekniker: Väte kan produceras med hjälp av en rad olika tekniker, inklusive elektrolys, ångreformering av metan och förgasning av biomassa. Dessa tekniker är dock för närvarande relativt dyra och ineffektiva, och förbättringar kommer att behövas för att göra produktionen av vätgas konkurrenskraftig i förhållande till andra energikällor.

- Bygga upp den nödvändiga infrastrukturen: För att stödja en utbredd användning av vätgas kommer det att behövas ett omfattande nätverk av produktions-, lagrings- och distributionsanläggningar. Detta kommer att kräva betydande investeringar i infrastruktur, inklusive rörledningar, lagringstankar och tankstationer.
- Säkerställa vätgassystemens säkerhet och tillförlitlighet: Vätgas är en mycket brandfarlig gas, och man måste se till att vätgassystemen är säkra och tillförlitliga. Detta kommer att kräva utveckling av lämpliga säkerhetsstandarder och inrättande av robusta säkerhetsförfaranden.
- Övervinna rättsliga hinder: Utvecklingen av European Hydrogen Backbone kommer att kräva samordning av insatser i ett antal olika länder och sektorer. Detta kommer att kräva utveckling av ett regelverk som främjar utvecklingen av vätgasteknik.

Sammantaget är European Hydrogen Backbone ett ambitiöst och komplext projekt som kommer att kräva betydande investeringar och samordning för att bli framgångsrikt. Om det lyckas har det dock potential att spela en viktig roll i utfasningen av fossila bränslen i EU:s energisystem och uppnåendet av dess klimat- och energimål.

De totala investeringskostnaderna för det planerade europeiska vätgasstamnätet 2040 förväntas uppgå till mellan 27 och 64 miljarder euro, vilket täcker hela kapitalkostnaden för att bygga och eftermontera stamnätet. Detta kan jämföras med de hundratals miljarder euro i investeringar i grön vätgasproduktion som förutses i EG:s vätgasstrategi, redan för perioden fram till 2030. Det 22 900 km långa stamnätet kommer att bestå av 75 % uppgraderade rörledningar, med diametrar på mellan 60-120 cm, och kommer att tillhandahålla 3-13 GW (LHV) transportkapacitet per rörledning. I det medelstora fallet kommer 60% av de totala investeringskostnaderna att gå till rörledningsarbeten och de återstående 40% kommer att spenderas på kompressionsutrustning.

Även om 75% av det totala nätverket eller nästan 18.000 km kommer att bestå av eftermonterad infrastruktur, representerar detta endast cirka 50% av den totala investeringen, vilket visar värdet av att använda befintliga rörledningar (European Hydrogen Backbone Report, 2020, s. 11).

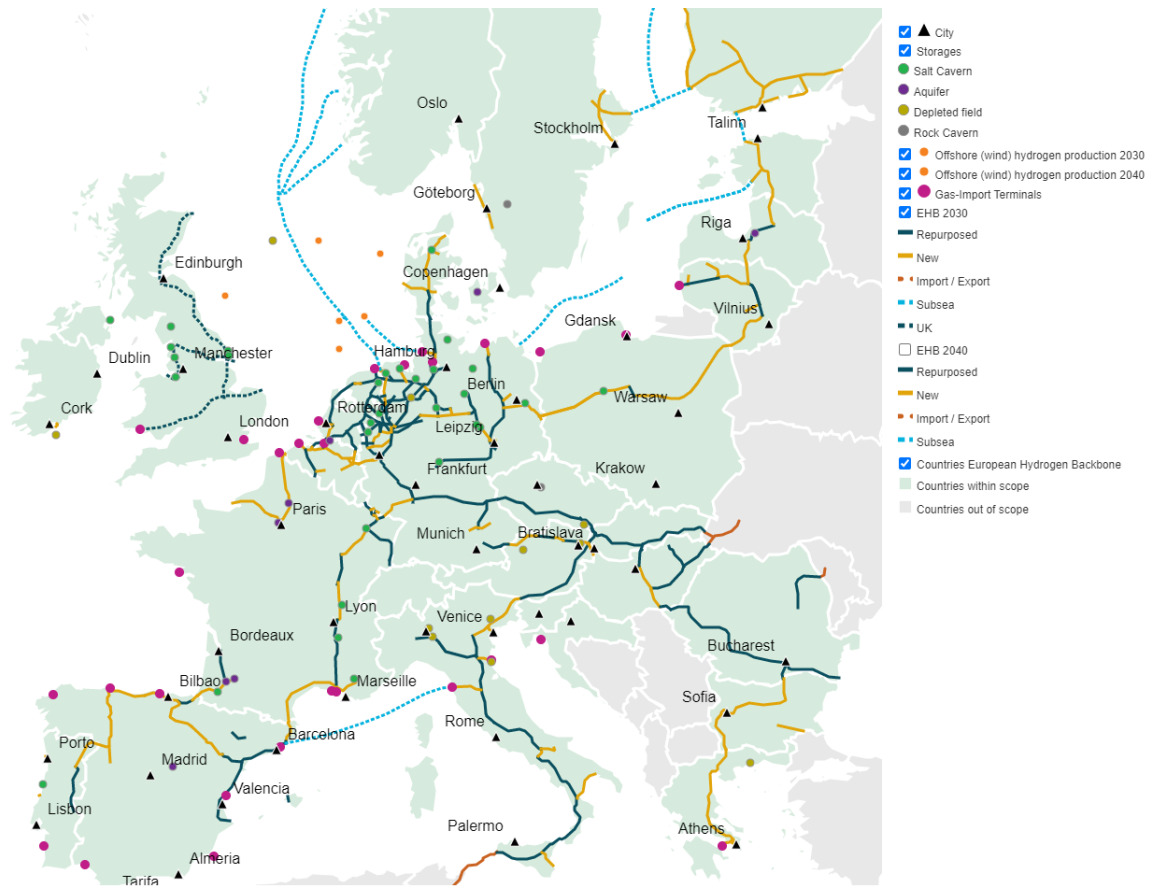


Bild nr. 6: Den europeiska ryggraden för vätgas 2030.

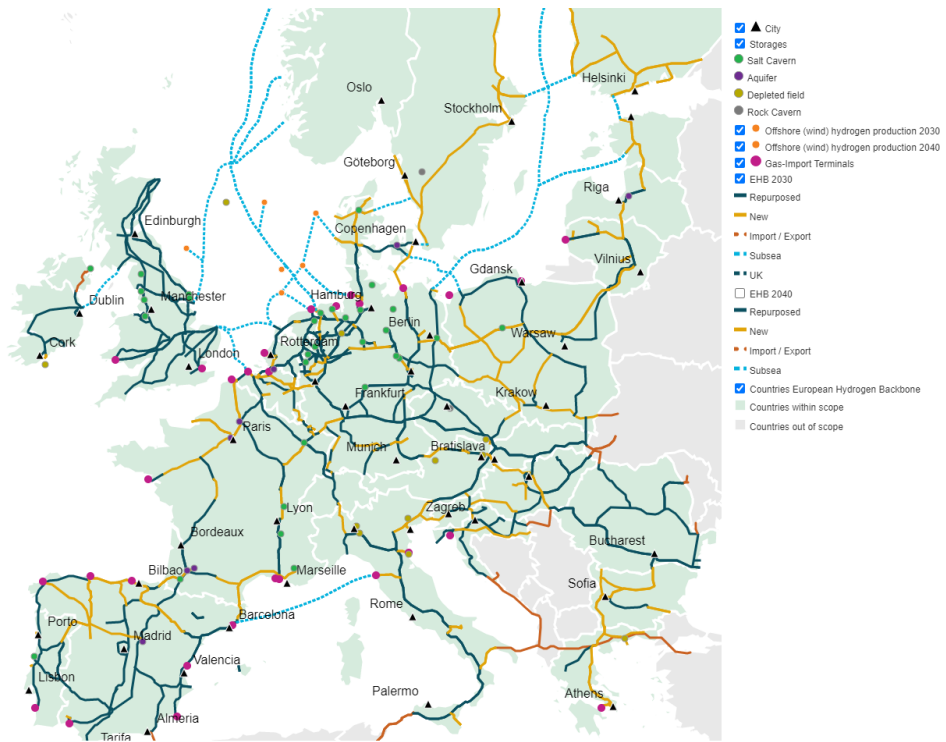


Bild nr. 7: Den europeiska ryggraden för vätgas 2040.

2.6.2 EXEMPEL PÅ FÖRVERKLIGANDE AV ETT NATIONELLT VÄTGSNÄTVERK

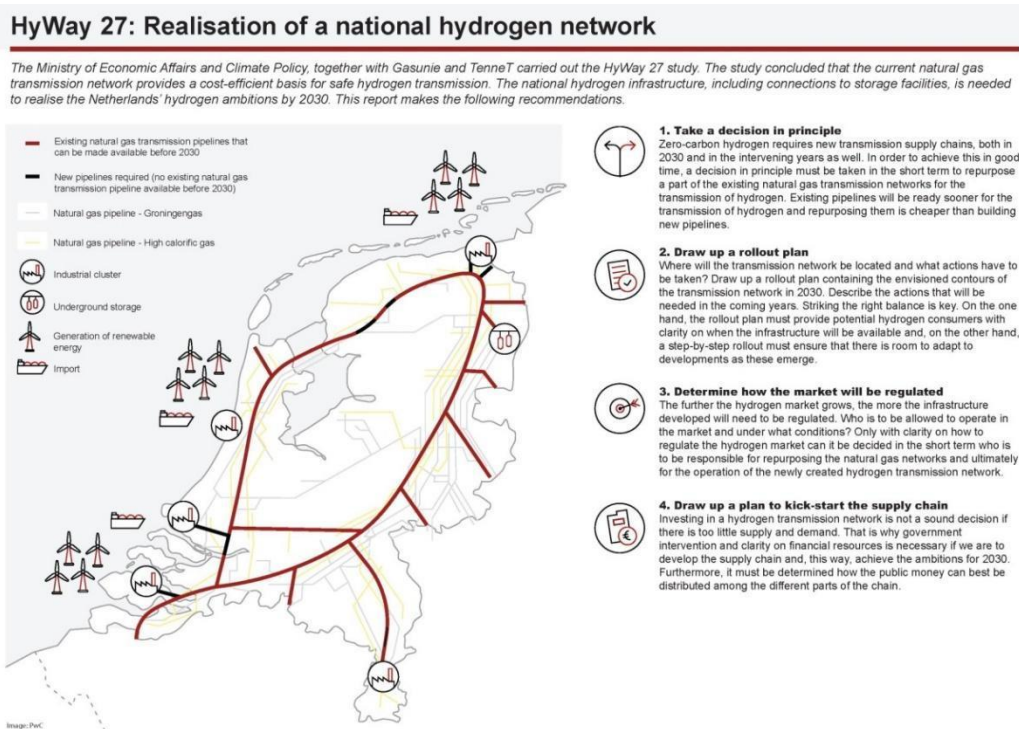


Bild nr. 8: HyWay 27 infografik.

2.7 LOHC

Flytande organiska vätgasbärare (LOHC) är organiska föreningar som kan absorbera och avge vätgas genom kemiska reaktioner. Därför kan LOHC användas som ett lagringsmedium för vätgas. I princip kan alla omättade föreningar (organiska molekyler med dubbel- eller trippelbindningar) binda väte under hydrogenering.

LOHC är material som kan lagra vätgas i flytande form, vilket potentiellt gör det lättare att transportera och använda som bränsle. När vätgas löses i ett LOHC blir det ett stabilt och relativt säkert lagringsmaterial. Vätet kan frigöras från LOHC genom uppvärmning eller genom att applicera en liten mängd tryck.

Det finns flera olika typer av LOHC som har utvecklats, bland annat pyridinbaserade LOHC, aminbaserade LOHC och alkoholbaserade LOHC. Dessa material har olika egenskaper och kan vara mer eller mindre lämpliga för olika tillämpningar.

En fördel med LOHC är att de kan lagra vätgas vid relativt höga densiteter, vilket gör det möjligt att transportera stora mängder vätgas i en liten volym. Detta kan göra dem användbara för tillämpningar som bränslecellsfordon, där vätgasen måste lagras ombord på fordonet.

LOHC är fortfarande ett aktivt forskningsområde, och det finns många utmaningar att ta itu med innan de kan användas i stor skala. Till exempel behövs ytterligare arbete för att förbättra effektiviteten i lagrings- och frisättningsprocessen och för att hitta material som är stabila och säkra under långa tidsperioder.

2020 byggde Japan den första internationella kedjan av vätgasleverantörer i världen mellan Brunei och Kawasaki City. Den använder LOHC-teknik på toluenbasis. Hyundai Motor investerar i utvecklingen av stationära och ombordsystem med LOHC.

2.7.1 EXEMPEL PÅ ANVÄNDNING AV LOHC I PRAKTIKEN

Hydrogenious LOHC Technologies

Hydrogenious LOHC Technologies är ett tyskt företag som specialiserat sig på att utveckla LOHC-teknik (Liquid Organic Hydrogen Carrier) för lagring och transport av vätgas. Företagets LOHC-teknik använder en speciell klass av organiska föreningar som kallas cykloalkaner för att lagra vätgas i flytande form vid omgivande temperaturer och tryck. Det lagrade vätet kan sedan enkelt transporteras och användas som bränslekälla för fordon eller i industriella processer. Tekniken har potential att avsevärt öka effektiviteten och genomförbarheten vid användning av vätgas som bränsle.



Bild nr. 9: Stationär LOHC-infrastruktur 9: Stationär LOHC-infrastruktur - StoragePLANTS av Hydrogenious.

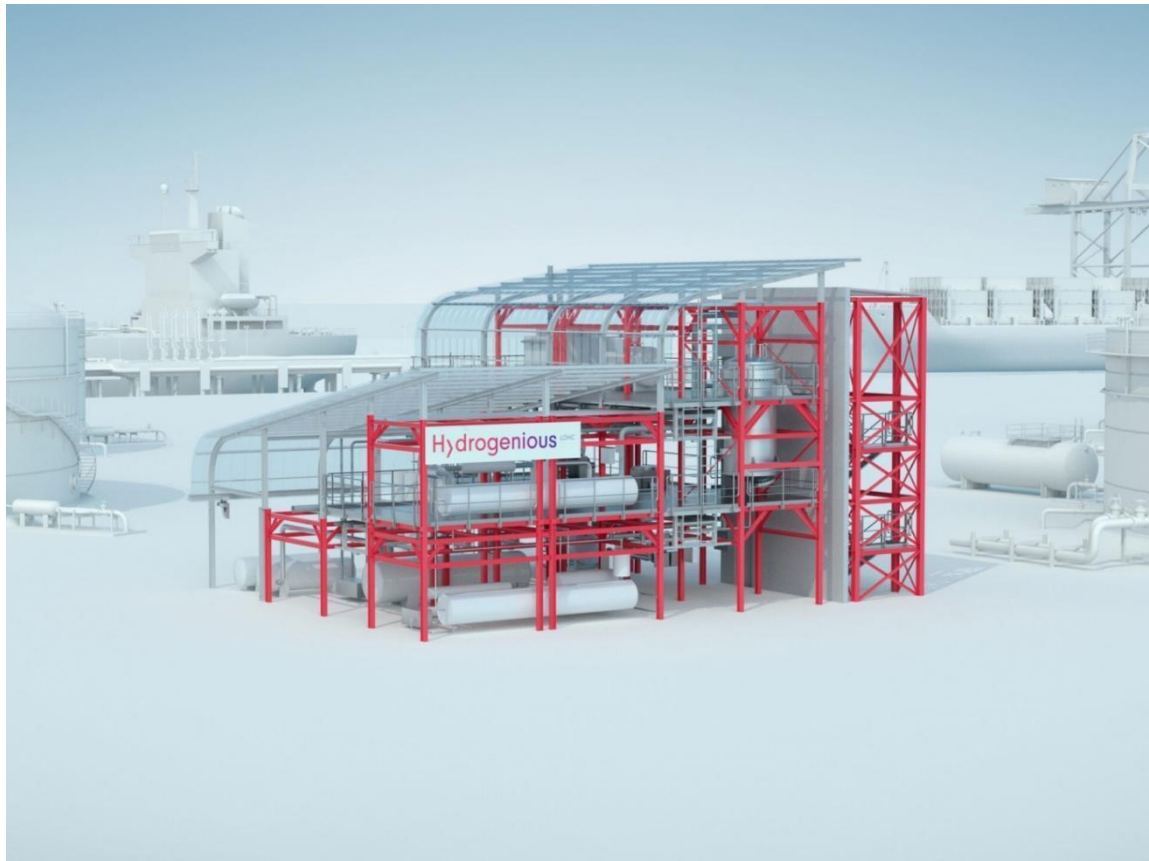


Bild nr. 10: Stationär LOHC-infrastruktur 10: Stationär LOHC-infrastruktur - ReleasePLANTS av Hydrogenious.

SAMMANFATTNING

Väte kan transporteras i gasform eller flytande form.

Gasformigt väte: Gasformigt väte kan transporteras i trycksatta eller kylda tankar på specialfartyg. Dessa tankar är konstruerade för att lagra vätgas vid höga tryck och låga temperaturer för att minimera gasens volym. Sjötransport av gasformigt väte är en relativt ny utveckling och är för närvarande begränsad till små kvantiteter.

Flytande väte: Flytande väte kan transporteras i kryptankar på specialfartyg. Dessa tankar är konstruerade för att lagra vätgas vid temperaturer under -253 °C och vid högt tryck för att hålla den i flytande tillstånd. Sjötransport av flytande väte är vanligare än sjötransport av gasformigt väte, men är fortfarande relativt begränsad på grund av de höga kostnaderna för specialfartyg och hanteringsutrustning.

Med vätgasleverans avses transport och distribution av vätgas från en produktions- eller lagringsplats till en användnings- eller försäljningspunkt. Det finns flera metoder för att leverera vätgas, inklusive rörledning, tankbil, järnväg och produktion på plats.

Rörledning: Vätgas kan transporteras genom rörledningar precis som naturgas, men infrastrukturen för vätgasrörledningar är för närvarande begränsad.

Tankbil: Vätgas kan transporteras med tankbil, antingen i gasform eller i flytande form. När vätgas transporteras i flytande form måste den förvaras vid en temperatur på -253 °C och under högt tryck för att förbli flytande. Detta kräver specialiserade tankbilar och hanteringsutrustning.

Järnväg: Väte kan också transporteras på järnväg, antingen i gasform eller i flytande form. Järnvägstransport används dock inte ofta för vätgas på grund av de höga kostnaderna för specialiserade järnvägsvagnar och hanteringsutrustning.

Produktion på plats: I vissa fall kan vätgas produceras på plats vid användningsstället med hjälp av naturgas, vattenelektrolys eller andra metoder. Detta kan vara ett bekvämt alternativ för användare som regelbundet behöver en liten mängd vätgas och som befinner sig nära en naturgasförsörjning.

Oavsett leveransmetod måste vätgas hanteras försiktigt eftersom det är mycket brandfarligt och kan vara farligt om det inte hanteras på rätt sätt.

Method	Advantages	Disadvantages
Compressed hydrogen transportation in containers by road or rails	<ul style="list-style-type: none"> - No need to build special infrastructure (pipelines) - Transport capacity can be scaled well to requirements on a small scale 	<ul style="list-style-type: none"> - High weight and volume tanks - The pipeline also functions as an accumulator hydrogen storage tank - Small mass transport capacity
Liquified hydrogen transportation in containers by road, rail or ship	<ul style="list-style-type: none"> - No need to build infrastructure (pipelines) - Possibility of transporting larger volumes 	<ul style="list-style-type: none"> - Large liquefaction losses - Small mass transport capacity
Hydrogen transportation by pipeline with natural gas mixture	<ul style="list-style-type: none"> - Existing natural gas infrastructure (and biogas/bio-methane) - Continuity of supply - Lower costs compared to transport by road/rail - Natural storage capacity 	<ul style="list-style-type: none"> - A limited ratio of admixture to a certain percentage - The maximum hydrogen concentration is given by compatibility of the connected end devices (e.g. CNG, boilers, etc.)
Separation of hydrogen from the natural gas mixture using membrane gas separation	<ul style="list-style-type: none"> - Use of the existing pipeline network - Relatively cheap technology - Scalable technology 	<ul style="list-style-type: none"> - Hydrogen back separation is not 100% - Can only be used on sections without branching - New technology
Clean hydrogen transportation through an existing gas pipeline adjusted to clean hydrogen	<ul style="list-style-type: none"> - Means to import large volumes hydrogen - Flexible balancing according to immediate country needs - Active transmission system operator in the latest approaches to decarbonise the EU gas sector - Experience in hydrogen operation in Europe, e.g. Benelux region 	<ul style="list-style-type: none"> - Low level of transport experience of pure hydrogen in pipelines in the region Central Europe
Pure hydrogen transportation through a new constructed pipeline	<ul style="list-style-type: none"> - Means of importing large volumes of hydrogen - Flexible balancing according to the immediate need in the country - Experience in operating hydrogen pipelines in Europe, e.g. Benelux region - Importing 'cheap' hydrogen from the regions with significantly lower production costs 	<ul style="list-style-type: none"> - High investment costs for construction compared to the use of existing infrastructure - Problems with securing rights land rights, EIA, nature protection and landscape
Liquid organic hydrogen carriers (LOHC)	<ul style="list-style-type: none"> - Transportation at normal temperature and pressure - Easy liquid handling - High hydrogen content both in terms of both by weight and volume - Great flexibility in terms of what is transported of quantity and distance transported 	<ul style="list-style-type: none"> - Hydrogen storage and recovery is expensive - New technology

Tabell nr. 1: Jämförelse av metoder för vätagstransport.

INSTUDERINGSFRÅGOR

1. Vilka är de kända grundläggande metoderna för vätagstransport?
2. Vilket är det normala trycket i behållare vid transport av komprimerad vätag?
3. Vilken temperatur har flytande väte?
4. Vilken är den typiska koncentrationen av vätag vid transport i naturgasledningar?
5. Vad är membranseparation?
6. Vad vet du om projektet The European Hydrogen Backbone?
7. Förklara vad akronymen LOHC betyder.

INTRODUKTION

Väte kan lagras på olika sätt, t.ex. som gas, vätska eller i fast form. Varje metod har sina egna fördelar och nackdelar, och vilken metod som är lämpligast för en viss tillämpning beror på de specifika kraven och begränsningarna för den aktuella tillämpningen.

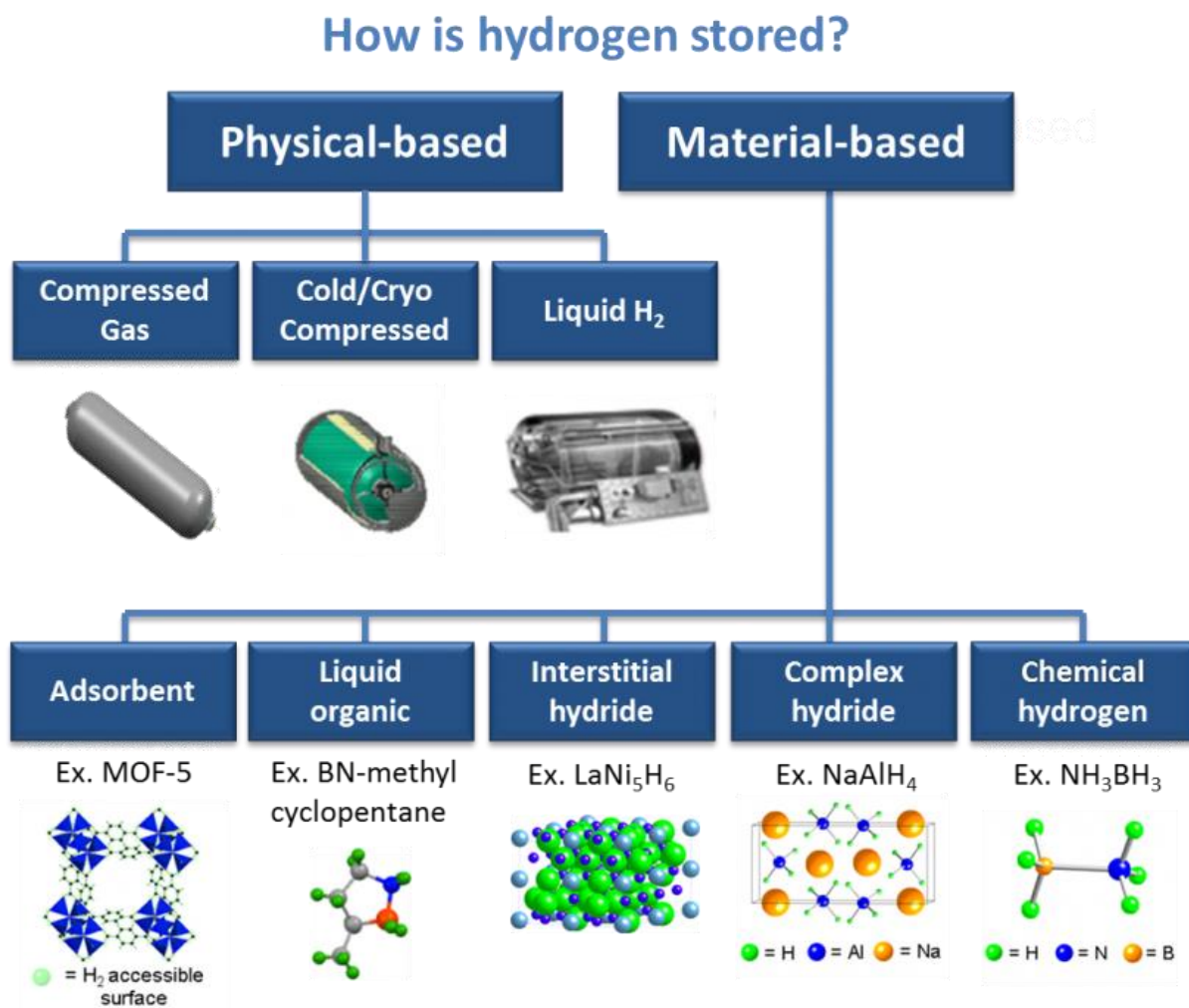


Bild nr. 11: Metoder för lagring av vätgas.

Ett sätt att lagra vätgas är som gas, vilket kan göras genom att trycksätta den i en tank eller cylinder. Detta är en enkel och relativt billig metod, men lagringsdensiteten är relativt låg, så det krävs en stor volym för att lagra en betydande mängd vätgas. Dessutom kan högtryckstankar vara tunga och kräva särskild hantering och säkerhetsåtgärder.

Ett annat sätt att lagra vätgas är som vätska, vilket kan uppnås genom att kyla den till en temperatur under dess kokpunkt. Flytande väte har en mycket hög lagringsdensitet, så det är möjligt att lagra en stor mängd

i en relativt liten volym. Den kryogena temperaturen för flytande väte (-253 °C) kräver dock att man använder specialiserad isolering och värmehanteringssystem, vilket kan vara dyrt.

Väte kan också lagras i fast form genom att det adsorberas på ytan av ett poröst material. Denna metod har fördelen att den är relativt enkel och säker, och den kan uppnå en hög lagringsdensitet. Den hastighet med vilken vätgas kan adsorberas och desorberas från lagringsmaterialet kan dock vara långsam, vilket kan begränsa den praktiska användbarheten av denna metod i vissa tillämpningar.

Det finns även andra metoder för vätgaslagring, t.ex. kemisk lagring och lagring med metallhydrider. Dessa metoder innebär att man använder kemiska föreningar eller metaller som kan reagera reversibelt med väte för att bilda stabila föreningar, som sedan kan lagras tills de behövs. Dessa metoder kan uppnå höga lagringsdensiteter och är relativt säkra, men de kan begränsas av den hastighet med vilken väte kan absorberas och frigöras, samt av kostnaden för och tillgången till lagringsmaterialen.

NYCKELORD: FLYTANDE VÄTE, GASSTRUKTURER, KOMPRIMERAT VÄTE, LAGRINGSTANKAR FÖR KRYOGENER, METALLHYDRIDER, TRYCKTANK, UNDERJORDISKA BEHÅLLARE, VÄTEHYDRIDER

3.1 LAGRING AV KOMPRIMERAT VÄTE

På grund av vätgasens låga densitet är det nödvändigt att lagra den komprimerad i trycktankar. De måste vara tryck- och förstöringsbeständiga och korrekt åtdragna (åtdragna med momentnyckel) för att undvika läckage. Väte är en gas med mycket små molekyler och därför är det nödvändigt att använda speciella material för lagring. När väte kommer i kontakt med jungfruligt stål eller aluminium uppstår så kallad väteförspredning, vilket kan försämra hållbarheten hos tryckflaskor, vilket återigen kräver användning av vissa specialmaterial. Att pressa vätgas är i sig energimässigt krävande. Väte är en gas som är mycket svår att komprimera. Den har omvänd Joule-Thomson-koefficient, och därför behövs mycket mer energi för att komprimera den än för andra gaser. För stationär lagring av vätgas används stora tryckbehållare av stål eller komposit (Vodíková strategie České republiky, 2021, s. 81).

Joule-Thomson-effekten, även känd som Joule-Kelvin-effekten, är temperaturförändringen hos en gas eller vätska när den expanderar eller tvingas genom en liten öppning eller ett poröst material. Denna effekt har fått sitt namn efter James Joule och William Thomson (Lord Kelvin).

Joule-Thomson-effekten kan observeras när en gas med högt tryck tillåts expandera genom en liten öppning eller ett poröst material. När gasen expanderar sjunker dess temperatur. Detta beror på att

gasens expansion utför ett arbete på omgivningen, vilket kräver energi. Den energi som behövs för detta arbete tas från gasens inre energi, vilket gör att dess temperatur sjunker.

Joule-Thomson-koefficienten är ett mått på temperaturförändringen hos en gas eller vätska när den expanderar. Koefficienten är positiv för de flesta gaser, vilket innebär att gasens temperatur sjunker när den expanderar. För vätskor kan Joule-Thomson-koefficienten vara antingen positiv eller negativ, beroende på vätskans specifika egenskaper.

Joule-Thomson-effekten har praktiska tillämpningar inom kylning och luftkonditionering samt inom olje- och gasindustrin, där den används för att mäta naturgasens temperatur och tryck i olika skeden av produktionsprocessen.

För stationära tillämpningar används vanligtvis svetsfria cylindrar av stål med låg kolhalt eller legerat stål. De tillverkas i volymer från några liter upp till ca 50 l för vanliga tillämpningar. För mobila tillämpningar används vanligtvis tryckbehållare av kompositmaterial. De tillverkas i volymer från tiotals liter upp till cirka 300 l. Ett typiskt drifttryck är 350 bar, i de nyaste tillämpningarna är det 450 - 700 bar. I många tillämpningar är den cylindriska formen något deformerad beroende på behovet av installation i ett fordons förvaringsutrymme. Om man vill lagra vätgas i högtryckstankar måste vätgasen först komprimeras till önskat tryck. För komprimering av vätgas används huvudsakligen kolvkompressorer. Den energi som krävs för vätgaskomprimering vid 350 bar uppgår till cirka 30% av energin från ett bränsle (Krátky, 2012, s. 37).



Bild nr. 12: Tryckbehållare för vätgas.

Nästa alternativ för lagring av vätgas i gasform är att lagra den i underjordiska lagringsplatser. De är vanligtvis några utvunna saltgruvor eller grottor med naturgas och tomma gasfält. I världen används denna metod på flera platser, till exempel i Amarillo i Texas (850 milj. m³), i franska Beynes (330 milj. m³), i engelska Billington (2,2 milj. m³). Andra lagringsplatser finns t.ex. i Tyskland och Holland. (Krčec, 2010, s. 20).

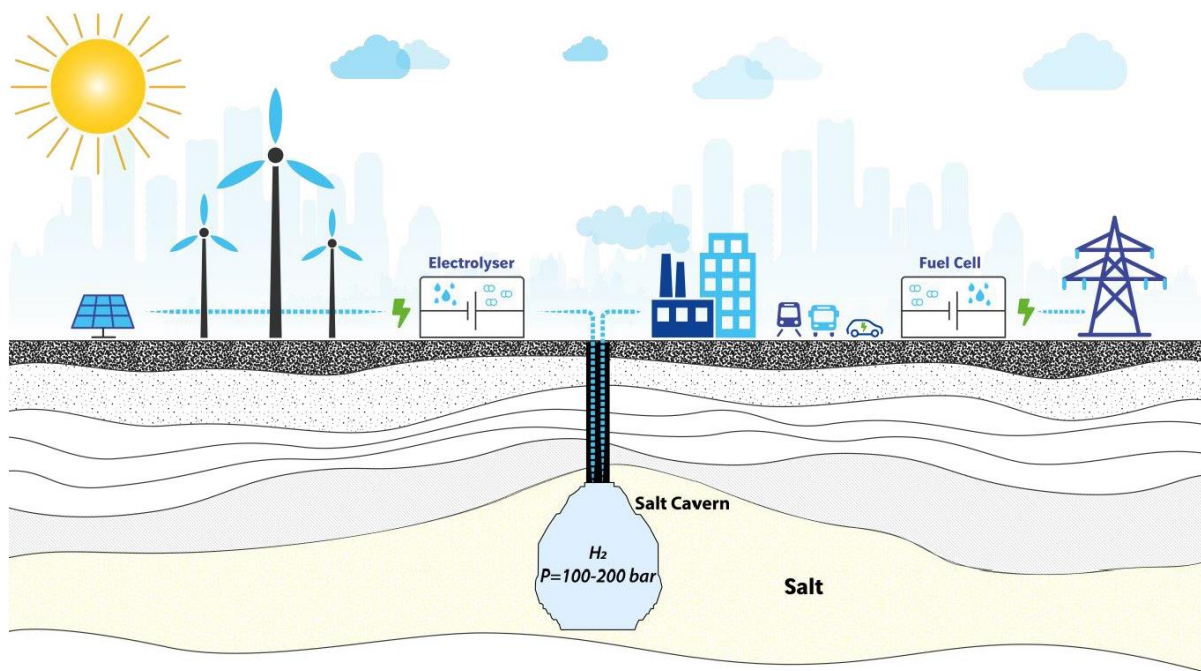


Bild nr. 13: Vätgaslagring i saltgrotta.

3.2 LAGRING AV FLYTANDE VÄTE

Det finns flera viktiga faktorer att ta hänsyn till när man utformar ett system för lagring av flytande vätagas.

En viktig faktor är materialet i lagringstanken. Tanken måste kunna motstå det flytande vätagasens extremt låga temperaturer (-253 °C) och det tryck som uppstår inuti tanken när vätagasen expanderar och drar ihop sig. Rostfritt stål och aluminium är vanliga material för vätagaslagringstankar, men de måste specialbehandlas för att göra dem motståndskraftiga mot korrosion och sprickbildning vid låga temperaturer. Tanken måste också vara konstruerad så att värme inte kan tränga in i tanken, eftersom detta kan få vätagasen att förångas och öka trycket inuti tanken. Detta uppnås vanligtvis genom användning av isolering, t.ex. skum eller vakuumisolerade paneler.

En annan viktig faktor är lagringstankens storlek. Tanken måste vara tillräckligt stor för att rymma en tillräcklig mängd vätagas för att uppfylla applikationens behov, men den måste också vara tillräckligt liten för att vara praktisk för den avsedda användningen. En för stor tank kan till exempel vara för tung eller ta upp för mycket utrymme, medan en för liten tank kanske inte kan rymma tillräckligt med vätagas för att vara praktisk.

Slutligen är det viktigt att ta hänsyn till lagringssystemets säkerhet. Flytande väte är en brandfarlig gas, så det är viktigt att se till att lagringssystemet är utformat för att förhindra läckage eller spill, och att det är utrustat med säkerhetsfunktioner som övertrycksventiler och nödavstängningssystem.

För lagring används flerskiktsskär med mycket goda isoleringsegenskaper med ett maximalt övertryck på 5 bar. Dessa behållare måste vara utrustade med en tryckavlastningsmekanism som reglerar det maximala säkra övertrycket. Under vätgaslagring i kryogena tankar sker en gradvis förångning orsakad av värmeöverföring från omgivningen och trycket ökar inuti behållaren. För att förhindra att tanken förstörs måste det överdrivna trycket kontrolleras genom att släppa ut det förångade vätet. För vanligt förekommande tankar kan förlusterna uppgå till upp till 3% av innehållet per dag (beroende på tankens kvalitet). I vissa tillämpningar hålls vätgasen kvar och trycksätts i ytterligare tryckcylindrar. Förvätskning är en tekniskt och energimässigt krävande process (Krátky, 2012, s. 38).

Den minsta teoretiska energin för att kondensera vätgas från omgivande förhållanden (300 K, 1,01 bar) är 3,3 kWh/kg LH2 eller 3,9 kWh/kg LH2 med omvandling till para-LH2 (vilket är standardpraxis). De faktiska energikraven för förvätskning är betydligt högre, vanligtvis 10-13 kWh/kg LH2, beroende på förvätskningsprocessens storlek. Nya förvätskningsmetoder, t.ex. en aktiv magnetisk regenerativ förvätskare, kan kräva så lite som 7 kWh/kg LH2. Som jämförelse kan nämnas att det lägre värmevärdet (LHV) för vätgas är 33,3 kWh/kg H2. Energitätheten för kompression vid produktion på plats varierar mellan cirka 5 och 20 % av LHV. Förvätskning (inklusive omvandling till paraLH2) med dagens processer kräver 30-40 % av LHV, medan teoretiska energikrav för 700 bar och lagring av LH2 endast ligger i intervallet 4-10 % av LHV (DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record, 2009, s. 1)



Bild nr. 14: Tank för flytande väte..

3.3 VÄTGASLAGRING I UNDERJORDISKA BEHÅLLARE I EN BLANDNING MED METAN ELLER AMMONIAK

Väte kan lagras under jord i behållare i en blandning med metan eller ammoniak, en process som kallas "vätgasinjektion". Denna metod används för att lagra överskottsväte som produceras under tider med låg

efterfrågan, så att det kan återvinnas och användas som bränsle eller råmaterial när det behövs. Det finns flera fördelar med detta tillvägagångssätt:

- Säkerhet: Injicering av vätgas gör det möjligt att lagra vätgas under jord i en kontrollerad miljö, vilket minskar risken för läckage och olyckor.
- Effektivitet: Väte kan lagras med hög densitet när det blandas med metan eller ammoniak, vilket gör att mer väte kan lagras i en mindre volym.
- Hållbarhet: Injicering av vätgas kan bidra till att minska utsläppen av växthusgaser genom att överskott av vätgas kan lagras och användas som bränsle i stället för att släppas ut i atmosfären.

Det finns flera utmaningar med att genomföra vätgasinjektion, inklusive behovet av att utveckla lämpliga lagringsbehållare och kostnaden för att bygga och driva lagringsanläggningarna. Detta tillvägagångssätt har dock potential att spela en viktig roll i framtiden för lagring och distribution av vätgas.

Injicering av vätgas innebär att överskott av vätgas lagras i underjordiska behållare i en blandning med metan eller ammoniak, en process som kan bidra till att minska utsläppen av växthusgaser och förbättra vätgaslagringens effektivitet. Här följer en mer detaljerad förklaring av hur denna process fungerar:

- Väte framställs genom en rad olika metoder, bland annat elektrolys, ångreformeringsmetoder av metan och förgasning av biomassa. Under perioder med låg efterfrågan produceras ett överskott av vätgas som måste lagras tills det behövs.
- Vätgasen sprutas in i underjordiska lagringsbehållare där den blandas med metan eller ammoniak. Metanet eller ammoniaken bidrar till att öka blandningens densitet, vilket gör att mer vätgas kan lagras i en mindre volym.
- Väte-metanblandningen lagras under jord, vanligtvis på ett djup av flera hundra meter. Förvaringsbehållarna är konstruerade för att klara tryck- och temperaturförhållandena på detta djup.
- När vätgasen behövs återvinns den från lagringsbehållarna och separeras från metan eller ammoniak. Detta kan göras med en mängd olika metoder, inklusive tryckväxlande adsorption och kryogen destillation.
- Det reade vätet kan sedan användas som bränsle eller råvara i en mängd olika tillämpningar, inklusive transport, kraftgenerering och industriella processer.

3.4 LAGRING AV VÄTE I HYDRIDER

Väte kan lagras i hydrider, vilket är material som kan absorbera och avge vätgas. Det finns flera typer av hydrider, bland annat metallhydrider, kovalenta hydrider och joniska hydrider.

Metalliska hydrider bildas när vätgas reagerar med en metall och bildar en fast förening. Dessa föreningar har en hög kapacitet för vätgaslagring, men de tenderar att vara tunga och skrymmande, och de kräver höga tryck för att frigöra vätgasen.

Kovalenta hydrider bildas när väteatomer binder kovalent med andra atomer för att bilda en förening. Dessa föreningar har en måttlig kapacitet för vätgaslagring och kan frigöras vid lägre tryck än metallhydrider.

Joniska hydrider bildas när vätejoner binder med andra joner för att bilda en förening. Dessa föreningar har en hög kapacitet för vätgaslagring, men de är i allmänhet inte lika stabila som metalliska eller kovalenta hydrider och tenderar att sönderdelas vid höga temperaturer.

Det finns flera utmaningar med att använda hydrider för vätgaslagring, inklusive kostnaden och svårigheten att producera och hantera hydriderna, samt den låga effektiviteten i vätgasfrisättningsprocessen. Forskare arbetar med att utveckla nya material och metoder för att övervinna dessa utmaningar och göra vätgaslagring i hydrider mer praktiskt och kostnadseffektivt.

Vid normal temperatur är hydrider stabila, de löser inte upp sig och är relativt säkra vätgastankar. Deras sönderfall sker vid höga temperaturer, varvid vätgas frigörs och överförs till en bränslecell.

De observerade parametrarna för dessa system är främst temperaturen vid vilken desorptionen av vätgas från ett material sker, absorbatorns viktkapacitet (om det gäller hela systemet), absorbatorns volymkapacitet och sist men inte minst priset och systemets komplexitet.

Ett av kraven är att nedbrytningen ska ske vid något högre temperaturer (150 - 200°C) för att inte förbruka alltför mycket energi genom hydriduppvärmning.

Det har konstruerats effektiva system som kan absorbera stora mängder väte. Med olika typer av hydrider finns det olika mängder väte som materialen kan absorbera. Vissa hydrider är lättbearbetade vätskor vid rumstemperatur och atmosfärstryck, medan andra är fasta ämnen.

Dessa material har god volymetrisk energidensitet, men i förhållande till sin vikt är energidensiteten inte idealisk. För vissa föreningar med lättmetaller, t.ex. magnesium, är dock systemets totala vikt endast 30 % högre jämfört med system för lagring av flytande väte. Dessa ogynnsamma parametrar kompenseras

av ett större behov av termisk desorption - hög temperatur, lågt tryck för producerad vätgas och sist men inte minst, ett högt pris på hydrider.

En annan viktig egenskap är reversibilitet, eller ett materials förmåga att återabsorbere nytt väte efter att ha förbrukat det lagrade vätet. Detta är kopplat till "laddning" av hydrider och deras upprepade användning på samma sätt som med batterier (Krátky, 2012, s. 41).

3.4.1 METALLHYDRIDER

Väte kan lagras i metallhydrider, som är föreningar som bildas mellan väte och en metall. Vätet lagras i metallgittret och kan frigöras genom en process som kallas dehydrogenering, vilket innebär att metallhydriden upphettas till en hög temperatur. Det finns flera typer av metallhydrider som kan användas för vätgaslagring, bland annat intermetalliska föreningar, komplexa metallhydrider och enkla metallhydrider.

Intermetalliska föreningar bildas mellan två eller flera metaller och kan lagra en stor mängd väte i sitt gitter. De är i allmänhet stabila och kan användas för långtidslagring av väte. De kräver dock ofta höga tryck eller höga temperaturer för att frigöra vätet, vilket kan vara svårt att uppnå i praktiska tillämpningar.

Komplexa metallhydrider bildas mellan en metall och en icke-metall och kan lagra en måttlig mängd väte i sitt gitter. De tenderar att frigöra vätet vid lägre temperaturer än intermetalliska föreningar, men de är inte lika stabila och kan brytas ned med tiden.

Enkla metallhydrider, t.ex. magnesiumhydrid, kan lagra en liten mängd väte i sitt gitter och släppa ut det vid låga temperaturer. De är dock inte lika stabila som intermetalliska föreningar och tenderar att sönderdelas med tiden.

Sammantaget är metallhydrider ett lovande alternativ för vätgaslagring på grund av deras höga vätgaslagringskapacitet och förmågan att frigöra vätgasen vid relativt låga temperaturer. Det krävs dock ytterligare forskning för att förbättra deras stabilitet och minska tillverkningskostnaderna.

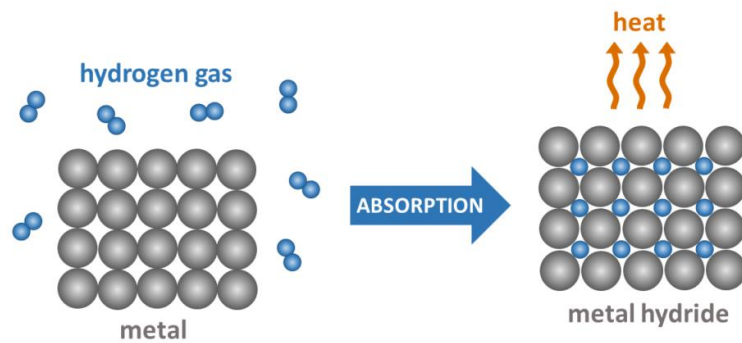


Bild nr. 15: Exoterm reaktion vid absorption av väte..

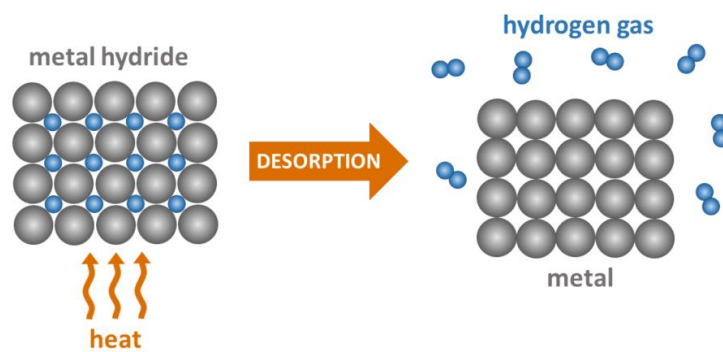


Bild nr. 16: Vätgasdesorptionsreaktion från metalhydrid.

3.5 VÄTGASLAGRING I KOLBASERADE BEHÅLLARE

Kolmaterial, som grafen och kolnanorör, har studerats som ett sätt att lagra vätgas. Dessa material har hög ytaarea och kan fysiskt absorbera vätgas, vilket gör att de kan lagra stora mängder vätgas i en liten volym. Vätgaslagringskapaciteten hos dessa material begränsas dock av deras ytaarea och porstorlek, och de kan bara lagra små mängder vätgas åt gången. Dessutom kan processen för att absorbera och frigöra vätgas från dessa material vara långsam, vilket gör dem mindre praktiska för användning i vätgaslagringstillämpningar.

Det finns flera olika sätt att lagra vätgas i kolmaterial, bland annat fysisk adsorption, kemisk adsorption och kemisk reaktion.

Fysisk adsorption sker när vätgasmolekyler dras till kolmaterialets yta på grund av Van der Waals-krafter. Denna typ av vätgaslagring är reversibel, vilket innebär att vätgasen lätt kan frigöras från materialet genom att trycket sänks eller temperaturen höjs. Fysisk adsorption kan användas för att lagra vätgas vid höga tryck (upp till ca 35 MPa) och vid rumstemperatur, men lagringskapaciteten begränsas av materialets ytarea.

Van der Waals-krafter är svaga attraktionskrafter som uppstår mellan neutrala atomer och molekyler. De är en typ av icke-kovalent växelverkan och orsakas av tillfälliga fluktuationer i elektrondensiteten. De tre typerna av van der Waals-krafter är Londons dispersionskrafter, dipol-dipol-interaktioner och kvadrupol-kvadrupol-interaktioner. Dessa krafter är ansvariga för gasers och vätskors beteende och spelar också en roll för biomolekyleras stabilitet och kristallbildning.

Vid kemisk adsorption bildas en kemisk bindning mellan vätet och kolmaterialet. Denna typ av vätgaslagring är också reversibel, men bindningen är starkare än de van der Waals-krafter som är involverade i fysisk adsorption, så det krävs mer energi för att frigöra vätgasen. Kemisk adsorption kan användas för att lagra vätgas vid lägre tryck (under 10 MPa) och vid lägre temperaturer.

Kemisk reaktion innebär att en ny förening bildas genom att väte reagerar med kolmaterialet. Denna typ av vätgaslagring är inte reversibel och vätgasen kan inte enkelt frigöras från materialet. Kemisk reaktion kan dock användas för att lagra stora mängder vätgas i en liten volym.

Sammantaget har kolmaterial flera attraktiva egenskaper för vätgaslagring, bland annat hög ytarea, hög hållfasthet och låg vikt. Lagringskapaciteten hos dessa material är dock begränsad och processen att absorbera och frigöra vätgas kan vara långsam, vilket gör dem mindre praktiska att använda i många vätgaslagringstillämpningar.

Nanostrukturer av kol omfattar högporös grafit och kolnanorör. På senare tid har uppmärksamheten riktats mot studier av enkelväggiga nanorör, som har stor potential för vätgaslagring. Många forskargrupper runt om i världen arbetar med frågan.

Det elementära byggelementet i nanorör är grafit. Nanorör bildas av ett eller flera lager som rullas ihop till ett rör med en slutlig längd. Rörens diameter är 0,7 - 3 nm. (Krček, 2010, s. 22).

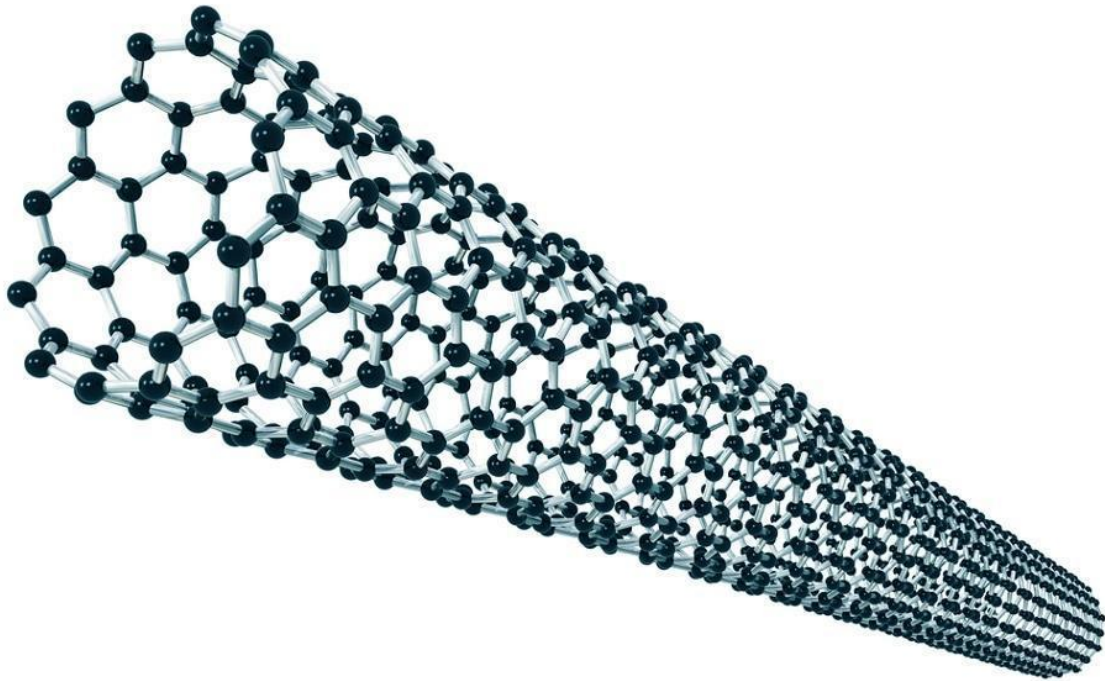


Bild nr. 17: Nanorör av kol.

SAMMANFATTNING

Med lagring av komprimerad vätgas avses lagring av vätgas vid höga tryck för att minska den volym som vätgasen upptar. Detta kan göras på ett antal olika sätt, bland annat genom användning av högtryckstankar eller cylindrar.

Fördelen med komprimerad vätgaslagring är att man kan lagra en relativt stor mängd vätgas på en relativt liten yta. Detta gör det till ett attraktivt alternativ för användning i fordon och andra tillämpningar där utrymmet är begränsat. Det är dock viktigt att notera att de höga tryck som krävs för lagring av komprimerat väte kan utgöra säkerhetsrisker, och de tankar och cylindrar som används för att lagra gasen måste vara noggrant utformade och underhållna för att minimera dessa risker.

Med lagring av flytande vätgas avses lagring av vätgas i flytande form, snarare än som gas eller fast ämne. För att lagra vätgas i flytande form måste den kylas till en temperatur på cirka -253 °C , vilket är långt under dess kokpunkt.

Fördelen med att lagra vätgas i flytande form är att man kan lagra en mycket stor mängd vätgas i en relativt liten volym. Detta gör det till ett attraktivt alternativ för användning i en mängd olika tillämpningar, inklusive rymdresor, där vikt och volym är kritiska faktorer.

Den låga temperatur som krävs för lagring av flytande väte gör det svårt att hantera och transportera, och det krävs specialutrustning och isolering för att förhindra värmeöverföring och avdunstning. Dessutom kan den låga temperaturen hos flytande väte göra det känsligt för försprödning av vissa material, vilket kan orsaka problem med tankar och andra lagringsbehållare.

Det är möjligt att lagra vätgas i underjordiska behållare i en blandning med metan eller ammoniak, vilket är en process som kallas "vätgasblandning". Detta tillvägagångssätt kan potentiellt användas för att lagra överskottsväte som produceras från förnybara energikällor, såsom vind- eller solenergi, och sedan blanda det med naturgas för användning som bränsle.

Vätgasblandning innebär att vätgas kan lagras och transporteras med hjälp av befintlig infrastruktur, t.ex. naturgasledningar. Detta kan vara mer kostnadseffektivt och logistiskt enklare än att bygga ny infrastruktur specifikt för lagring och transport av vätgas.

Ett av de största problemen är att vätgas och metan eller ammoniak har olika fysiska och kemiska egenskaper, vilket kan göra det svårt att blanda dem på ett sätt som är säkert och effektivt. Dessutom är vätgas dyrare att producera än metan, så ekonomin i vätgasblandning kanske inte alltid är gynnsam.

Vätgaslagring i hydrider avser användning av material som kan absorbera och avge stora mängder vätgas, så kallade "hydrider", som ett sätt att lagra vätgas. Det finns flera typer av hydrider som kan användas för vätgaslagring, bland annat metallhydrider, kemiska hydrider och komplexa hydrider.

De främsta fördelarna med vätgaslagring i hydrider är att det gör det möjligt att lagra vätgas i en relativt kompakt och lätt form. Detta gör det till ett attraktivt alternativ för användning i en mängd olika applikationer, t.ex. bärbara elektroniska enheter och bränslecellsfordon.

Hydrider har en relativt låg kapacitet för vätgaslagring, vilket innebär att det krävs en stor volym av materialet för att lagra en praktisk mängd vätgas. Dessutom är processen för att absorbera och frigöra vätgas från hydrider ofta långsam och kräver användning av värme, vilket kan vara energiintensivt och ineffektivt.

Vätgaslagring i kolbaserade behållare innebär att man använder material som är tillverkade av kol, t.ex. kolnanorör eller grafen, för att lagra vätgas. Dessa material är kända för sin höga ytareal och starka kemiska bindningar, vilket gör att de kan adsorbera och lagra stora mängder vätgas.

En av de största fördelarna med vätgaslagring i kolbaserade behållare är att de har en hög kapacitet för vätgaslagring, vilket innebär att det krävs en relativt liten volym av materialet för att lagra en praktisk mängd vätgas. Kolbaserade material är dessutom relativt lätta och starka, vilket gör dem lämpliga för användning i en mängd olika tillämpningar.

Method	Advantages	Disadvantages
Compressed hydrogen storage	<ul style="list-style-type: none"> - Compared to batteries, an increasingly convenient form of energy storage for longer periods - Long-term experience 	<ul style="list-style-type: none"> - Losses (leakages) - Hydrogen compression is energy intensive - Technologically no longer practically possible further improvements - Restriction of routes according to ADR conditions
Liquid hydrogen storage	<ul style="list-style-type: none"> - Higher energy concentration than for compressed hydrogen - Can be handled at low pressure - Good energy content ratio to the weight of the container 	<ul style="list-style-type: none"> - Losses (leakages) - Liquefaction of hydrogen is energetically intensive - Cryogenic storage vessels and transport are very expensive
Hydrogen storage in underground containers in a mixture with methane or ammonia	<ul style="list-style-type: none"> - High-capacity storage - Existing storage infrastructure - Connection to the gas system - Experience with hydrogen storage as a component of luminescent gas 	<ul style="list-style-type: none"> - Storage of a higher proportion of hydrogen is needs to be technically verified and may vary from tank to tank - Losses (leakages) from storage of higher concentrations of hydrogen mixed with methane or hydrogen alone
Hydrogen storage in hydrides	<ul style="list-style-type: none"> - Transportation at normal temperature and pressure - Easy handling of solids - High hydrogen content both in terms by weight and volume - Great flexibility in terms of quantity transported and distance transported 	<ul style="list-style-type: none"> - New technology
Hydrogen storage in carbon-based containers	<ul style="list-style-type: none"> - Very lightweight material - High strength-to-weight ratio - Chemically and thermally stable 	<ul style="list-style-type: none"> - Carbon materials are not completely impermeable to hydrogen - Degrade over time - More expensive and technically difficult to manufacture

Tabell nr 2: Jämförelse av metoder för vätgaslagring.

INSTUDERINGSFRÅGOR

1. Förklara Joule-Thomson-effekten.
2. Vilket är det typiska trycket i högtrycksförvaringstankar för vätgas?
3. Vilken mekanism måste tankar vara utrustade med för att lagra flytande väte?
4. Beskriv fördelarna med att lagra vätgas i underjordiska lager blandat med metan eller ammoniak.
5. Vilka typer av hydrider är lämpliga för vätgaslagring?
6. Vilka kolmaterial är lämpliga för vätgaslagring?

4 KOMPONENTER

INTRODUKTION

Det finns flera sätt att lagra vätgas, beroende på typ och önskade tryck- och temperaturförhållanden.

Några vanliga komponenter för lagring av vätgas inkluderar:

- Cylindrar för komprimerat väte: Dessa är högtrycksbehållare tillverkade av stål, aluminium eller kompositmaterial. De används för att lagra vätgas som är i komprimerat flytande eller gasformigt tillstånd.
- Kryogena tankar: Dessa tankar används för att lagra gaser som befinner sig i ett kryogent tillstånd (mycket låg temperatur), t.ex. flytande väte eller flytande syre.
- Lagringstankar för högt tryck: Detta är stora tankar som används för att lagra gaser vid högt tryck. De kan vara tillverkade av stål, aluminium eller andra material och används vanligtvis för att lagra vätgas i gasform.
- Lagring i rörledningar: Väte kan också lagras i rörledningar, som används för att transportera gasen från en plats till en annan. Dessa rörledningar är vanligtvis nedgrävda under jord och kan användas för att lagra gaser under långa tidsperioder.

Det är viktigt att följa korrekta säkerhetsrutiner och bestämmelser vid lagring av vätgas för att minimera risken för olyckor eller utsläpp.

NYCKELORD: HÖGTRYCKSTANKAR, KRYOGENA TANKAR, TRYCKCYLINDRAR, TRYCKKÄRL

4.1 TRYCKBEHÅLLARE

Trycktankar för vätgas är behållare som är konstruerade för att lagra vätgas vid högt tryck. De är ofta tillverkade av kompositmaterial som kolfiber eller glasfiber, som är lätta och tillräckligt starka för att klara trycket från gasen inuti tanken.

Vätgas lagras i trycktankar för att öka den mängd gas som kan lagras i en given volym. När vätgas lagras under högt tryck ökar dess energidensitet, vilket gör att den tar upp mycket mindre utrymme. Detta gör det möjligt att lagra stora mängder vätgas i en relativt liten tank, vilket gör det till ett attraktivt alternativ för användning i bränslecellsfordon och andra tillämpningar där utrymmet är begränsat.

Det finns flera olika typer av vätgastryckstankar, bland annat sådana som är avsedda att fyllas på och sådana som är avsedda att kasseras efter att de har tömts. Vissa tankar är också utformade för att användas i kombination med andra typer av lagringssystem, t.ex. kryotankar, som används för att lagra vätgas i flytande form vid mycket låga temperaturer.

För att garantera säkerheten för gasen inuti tanken är vätgastrycktankar utrustade med olika säkerhetsfunktioner som övertrycksventiler och sprängskivor. Dessa funktioner hjälper till att förhindra att tanken brister eller spricker i händelse av en övertryckssituation.

Generellt sett är vätgastryckstankar en viktig del av den infrastruktur som behövs för att lagra och transportera vätgas, och de spelar en avgörande roll för utvecklingen och spridningen av vätgasdrivna bränslecellstekniker.

Tryckkärl kan användas både för stationär lagring och för mobil vätgaslagring. För statiska tillämpningar används vanligtvis sömlösa stålcyllindrar av stål med låg kolhalt eller legerat stål. De tillverkas i ett brett spektrum av volymer beroende på den planerade användningen.

För mobila tillämpningar används vanligtvis tryckkärl av komposit. De tillverkas i volymer från tiotals liter upp till cirka 300 l. Ett typiskt drifttryck är 350 bar, i de nyaste applikationerna från 450 upp till 700 bar (tillfällig teknisk gräns är 1000 bar).

Cyllinders som är 12 meter långa och har en ytterdiameter på cirka 80 cm kan användas som tankar för tankstationer för vätgasdrivna fordon eller som tankar för energiöverskott från förnybar energi (Vodíková strategie České republiky, 2021, s. 111).

Det faktum att det är en beprövad teknik som är verifierad och uppfyller alla stigande krav på vätgaslagring anses vara en fördel. Den är lämplig för lagring av små mängder i oregelbundna leveranser. Med utvecklingen av vätgasteknik kommer villkoren för vätgaslagring att öka dramatiskt. En fråga som kvarstår är om den nuvarande teknikutvecklingen inte kommer att leda till en minskning av lagringsbehoven och vätgas transporter under högt tryck. En nackdel med trycktankar kan vara deras säkerhetsaspekter och tekniska begränsningar som t.ex. tryck, material eller volym hos tryckcyllindrar (Vodíková strategie České republiky, 2021, s. 111-112).



Bild nr. 18: Tryckbehållare av komposit.

4.2 KRYOGENA TANKAR

Kryotankar är specialkonstruerade förvaringskärl som används för att lagra material vid extremt låga temperaturer. De används för att lagra en mängd olika material, inklusive gaser som väte, syre och kväve, samt biologiska material som mänskliga celler och vävnader.

Kryotankar är tillverkade av material som klarar dessa extremt låga temperaturer, t.ex. rostfritt stål eller aluminium. De är också kraftigt isolerade för att hålla kylan inne och värmen ute.

Det finns två huvudtyper av kryotankar: stationära tankar och bärbara tankar. Stationära tankar används för att lagra stora mängder material och installeras vanligtvis på en fast plats, medan portabla tankar används för att lagra mindre mängder och kan flyttas från en plats till en annan.

Kryotankar används inom en rad olika branscher, bland annat inom medicin-, kemi- och energiindustrin. De är ett viktigt verktyg för lagring och transport av material vid extremt låga temperaturer, och de spelar en avgörande roll i många vetenskapliga och tekniska tillämpningar.

Kryotankar kan användas för att lagra vätgas i flytande form vid en temperatur på $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$. Detta är ett av de mest effektiva sätten att lagra vätgas, eftersom det möjliggör en mycket tätare lagring av gasen.

Lagring av vätgas i en kryogen tank kräver dock specialutrustning och noggrann hantering, eftersom den extremt låga temperaturen kan vara farlig. Tanken måste vara kraftigt isolerad för att hålla vätgasen kall och förhindra att den värms upp och förångas. Dessutom måste tanken vara utrustad med säkerhetsfunktioner som övertrycksventiler för att förhindra att tanken spricker på grund av övertryck.

Kryogena tankar används vanligtvis för att lagra stora mängder vätgas, och de installeras vanligtvis på en fast plats. De används ofta inom kemi- och energiindustrin samt inom forskning och utveckling.

Generellt sett är kryotankar ett viktigt verktyg för lagring och transport av vätgas, men de kräver särskild hantering och utrustning på grund av de extrema temperatur- och tryckförhållandena.



Bild nr. 19: Kryogeniska tankar.

4.3 LAGRINGSTANKAR FÖR HÖGT TRYCK

Högtryckstankar är stora tryckkärl som används för att lagra gaser vid höga tryck. De kan tillverkas av en mängd olika material, t.ex. stål, aluminium och fiberförstärkt plast, och är konstruerade för att vara starka men ändå lätta. Dessa tankar används vanligtvis för att lagra gaser som är i gasform, t.ex. väte.

Högtryckstankar används i en mängd olika tillämpningar, bland annat för lagring av bränsle för vätgasfordon. De är i allmänhet utformade och konstruerade för att uppfylla säkerhetsbestämmelser och standarder för att minimera risken för olyckor eller utsläpp av den lagrade gasen.

Det är viktigt att följa korrekta säkerhetsrutiner vid hantering och lagring av högtryckstankar. Detta innebär att man måste se till att tankarna förvaras på en säker plats, borta från antändningskällor, och att de hanteras och transporteras försiktigt för att förhindra skador. Dessutom är det viktigt att regelbundet inspektera och underhålla högtryckstankar för att säkerställa att de är i gott skick och för att förhindra läckage eller andra problem.

Högtryckslagring kan lagra en stor mängd vätgas i ett relativt litet utrymme. En stor möjlighet för högtryckslagring är det strategiska område som är absolut nödvändigt för den fortsatta utvecklingen av vätgas och de besparingar som följer av omfattningen av möjlig vätgaslagring. Vid byggandet av högtryckslagringsanläggningar är det nödvändigt att förvänta sig höga initiala investeringskrav. Byggandet lönar sig endast vid produktions- eller förbrukningspunkten och är beroende av vätgaskomprimering och energiförluster. Säkerhetsaspekterna får inte heller försummas (Vodíková strategie České republiky, 2021, s. 115).

SAMMANFATTNING

Tryckflaskor för komprimerat väte är högtrycksbehållare som används för att lagra vätgas vid tryck mellan 350 och 700 bar. Flaskorna är tillverkade av höghållfasta material som stål eller kompositmaterial och är utformade för att vara starka men ändå lätta. De används ofta som bränsle för vätgasfordon, som kemisk råvara och för andra industriella och kommersiella tillämpningar.

Kryogena vätgastankar är lagringskärl som används för att lagra vätgas vid extremt låga temperaturer, vanligtvis i intervallet -253 °C eller kallare. Dessa tankar är tillverkade av material som tål den extrema kylan och trycket från det lagrade vätet, t.ex. rostfritt stål eller höghållfasta kompositer.

Högtryckstankar för vätgas är tryckkärl som används för att lagra vätgas vid höga tryck. Dessa tankar är tillverkade av höghållfasta material som stål eller kompositmaterial och är utformade för att vara starka men ändå lätta. De används ofta som bränsle för vätgasfordon, som kemisk råvara och för andra industriella och kommersiella tillämpningar.

Lagringstankar för vätgas med högt tryck har flera fördelar jämfört med andra typer av bränslelagring. De är relativt lätta, vilket gör dem väl lämpade för användning i fordon. De är också lätta att fylla på och kan användas i många olika temperaturer. Vätgas är dock en mycket brandfarlig gas, så det är viktigt att följa lämpliga säkerhetsrutiner vid hantering och lagring av högtrycksbehållare för vätgas. Det innebär bl.a. att tankarna ska förvaras på en säker plats, borta från antändningskällor, och att de ska hanteras och transporteras varsamt för att förhindra skador.

INSTUDERINGSFRÅGOR

1. Vilka komponenter känner du till för vätgaslagring?
2. Vad är skillnaden mellan ett tryckkärl och en kryogen tank?
3. Var används högtryckslagring av vätgas oftast?

5 REFERENSER

- GUPTA B. Ram. *Hydrogen fuel, Production, Transport and Storage*. CRC Press, New York 2009. 611 str. ISBN 978-1-4200-4575-8.
- *Vodíková strategie České republiky*. Česká republika: Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky, 2021.
- ŠVÁB, Michal. *Trendy ve vývoji vodíkového hospodářství ve světě a možnosti uplatnění v České republice*. Česká republika: Česká energetická agentura, 2006.
- KRČEK, Martin a Lukáš RADIL. *Analýza využití vodíku v energetice: Analysis of usage hydrogen in power supply*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010.
- BŘOUŠEK, L. *Vodík a automobil*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 51 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Kaplan, CSc.
- KRÁTKÝ, Š. *Výroba a uskladnění vodíku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 51 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Hejčík, Ph.D.
- JUREČKA, R. *Možnosti využití vodíku v letectví*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 98 s. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Antonín Píštěk, CSc.
- GALÍK, Tomáš. *Posouzení dopadů využívání zemního plynu obohaceného vodíkem* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132166>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Marek Baláš.
- *European Hydrogen Backbone Report* [online]. 2020 [cit. 2022-9-8]. Dostupné z: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjOxautrtHvAhXGu6QKHWpnDMgQFjAAegQIAxAD&url=https%3A%2F%2Fwww.gasunie.nl%2Fen%2Fnews%2Fgas-infrastructure-companies-present-aeuropean-hydrogen-backboneplan%2F%245741%2F%245742&usg=AOvVaw2HDA_t_6gG1ZBmw_EUMdh9s
- The Future of Gas Separation Through Membrane Technologies [foto]. *Monteco* [online]. 9.5.2017 [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: <https://monteco.com/the-future-of-gas-separation-through-membrane-technologies/>

- Stationary LOHC infrastructure [foto]. *Hydrogenious LOHC* [online]. [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: <https://hydrogenious.net/what/>
- SATYAPAL, Sunita. DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record [foto]. *Energy requirements for hydrogen gas compression and liquefaction as related to vehicle storage needs* [online]. 26.10.2009 [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/9013_energy_requirements_for_hydrogen_gas_compression.pdf
- Research institute on metal hydrides [foto]. *Hystorsys* [online]. [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: <https://www.hystorsys.no/our-story/>
- Carbon Nanotubes for Energy Storage Applications [foto]. *AZONANO* [online]. 21.10.2016 [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=4298>
- Hydrogen Storage: Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office [foto]. *ENERGY.GOV* [online]. [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>
- Realisation of a national hydrogen network [foto]. *HyWay 27* [online]. 30.7.2021 [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: <https://www.hyway27.nl/en/latest-news/hyway-27-realisation-of-a-national-hydrogen-network>
- *Lecture 3 Hydrogen storage: European Train the Trainer Programme for Responders* [online]. HyResponder, 2021 [cit. 2023-01-16].
- Liquid hydrogen seen as 'holy grail' for hydrogen uptake in mobility sector: Linde COO. *S&P Global Commodity Insights* [online]. 16.11.2021 [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/energy-transition/111621-liquid-hydrogen-seen-as-holy-grail-for-hydrogen-uptake-in-mobility-sector-linde-coo>

6 LISTA ÖVER BILDER OCH TABELLER

Tabell nr. 1: Jämförelse av metoder för vätgastransport.

Tabell nr. 2: Jämförelse av metoder för lagring av vätgas.

Bild nr. 1: Varningstavla

Bild nr. 2: Vätgastransport i behållare på väg

Bild nr. 3: Transport av flytande vätgas i containrar på fartyg

Bild nr. 4: Membran separation av gas

Bild nr. 5: Vätgastransport i rörledning

Bild nr. 6: Den europeiska backbonen för vätgas 2030

Bild nr. 7: Den europeiska ryggraden för vätgas 2040

Bild nr. 8: Infografik om HyWay 27

Bild nr. 9: Stationär LOHC-infrastruktur - StoragePLANTS av Hydrogenious

Bild nr. 10: Stationär LOHC-infrastruktur - ReleasePLANTS av Hydrogenious

Bild nr. 11: Metoder för lagring av vätgas

Bild nr. 12: Trycktankar för vätgas

Bild nr. 13: Vätgaslagring i saltgrotta

Bild nr. 14: Tank för flytande vätgas

Bild nr. 15: Exoterm reaktion vid absorption av vätgas

Bild nr. 16: Desorptionsreaktion av väte från matalhydrid

Bild nr. 17: Nanorör av kol

Bild nr. 18: Tryckbehållare av komposit

Bild nr. 19: Kryogena tankar

7 FÖRKORTNINGAR

EHB - The European Hydrogen Backbone

MIE - minimum Ignition Energy

LNG - liquified natural gas

LOHC - liquid organic hydrogen carriers

LH2 - liquid hydrogen

HENG - hydrogen-enriched natural gas

CO₂ - carbon dioxide

CNG - compressed Natural Gas

MOF - metal organic frameworks

EU - European Union

UK - United Kingdom

EIA - environmental impact assessment

LHV - lower heating value

DOE - design of experiment

ADR - accord dangereuses route