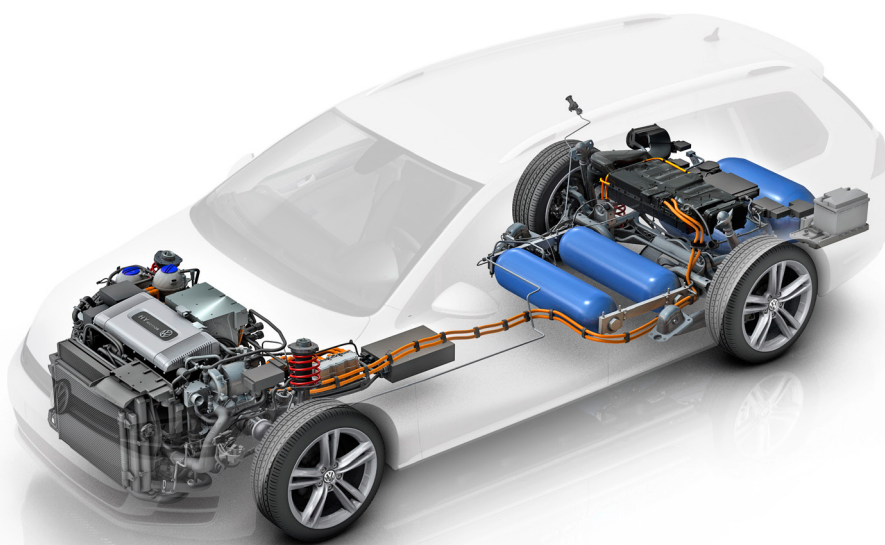


# VÄTGASLAGRING I VÄGFORDON

RAPPORT 2018:553



TEKNIKBEVAKNING  
BRÄNSLECELLER





# Vätgaslagring i vägfordon

HANS POHL  
BENGT RIDELL

ISBN 978-91-7673-553-4 | © Energiforsk december 2018 | Omslagsfoto Volkswagen Golf HyMotion

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: [kontakt@energiforsk.se](mailto:kontakt@energiforsk.se) | [www.energiforsk.se](http://www.energiforsk.se)



## Förord

I syfte att koordinera teknikbevakningen, men också för att sammanställa, analysera och sprida information om utvecklingen inom bränslecellsområdet finansierar Energimyndigheten projektet **Teknikbevakning av bränsleceller**. Projektet och dess resultat vänder till svenska intressenter, främst fordonsindustrin, och genomförs under 2016 – 2019 som ett temaområde inom kompetenscentret Swedish Electromobility Centre med Energiforsk som koordinator och projektledare.

Denna rapport, som har tagits fram inom teknikbevakningsprojektet, beskriver och analyserar olika former av vätgaslagring i fordon med fokus på trycksatt vätgas. Livslängd och kostnad adresseras med syftet att bidra till förbättrade möjligheter att bedöma om och i så fall på vilket sätt som de olika teknikerna för vätgaslagring kan bli praktiskt och kommersiellt attraktiva.

Projektet har genomförts av Hans Pohl, RISE Viktoria och Bengt Ridell, Sweco.

Styrgruppen för projektet har bestått av följande ledamöter: Pontus Svens/Annika Ahlberg-Tidblad Scania, Johan Svenningstorp/Staffan Lundgren AB Volvo, Stefan Bohatsch Volvo Cars, Jörgen Westlinder, Sandvik Materials Technology, Andreas Bodén Powercell, Bengt Ridell Sweco Energuide, Göran Lindbergh Swedish Electromobility Centre/KTH, Peter Smeds/Magnus Lindgren Trafikverket, Elna Holmberg Swedish Electromobility Centre och Bertil Wahlund Energiforsk. Energiforsk framför ett stort tack till styrgruppen för värdefulla insatser.

Samtliga rapporter från projektet kommer att publiceras och fritt kunna laddas ner från Energiforsks webbplats under Teknikbevakning bränsleceller på [www.energiforsk.se](http://www.energiforsk.se) och på Swedish Electromobility Centres webbplats [www.emobilitycentre.se](http://www.emobilitycentre.se).

Stockholm november 2018

Bertil Wahlund Energiforsk AB

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.



**Swedish  
Electromobility  
Centre**

Swedish Electromobility Centre är ett nationellt kompetenscentrum för forskning och utveckling av el- och hybridfordon och laddinfrastruktur. Vi enar Sveriges kompetens och utgör en bas för samverkan mellan akademi, industri och samhälle.

## Sammanfattning

Denna rapport beskriver och diskuterar olika sätt att lagra vätgas ombord på vägfordon. Dominerande metod idag är att lagra vätgas i trycktankar vid 350 bar (primärt tunga fordon) och 700 bar (primärt lätta fordon). Tankarna håller upp till 20 år och vid lägre tryck är antalet tillåtna tankningar mycket stort medan det vid 700 bar är maximalt 5 000 gånger. Även 5 000 tankningar räcker dock mycket långt för flertalet tillämpningar.

Lagringsmetoden måste vara kompatibel med infrastrukturen för tankning. I dagsläget finns det i princip endast tankstationer för trycksatt vätgas.

Bland övriga lagringsmetoder visar genomgången att kryokomprimerad vätgas kan ha fördelar. Det bedöms kunna ge högre energilagringdensitet och lägre kostnader i jämförelse med vanliga trycktankar. Även lagring av vätgas i metallhydrider kan vara en konkurrenskraftig lösning. Övriga lagringsalternativ, exempelvis lagring i olika former av porösa material, bedöms ha lång tid kvar till eventuell kommersiell tillämpning i fordon.

I diskussionen betonas att vätgaslagret måste beaktas i relation till hela energikedjan för produktion och distribution av vätgas. Finns flytande vätgas på grund av faktorer uppströms i energikedjan blir kryokomprimerade lösningar intressantare.

Skillnaden mellan privat och offentlig tankinfrastruktur berörs och det noteras att tunga fordon både har större frihet i hur energilagret specificeras och bättre möjligheter att ta fram dedicerad tankinfrastruktur. Slutligen konstateras de komplementära egenskaper som batterier och vätgastankar har.

## Summary

This report describes and discusses different possibilities to store hydrogen in a vehicle. The dominating method is to store it in pressure cylinders at 350 bar (primarily heavy vehicles and 700 bar (primarily light vehicles). The cylinders life time is up to 20 years and at lower pressures the number of allowed refills is very high whereas it for 700 bar is limited to 5,000 times. But even 5,000 refills meet the requirements of most car applications.

The hydrogen storage method must be compatible with the refuelling infrastructure. Today there are basically only refuelling stations for pressurized hydrogen.

Among other storage methods the study shows that cryocompressed hydrogen might have some advantages. It is assessed to give higher energy storage density and lower cost in relation to pressurized hydrogen at ambient temperature. Hydrogen storage in metal hydrides might become a competitive alternative. Further storage methods, such as storage in porous materials, are assessed to have several years of development before they might find a commercial application in vehicles.

In the discussion it is emphasized that the hydrogen storage method has to be considered with the whole energy chain of hydrogen production and distribution in mind. If liquid hydrogen is available due to factors upstream in the energy chain then cryocompressed solutions become more interesting.

The differences between private and public refuelling infrastructures are touched upon and it is noted that there is more freedom in the design of the hydrogen storage for heavy vehicles, partly as it is sometimes possible to invest in a dedicated refuelling infrastructure. Finally, the complementary features of batteries and hydrogen tanks are forwarded.

## Innehåll

|          |                                                         |           |
|----------|---------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Inledning</b>                                        | <b>7</b>  |
| 1.1      | Bakgrund                                                | 7         |
| 1.2      | Bränsleceller för fordon                                | 7         |
| <b>2</b> | <b>Översikt energibärare</b>                            | <b>8</b>  |
| <b>3</b> | <b>Trycksatt vätgas</b>                                 | <b>9</b>  |
| 3.1      | Huvudkonceptens funktion                                | 9         |
| 3.2      | Nyckelaspekter inom standardiseringen                   | 11        |
| 3.3      | Hur länge lever tanken?                                 | 11        |
| 3.4      | Kostnadsaspekter                                        | 11        |
| <b>4</b> | <b>Andra lagringsformer av väte</b>                     | <b>13</b> |
| 4.1      | Flytande vätgas med eller utan tryck                    | 13        |
| 4.2      | Vätgasrika vätskor                                      | 15        |
| 4.3      | Ytterligare lagringsformer                              | 17        |
| 4.3.1    | Hydrider                                                | 17        |
| 4.3.2    | Porösa material                                         | 18        |
| <b>5</b> | <b>Diskussion – hur står sig de olika alternativen?</b> | <b>19</b> |
| 5.1      | Hela energikedjan måste beaktas                         | 19        |
| 5.2      | Livslängden på tankarna                                 | 20        |
| 5.3      | Bränsleceller och batterier                             | 21        |
| <b>6</b> | <b>Slutsatser</b>                                       | <b>22</b> |

# 1 Inledning

## 1.1 BAKGRUND

Denna rapport beskriver och analyserar olika former av vätgaslagring i fordon med fokus på trycksatt vätgas. Livslängd och kostnad adresseras med syftet att bidra till förbättrade möjligheter att bedöma om och i så fall på vilket sätt som de olika teknikerna för vätgaslagring kan bli praktiskt och kommersiellt attraktiva.

Teknikbevakning av bränslecellsområdet har sedan 2014 placerats hos SHC, numera Swedish Electromobility Centre, och finansieras i huvudsak av Energimyndigheten. Detta har gjort främst för att få en närmare koppling mellan forskningen i Sverige och fordonsindustrin. Ett långsiktigt syfte är att bidra till kompetensförsörjning för industrin i Sverige.

## 1.2 BRÄNSLECELLER FÖR FORDON

Bränsleceller producerar el, värme och vatten genom en kemisk reaktion där syrgas och vätgas bildar vatten. I fordonstillämpningar används bränsleceller på tre olika sätt

1. som huvudsaklig energiomvandlare tillsammans med ett litet effektbatteri för bromsenergiåtervinning med mera
2. som räckviddsförlängare tillsammans med ett stort batteripaket som normalt sett även laddas genom anslutning till elnätet när fordonet inte används
3. som auxiliary power unit för produktion av el till fordonets kringssystem, främst i lastbilar som står parkerade med huvudmotorn avstängd.

I de båda förstnämnda fallen dominerar polymerelektrolytbränsleceller (PEFC) drivna med trycksatt vätgas kraftigt. I det andra och framför allt i det tredje fallet kan även fastoxidbränsleceller (SOFC) drivna med vätgas från ett reformerat flytande bränsle vara aktuellt. Denna rapport avgränsas till att behandla bränsleceller för framdrivning.

Det finns fyra huvudtyper av bränsleceller och utöver de redan nämnda finns även smältkarbonatbränsleceller (MCFC) och fosforsyrebränsleceller (PAFC). De är inte aktuella för fordonstillämpningar.

De bränslecellsfordon som tillverkas i litet större serier är personbilar som använder PEFC och tankas med trycksatt vätgas vid 700 bar. Toyota, Honda och Hyundai har sådana fordon på marknaden och samtliga är av typ 1 enligt ovan. I regel har bränslecellstacken en nominell effekt av kring 100 kW<sub>e</sub> och fordonets batteri 20 kW<sub>e</sub>. Daimler har presenterat en bränslecellsbil som även kommer att ha möjlighet att användas som plug-in hybrid, det vill säga att batteriet ska kunna laddas separat från en yttre källa.

Andra tyngre bränslecellsfordon som bussar och olika typer av lastbilar har ofta vätgastankar med trycket 350 bar. Tyngre fordon är oftast av typ 2 enligt ovan.

## 2 Översikt energibärare

Vätgas är vid normalt tryck och temperatur en mycket lätt gas. Vätgas antar flytande form vid -253 grader Celsius. I Tabell 1 jämförs några olika typer av energilager relevanta för fordon.

**Tabell 1: Energilagransformer för fordon**

| Energibärare                                                | Energitäthet   |                | Kommentarer/källa |
|-------------------------------------------------------------|----------------|----------------|-------------------|
|                                                             | Volym<br>kWh/l | Vikt<br>kWh/kg |                   |
| Bensin                                                      | 9,5            | 12,9           | <sup>1</sup>      |
| Diesel                                                      | 10,7           | 12,7           | <sup>1</sup>      |
| CNG 200 bar                                                 | 2,50           | 14,9           | <sup>1</sup>      |
| Naturgas flytande (LNG)                                     | 6,17           | 14,9           | <sup>1</sup>      |
| Vätgas 350 bar (20° C)                                      | 0,75           | 33,3           | LHV, <sup>2</sup> |
| Vätgas 700 bar (20° C)                                      | 1,3            | 33,3           | LHV,              |
| Vätgas flytande                                             | 2,36           | 33,3           | LHV, <sup>1</sup> |
| Batterier litium-jon<br>(anod NMC (6:2:2),<br>katod grafit) | 0,120          | 0,155          | <sup>3</sup>      |

Tabellen visar tydligt att vätgas är mycket energirikt per kilo medan energiinnehållet är klart lägre per volymenhet än flertalet andra drivmedelsalternativ, även vid höga tryck. För att vätgasen ska bli intressant som energilager och energibärare måste den förpackas på ett sätt som ger rimlig energimängd per vikts- och volymenhet inkluderande tanken. Medan tanken för bensin och diesel har en snudd på försumbar påverkan på den totala vikten för tank plus drivmedel, är det inte fallet för vätgas. I följande avsnitt beskrivs några sätt att lagra vätgas i fordon.

<sup>1</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Energy\\_density](https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_density)

<sup>2</sup> <http://www.h2data.de/>

<sup>3</sup> Berkmans, G, Messagie, M, Smekens, J, Omar, N, Vanhaverbeke, L and Van Mierlo, J. (2017) Cost projection of state of the art lithium-ion batteries for electric vehicles up to 2030, *Energies*, 10, 1314. Dave Andre, Sung-Jin Kim, Peter Lamp, Simon Franz Lux, Filippo Maglia\*, Odysseas Paschos and Barbara Stiaszny (forthcoming) Future generations of cathode materials: an automotive industry perspective, *Journal of Materials Chemistry A*.

## 3 Trycksatt vätgas

### 3.1 HUVUDKONCEPTENS FUNKTION

Tankar för trycksatt vätgas indelas i följande fem typer:

Typ I: Metallisk tank, används för lagring upp till ca 200 bar oftast för stationär lagring, se Figur 1.

Typ II: Tjock metallisk tank insvept med fiberkomposit typ kolfiber

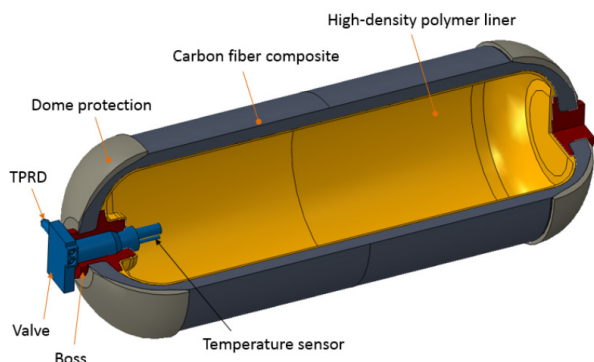
Typ III: Metallisk tank lindad med tjocka lager av kolfiber, används för lagring upp till ca 350 bar. I praktiken används aluminium som lindas med kolfiber. Typ III tankar är billigare än Typ IV eftersom aluminium kan ersätta stora delar av den dyra kolfibern.

Typ IV: En polymertank helt lindad med kolfiber, dessa tankar används för lagring över 350 bar. Typ IV tankarna är de som i regel används för personbilar för 700 bars lagring. Se Figur 2.

Typ V: Kolfibertankar utan liner. Typ V är under utveckling och har ännu inte använts för kommersiella vätgastankar. De har idag främst använts inom rymd- och flygindustrin för olika gaser och lägre tryck. Den stora fördelen är att de har låg vikt och att de är möjliga att forma för att passa olika utrymmen.<sup>4</sup>



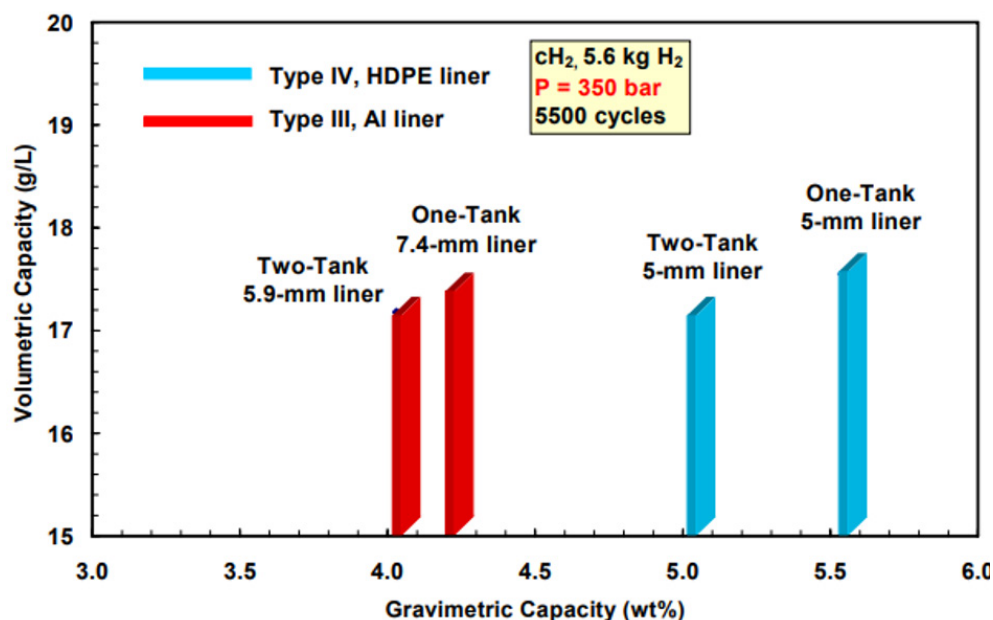
Figur 1: Typ I tankar på 15 bar respektive 200 bar



Figur 2: Typ IV tank

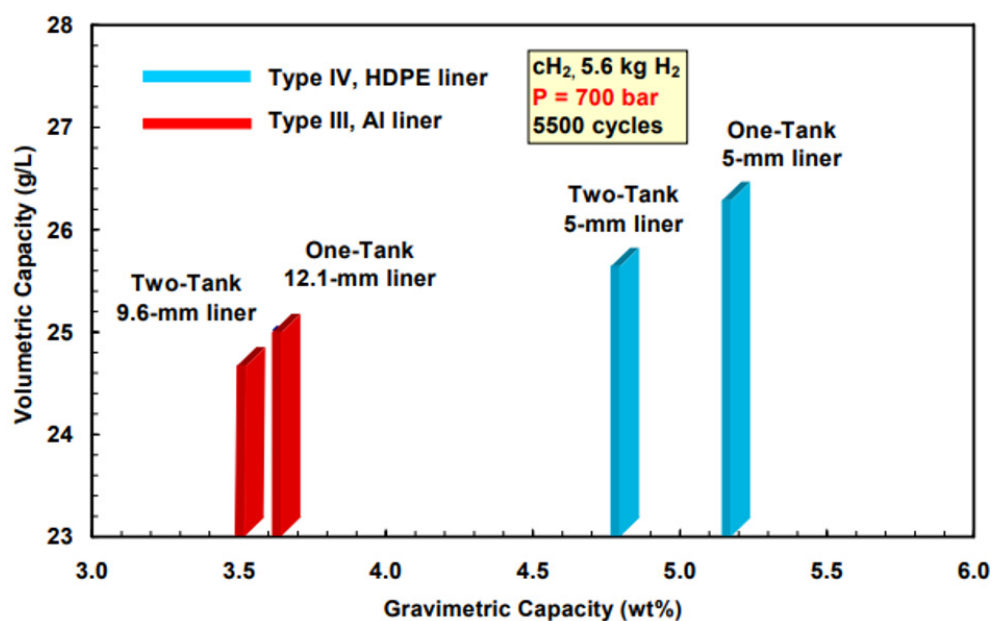
<sup>4</sup> <https://www.compositesworld.com/articles/next-generation-pressure-vessels>

I Figur 3 görs en jämförelse mellan typ III och typ IV tankar. Höjden på staplarna indikerar att båda typerna ger ungefär samma vätgasinnehåll per volymenhet men typ IV tankarna är klart lättare och får därmed bättre vätgaskapacitet per viktsenhet.



Figur 3: Jämförelse tankar typ III och IV vid 350 bar<sup>5</sup>

Vid högre tryck krävs det betydligt tjockare aluminiumliner, vilket leder till att typ III tankarna relativt sett blir sämre både gravimetriskt och volymetriskt, se Figur 4.



Figur 4: Jämförelse tankar typ III och IV vid 700 bar<sup>5</sup>

<sup>5</sup> Technical Assessment of Compressed Hydrogen Storage tank system for Automotive Applications  
ANL-10/24

### 3.2 NYCKELASPEKTER INOM STANDARDISERINGEN

Det internationella standardiseringsarbetet för vätgas som energibärare sker i huvudsak inom ISO TC197 "Standardization in the field of systems and devices for the production, storage, transport, measurement and use of hydrogen". De flesta frågorna som tas upp angående standardisering är relaterade till säkerhet och bränslekvälighet samt tankning av fordon. ISO TC197 har publicerat 19 olika standards och arbetar idag med ytterligare 10.

I Working Group 18 On-board Storage behandlas lagring av trycksatt vätgas ombord fordon. De har tagit fram en standard ISO/FDIS 19881 "Gaseous hydrogen -- Land vehicle fuel containers" som behandlar lagring av vätgas ombord fordon. Denna standard är ännu inte publicerad men är färdig för godkännande. En viktig fråga är hur övertrycksventilen skall vara konstruerad.

### 3.3 HUR LÄNGE LEVER TANKEN?

Vätgastankarna ska hantera högt tryck och stora variationer mellan 10% till 100% fyllnad. Det ger betydande utmatningspåfrestningar för gastankarna. Enligt det europeiska typgodkännandet för vätgasbilar gäller att tanken för 700 bar ska hålla 5 000 cykler och högst 20 år. Undantag från regeln tillåts med kortare livslängd och cykelantal. Det ska tydligt framgå hur länge fordonet får användas.<sup>6</sup>

Vid lägre tryck gäller samma regler som för naturgas, vilket innebär att om tanken är designad för 20 års användning ska den hålla 20 000 cykler.<sup>7</sup>

### 3.4 KOSTNADSASPEKTER

Det amerikanska kostnadsmålet för vätgastankar på 700 bar för personbilar är 9 USD/kWh. Idag ligger enligt USDOEs bedömningar kostnaden på cirka 14 USD/kWh under förutsättning att masstillverkning gäller.<sup>8</sup>

Tanken eller tankarna kostar således väsentligt mer än tankar för flytande drivmedel. Men hur förhåller sig kostnaden till batterier?

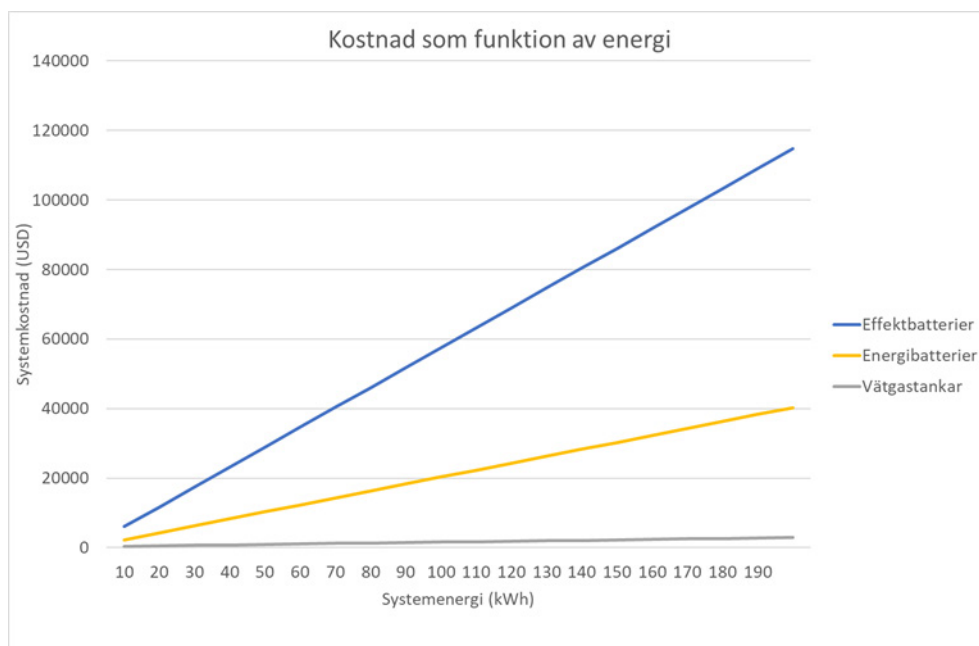
I ett parallellt projekt görs en del jämförande kalkyler med olika kombinationer av bränsleceller och batterier.<sup>9</sup> Från rapporten lånas ett diagram som visar hur kostnaden utvecklar sig per lagrad energienhet för två olika typer av batterier och vätgastankar, se Figur 5.

<sup>6</sup> COMMISSION REGULATION (EU) No 406/2010 of 26 April 2010 implementing Regulation (EC) No 79/2009 of the European Parliament and of the Council on type-approval of hydrogen-powered motor vehicles

<sup>7</sup> Trudgeon, M (2005) An overview of NGV cylinder safety standards, production and in-service requirements

<sup>8</sup> James, B.D, Houchins, C. (2018) Hydrogen Storage Cost Analysis, DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Review, June.

<sup>9</sup> Pohl, H (forthcoming) Kostnadsfunktion för traktionära bränslecellssystem, SEC/Energiforsk Teknikbevakning av bränsleceller



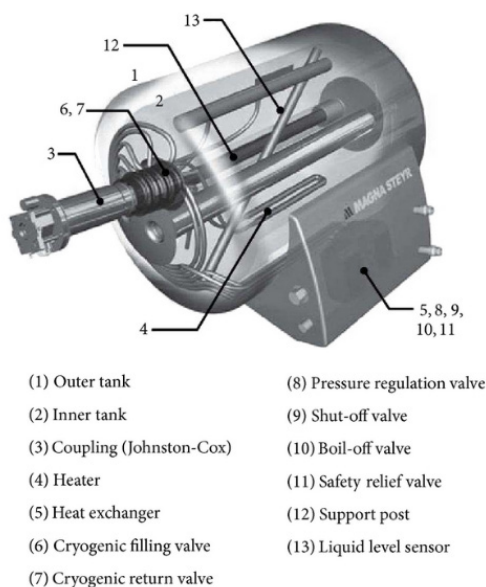
Figur 5: Kostnad i relation till lagrad energimängd

Jämförelsen haltar eftersom batteripaketet levererar el som kan gå direkt till fordonets elmotor. Vätgastanken måste kompletteras med en bränslecellsstack för att leverera el. Det bör också noteras att även om vätgastankarna verkar ha en låg kostnad i förhållande till batterierna så är de väsentligt dyrare än tankar för flytande bränslen som bensin eller diesel.

## 4 Andra lagringsformer av väte

### 4.1 FLYTANDE VÄTGAS MED ELLER UTAN TRYCK

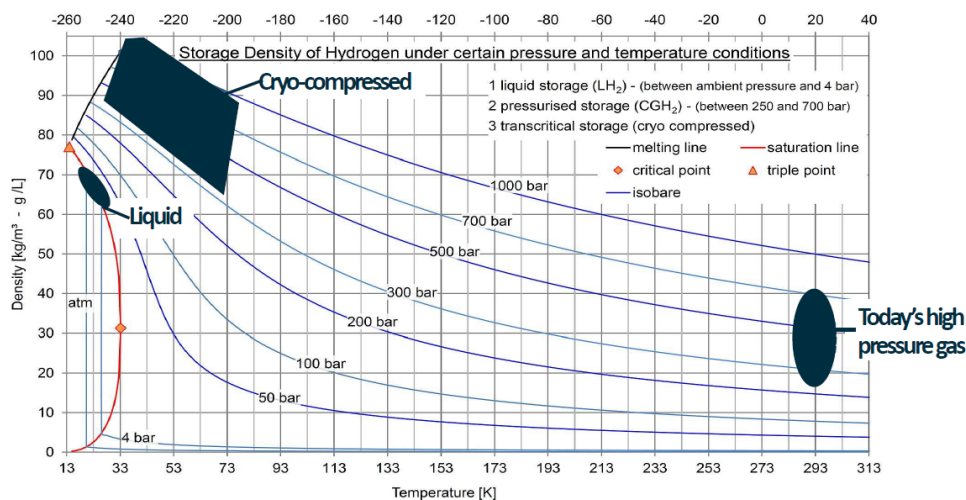
Flytande vätgas lagras i välisolerade termosar, se Figur 6. Det är hyfsat enkelt att hantera och erbjuder god energitäthet. En nackdel är den s.k. boil-off som blir aktuell om fordonet inte används på ett tag eftersom temperaturen sakta stiger i tanken och därmed trycket. Bortsett från att det innebär en förlust av nyttig energi kan det även vara en utmaning att hantera den därmed frisläppta gasen.



Figur 6: Tank för flytande vätgas (källa: Magna Steyr och BMW)

För storskaliga längre transporter och lagring av vätgas är flytande vätgas aktuellt och tekniken är mogen. På land torde pipelines vara mer kostnadseffektivt på lång sikt men dessförinnan kan flytande vätgas behövas för transport i tankbilar. Till sjöss, exempelvis Japan pratar om att importera vätgas från Australien, är tankbåtar med flytande vätgas förmodligen det alternativ som blir effektivast.

Under senare år har intresset för kryokomprimerad vätgas ökat ( $CcH_2$ ). BMW har varit ganska ensamt om att tala för denna lösning men nu betonas tekniken även i de stora amerikanska programmen. Ett viktigt argument i USA är att övergången till vätgas som drivmedel förväntas kräva olika lösningar för att få ut vätgasen till tankstationerna. Vid liten marknadsandel (<5%) är leverans av trycksatt vätgas med tankbilar effektivast. Vid stor marknadsandel (>30%) krävs pipelines för trycksatt vätgas. Men under tidsperioden däremellan hävdas flytande vätgas levererad med tankbil behövas till en stor del. Om flytande vätgas finns på tankstationen kan det vara en fördel att dra nytta av den, i synnerhet i kommersiella fordon.



Figur 7: Olika lagringsformer för vätgas<sup>10</sup>

Kryokomprimerad vätgas återfinns i ett fönster mellan -245 och -195 grader Celsius vid höga tryck, se figur Figur 7. Notera att kryokomprimerad gas har cirka dubbelt så hög energitäthet per volymenhet som vätgas vid rumstemperatur komprimerad till 700 bar. Tätheten är även något högre än för flytande vätgas. Medan tankar för flytande vätgas omgående måste släppa ut gas om värme tillförs kan kryokomprimerade lösningar i viss mån tillåta att värmen i stället omvandlas till högre tryck i tanken. Dock gäller det bara i viss utsträckning, teoretiskt sett kan vätgas skapa tryck på flera tusen bar när den övergår från flytande form till gas.

Argonne National Laboratories har räknat på olika vätgastankar för bussar. Alla har en kapacitet på 40 kg vätgas. I Tabell 2 visas några nyckeltal för de tre tanktyperna som jämförs.

Tabell 2: Vätgastankar för bussar<sup>11</sup>

| Metod           | CcH <sub>2</sub> 350 bar | CcH <sub>2</sub> 500 bar | CH <sub>2</sub> 350 bar |
|-----------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Temperatur      | 64 K                     | 70 K                     | 288 K                   |
| Densitet:       |                          |                          |                         |
| Gravimetrisk    | 9,6%                     | 8,4%                     | 4,4%                    |
| Volymetrisk     | 46,1 g/L                 | 50,1 g/L                 | 18,5 g/L                |
| Åtgång kolfiber | 4 * 36 kg                | 4 * 53,1 kg              | 8 * 50 kg               |
| Kostnad         | 10 USD/kWh               | 11 USD/kWh               | 15 USD/kWh              |

En teknisk skillnad mellan lösningarna är att de kryokomprimerade tankarna endast klarar en viss tid utan att behöva släppa ut gas. Vid 95% full tank klarar de 7 dygn. I övrigt visar siffrorna att tankar för kryokomprimerad vätgas har tydliga fördelar.

<sup>10</sup> Satyapal, S. (2018) Hydrogen and Fuel Cell Program Overview, Merit, Washington D.C. (slide 34)

<sup>11</sup> Ahluwalia, R.K, Peng, J-K, Roh, H.S, and Papadakis, D.D. (2018) System level analysis of hydrogen storage options, Merit, Washington D.C.

Motsvarande kalkyler för en personbiltank om 5,6 kg återfinns i Tabell 3.

**Tabell 3: Vätgastankar för personbil<sup>11</sup>**

| Metod              | CcH2 350 bar | CcH2 500 bar | CH2 700 bar |
|--------------------|--------------|--------------|-------------|
| Temperatur         | 62 K         | 67 K         | 288 K       |
| Densitet:          |              |              |             |
| Gravimetrisk       | 7,5%         | 7,0%         | 4,2%        |
| Volymetrisk        | 35,5 g/L     | 44,2 g/L     | 24,6 g/L    |
| Åtgång<br>kolfiber | 20,0 kg      | 29,4 kg      | 96 kg       |
| Kostnad            | 11 USD/kWh   | 12 USD/kWh   | 15 USD/kWh  |

Temperaturerna är något lägre och densitetsvinsterna inte lika stora men fortsatt är kostnadsfördelen för de kryokomprimerade lösningarna betydande. Även personbiltankarna klarar 7 dygn utan förluster vid 95% fyllnadsgrad och vid lägre fyllnadsgrader upp till cirka en månad.

Tanken eller tankarna måste analyseras i sitt sammanhang. Om vätgas levereras till och finns tillgänglig i flytande form vid tankstationen så torde kostnaden för den vätgas vara lägre eller lika med kostnaden för gasformig vätgas. Därmed inte sagt att priset blir så. Att tanka flytande vätgas är innebär att en del moment som krävs vid trycksatt vätgas undviks, exempelvis komprimering och kylning av gasen. Men om man kan undvika att göra vätgasen flytande och hela tiden hålla sig till gasformig vätgas undviks å andra sidan ett par omvandlingar som leder till förluster.

En annan aspekt som kan vara viktig är livslängden för tankarna. Enligt tidigare är livslängden i antal cykler för 350 bars tankar väsentligt längre än för 700 bar. Om vi antar att det är trycket som bestämmer livslängden och att den låga temperaturen inte har någon påverkan blir det kryokomprimerade alternativet intressant för fordon som har krav på en hög livslängd i termer av antal cykler.

## 4.2 VÄTGASRIKA VÄTSKOR

Inte minst sedan NECAR 3 som tankade metanol presenterades av DaimlerChrysler år 1997 har diskussioner förts om man på något vis kan undvika vätgasen utanför fordonet och i stället använda vätgasrika vätskor. Nästa bil från tillverkaren NECAR 4 tankade flytande vätgas och med NECAR 5 år 2000 kom återigen metanolen som drivmedel.



Figur 8: NECAR 3 (bild från Daimler)

Strax därefter, kanske för att USDOE endast bidrog finansiellt till projekt med trycksatt vätgas, verkade det dock som att de stora biltillverkarna kom överens om att förenkla livet för sig själva genom att endast arbeta med ren vätgas, företrädesvis vid 350 eller 700 bar. Vill biltillverkarna ha infrastruktur för vätgas på plats duger det inte att sväva på målet avseende vilket drivmedel man vill ha så diskussionen om alternativ till vätgas har varit ganska begränsad. Dock gjorde Renault-Nissan för ett par år sedan en förvånande manöver när en mindre batteridrivna skåpbil presenterades som tankade etanol till räckviddsförlängaren med fastoxidbränsleceller, se Figur 9.



Figur 9: Elbil som tankar etanol (bild från Nissan)

Argonne National Laboratory håller på att studera alternativ till vätgas. Vid en lägesrapport i juni 2018 framkom följande preliminära resultat<sup>11</sup>. Studien undersöker alternativ till vätgas för att underlätta transport till och lagring på tankstationen. Fordonen tankar alltså fortsatt vätgas. Tre olika vätskor undersöks; ammoniak ( $\text{NH}_3$ ), metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) och metylcyklohexan respektive toluen ( $\text{MCH}$ ,  $\text{C}_7\text{H}_{14}$  respektive  $\text{C}_7\text{H}_8$ ) och jämförs med komprimerad vätgas. I alla fyra fallen produceras energibäraren med naturgas som insatsvara och sedan fraktas den med tankbil till tankstationen. Grovt sett verkar knappt en tredjedel så många tankbilar behöva köra om ammoniak eller metanol används för att frakta samma mängd vätgas.

Totalt sett visar kostnaden för de olika alternativen att det idag trots allt är billigast att köra med trycksatt vätgas hela vägen och inte ta omvägen via någon vätgasrik vätska. Det är även mer energieffektivt. Studien pågår och det är värt att notera att kostnader för olika energislag skiljer sig markant mellan olika länder. Dessutom torde det vara högrelevant att titta närmare på mer förnybara alternativ, exempelvis kan ammoniak och metanol förhållandevis enkelt produceras baserat på förnybara råvaror.

### 4.3 YTTERLIGARE LAGRINGSFORMER

Nedan följer en allt annat än fullständig översikt över några alternativa lagringsformer för vätgas. Det pågår omfattande forskning på området och att döma av USAs forskningsportfölj år 2018 och redovisningen av resultaten verkar det finnas förväntningar om genombrott. I vanliga fall är rapporteringen från DOE-projekten föredömligt tillgänglig och även Annual Merit Review 2018 serverar många rapporter och presentationer på hemsidan<sup>12</sup>. Men flera presentationer innehåller maskerade avsnitt, vilket inte har varit fallet tidigare i den utsträckningen.

Avsnittet baseras till stor del på Ren et al (2016), som i sin tur granskat över 250 artiklar<sup>13</sup>.

#### 4.3.1 Hydrider

Lagring av vätgas i (metall)hydrider erbjuder i förhållande till andra lösningar mycket hög täthet, både med avseende på vikt och volym. Även med bivillkoret att lagringsformerna ska vara reversibla nås bra täthet, exempelvis har  $\text{MgH}_2$  7,6 viktsprocent vätgas. Problemet med hydriderna är reaktionstakten. Det krävs vanligen höga temperaturer (några hundra grader Celsius) för att fylla på respektive frigöra vätgasen i tillräcklig takt.

Ett sätt att förbättra egenskaperna är att blanda olika hydrider och otaliga kombinationer undersöks i jakten på fungerande kompromisser. Ett annat sätt är att låsa in hydriderna i ett poröst material för att på så vis göra reaktionsytorna större.

I James och Houchins (2018) redovisas en kostnadsberäkning för ett tanksystem med metallhydrider som uppges ha samma kapacitet som 700 bars gastankar<sup>14</sup>. Även kostnaden verkar ligga i samma härads. En stor skillnad är att tanken med metallhydrider har en värmeväxlare inuti. Det är osäkert i vilken utsträckning som konceptet fungerar eftersom det bara är en teoretisk studie.

De tyska ubåtarna av 212-class använder metallhydrider för lagring av vätgasen som används i ubåten bränsleceller. För ubåten är vikten av metallhydriderna en del av ubåten ballast.

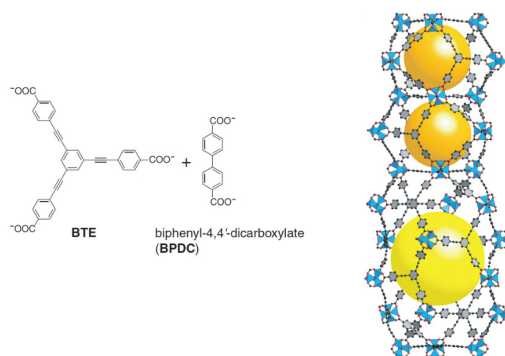
<sup>12</sup> Se [https://www.hydrogen.energy.gov/annual\\_review18\\_proceedings.html](https://www.hydrogen.energy.gov/annual_review18_proceedings.html)

<sup>13</sup> Ren, J, Musyoka, N.M, Langmi, W, Mathe, M, Liao, S. (2016) Current research trends and perspectives on materials-based hydrogen storage solutions: A critical review. *Journal of Hydrogen Energy*, 42: 289-311.

<sup>14</sup> James, B.D, Houchins, C. (2018) Hydrogen Storage Cost Analysis, DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Review, June.

### 4.3.2 Porösa material

Med porösa material menas här exempelvis zeoliter, kolstrukturer och metal-organic frameworks (MOFs). I dessa material fäster vätgasen med svaga bindningar. Strukturen liksom den yta som erbjuds påverkar lagringskapaciteten. En del material har extrema ytor, exempelvis har MOF-210 hela 6 240 m<sup>2</sup>/g, se Figur 10.



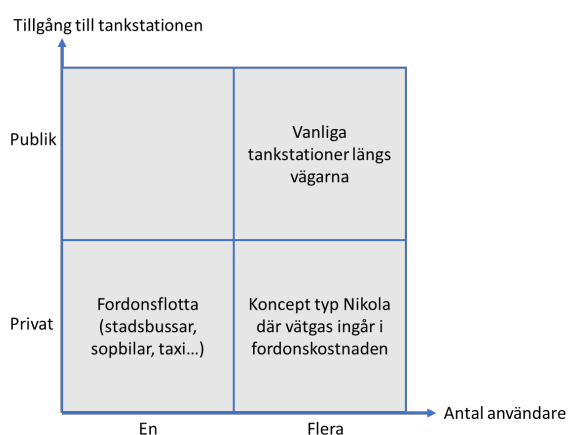
Figur 10: MOF-210 (källa: <https://jclfss.weebly.com/recent-developments.html>)

För att nå hög lagringsdensitet krävs låga temperaturer (kryolagring) och gärna även ganska högt tryck. Många olika tekniker provas för att påverka egenskaperna, exempelvis jonisering eller polarisering av värdmaterialet, eller tillägg av en katalysator (platina t ex) i strukturen. Flera projekt med bland annat grafen pågår inom ramen för USAs program.

## 5 Diskussion – hur står sig de olika alternativen?

### 5.1 HELA ENERGIKEDJAN MÅSTE BEAKTAS

På kort sikt styrs valet av tankar för bränslecellsfordonet till mycket stor del av vilken typ av vätgas som finns tillgänglig att tanka respektive vilken lagringsteknik för vätgas som är kommersiellt tillgänglig. Överlägset flest tankstationer idag erbjuder trycksatt vätgas och merparten med tryck upp till 700 bar.



Figur 11: Fyrfältare med tankstationstyper

I Figur 11 visas olika huvudtyper av vätgastillgång. För den som funderar på att utveckla eller beställa ett fordon med vätgasdrift måste tankbehovet beaktas. På personbilssidan är det förmodligen få kunder som kan välja annat än att köpa de lösningar som finns på marknaden, dvs. i nuläget bilar som tankar trycksatt vätgas med upp till 700 bar. Men för tyngre fordon är valfriheten än så länge större.

De båda privata alternativen skiljer sig genom att det i fallet med flera användare är tänkt att många ska dela på en tankinfrastruktur. I jämförelse med den privata lösningen med en användare som normalt redan från början väldigt väl vet sitt energibehov är skillnaden mycket stor. Att bygga upp tankstationer parallellt som nya kunder kontrakteras är en utmaning. Samtidigt så kan det räcka att ett fåtal helst mycket stora kunder med liknande tankbehov rent geografiskt tecknas för att tröskeln till en fungerande affärsmodell ska passeras. Tankstationerna kan givetvis även vara öppna för externa användare men förmodligen vill de avtalade kunderna ha garantier om viss tillgänglighet.

Att som Tesla sätta upp snabbbladdare på olika håll i världen är ett koncept som nog inte blir aktuellt för vätgas. Detta inte minst eftersom det redan finns en global standard för hur trycksatt vätgas ska tankas. Dessutom behöver vätgasbilarna vanligen tanka mer sällan och tankningen går snabbt.

Vätgas som produceras för eget bruk kan åtnjuta skattefördelar. Om kunden exempelvis producerar el med vind eller sol och omvandlar den till vätgas så

undviks den skatt som annars skulle ha betalats vid inköpet av el. Exempelvis ska företag i Sverige betala energiskatt om 41,38 öre/kWh (om de inte är berättigade till avdrag). I båda de privata fallen i F kan detta vara aktuellt.

För användare som planerar att etablera sin egen försörjning av vätgas kan också de mindre etablerade lösningarna för vätgaslagring ombord på fordonet vara aktuella. Detta gäller för fordon som tillverkas specifikt för kunden, vilket är fallet i större eller mindre utsträckning för flertalet typer av tunga fordon.

På längre sikt handlar vätgasförsörjningen mycket om hela energisystemet i regionen. Vätgasens roll beror bland annat på lagringsbehoven av förnybar el. Detta i kombination med hur vätgasen ska distribueras till tankstationerna får konsekvenser för vilken typ av tank som fordonen kan använda.

## 5.2 LIVSLÄNGDEN PÅ TANKARNA

Utgångspunkten vid val av vätgaslager är att det ska hålla hela fordonets livslängd. Av de etablerade lösningarna har 700 bars tankar sämst livslängd. Enligt ovan säger regelverket att de ska bytas ut efter 20 år eller 5 000 cykler.

Tankstorleken på dagens personbilar ger en maximal räckvidd om cirka 50 mil.

Om vi antar att bilen tankas var 30:e mil så motsvarar 5 000 cykler 150 000 mil.

Innan dess har nog andra vitala delar gett upp. DOEs långsiktiga mål för bränslecellssystemets livslängd i personbilar är 8 000 h. För att köra 150 000 mil på 8 000 h krävs en genomsnittshastighet om 187 km/h. För bilar är det således förmodligen mycket sällan som antalet tankcykler begränsar fordonets livslängd.

En källa i USA<sup>15</sup> visar en Mirai med en information i tanklocket att bilen inte ska tankas efter november 2029. Om Mirai tankas cirka en gång per dag motsvarar det 5 000 cykler.

Livslängden för tunga fordon som använder tankar med 700 bars tryck är mer intressant. Anledningen till att det tunga fordonet använder 700 bars tankar borde primärt vara att det helt enkelt finns behov av god räckvidd mellan tanktillfällena och begränsningar i lastkapacitet för tankarna. Således har nog fordon med 700 bars tankar normalt sett räckvidd som räcker för ett helt arbetspass och om de tankar en gång per dygn håller tankarna i drygt 13 år. Körs fordonet 8 h per dygn betyder det att drivlinan ska hålla i 40 000 h. DOEs långsiktiga mål för livslängden för bränsleceller för bussar är 25 000 h. Många av bussarna i USA har hållit mer än 19 000 timmar.<sup>16</sup>

En övergång till 350 bars tankar som ska hålla 20 000 cykler, eventuellt i kombination med kryokomprimerade lösningar, eliminerar i princip helt livslängdsproblemet för tankarna.

Att exempelvis Toyota använder 700 bars tankar i sina bussar beror nog mer på att företaget vill utnyttja befintliga lösningar som tagits fram för Mirai eller andra fordon i så stor utsträckning som möjligt. Detta förmodligen delvis av kostnadsskäl men kanske så värdesätts också möjligheten att samla in

<sup>15</sup> <https://insideevs.com/2016-toyota-mirai-refuel-2029/>

<sup>16</sup> Joseck, F. (2018) System Analysis Program Overview, Annual Merit Review Proceedings, June 2018

driftserfarenheter från samma system i olika typer av tillämpningar. Totalt har bussen 10 tankar som tillsammans rymmer 17,2 kg vätgas.

För tyngre fordon med flera tankar kan det kanske vara intressant att tömma en tank i taget enligt ett givet schema. På det viset kan cykling av samtliga tankar undvikas i flertalet tankcykler, eftersom det normalt torde finnas åtminstone en full tank kvar i reserv när fordonet tankar.

### 5.3 BRÄNSLECELLER OCH BATTERIER

Kostnadslogiken mellan batterier och vätgastankar skiljer sig. En vätgastank har en väldefinierad livslängd och levererar hela tiden samma lagringskapacitet. För att få ut maximal energimängd från vätgastanken ska den alltså helst köras fulla cykler varje gång.

Batterier tappar i kapacitet efterhand och beroende på hur de används. Batterier kan leverera mer energi över sin livslängd om de tillåts arbeta inom ett snävt laddningsfönster. Så medan vätgastankar totalekonomiskt vinner på att köras fulla cykler vinner batterier (något förenklat) på att laddas ofta.

Det krävs en balansering mellan batteripaketets storlek/kostnad, antalet laddtillfällen och tänkt livslängd givet tillämpningen. Ju större batteripaketet är, desto lättare att säkra en livslängd i form av total körsträcka.

Kombinationen externt laddbara batterier, vätgastankar och bränsleceller kan ge fördelar, exempelvis:

- Billig el för flertalet resor och kanske även för en stor del av total körsträcka, beroende på användning och batteridimensionering
- God räckvidd och snabb tankning
- Viss drivmedelsflexibilitet, extra bra under ett introduktionsskede
- Lättare att nå god livslängd för bränslecellerna tack vare färre start/stopp och mindre dynamik i belastningsprofilen.

Nackdelar finns emellertid också, exempelvis:

- Batterier och vätgastankar tar stor plats och väger en hel del tillsammans
- Hög grundinvestering kan bli följderna beroende på hur de olika delarna dimensioneras.

Flera tunga fordon konstrueras med vätgas och bränsleceller som räckviddsförlängare till batterifordon. Utöver att det rent konstruktionsmässigt kan vara attraktivt att ta en redan existerande batteribaserad lösning och lägga till de andra delarna så talar livslängdsfrågan för att detta kan fungera bättre på marknaden i nuläget. Med fordon som kanske i huvudsak kör med vätgas som tillförd energi kan såväl batterier som bränsleceller användas på ett sådant sätt att livslängden blir mycket god.

## 6 Slutsatser

Syftet med rapporten är att bidra till bedömningen av vilka lagringsformer av vätgas som kan bli attraktiva för vägfordonstillämpningar. Efter en genomgång av huvudalternativen för vätgaslagring ombord på fordon framgår det att vid sidan av trycksatt vätgas vid 700 bar, som dominerar kraftigt idag, verkar främst tankar för kryokomprimerad vätgas vara ett intressant alternativ.

För tunga fordon kan 350 bars tankar också vara ett alternativ då de medger lägre kostnader och hög livslängd.

Valet av vätgaslager beror emellertid till stor del av hur övriga energikedjan för produktion och distribution av vätgas ser ut. Möjligheterna för tunga fordon i tillämpningar som sopbilar eller stadsbussar att välja en annan form av vätgaslager är väsentligt större än för personbilar.



# VÄTGASLAGRING I VÄGFORDON

Här beskrivs olika sätt att lagra vätgas i vägfordon. Den lagringsmetod som dominerar är trycktankar på 350 bar för tunga fordon och 700 bar för lätta fordon. Metoden måste vara kompatibel med den infrastruktur som finns för tankning. I dagsläget finns i stort sett bara tankstationer för trycksatt vätgas.

Bland övriga lagringsalternativ lyfts kryokomprimerad vätgas fram som en intressant lösning. Det bedöms kunna ge högre energilagringdensitet och lägre kostnader jämfört med vanliga trycktankar. Även lagring av vätgas i metallhybrider kan vara en konkurrenskraftig lösning. Övriga lagringsalternativ, exempelvis lagring i olika former av porösa material, bedöms ha lång tid kvar till eventuell kommersiell tillämpning i fordon.

Vid val av vätgaslager i fordonet måste man ta hänsyn till hela kedjan för produktion och distribution av vätgasen.

## Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. [www.energiforsk.se](http://www.energiforsk.se)



Energiforsk