

Vedyn varastointimenetelmät

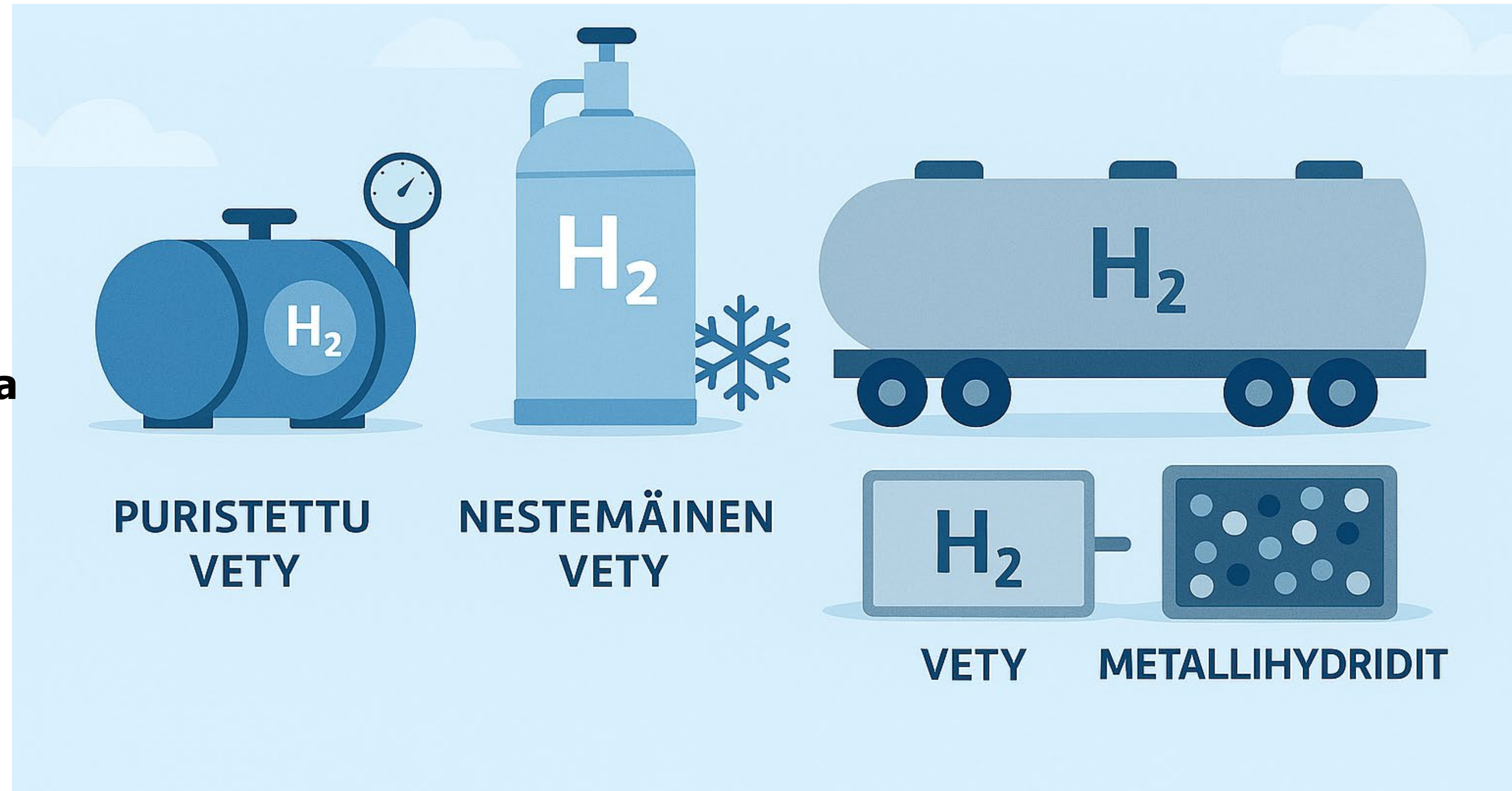
Materiaalin koostamisessa on hyödynnetty alkuperäistä materiaalia:

Vedyntuotanto ja vetytalouden arvoketjut – koulutus 2024

**Vedyn varastointi kaasuna ja nesteenä, Tommi Paanu
Turun AMK**



OSAO



Euroopan unionin
osarahoittama

Vedyn varastointimenetelmät - haasteita

Vedyn ominaisuudet

Vety on erittäin kevyt kaasu – tiheys noin 1/11 ilman tiheydestä

1 kg vetyä vaatii noin 11 m³ tilaa (riittää ajoneuvolle n. 100 km matkalle)

Keskeiset haasteet

Turvallisuus:

Vety vuotaa helposti monien materiaalien läpi

Nousee nopeasti ja voi kerääntyä katon rajaan

Ilman kanssa sekoittuessaan voi aiheuttaa palon tai räjähdysriskin

Hauraus (embrittlement):

Vety imeytyy metalleihin ja heikentää niiden sitkeyttä

Lisää halkeamien syntymisen ja etenemisen riskiä

Haihtumishäviöt

Nestemäinen vety höyrystyy lämmön vuotamisen vuoksi



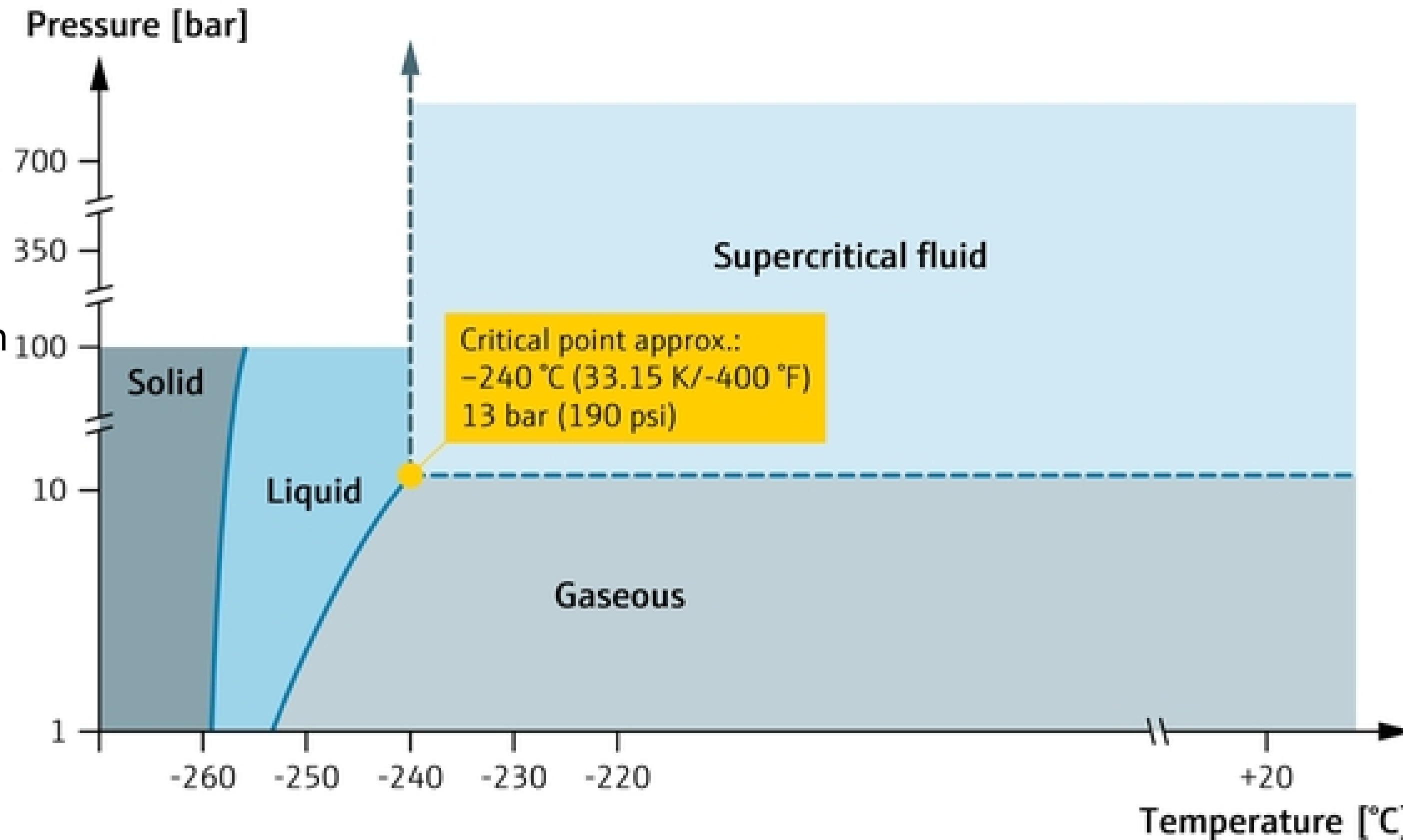
**Euroopan unionin
osarahoittama**

Vedyn varastointimenetelmät

Osa varastointimenetelmistä liittyy vedyn fysikaalisten ominaisuuksien hyödyntämiseen – oheisen kuvion mukaisesti

Lisäksi hyödynnetään aineiden kemiallisia ominaisuuksia

Paineistettua kaasumaista vetyä varastoidaan säiliöissä 350-700 bar. Täysin nestemäistä vetyä säilytetään noin -253 °C:ssa, kun taas kryopuristettua vetyä voidaan säilyttää noin -233 °C:ssa.



Kaasumaisen varastoinnin laitteistovaatimukset eivät ole niin suuria ja ne ovat huomattavasti taloudellisempia, mutta nesteenä varastoinnilla on etunsa, pääasiassa tällöin energian varastointitiheys paljon korkeampi



**Euroopan unionin
osarahoittama**

<https://www.fi.endress.com/fi/kest%C3%A4v%C3%A4n-kehityksen-ratkaisut-teollisuuteen/vedyn-kuljetys-varastointi#toc10>

Vedyn varastointimenetelmät

vallalla oleva

Fysikaalinen menetelmä

Kemiallinen menetelmä

kehitteillä oleva

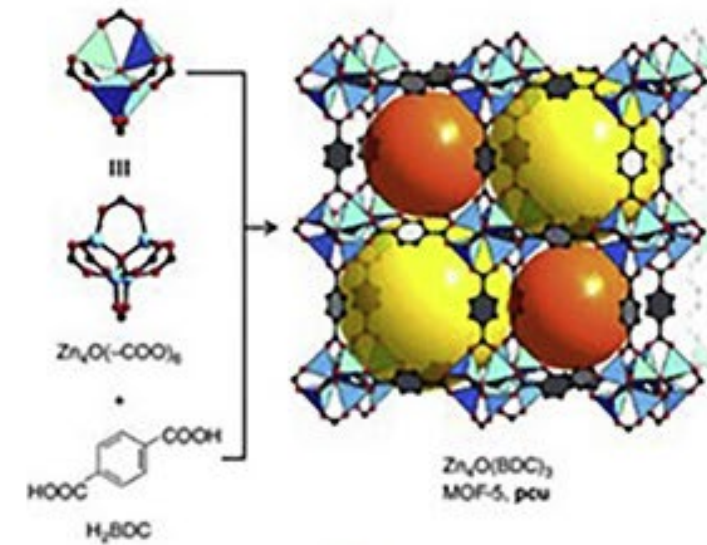
Paineistettu kaasu



Kryogeeninen neste



Nesteytetty vety



Sorbentti

Vety sitoutuu materiaalin huokosiin

Orgaaninen vedyn kantaja

Vety sitoutuu orgaaniseen aineeseen (LOHC, metanoli)

Metallihydridi

Kun vety reagoi metallin kanssa, syntyy metallihydridi (esim. MgH_2)

Kirjallisuudessa puhutaan myös vetysohjosta – käytetään avaruusaluksissa



Euroopan unionin osarahoittama

Muokattu

https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0254058424008356-ga1_lrg.jpg

Vedyn varastointimenetelmät

Paineistettu (*Compressed Gaseous*) vetykaasu (CGH₂):

- yleisin, yksinkertainen ja halvin varastointimenetelmä
- haasteena korkea paine, matala varastointitiheys, lämmönhallinta säiliön täyttämisessä, turvallisuus
- tyypilliset kaasumaisen vedyn varastointipaineet: staattiset säiliöt 350 bar(g) ja liikkuvat säiliöt 700 bar(g)
- tavoitteena kustannustehokkaan säiliön suunnittelu ja kehittäminen - sylinterimuotoinen

Nesteytetty (*Liquefied*) vety (LH₂):

- kaupallisesti saatavilla, korkea varastointitiheys
- haasteena matala lämpötila (-253°C = 20 K) – boil-off ilmiö
- pallomaiset säiliöt ovat hyvä valinta nestemäisen vedyn varastointiin pinta-alan minimoimiseksi – pinta-ala vaikuttaa lämmönsiirtoon
- energiantarve 30-40% varastoidun vedyn LHV:stä – energiamäärä, joka vedystä saadaan kun se käytetään esim polttokennossa

Kylmäkompressoitu (Cryo-compressed) vety (CcH₂):

- korkea varastointitiheys
- vaatii sekä matalan lämpötilan (-235°C) että paineistuksen (300 bar)
- suuri energian kulutus (kaasun puristus ja jäähdytys)
- ei kaupallisesti saatavilla



Vedyn varastointimenetelmät

Varastointi orgaaniseen nestemäiseen vedyn kantajaan (Liquid Organic Hydrogen Carrier) (LOHC):

Perusta:

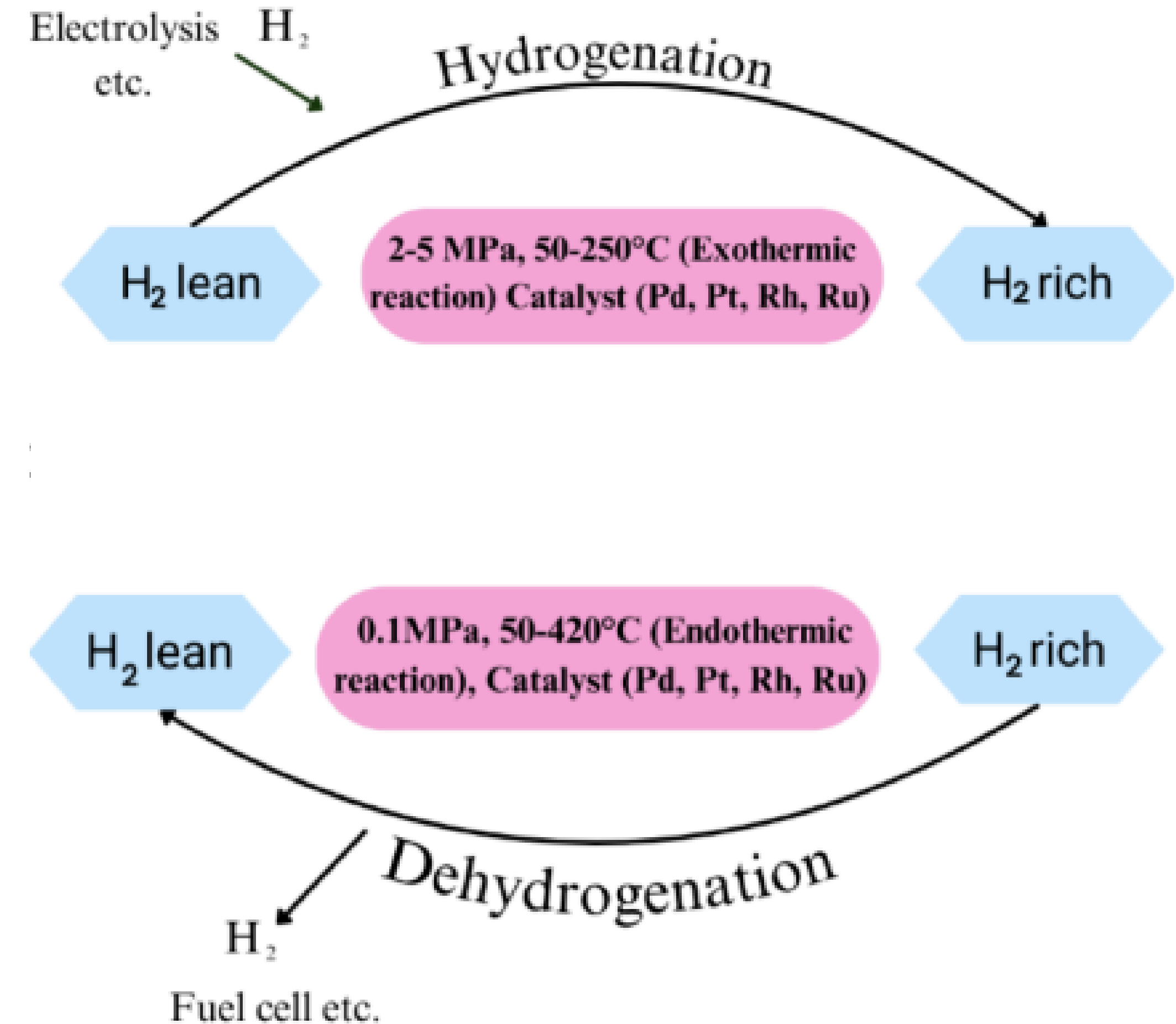
- vedyn varastointi tapahtuu orgaaniseen kantaja-aineeseen kemiallisen hydrauksen avulla
- hydraus: liitetään vetyä kantaja-aineeseen (kemiallinen reaktio)
- dehydraus: vastakkainen prosessi, jossa vety vapautetaan kantaja-aineesta
- katalyytit: reaktiot vaativat katalyytin, yleisimmin platinaa

Edut:

- hyödyntää olemassa olevaa nestepolttoaineiden varastointi- ja kuljetusinfrastruktuuria
- turvallinen ja soveltuu pitkäaikaiseen varastointiin

Haitat:

- matala varastointitiheys
- suuri energiantarve hydraukseen ja dehydraukseen
- kantaja-aineen puhdistustarve.



Euroopan unionin
osarahoittama

<https://cetj.yildiz.edu.tr/storage/upload/pdfs/1756457855-en.pdf>

Vedyn varastointimenetelmät

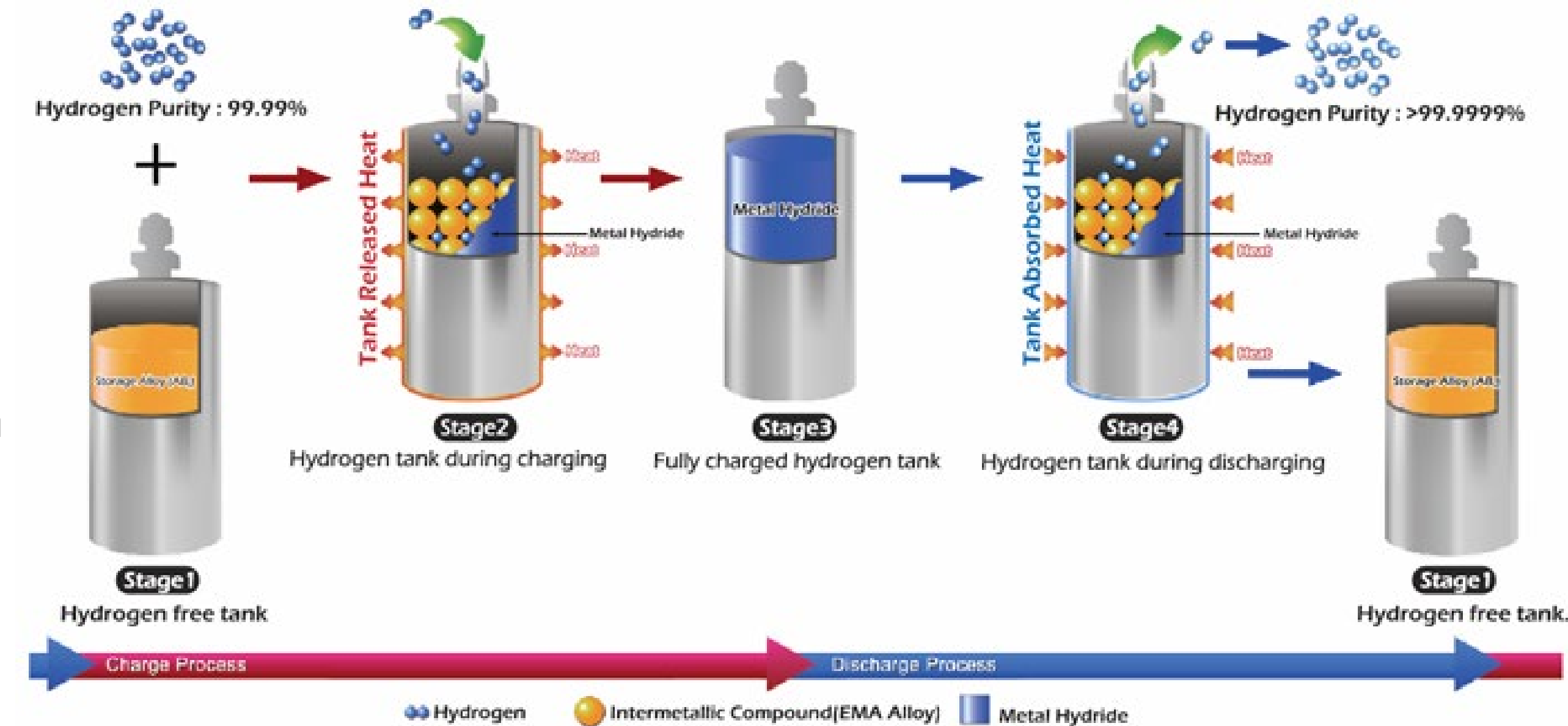
Varastointi metallihydridiakuun:

Perusta:

- vety sitoutuu metalliseokseen muodostaen metallihydridin. Varastointi perustuu kemialliseen absorptioon, ei pelkkään paineistukseen.
- lataus: vetyä syötetään metalliseokseen → muodostuu hydridi
- purku: hydridi vapauttaa vetyä lämmön tai paineen avulla

Edut:

- korkea tilavuustiheys verrattuna kaasumaiseen varastointiin.
- turvallisempi kuin paineistettut tai kryogeeniset menetelmät. Kohtuullinen paine ja lämpötila (ei äärimmäisiä olosuhteita)
- pitkä käyttöikä ja hyvä syklistä kesto.
- Haitat:
 - painava rakenne – erikoismetalliseos lisää massaa ja kustannuksia
 - hidas lataus/purku verrattuna muihin varastointitapoihin
 - lämpötilan hallinta kriittistä hydridin muodostumisessa ja purkamisessa



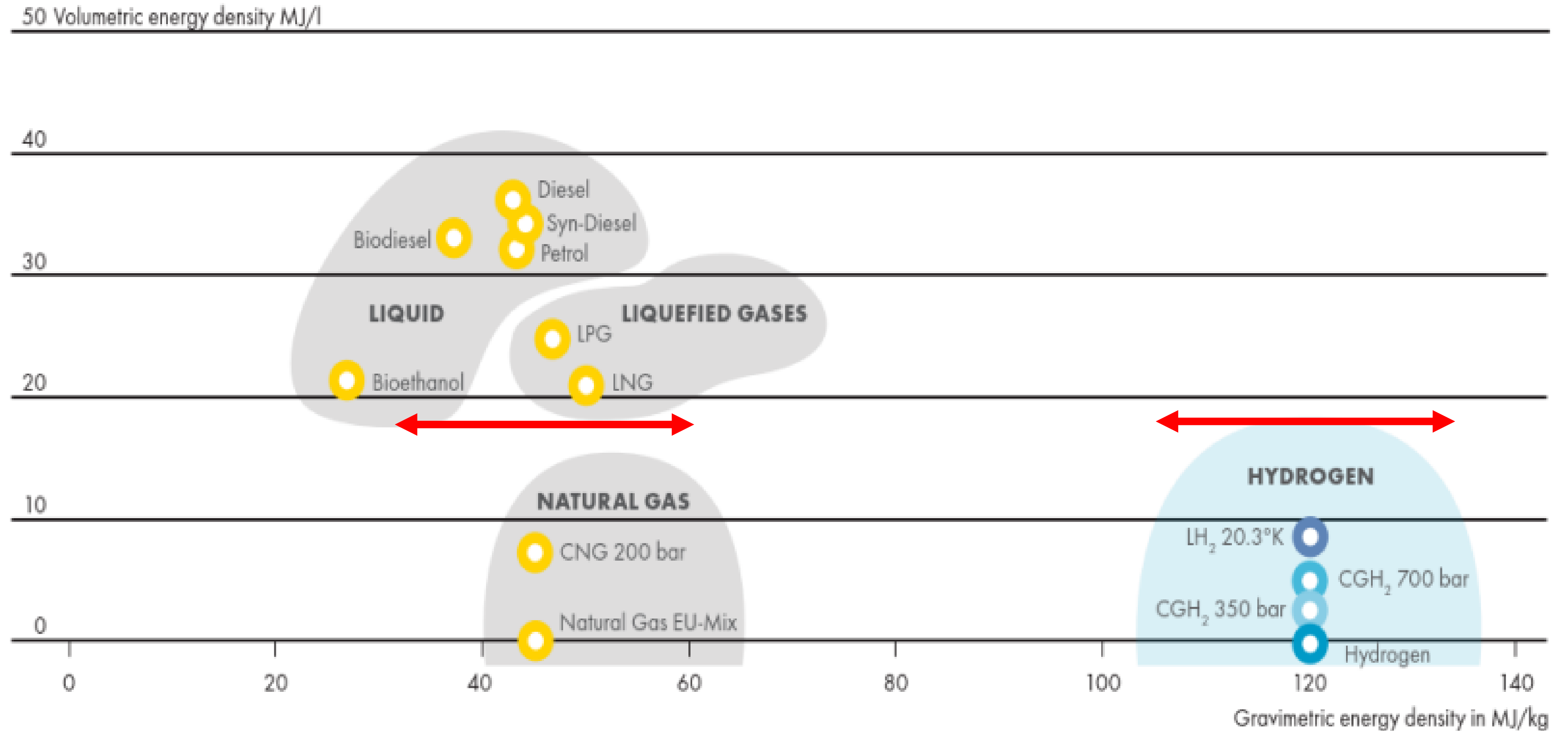
- varastointimenetelmä on käytössä pienissä sovelluksissa (esim. kannettavat laitteet, erikoisakkujärjestelmät) - ei vielä laajasti käytössä suurissa energiavarastoissa
- kehitystyö käynnissä erityisesti vetyautoissa ja kiinteissä varastoissa
- markkinaosuus pieni, mutta kasvanee tutkimuksen ja materiaalikehityksen myötä.



Euroopan unionin
osarahoittama

<https://mail.autosamplerguys.com/hydrogen-storage-systems.html>

Vedyn varastointimenetelmät



Vedyllä on erittäin korkea energiatiheys massayksikköä kohden

Vedyn tiheys $\sim 0,08 \text{ kg/Nm}^3$
Maakaasun tiheys $\sim 0,7 \text{ kg/Nm}^3$
Vrt. maakaasun energiatiheys:
— n. 3,5 x vety MJ/m³
— n. 0,4 x vety MJ/kg



Euroopan unionin
osarahoittama

https://afry.com/sites/default/files/2022-04/4_vetyesitys_jsii_11.3.2022.pdf

Vedyn varastointimenetelmät

Vedyn tiheys, ja siten **energiatiheys tilavuusyksikköä kohden**, vaihtelee riippuen varastointitavasta, ollen merkittävästi pienempi kuin nestemäisten polttoaineiden, kuten maakaasu tai kevyt polttoöljy:

Varastointimenetelmä	Tiheys (kg/m ³)	Energiatiheys (MJ/litra)
CGH ₂ (350 bar(g))	24	2,9
CGH ₂ (700 bar(g))	41	4,9
LH ₂	71	8,5
CcH ₂	80	9,6
SH ₂	81	9,7
LOHC	54	6,7
LNG (nesteytetty maakaasu)	450	23
Kevyt polttoöljy	840	36



Vedyn varastointimenetelmät - energiantarve

Menetelmä	Paine (barg)	Lämpötila (°C)	Tiheys (kg/m ³)	Energia tiheys ² (MJ/L)	Energiantarve ¹ (kWh/kgH ₂)	Energiantarve (% H ₂ LHV)	Säiliön tyyppi
Kompressoitu	350	15	24	2.9	2.2	7 %	Erikoisteräksiset tai komposiittisylinterit
Kompressoitu	700	15	40	4.8	3.2	10 %	
Neste	2-4	-253	71	8.5	8.0-13.4 (suuruudesta riippuen)	24 – 40 %	Kaksoisvaipallinen terässäiliö, jossa vakuumi välissä eristeenä

1: Energiantarpeessa oletettu vedylle 20 barg ja 300K lähtötila
 2: Laskettu käyttäen SRK tilayhtälöä, H₂ LHV 120.1 MJ/kg.



Euroopan unionin
osarahoittama

https://afry.com/sites/default/files/2022-04/4_vetyesitys_jsii_11.3.2022.pdf

Painestettu vetykaasu (CGH₂)

Vedyn energiasisältö massayksikköä kohden on erittäin hyvä, lähes kolminkertainen bensiiniin ja dieselöljyyn verrattuna.

Pienen tiheyden takia tilavuuteen suhteutettu energiatiheys on kuitenkin erittäin huono.

Siksi vedyn varastoinnissa kaasumaisena on käytettävä erittäin korkeaa painetta; nykyisin jopa 700 bar on käytössä.

Vetysäiliössä yhdistyy tiivis, teräksestä valmistettu sisäsäiliö ja hiilikuitukomposiitista tehty ulkovaippa, joka kantaa paineen aiheuttamat voimat.

Käytännössä yleensä kaasun paineella, esimerkiksi säiliössä tai putkistossa, tarkoitetaan sen yli- tai alipainetta:

- 100 bar(g) [*g=gauge; mittari, mittalaite*] tarkoittaa, että säiliössä on 100 bar ylipainetta ympäröivään ilmanpaineeseen nähden
- -0,4 bar(g) tarkoittaa vastaavasti 0,4 bar alipainetta ympäröivään ilmanpaineeseen nähden.
- normaali ilmanpaine merenpinnan tasolla on 1,013 bar(a).

Lämpötila-asteikkona tunnetumpi on Celsius-asteikko, jonka nollapiste eli jäätymispiste 0°C on absoluuttisella lämpötila-asteikolla 273,15 K ja kiehumispiste 100°C = 373,15 K normaalipaineessa. Absoluuttinen nollapiste on siis -273,15°C.



Painestettu vetykaasu (CGH₂)

Kun huomioidaan edellä mainitut esitystavat lämpötilan ja paineen osalta sekä vedyn moolimassa (n. 2 g/mol), vetykaasun tiheys ρ yksikössä kg/m³ voidaan laskea yhtälöstä:

$$pV=nRT$$

$$\rho = 24,24 \times \frac{(p + 1,013)}{(t + 273,15)}$$

Missä:

ρ = tiheys (yleensä kg/m³)

p = yli-/alipaine (bar)

t = lämpötila (°C)

273,15= muuntaa Celsius-asteet Kelvineiksi

1,013= lisää ilmanpaineen korjauksen (bar)

24,24 = **vakio**, joka tulee kaasun tilanyhtälöstä (ideaalikaasun laki) ja yksikkömuunnoksista.

Yhtälöt perustuvat ns. ihannekaasun tilanyhtälöön.

Ihannekaasutila on rajatila, jota kaasut lähestyvät paineen pienentyessä ja lämpötilan noustessa. Tällöin kaasut ovat mahdollisimman etäällä nesteytymisolosuhteista.

Yhtälön antaman tuloksen virhe kasvaa paineen kasvaessa ja lämpötilan laskiessa. Tuloksen tarkkuutta voidaan korjata jakamalla em. Yhtälöllä laskettu tiheys ns. kokoonpuristuvuuskertoimella Z .

Tässä yhteydessä puhutaan yleensä reaalikaasusta.

Esimerkki: Vetykaasun paine on 350 bar(g) ja lämpötila 15°C.
Laske vetykaasun tiheys ideaalikaasuoletuksella eli $Z = 1$.



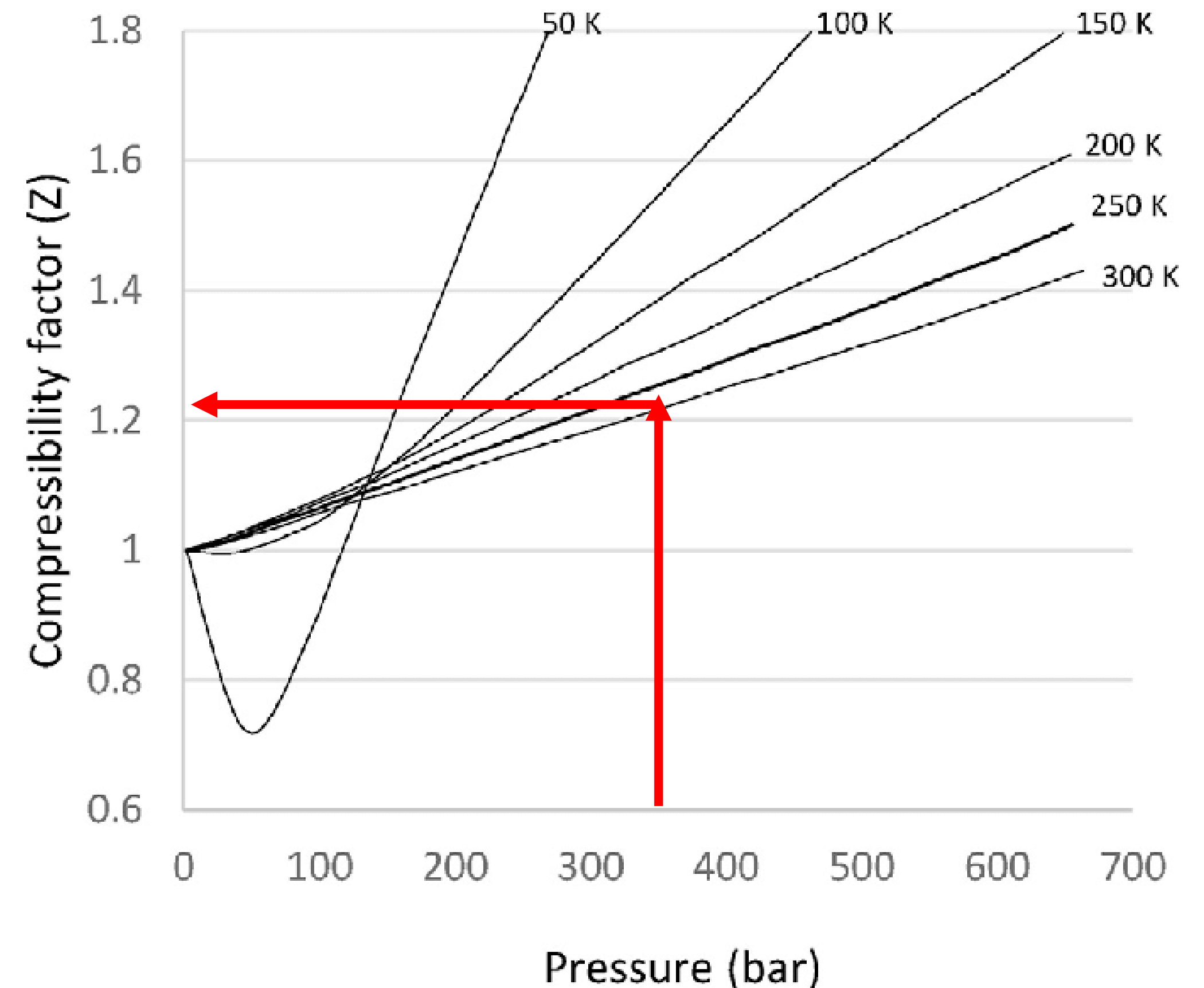
Painestettu vetykaasu (CGH₂)

Kun huomioidaan edellä mainitut esitystavat lämpötilan ja paineen osalta sekä vedyn moolimassa (n. 2 g/mol), vetykaasun tiheys ρ yksikössä kg/m³ voidaan laskea yhtälöstä:

$$pV=nRT$$

$$\rho = 24,24 \times \frac{(350 + 1,013)}{15} = 29,5 \text{ kg/m}^3$$

Lähteissä annetaan vastaavassa tilanteessa vetykaasun tiheydelle arvo 24 kg/m³. Tästä voidaan laskea, että kokoonpuristuvuuskerroin Z on siten suuruusluokkaa $29,5/24 = 1,23$.



Nestetty vety (LH₂)

Vaihtoehtoisesti vety voidaan muuttaa nestemäiseen olomuotoon jäädyttämällä se -253 °C lämpötilaan. Nesteytetyn vedyn säilöissä on myös kaksikuorinen rakenne, jossa kuorten välissä on tehokas lämpöeristys. Tällainen säiliö vaatii käytännössä jatkuvaa jäädyttämistä, muuten vety muuttuu takaisin kaasuksi. Siksi nestevety soveltuu parhaiten autoihin, jotka ovat jatkuvassa käytössä.

LH₂-varastosäiliöt tehdään yleensä ruostumattomasta teräksestä tai alumiiniseoksesta. Myös kupari ja messinki ovat mahdollisia. Kylmässä haurastuvat materiaalit, kuten hiiliteräs, eivät tähän käy.

Kaksoisvaipallisissa, tyhjiöeristetyissä säiliöissä ulkovaippa voi olla tavallista hiiliterästä.

LH₂-järjestelmien suunnittelussa tulee huomioida suurista lämpötilaeroista johtuvat lämpölaajenemisesta aiheutuvat liikkeet. Jään muodostusta säiliön ja sen varusteiden pintaan pitäisi välttää. Säiliö pitää varustaa törmäyseiteillä ja maadoittaa tehokkaasti (kipinöinti-syttymisvaara)

Muutamien kaasujen nesteytymislämpötiloja ja tiheyksiä nesteenä normaali-paineessa:

LPG (propaani) pysyy nesteenä huoneenlämmössä paineen ollessa n. 8 bar(g)

Kaasu	Nesteytymis lämpötila normaalipai neessa (°C)	Tiheys nesteenä (kg/m ³)
Maakaasu (LNG)	-162	450
Nestekaasu (LPG)	-42	580
Vety (LH₂)	-253	71



**Euroopan unionin
osarahoittama**

https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/valitse_auto_viisaasti/energialahteet/vety

Nesteytetty vety (LH₂)

- LH₂ on säiliössä kiehumispisteessä johtuen lämpövuodosta säiliön rakenteiden läpi. Tällöin säiliön yläosa täyttyy ns. **boil-off –kaasusta** (*Boil-Off Gas; BOG*).
- Jos BOG:ia ei poisteta tai nesteytetä uudelleen, paine säiliössä nousee pikku hiljaa ja uhkaa ajansaatossa sen rakenteiden kesto.
- BOG:in ns. pitoaikaa voidaan lisätä mitoittamalla säiliö paineastiaksi.
- Boil-off-kaasun muodostumisnopeus (*Boil-Off Rate; BOR*) tarkoittaa sitä määrää vetyä, joka kaasuuntuu vuorokaudessa, suhteessa alkuperäiseen nestevedyn määrään.
- BOR on alueella 0,03 – 3,0 %/vrk, tyypillisesti luokkaa 0,1 – 0,2 %/vrk.

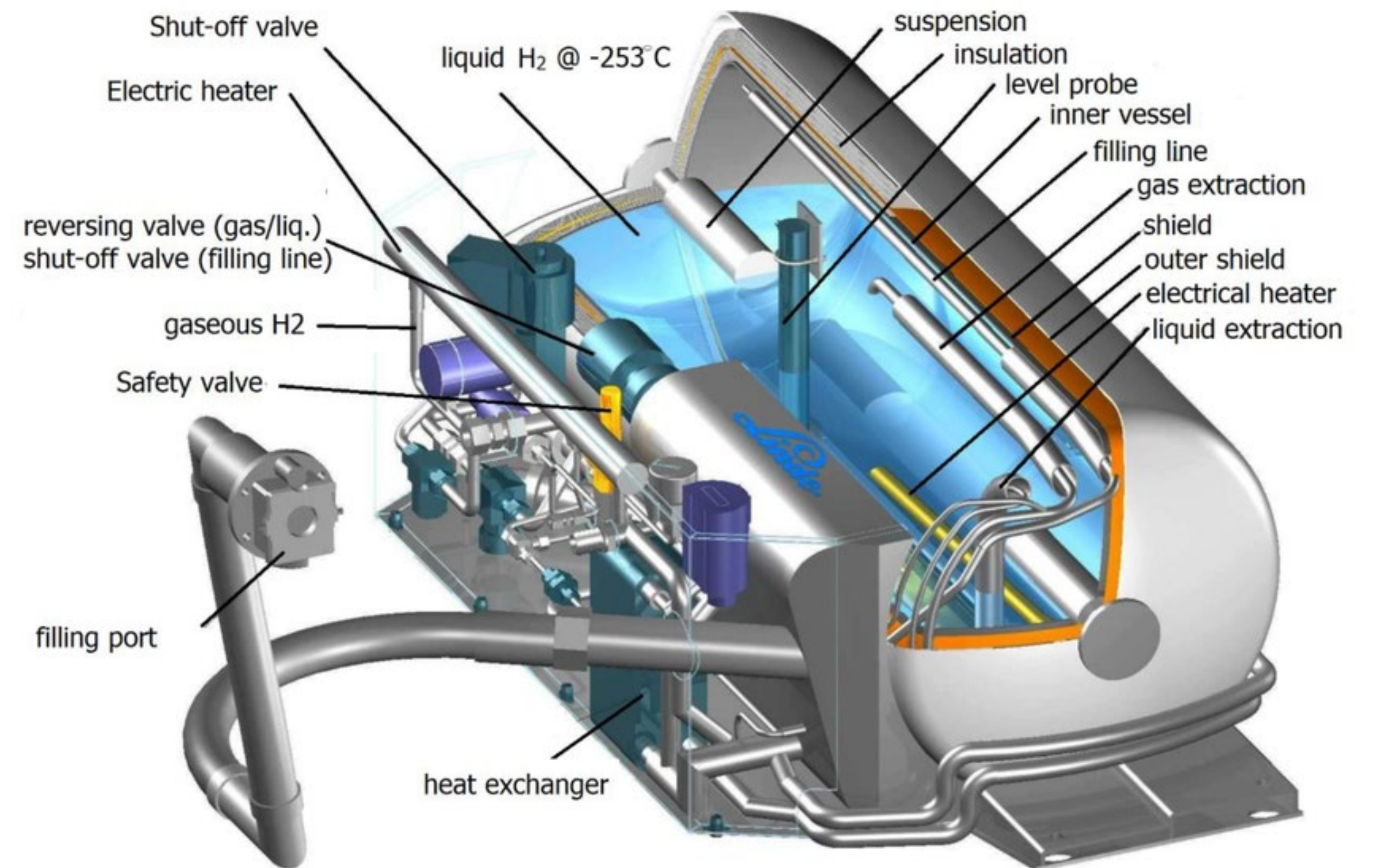
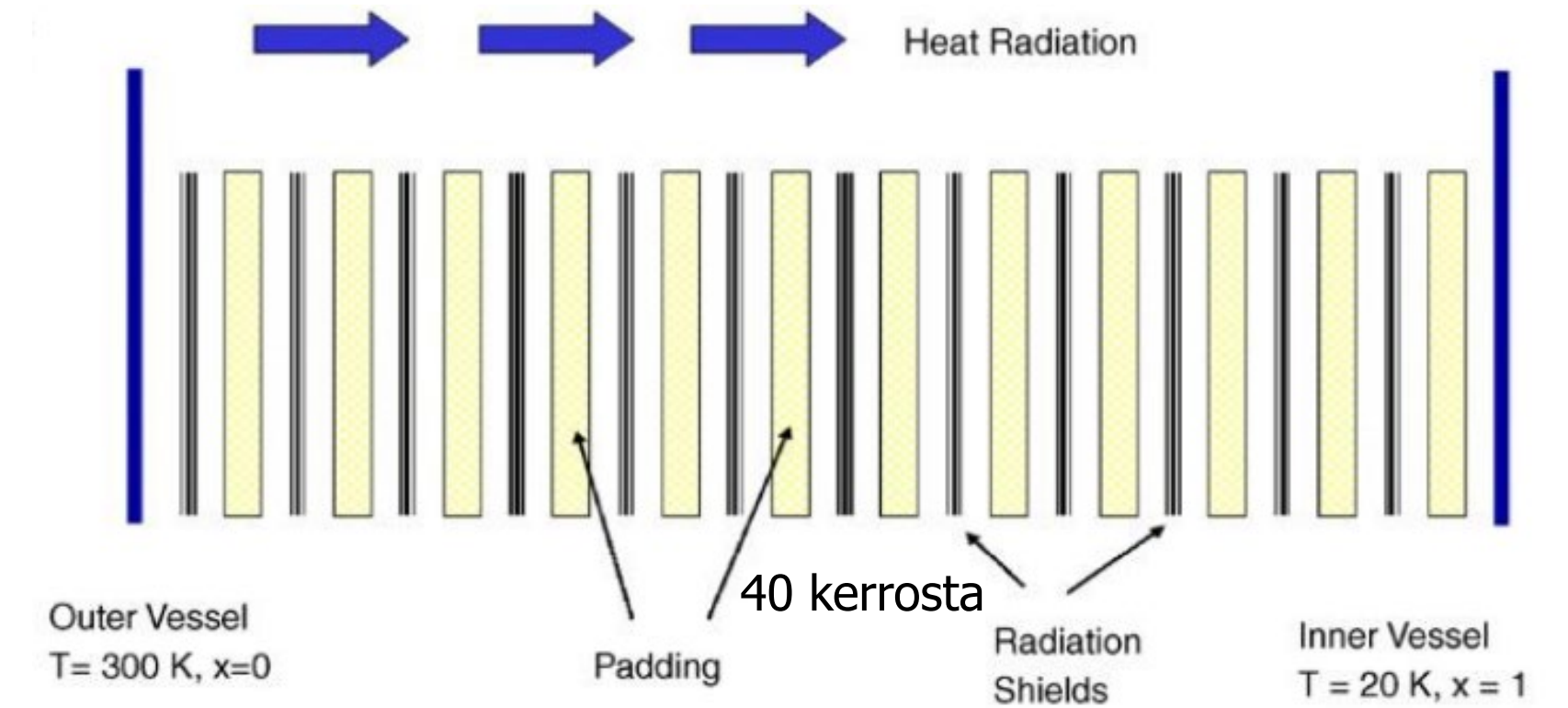


Net Volume	50 – 200 L
Total Volume	52.4 – 210 L
Weight	89 – 186 kg
Boil-off Rate	Max. 4.0% / day
Operating Pressure	3 bar
MAWP	10 bar



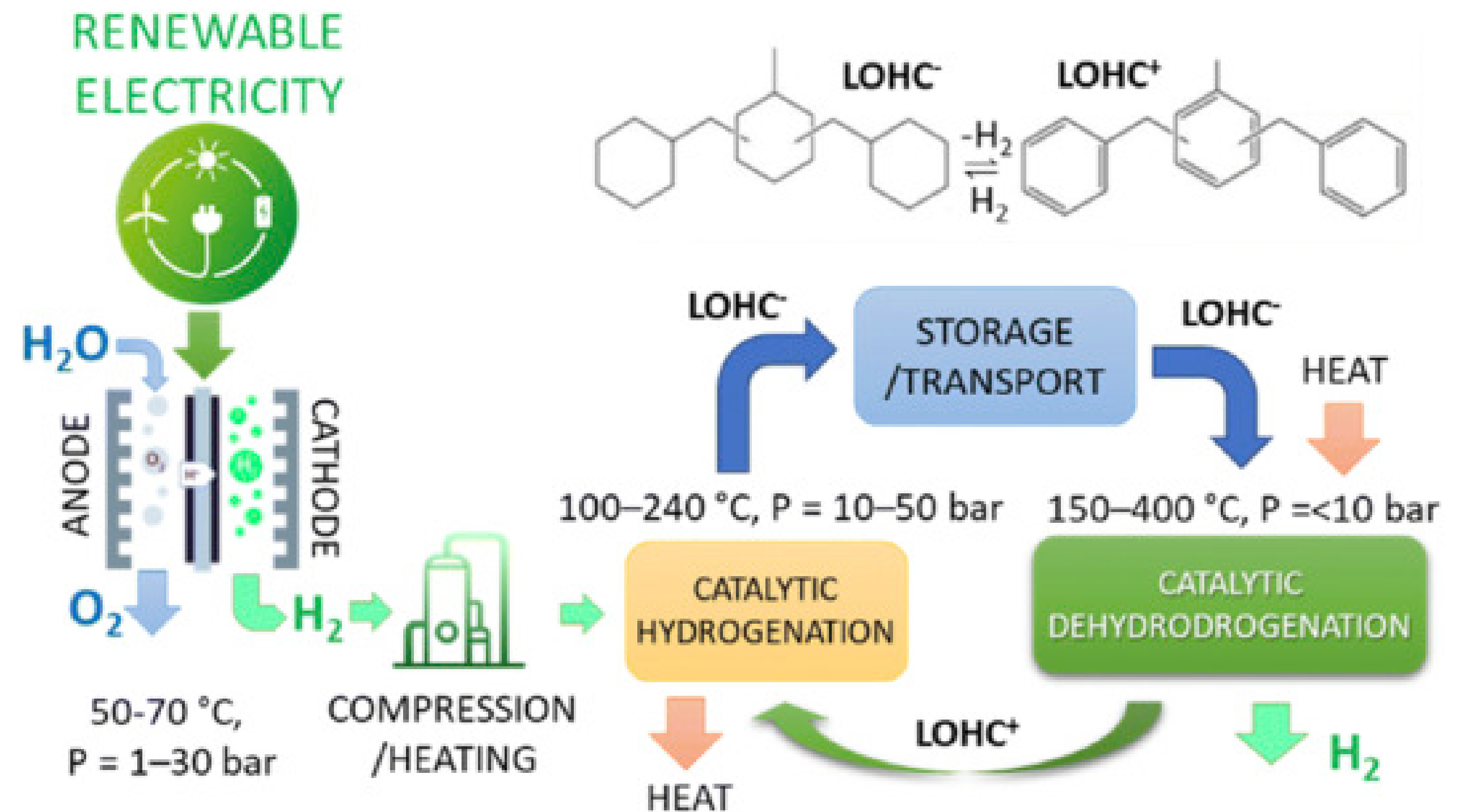
Nesteytetty vety (LH₂)

- Nestevetysäiliön lämpöeristys voi olla aktiivinen tai passiivinen:
- aktiivisessa käytetään jäähdytyskonetta nesteyttämään syntyvä BOG
- passiivisessa käytetään tehokasta, alhaisen lämmönjohtavuuden omaavaa eristemateriaalia tai mahdollisesti kerrosrakennetta + tyhjiötä
- Eristemateriaalit voidaan jakaa kolmeen ryhmään:
- kiinteät täyteaineet (bulk fill)
- vaahdot (foam)
- kerrosmateriaalit (layered)



LOCH – vety sitoutuneena kantaja-aineeseen

- Dibentsyyliitolueeni (DBT) on tällä hetkellä potentiaalisin kantaja-aine
- korkea varastointitiheys (54 kg vetyä / m³ DBT; massasuhde 6,2 %)
- kaupallisesti saatavilla
- kohtuullisen kilpailukykyinen hinta.
- dehydruuksessa vapautuvan vedyn puhtausaste on >99,9 %, joka on riittävä useimpiin sovelluskohteisiin, paitsi esim. PEM-polttokennoon.
- LOHC-teknologia on vielä kehitysvaiheen teknologia, mutta muutamia toimijoita löytyy pienen mittakaavan LOHC-varastoille.



Vedyn sitominen metallihydriidiin

- vedyn purkautuminen metallihydridistä (desorptio) tapahtuu, kun olosuhteet muuttuvat niin, että hydridin kemiallinen tasapaino siirtyy vedyn vapautumisen suuntaan.

1. Lämpötilan nosto

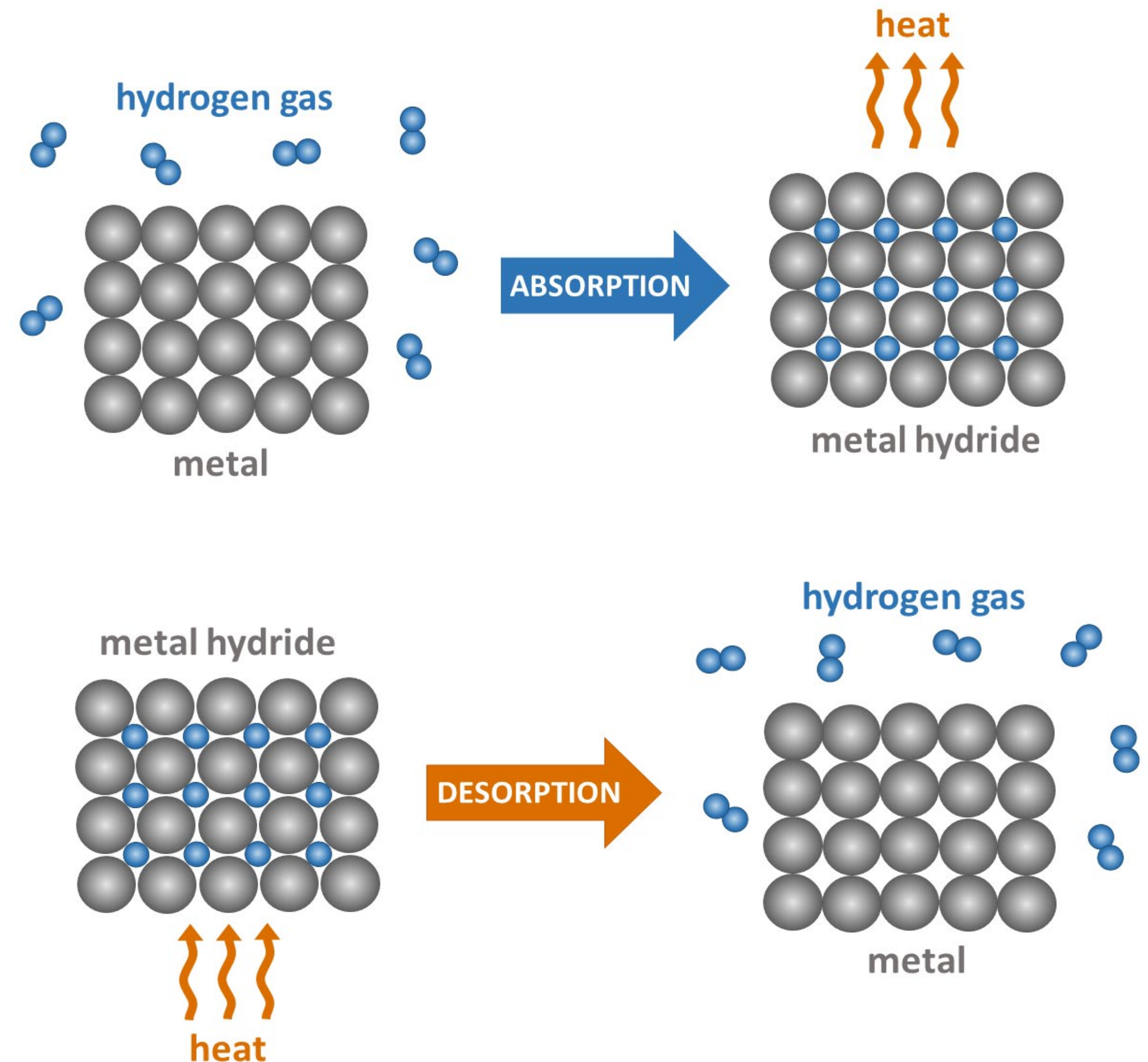
desorptio on endoterminen prosessi, eli se vaatii lämpöä. Kun lämpötila nousee, metallihydridin sidokset heikkenevät ja vetyatomeista muodostuu H_2 -molekyylejä, jotka vapautuvat

2. Paineen lasku

Metallihydridi on tasapainossa vedyn osapaineen kanssa. Kun ympäristön vetykaasun paine alenee (esim. kulutetaan vetyä polttokennossa), hydridi alkaa vapauttaa vetyä tasapainon säilyttämiseksi

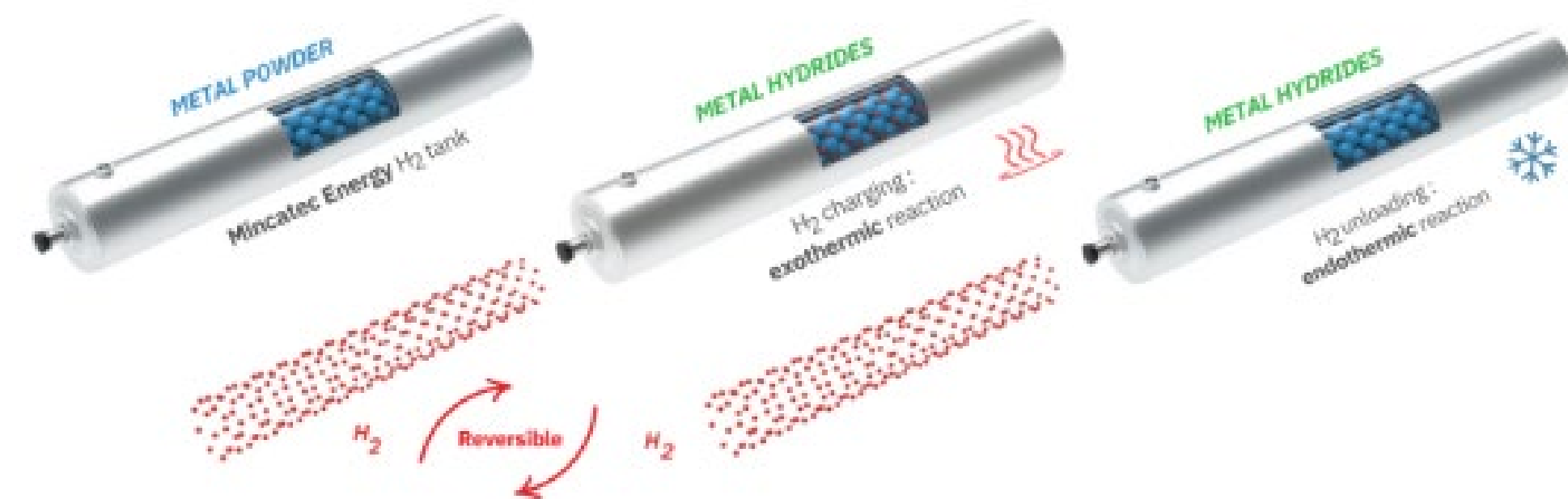
3. Katalyyttiset ja materiaalitekijät

Joissakin hydrideissa käytetään katalyyttejä nopeuttamaan desorptiota. Materiaalin rakenne (huokoisuus, seosaineet) vaikuttavat reaktionopeuteen



Vedyn sitominen metallihydridiin

- varastomuoto johtaa verrattain painavaan säiliöön, koska parhaimpaan hydridit eivät kykene sitomaan vetyä kuin alle 10 prosenttia omasta massastaan
- hydridi on toisaalta luonnostaan turvallisin varastointimuoto, sillä siitä vety ei vuoda itsekseen, vaan hydridiä on lämmitettävä, jotta vety vapautuisi
- vety tarjoaa kuitenkin akkuja paljon paremman energiatihedyyden sähkön varastointiin. Siksi autoteollisuus on ryhtynyt aktiivisesti kehittämään polttokennoautoja.
- atomaarisen vedyn tilavuustiheys on erittäin korkea, kun se sijoittuu kiderakenteen välisijojen paikkoihin – sitoutuu kemiallisesti osaksi kiinteää ainetta. Vedyn varastointi metallihydrideissä on luontaisesti turvallista ja välttää puristetun vetykaasun käytön sekä energiatehottoman ja mahdollisesti vaarallisen nestemäisen vedyn. Vedyn tiheys MH-varastointijärjestelmissä, lähellä huoneenlämpötilaa ja matalassa paineessa (10–30 bar), vastaa puristetun vedyn tiheyttä 1000 barin paineessa.
- kaupallisia sovelluksia ei vielä ole



Characteristics & Data

H₂ storage capacity: 1 kg
Tank mass: 85 kg
Pack volume: 32 L
Pack dimensions: L = 496 x 260 x 260 mm
Operating temperature: from -20°C to 80°C
Storage temperature: from -40°C to 100°C

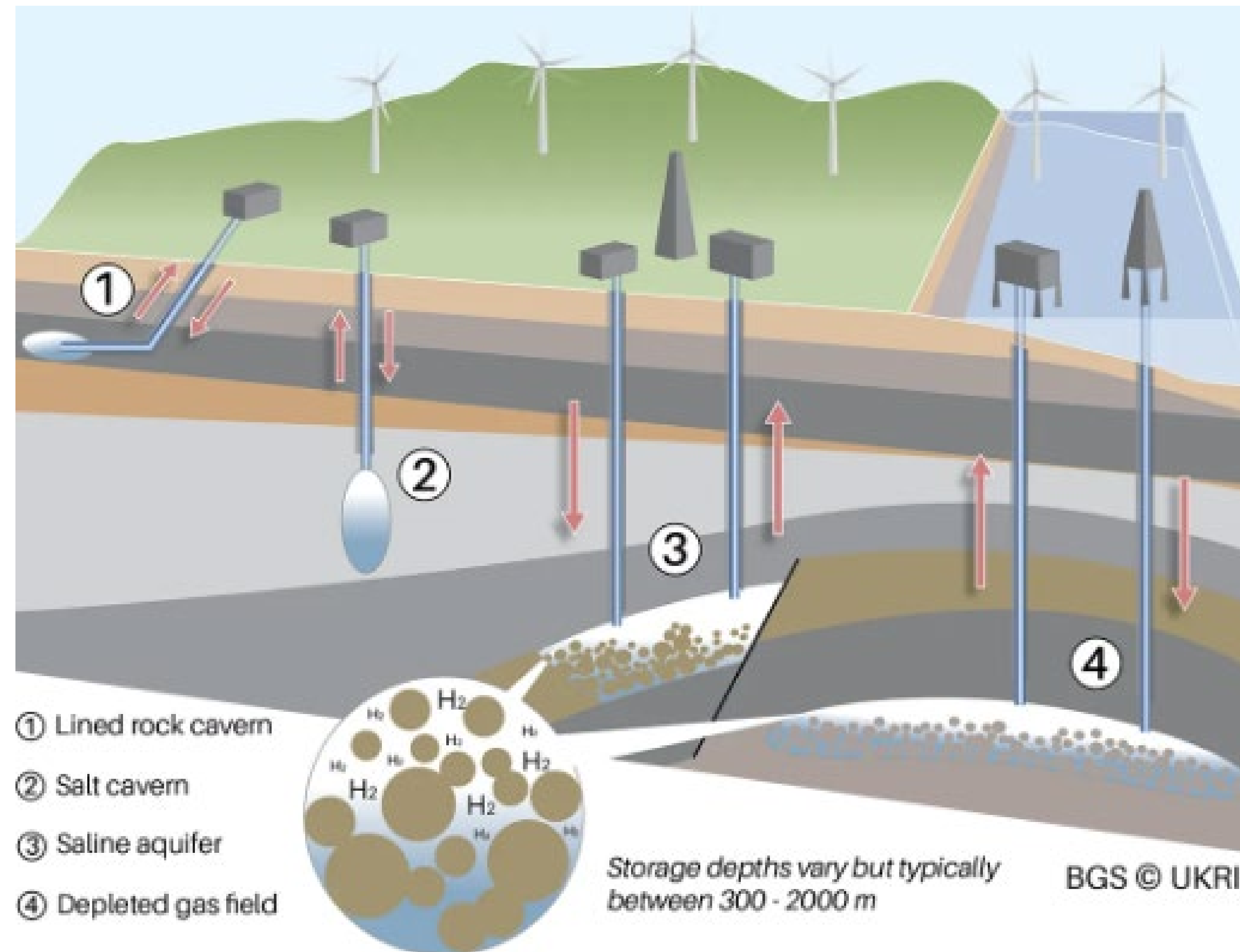
Ab/Sorption: < 4 kWh/kg_H₂
Equilibrium pressure: 10 bar at 20°C
Loading pressure: maxi 50 bar
Loading time with cooling: < 10 mn
Tank material: aluminium alloy



Euroopan unionin
osarahoittama

Vedyn maanalainen varastointi

- maanalainen vedyn varastointi on lupaava ratkaisu laajamittaiseen ja pitkäkestoiseen energian varastointiin
- nyt arvioidaan, että maanalainen varastointi on halvin ja turvallisin vaihtoehto laajamittaiseen vedyn varastointiin.
- nämä ratkaisut ovat kalliita, ja soveltuvat siten vain suurien määrien (> 6000 tonnia) varastointiin.
- kuvassa on esitetty mahdollisia vedyn varastointimenetelmiä:
 - vuoristoon louhitut vuoratut kallioluolat
 - suolakallioluolat
 - suolapitoiset pohjavesikerrostumat
 - käytöstä poistetut kaasukentät
- koska Suomessa ei ole kaasujen varastointiin soveltuvia luonnollisia geologisia muodostelmia, HUG-hanke (2024–2026) kehittää ja tutkii maanalaista vetyvarastointikonseptia, joka perustuu kalliovarastojen rakentamiseen. Hanketta toteuttavat VTT ja GTK yhdessä noin 16 teollisuuskumppanin kanssa
- SSAB, LKAB ja Vattenfall ovat Ruotsin Luulajassa vuoranneet kallioon (LRC, lined rock cavern) vetyluolan, jonka koko on noin 100 m³, ja se sijaitsee noin 30 metriä maanpinnan alla.



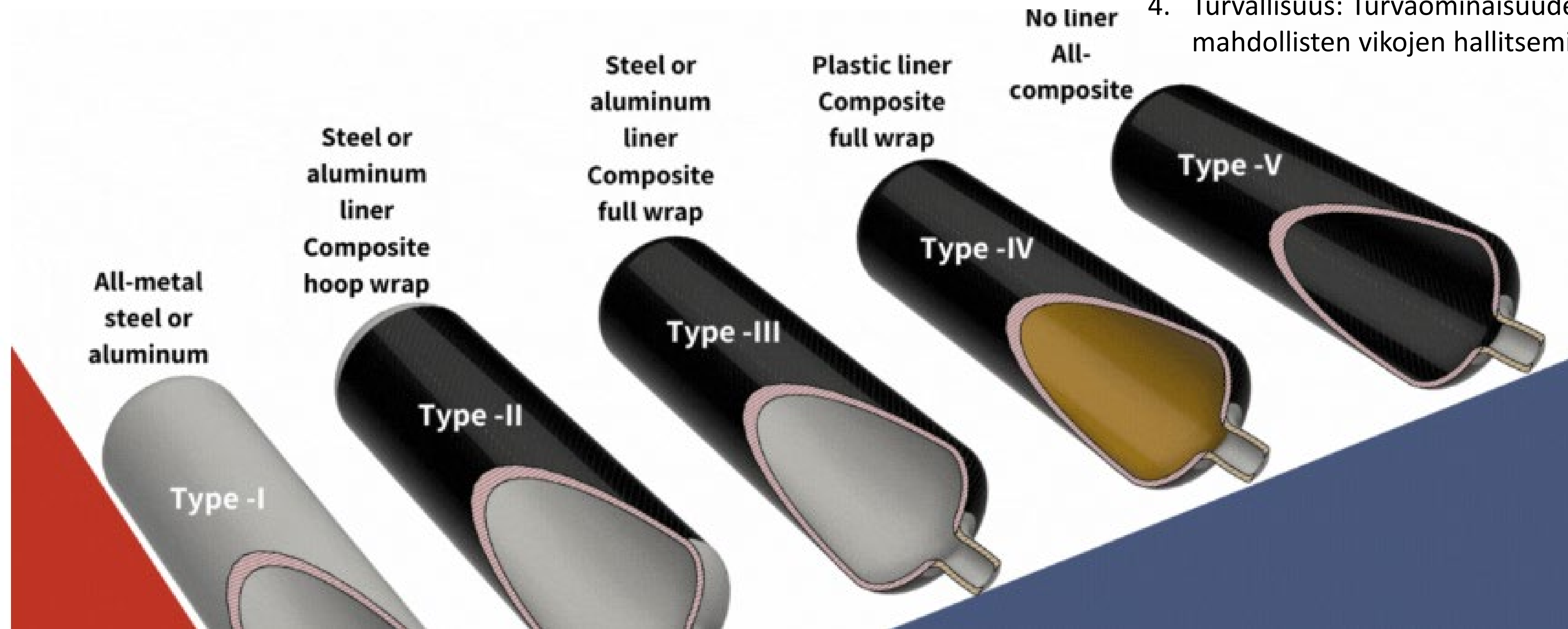
**Euroopan unionin
osarahoittama**

<https://www.bgs.ac.uk/news/making-the-case-for-underground-hydrogen-storage-in-the-uk/>

Vedyn varastointisäiliöt

MITÄ TULEE HUOMIOIDA:

1. Korkeapaineen kestävyys: Tyypillisesti 350–700 bar ajoneuvosovelluksissa.
2. Materiaalien kestävyys: Vedyn läpäisevyyden (permeaation) ja haurastumisen minimointi.
3. Rakenne: Kevyt rakenne (erityisesti liikkuvissa sovelluksissa).
4. Turvallisuus: Turvaominaisuudet vuotojen estämiseksi ja mahdollisten vikojen hallitsemiseksi



wrap = kietoa, kääre hoop = vanne



Euroopan unionin
osarahoittama

Vedyn varastointisäiliöt

Ominaisuus

Materiaali

Käyttöpaine

Tiheys (Tyypillinen)

Sovellukset

Edut

Haitat

Tyyppi 1 (Perus)

Täysin metallinen (teräs tai alumiiniseokset).

200–300 bar.

~15 g H₂/litra.

Pääasiassa teollinen ja paikallaan pysyvä varastointi.

Alhaiset kustannukset, yksinkertainen rakenne, vakiintuneet valmistustekniikat.

Raskas paino, rajoitettu painekapasiteetti.

Tyyppi 2 (Vahvistettu)

Metallivuori (teräs tai alumiini) osittaisella kuituvahvistuksella (yleensä lasikuitu).

100–500 bar.

~20 g H₂/litra.

Teolliset sovellukset, jotkin mobiilisovellukset.

Korkeampi painekapasiteetti kuin Tyyppi 1, pienempi paino.

Edelleen suhteellisen raskas mobiilisovelluksiin.



Euroopan unionin
osarahoittama

Vedyn varastointisäiliöt

Ominaisuus	Tyyppi 3	Tyyppi 4 (State-of-the-art)
Materiaali	Metallivuori (yleensä alumiini) täydellä komposiittikääreellä (hiilikuitu).	Polymeerivuori (HDPE tai polyamidi) täydellä komposiittikääreellä (hiilikuitu).
Käyttöpaine	Jopa 350 bar (jotkin mallit 700 bar).	Jopa 700 bar (jotkin mallit 875 bar).
Tiheys (Tyypillinen)	~25 g H ₂ /litra.	~40 g H₂/litra.
Sovellukset	Ajoneuvot, erityisesti linja-autot ja kuorma-autot.	Henkilöautot, raskaat hyötyajoneuvot, kannettavat sovellukset.
Edut	Huomattavasti kevyempi kuin Tyypit 1 ja 2, korkeampi painekapasiteetti.	Korkein varastointitiheys, kevyin paino , erinomainen väsymiskestävyys.
Haitat	Monimutkaisempi ja kalliimpi valmistaa.	Monimutkainen valmistusprosessi, potentiaalisesti suurempi vedyn läpäisevyys polymeerivuoren kautta.



Vedyn varastointisäiliöt

Vetysäiliötyyppi 5 (Kokeellinen)

Linerless All-Composite Design

- Tyyppi 5: Edistyksellisin ja kokeellisin muotoilu.
- Materiaali: Täysin komposiittirakenne ilman erillistä vuorta (linerless).
- Käyttöpaine: Vaihteleva, riippuen erityisestä suunnittelusta.
- Tiheys (Tyypillinen): ~20 g H₂/litra (potentiaali korkeampiin tiheyksiin edistyneillä malleilla).
- Valmistus: Edistyneet komposiittilaminointitekniikat.
- Sovellukset: Kokeelliset ja erikoissovellukset (esimerkiksi ilmailu- ja avaruustekniikka, jossa äärimmäiset painonsäästöt ovat ratkaisevia).
- Edut: Potentiaali erittäin alhaiseen painoon, vähentynyt monimutkaisuus vuorillisiin säiliöihin verrattuna.
- Haitat: Haasteita vedyn läpäisevyyden (permeaation) kanssa, vähemmän vakiintunut teknologia



**Euroopan unionin
osarahoittama**

Vedyn varastointisäiliöt

Tekijä

Järjestys (Paras > Heikoin)

Huomioita

Painotehokkuus (Keveys)

Tyyppi 4 $\approx$ Tyyppi 5 > Tyyppi 3 > Tyyppi 2 > Tyyppi 1.

Tyyppi 4 ja 5 ovat ratkaisevia liikkuvissa sovelluksissa.

Painekapasiteetti

Tyyppi 3 $\leq$ Tyyppi 4 $\approx$ Tyyppi 5 > Tyyppi 2 > Tyyppi 1.

Korkeammat paineet mahdollistavat suuremmat varastointitiheydet.

Permeaation Kestävyys

Tyyppi 1 $\approx$ Tyyppi 2 $\approx$ Tyyppi 3 > Tyyppi 4 > Tyyppi 5.

Metallivuoret tarjoavat parhaan läpäisevyydenkestävyyden verrattuna polymeerivuoriin tai vuorettomiin malleihin.

Valmistuksen Monimutkaisuus

Tyyppi 5 > Tyyppi 4 > Tyyppi 3 > Tyyppi 2 > Tyyppi 1.

Edistyneemmät tyypit ovat monimutkaisempia, mikä lisää kustannuksia.

Kustannukset

Tyyppi 5 > Tyyppi 4 > Tyyppi 3 > Tyyppi 2 > Tyyppi 1.

Lisääntyneet materiaali- ja valmistusmonimutkaisuudet nostavat hintaa.



Euroopan unionin
osarahoittama

Vedyn varastoinnin energiankulutus

- kaasumaisessa varastoinnissa energiankulutus on pääosin puristustyötä, joka tehdään kompressorissa kaasun paineen nostamiseksi varastointipaineeseen
- nestemäisessä varastoinnissa energiankulutus koostuu kaasun jäähdyttämisestä nesteytymispisteeseen sekä varastoinnin aikana syntyvän boil-off-kaasun jälleen nesteyttämisestä
- suuntaa-antavina lukuina energiankulutuksesta on esitetty arvoja:
 - 9–12 % LHV:stä (3–4 kWh/kgH₂), kun paine nostetaan 350 bar(g) tasolle
 - 12–15 % LHV:stä (4–5 kWh/kgH₂), kun paine nostetaan 700 bar(g) tasolle
 - 30–35 % LHV:stä (10–12 kWh/kgH₂), kun vety nesteytetään (LH₂).

