



Education in Hydrogen Technologies Area

OPSLAG EN VERVOER VAN WATERSTOF



Co-funded by
the European Union

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

INHOUD

Inhoud	2
Inleiding.....	4
1 Transport van waterstof.....	5
1.1 Inleiding.....	5
1.2 Trefwoorden.....	5
1.3 Vervoer van gecompriemde waterstof in containers over de weg of per spoor.....	6
1.3.1 Transport van Waterstof: Modaliteiten, Veiligheid en Capaciteit	6
1.4 Vervoer van vloeibare waterstof in containers over de weg, per spoor of per schip.....	7
1.4.1 Innovaties en Veiligheidsmaatregelen in het Cryogeen Transport van Vloeibare Waterstof	7
1.4.2 Optimalisatie van Ortho-naar-Parawaterstof Conversie en Efficiëntie van LH2 Opslag.....	8
1.5 Vervoer van waterstof per pijpleiding met aardgasmengsel	10
1.5.1 Geavanceerde Overwegingen bij het Transport van Waterstof-Verrijkt Aardgas (HENG) via Pijpleidingen.....	10
1.6 Scheiding van waterstof uit het aardgasmengsel met behulp van membraangasscheiding	11
1.7 Schoon waterstoftransport via een bestaande gasleiding die is aangepast aan schone waterstof	12
1.8 Vervoer van zuivere waterstof via een nieuw aangelegde pijpleiding	14
1.8.1 De Europese waterstof backbone /netwerk	15
1.8.2 Voorbeeld van de realisatie van een nationaal waterstofnetwerk.....	18
1.9 LOHC.....	19
1.9.1 Voorbeeld van het gebruik van LOHC in de praktijk	19
1.10 Samenvatting: Transport en Opslag van Waterstof	21
1.11 Multiple-Choice vragen	23
1.11.1 Antwoorden:.....	25
2 Waterstofopslag	26
2.1 Opslag van gecompriemde waterstof.....	27
2.2 Opslag van vloeibare waterstof.....	30
2.3 Opslag van waterstof in ondergrondse containers in een mengsel met methaan of ammoniak	32
2.4 Waterstofopslag in hydriden.....	33
2.4.1 Metalen hydridides	35
2.4.2 Waterstofopslag in chemische hydriden.....	37

2.4.3	Hydrolyse.....	37
2.4.4	Hydrogenering/Dehydrogeneringsreacties.....	38
2.4.5	De sorptie van waterstof.....	38
2.4.6	Koolstof Nanobuizen.....	38
2.4.7	Boornitride nanobuisjes.....	38
2.4.8	Gepileerd grafeen.....	39
2.5	Geavanceerde Koolstofmaterialen voor Waterstofopslag: Potentieel en Uitdagingen.....	40
2.6	Samenvatting.....	42
2.7	Vragen.....	45
2.7.1	Antwoorden:.....	47
3	Onderdelen.....	48
3.1	Inleiding.....	48
3.2	Trefwoorden.....	48
3.3	Druktanks.....	48
3.4	Opslag van samengeperst gas.....	50
3.5	Cryogene tanks.....	51
3.6	Hogedruk opslagtanks.....	53
3.7	Samenvatting.....	54
3.8	Vragen.....	55
3.8.1	Antwoorden met Omschrijving:.....	58
4	Lijst van bronnen.....	60
5	Lijst van afbeeldingen en tabellen.....	62
6	Lijst van afkortingen.....	63

Ondersteund door de Europese Unie. De standpunten en meningen zijn echter uitsluitend die van de auteurs en komen niet noodzakelijkerwijs overeen met die van de Europese Unie of het Uitvoerend Agentschap voor onderwijs en cultuur (EACEA). Noch de Europese Unie, noch het EACEA kan verantwoordelijk worden gehouden.

Waterstof kan op verschillende manieren worden opgeslagen, onder meer als gas, als vloeistof of in vaste vorm zoals een metaalhydride of een chemische verbinding. De meest gebruikelijke methode om waterstof op te slaan is als samengeperst gas in hogedruktanks. Deze methode heeft het voordeel dat zij relatief eenvoudig en goedkoop is, maar de opslagdichtheid is relatief laag, zodat grote tanks nodig zijn om een bruikbare hoeveelheid waterstof op te slaan.

Waterstof kan als vloeistof worden opgeslagen in cryogene tanks, tanks die ontworpen zijn om materialen bij extreem lage temperaturen op te slaan. Vloeibare waterstof heeft een veel hogere opslagdichtheid dan gasvormige waterstof, zodat het in kleinere tanks kan worden opgeslagen. De tanks en uitrusting voor de opslag en behandeling van vloeibare waterstof zijn echter duurder en complexer dan die voor de opslag van samengeperst gas.

Een andere methode van waterstofopslag is opslag in vaste vorm, zoals in een metaalhydride of chemische verbinding. Deze methode heeft het voordeel dat grote hoeveelheden waterstof in een kleine ruimte kunnen worden opgeslagen, maar is over het algemeen duurder en minder efficiënt dan de andere methoden.

Er zijn ook verschillende methoden om waterstof te vervoeren, waaronder per vrachtwagen, trein, schip en pijpleiding. De meest gebruikelijke methode is per vrachtwagen, waarbij tanks worden gebruikt die vergelijkbaar zijn met die voor de opslag van waterstof. Waterstof kan ook worden vervoerd per trein of schip in cryogene tanks, of door pijpleidingen zoals aardgas.

In het algemeen is de ontwikkeling van doeltreffende en efficiënte methoden voor de opslag en het vervoer van waterstof een belangrijk gebied van onderzoek en ontwikkeling, aangezien waterstof een veelbelovende manier is om energie op te slaan.

1 TRANSPORT VAN WATERSTOF

1.1 INLEIDING

Waterstof, erkend voor zijn potentieel als schone energiedrager, kan worden vervoerd met verschillende transportmethoden zoals vrachtwagens, schepen, spoorwegen en pijpleidingen. Voor wegtransport worden aanhangers met speciaal ontworpen cryogene tankwagens ingezet om waterstof als vloeistof bij temperaturen rond de -253°C te vervoeren. Deze aanpak verkleint het volume van waterstof aanzienlijk, wat bijdraagt aan een efficiënter transportproces.

Maritiem transport van waterstof biedt alternatieven voor zowel cryogene vloeistof in speciaal uitgeruste tankers als gecomprimeerd gas in drukbestendige containers. Deze methoden leiden tot flexibele overzeese leveringsketens, vergelijkbaar met de gevestigde routes voor vloeibaar aardgas (LNG).

Pijpleidingtransport van waterstof is een andere strategie die vooral effectief is voor kortere afstanden. Ondanks dat waterstof gemakkelijker kan ontsnappen uit pijpleidingen dan aardgas, biedt het een directe en efficiënte levering van productiefaciliteiten naar lokale opslag- of distributiepunten. De uitdagingen rondom waterstofpermeatie vereisen geavanceerde materialen en technologieën om de integriteit van het transportsysteem te waarborgen.

Door de implementatie van deze gevarieerde transportmethoden, elk met hun unieke technische eisen en operationele protocollen, kan waterstof een sleutelrol spelen in de transitie naar een duurzame energievoorziening. Toekomstige ontwikkelingen en verbeteringen in transportinfrastructuur zullen naar verwachting de efficiëntie en economische levensvatbaarheid van waterstoftransport verder verhogen.

1.2 TREFWOORDEN

Waterstoftransport, Cryogene waterstofopslag, Waterstofinfrastructuur, Waterstofveiligheidsprotocollen, Gecomprimeerd waterstofgas, Vloeibare organische waterstofdragers (LOHC), Waterstofverrijkt aardgas (HENG), Membraangasscheiding, Waterstofpijpleidingen, Waterstofpermeatie, Ortho-naar-para conversie, Waterstoflekpreventie, Duurzame energiedrager, Brandstofceltechnologie, Energie-inhoud van waterstof, Waterstof in transportsector, European Hydrogen Backbone, Waterstofenergie-efficiëntie, Waterstofdistributie en Innovatie in waterstoftransport

1.3 VERVOER VAN GECOMPRIMEERDE WATERSTOF IN CONTAINERS OVER DE WEG OF PER SPOOR

1.3.1 TRANSPORT VAN WATERSTOF: MODALITEITEN, VEILIGHEID EN CAPACITEIT

Waterstoftransport over de weg kan plaatsvinden in de vorm van samengeperst gas of vloeistof. Samengeperst gas wordt doorgaans opgeslagen in hogedruktanks van koolstofvezel of staal die op aanhangers of vrachtwagens zijn gemonteerd, ontworpen om de hoge opslagdruk te weerstaan. Tijdens het transport moet speciale aandacht worden besteed aan het ontwerp en onderhoud van de containers, de opleiding van de chauffeurs, en de naleving van strikte veiligheidsvoorschriften om lekkages en ongevallen te voorkomen.

Spoorvervoer biedt de mogelijkheid om grotere hoeveelheden waterstof over langere afstanden te verplaatsen, met relatief lage kosten en een kleiner milieu-impact dan wegtransport. Het naleven van veiligheidsnormen en de uitdagingen van potentiële ongevallen of lekkages vereisen eveneens goed ontworpen en onderhouden containers en goed uitgeruste wagons met passende veiligheidsmaatregelen.

Waterstof kan in verschillende fysieke staten worden vervoerd: in gasvorm via meerdere kleine cilinders of opgeslagen in lange horizontale vaten. Volgens S&P Global Commodity Insights (2021), kan een vrachtwagen tot 1.100 kg waterstof in gasvorm vervoeren, terwijl vloeibaar waterstoftransport tot 3.500 kg per vrachtwagen mogelijk maakt. vervoeren (S&P Global Commodity Insights, 2021).

Moderne transportmethoden omvatten het gebruik van samengeperst gas in drukvaten gemaakt van ijzer of composiet koolstofbuizen, waarbij drukcilinders worden gebruikt die een druk van 200 tot 300 bar kunnen weerstaan. Waterstofvoertuigen gebruiken kleinere tanks die ontworpen zijn om drukken van 350 tot 700 bar te hanteren.



Foto nr. 2: Vervoer van waterstof in containers over de weg.

1.4 VERVOER VAN VLOEIBARE WATERSTOF IN CONTAINERS OVER DE WEG, PER SPOOR OF PER SCHIP

1.4.1 INNOVATIES EN VEILIGHEIDSMaatregelen IN HET CRYOGEEN TRANSPORT VAN VLOEIBARE WATERSTOF

Vloeibare waterstof, met zijn hoge energiedichtheid en het vermogen om alleen water te produceren bij verbranding, staat te boek als een veelbelovende, schone transportbrandstof. De cryogene eigenschappen van LH₂, die opslag en transport bij ongeveer -253°C vereisen, stellen echter substantiële technische eisen en creëren significante kosten voor de benodigde infrastructuur.

Wegtransport van LH₂ vergt gespecialiseerde, geïsoleerde en roestvrijstalen tankwagens, uitgerust met geavanceerde veiligheidsmechanismen zoals overdrukventielen om de kritieke lage temperaturen te handhaven en lekkages tijdens het laden via transferleidingen te voorkomen. Deze tankwagens dragen bij aan de veiligheid van het LH₂-transport door middel van strikte veiligheidsprotocollen en vereisen chauffeurs met specifieke training en kennis van de unieke risico's die verbonden zijn aan LH₂.

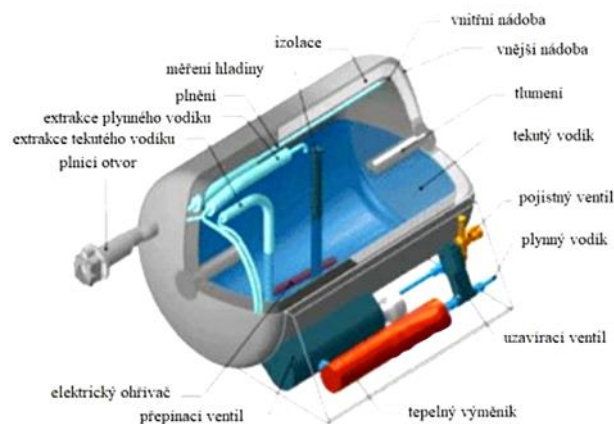
Voor maritiem transport, waarbij grote hoeveelheden LH₂ over lange afstanden worden vervoerd, moeten de containers robuust en cryogeen bestendig zijn om de uitdagingen van zeetransport het hoofd te bieden. Veiligheidskwesties, zoals het risico op morsen en lekken, zijn hierbij van bijzonder belang. Initiatieven zoals het HYFLEET:CUTE-project van de Europese Unie hebben aangetoond dat het transport van waterstof per schip haalbaar is, wat de weg vrijmaakt voor toekomstige ontwikkelingen in de scheepvaartindustrie met betrekking tot gespecialiseerde cryogene schepen.

De cryogene opslag van LH₂ brengt echter zijn eigen uitdagingen met zich mee, waaronder het energie-intensieve liquefactieproces dat tot 30% van de LH₂-verbrandingsenergie vereist, en een dagelijks volumetrisch verlies van ongeveer 3%. Deze factoren benadrukken het belang van het ontwikkelen van nieuwe, efficiëntere liquefactiemethoden om zowel de energiebehoefte te verminderen als de effectiviteit van LH₂-opslag te verbeteren.



Foto nr. 3: Vervoer van vloeibare waterstof in een containerschip.

Fig. 6: cryogene waterstofcontainer



1.4.2 OPTIMALISATIE VAN ORTHO-NAAR-PARAWATERSTOF CONVERSIE EN EFFICIËNTIE VAN LH2 OPSLAG

Een belangrijk aspect van de efficiëntie in de opslag van vloeibare waterstof (LH2) is de omzetting van ortho- naar paravorm waterstof. De orthovorm (o-H2) van waterstofmoleculen kenmerkt zich door atomen met parallelle spins, terwijl in de paravorm (p-H2) de spins van de atomen anti-parallel zijn. Bij lage temperaturen is p-H2 stabiel en heeft het een lagere enthalpie. De conversie van o-H2 naar p-H2 genereert warmte, wat de koelingsvereisten en daarmee de energiebehoefte van het opslagproces verhoogt.

De zuiverheid van waterstof is een andere cruciale factor; verontreinigingen zoals CO₂, CO, CH₄ en O₂ moeten tot een minimum worden beperkt, vooral omdat een zuurstofconcentratie van meer dan 1 mg per kg explosieve risico's kan verhogen.

Voor de opslag van LH₂ worden meerlaagse containers gebruikt die uitgerust zijn met superieure isolatie-eigenschappen en overdrukbeveiligingen. Deze beveiligingen zijn cruciaal om de gecontroleerde vrijgave van verdampt LH₂ mogelijk te maken en drukopbouw binnen de container te voorkomen. De typische verdampingsverliezen voor LH₂ opslag liggen rond de 3% per dag. Om de efficiëntie te verbeteren, kan het verdampte LH₂ worden opgevangen en opnieuw opgeslagen in drukcilinders voor later gebruik.

1.4.2.1 VERGELIJKING VAN CONVENTIONELE METHODEN

Voor E-categorie voertuigen, die doorgaans groter en zwaarder zijn dan de compactere segmenten, zijn de eisen voor brandstofefficiëntie en opslagcapaciteit aanzienlijk. Neem bijvoorbeeld de Toyota Mirai, een waterstofbrandstofcelauto, die met een tank van slechts 5,6 kg waterstof een indrukwekkende actieradius van 650 km kan bereiken. Dit illustreert de vooruitgang in brandstofceltechnologie en waterstofopslag, waardoor de energiedichtheid per kilogram waterstof wordt geoptimaliseerd om een grotere afstand af te leggen.

Dit niveau van efficiëntie impliceert dat voor een vergelijkbare actieradius in een E-categorie auto, de grootte en het gewicht van de waterstofopslagcontainers mogelijk minder substantieel zouden zijn dan eerder ingeschat. Hoewel waterstoftanks vanwege de hoge druk nog steeds robuuster zijn dan conventionele brandstoftanks, maakt de verbeterde energiedichtheid en efficiëntie van waterstofbrandstofcellen het mogelijk om vergelijkbare actieradius te bereiken met minder waterstof, resulterend in lichtere en mogelijk minder volumineuze tanks dan oorspronkelijk aangenomen.

Deze geavanceerde voertuigen zijn uitgerust met samengestelde tanks die bij hoge drukken van 700 bar werken, waardoor de opslag van waterstof efficiënter wordt zonder de totale massa en het volume aanzienlijk te verhogen. Zoals blijkt uit de Toyota Mirai, zorgen de geïntegreerde technologie en innovatieve engineering ervoor dat waterstof een haalbare optie is voor duurzame mobiliteit in de E-categorie, zelfs met de huidige beperkingen van waterstofopslag.

De veiligheid blijft een prioriteit, waarbij de opslag en het transport van waterstof streng gereguleerd zijn om risico's te minimaliseren. De toekomst van waterstoftransport zal verder worden gevormd door voortdurende verbeteringen in zowel de efficiëntie van de waterstofproductie als de ontwikkeling van de benodigde infrastructuur om de toepassing van waterstof als schone energiedrager te ondersteunen.

Type container	Containergewicht [kg]	Containervolume [l]
Brandstoftank	55	45
Cryogene tank	100	180
Stalen tank 350 bar	360	290
Samengestelde tank 350 bar	120	290
Samengestelde tank 450 bar	130	230
Samengestelde tank 700 bar	140	200

Fig. 7: Vergelijking van gemeenschappelijke opslagmethoden

1.5 VERVOER VAN WATERSTOF PER PIJPLEIDING MET AARDGASMENGSEL

1.5.1 GEAVANCEERDE OVERWEGINGEN BIJ HET TRANSPORT VAN WATERSTOF-VERRIJKT AARDGAS (HENG) VIA PIJPLEIDINGEN

Waterstof kan in combinatie met aardgas als een mengsel, bekend als waterstof-verrijkt aardgas (HENG), door pijpleidingen worden getransporteerd. De typische waterstofconcentratie in HENG ligt tussen 10% en 20%. Dit biedt een potentieel kosteneffectieve transportoplossing door gebruik te maken van de bestaande aardgasinfrastructuur, wat aanzienlijke economische voordelen kan opleveren ten opzichte van het aanleggen van nieuwe gespecialiseerde pijpleidingen.

Desondanks moeten de pijpleidingen die voor HENG worden gebruikt, compatibel zijn met waterstof om corrosie van waterstofgevoelige materialen te voorkomen. De keuze van het leidingmateriaal of de toepassing van een beschermende coating zijn daarom cruciaal. Verder heeft waterstof een lagere energie-inhoud per volume-eenheid dan aardgas, wat impliceert dat HENG een groter volume nodig heeft om gelijkwaardige energie te leveren.

Zorgvuldige behandeling en opslag zijn essentieel voor HENG, vooral omdat het vaak onder hoge druk moet worden bewaard om het transport te vergemakkelijken. Opslag- en transportfaciliteiten moeten derhalve ontworpen zijn om dergelijke druk te weerstaan.

De lagere verbrandingswaarde van waterstof, ongeveer 30% van die van aardgas, vormt geen significant probleem voor de gasverkoop aangezien de distributiekosten worden berekend op basis van geleverde energie-eenheden (KWh). Factureringsystemen dienen zich aan te passen aan de werkelijke verwarmingswaarde van het geleverde gas.

Om dezelfde warmte-output te bereiken, is meer HENG nodig dan puur aardgas. Echter, de lagere weerstand van waterstof tijdens het transport door pijpleidingen kan resulteren in een snellere stroming van het mengsel, zonder de bestaande pijpleidingcapaciteit voor de transport van warmte te belemmeren.

In de context van de huidige energietransitie kan HENG een effectief middel zijn voor het transport van waterstof. Niettemin, de implementatie vereist gedegen technische overwegingen en infrastructuraanpassingen om de veiligheid en doeltreffendheid van het vervoer te garanderen. (Vodíková strategie České republiky, 2021, s. 77-78).

1.6 SCHEIDING VAN WATERSTOF UIT HET AARDGASMENGSEL MET BEHULP VAN MEMBRAANGASSCHEIDING

Membraangasscheiding is een proces waarbij een gasmengsel met behulp van een membraan wordt gescheiden in zijn afzonderlijke componenten. Het membraan laat sommige gassen door en verhindert andere. Voor het scheiden van waterstof uit een aardgasmengsel kan een membraan worden gebruikt dat selectief is voor waterstof.

Er zijn verschillende soorten membranen die voor waterstofscheiding kunnen worden gebruikt, waaronder polymeermembranen, anorganische membranen en organische metaalframes (MOF). Polymeermembranen zijn gemaakt van polymeren zoals polysulfonen en polyamiden, en ze worden vaak gebruikt voor het scheiden van waterstof uit aardgasmengsels vanwege hun hoge selectiviteit voor waterstof. Anorganische membranen, zoals keramische en glazen membranen, worden ook gebruikt voor waterstofscheiding, maar zij zijn over het algemeen minder selectief dan polymeermembranen. MOF zijn een relatief nieuw type membraan met een hoog oppervlak en instelbare poriëngrootte, waardoor zij gassen zeer efficiënt kunnen scheiden.

Bij het scheiden van waterstof uit een aardgasmengsel met behulp van een membraan wordt het gasmengsel aan één kant onder druk gezet, terwijl aan de andere kant een lagere druk wordt gehandhaafd. De waterstofmoleculen kunnen dan door het membraan naar de kant met de lagere druk, terwijl de andere gassen er niet doorheen kunnen. De afgescheiden waterstof kan dan worden opgevangen en gebruikt als brandstof of grondstof voor chemische processen.

Het is belangrijk op te merken dat de efficiëntie van het scheidingsproces kan worden beïnvloed door een aantal factoren, waaronder het gebruikte type membraan, het drukverschil over het membraan

en de temperatuur van het gasmengsel. Bovendien hangt de zuiverheid van de afgescheiden waterstof af van de selectiviteit van het membraan en de samenstelling van het uitgangsgasmengsel.

Het is nog een vrij nieuw en niet goed getest proces. Toch is het gebruik van de huidige gasinfrastructuur een grote kans en maakt het een aanzienlijke verlaging van de kosten voor het vervoer van H₂ en een verlaging van de eindprijs voor de klant mogelijk. Een membraanscheider zelf is een relatief goedkoop apparaat met mogelijkheden voor schaalbaarheid. Helaas stuiten wij ook hier op bepaalde onvolkomenheden, bijvoorbeeld een onvolledige gasscheiding. Deze technologie is ook moeilijk toepasbaar in secties die vertakt zijn. In dit geval gaat het om een probleem dat verband houdt met de ongelijke verdeling van waterstof in de samenstellende takken. Hierdoor zouden sommige klanten te weinig waterstof kunnen ontvangen. Het risico van een tekort aan geleverde energie is over het algemeen al duidelijk bij het hele idee van een dergelijk systeem. Indien bijvoorbeeld slechts 20% van de pijpleidingen "gereserveerd" zou zijn voor waterstof, d.w.z. voor het enige medium dat energie voor de eindafnemer vervoert, zou er sprake zijn van een aanzienlijke vermindering van de accumulatie- en overdrachtscapaciteit van een dergelijke pijpleiding (Galík, 2021, s. 63).

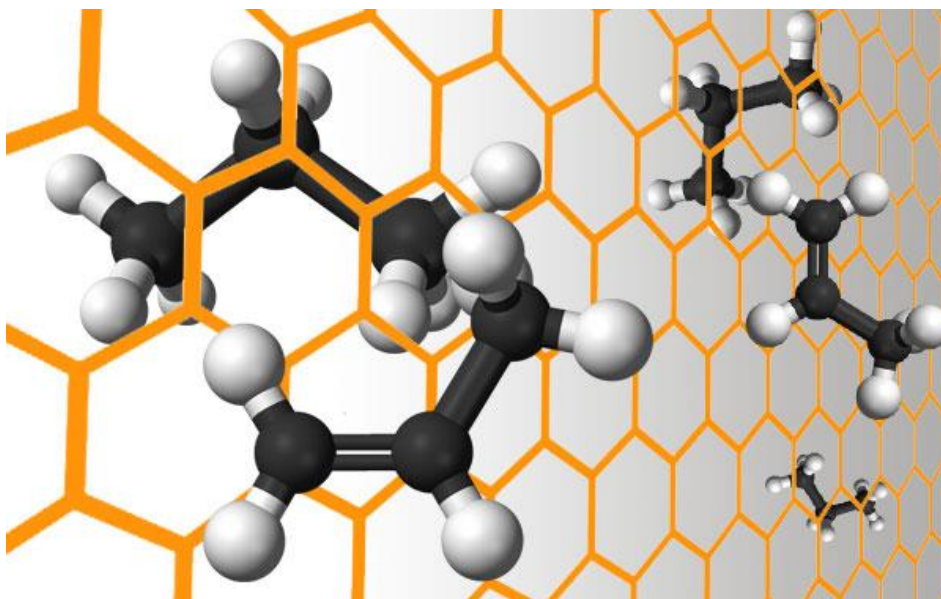


Foto nr. 4: Membraangasscheiding.

1.7 SCHOON WATERSTOFTRANSPORT VIA EEN BESTAANDE GASLEIDING DIE IS AANGEPAST AAN SCHONE WATERSTOF

Het is mogelijk waterstof door een bestaande aardgaspijpleiding te vervoeren door de pijpleiding aan te passen om het waterstofgas aan te kunnen. Dit kan gebeuren door de druk van de pijpleiding te verlagen, de wanddikte van de pijpleiding te vergroten om de hogere druk van waterstofgas te kunnen weerstaan, en waterstofspectifieke materialen aan de pijpleiding toe te voegen om corrosie te

voorkomen. Het aanpassen van een bestaande aardgaspijpleiding voor het vervoer van waterstof staat bekend als "hergebruik".

Dit proces omvat een aantal stappen, waaronder:

- Reinigen en doorspoelen van de pijpleiding: De pijpleiding moet worden gereinigd en gezuiverd van alle aardgasresten of andere verontreinigingen voordat waterstof erdoor kan worden getransporteerd.
- Inspectie van de pijpleiding: De pijpleiding moet worden geïnspecteerd op gebreken of schade die de integriteit ervan tijdens de waterstoftransport in gevaar kunnen brengen.
- Noodzakelijke reparaties uitvoeren: Alle gebreken of beschadigingen die tijdens het inspectieproces worden vastgesteld, moeten worden hersteld voordat de pijpleiding kan worden gebruikt voor het transport van waterstof.
- Aanpassing van de werking van de pijpleiding: Het is mogelijk dat de werkdruk en het debiet van de pijpleiding moeten worden aangepast aan de waterstoftransmissie.
- Toevoeging van waterstofs specifieke infrastructuur: Het is mogelijk dat de pijpleiding moet worden uitgerust met aanvullende infrastructuur, zoals waterstofs specifieke compressoren, om het transport van waterstof te vergemakkelijken.
- Zorgen voor veiligheid: Het is belangrijk om veiligheidsmaatregelen toe te passen, zoals het installeren van waterstofdetectoren en noodafsluitingssystemen, om de veilige transmissie van waterstof door de pijpleiding te garanderen.
- Vervanging van instrumentatie voor elektrische apparatuur van ATEX IIC-klasse in de waterstoffabriek/pijpleiding.

Een potentieel voordeel van het gebruik van een bestaande pijpleiding voor waterstoftransport is dat het tijd en geld kan besparen in vergelijking met de aanleg van een nieuwe pijpleiding speciaal voor waterstof. Er zijn echter ook enkele uitdagingen en risico's verbonden aan het hergebruik van een pijpleiding voor waterstof. Het is bijvoorbeeld belangrijk om de toestand van de pijpleiding zorgvuldig te beoordelen en ervoor te zorgen dat deze geschikt is voor het vervoer van waterstof. Ook de gevolgen voor de plaatselijke gemeenschap en het milieu tijdens het hergebruik zijn belangrijk.

De European Hydrogen Backbone-studie gaat ervan uit dat 75 procent van het waterstofdistributienetwerk gebaseerd moet worden op de bestaande infrastructuur, de overige 25 procent zal moeten worden opgebouwd. De EU rekent met een tekort aan schone waterstof tot zeker 2030, waardoor import nodig zal zijn (Galík, 2021, s. 62).

Waterstof kan uit veel meer landen komen dan aardgas. Dit maakt de invoer minder geopolitiek afhankelijk.

1.8 VERVOER VAN ZUIVERE WATERSTOF VIA EEN NIEUW AANGELEGDE PIJPLEIDING

Waterstof kan net als aardgas in gasvorm door pijpleidingen worden getransporteerd. De aanleg van een waterstofpijpleiding is vergelijkbaar met die van een aardgaspijpleiding, met enkele belangrijke verschillen om rekening te houden met de unieke eigenschappen van waterstof.

Hier volgen enkele belangrijke overwegingen voor de aanleg van een waterstofpijpleiding:

- **Materialen:** De voor de aanleg van de pijpleiding gebruikte materialen moeten bestand zijn tegen de corrosieve aard van waterstof. Koolstofstaal, bijvoorbeeld, is niet geschikt voor gebruik in waterstofpijpleidingen, omdat het na verloop van tijd kan corroderen. In plaats daarvan kunnen materialen zoals roestvrij staal, aluminium of speciale legeringen zoals inconel of hastelloy worden gebruikt.
- **Diameter van de pijp:** De diameter van de pijp moet worden gekozen op basis van het gewenste debiet en de druk van de waterstof. Aangezien waterstof een lagere dichtheid heeft dan aardgas, kan de vereiste pijpdiameter groter zijn voor een bepaald debiet.
- **Lassen:** Lassen is een kritische stap bij de aanleg van elke pijpleiding, en bij het lassen van waterstofpijpleidingen moeten speciale voorzorgsmaatregelen worden genomen. Waterstof kan met lucht brandbare mengsels vormen, zodat het belangrijk is de lucht rond het lasgebied te zuiveren en beschermgassen te gebruiken om de vorming van explosieve mengsels te voorkomen.
- **Veiligheidssystemen:** Waterstofpijpleidingen moeten over een aantal veiligheidssystemen beschikken om ongelukken en lekken te voorkomen. Daartoe behoren overdrukbeveiliging, lekdetectiesystemen en noodstopsystemen.
- **Vergunningen:** Zoals bij elk groot bouwproject moeten voor de aanleg van een waterstofpijpleiding de nodige vergunningen en goedkeuringen van de betrokken overheidsinstanties worden verkregen.

In het algemeen vereist de aanleg van een waterstofpijpleiding zorgvuldige planning en aandacht voor details om een veilig en efficiënt vervoer van waterstof te waarborgen.

Vervoer via gaspijpleidingen wordt gerealiseerd in geval van de combinatie van vele producenten en afnemers op één plaats. In de wereld zijn er veel vrij grote netwerken, waarvan het belangrijkste

waarschijnlijk in Duitsland ligt, waar de totale lengte van het netwerk meer dan 200 km bedraagt. De werkdruk in dit netwerk is 2,5 MPa, de transportcapaciteit van het netwerk is 50 miljoen m³ per uur. De pijpleiding heeft een diameter van 20 cm en ligt een meter onder de grond. Het operationeel verlies bedraagt ongeveer 1%. In de VS (Texas) is er een netwerk van 96 km lang met soortgelijke parameters. Andere zijn kleiner, bijvoorbeeld in Frankrijk, het VK en andere landen. Er zijn meer dan 1000 operationele waterstofpijpleidingen in de wereld (Šváb, 2006, s. 25-26).



Foto nr. Foto 5: Waterstofvervoer per pijpleiding.

1.8.1 DE EUROPESE WATERSTOF BACKBONE /NETWERK

De Europese waterstofbackbone (EHB) is een voorgesteld infrastructuurproject dat het gebruik van waterstof als schone energiebron in Europa moet ondersteunen. Het is bedoeld als een uitgebreid netwerk van waterstofproductie-, opslag- en distributiefaciliteiten die in de hele Europese Unie (EU) zullen worden gebouwd. Het doel van de Europese waterstofbackbone is de grootschalige invoering van waterstoftechnologieën in de EU mogelijk te maken, met name in sectoren waar het moeilijk is om waterstof met andere technologieën koolstofvrij te maken.

De Europese waterstofbackbone zal naar verwachting een belangrijk onderdeel vormen van de inspanningen van de EU om haar energiesysteem koolstofvrij te maken en haar klimaat- en energiedoelstellingen te halen. Het moet de ontwikkeling van een aantal sectoren ondersteunen, waaronder vervoer, industrie en elektriciteitsopwekking.

De specifieke details van de Europese waterstofbackbone, met inbegrip van de exacte locatie van productie-, opslag- en distributiefaciliteiten, zijn nog niet definitief vastgesteld. De Europese Commissie heeft echter een aantal belangrijke uitdagingen geïdentificeerd die moeten worden aangepakt om de Europese waterstofruggengraat te verwezenlijken. Deze uitdagingen omvatten:

- Ontwikkeling van kosteneffectieve en efficiënte productietechnologieën: Waterstof kan worden geproduceerd met behulp van verschillende technologieën, waaronder elektrolyse, methaanreforming met stoom en vergassing van biomassa. Deze technologieën zijn momenteel echter relatief duur en inefficiënt, en er zullen verbeteringen nodig zijn om de productie van waterstof concurrerend te maken met andere energiebronnen.
- De noodzakelijke infrastructuur aanleggen: Om het grootschalige gebruik van waterstof te ondersteunen is een uitgebreid netwerk van productie-, opslag- en distributiefaciliteiten nodig. Dit vereist aanzienlijke investeringen in infrastructuur, waaronder pijpleidingen, opslagtanks en tankstations.
- Zorgen voor de veiligheid en betrouwbaarheid van waterstofsysteem: Waterstof is een licht ontvlambaar gas en er moet voor worden gezorgd dat de waterstofsysteem veilig en betrouwbaar zijn. Dit vereist de ontwikkeling van passende veiligheidsnormen en de vaststelling van solide veiligheidsprocedures.
- Het overwinnen van regelgevingsbarrières: De ontwikkeling van de Europese waterstofruggengraat vereist coördinatie van de inspanningen in een aantal verschillende landen en sectoren. Dit vereist de ontwikkeling van een regelgevingskader dat bevorderlijk is voor de ontwikkeling van waterstoftechnologieën.

In het algemeen is de Europese waterstof waterstofbackbone een ambitieus en complex project dat aanzienlijke investeringen en coördinatie zal vergen om succesvol te zijn. Indien het slaagt, kan het echter een belangrijke rol spelen bij het koolstofvrij maken van het energiesysteem van de EU en het bereiken van haar klimaat- en energiedoelstellingen.

De totale investeringskosten van de beoogde Europese waterstofbackbone in 2040 zullen naar verwachting variëren van 27 tot 64 miljard euro, wat de volledige kapitaalkosten van de aanleg en aanpassing van de ruggengraat dekt. Dit is vergelijkbaar met de honderden miljarden aan investeringen in groene waterstofproductie die de waterstofstrategie van de EG reeds voor de periode tot 2030 voorziet. De backbone van 22.900 km zal bestaan uit 75% achteraf aangelegde pijpleidingen, met diameters tussen 60 en 120 cm, en zal een transportcapaciteit van 3-13 GW (LHV) per pijpleiding bieden. In het middelste geval wordt 60% van de totale investeringskosten besteed aan pijpleidingwerkzaamheden en de resterende 40% aan compressieapparatuur.

Hoewel 75% van het totale netwerk of bijna 18.000 km zal bestaan uit aangepaste infrastructuur, vertegenwoordigt dit slechts ongeveer 50% van de totale investering, hetgeen de waarde aantoont van het gebruik van bestaande pijpleidingen (European Hydrogen Backbone Report, 2020, s. 11).

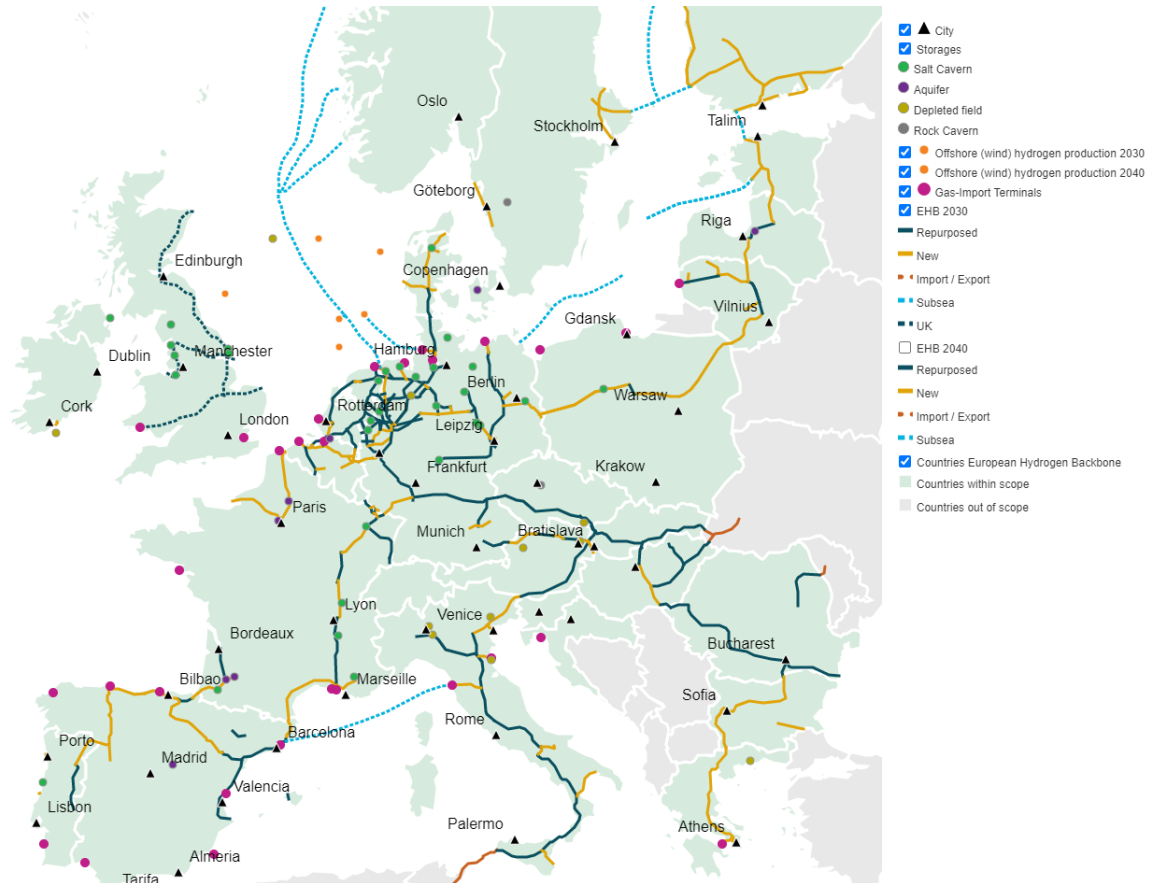


Foto nr. 6: De Europese waterstofrugengraat 2030.

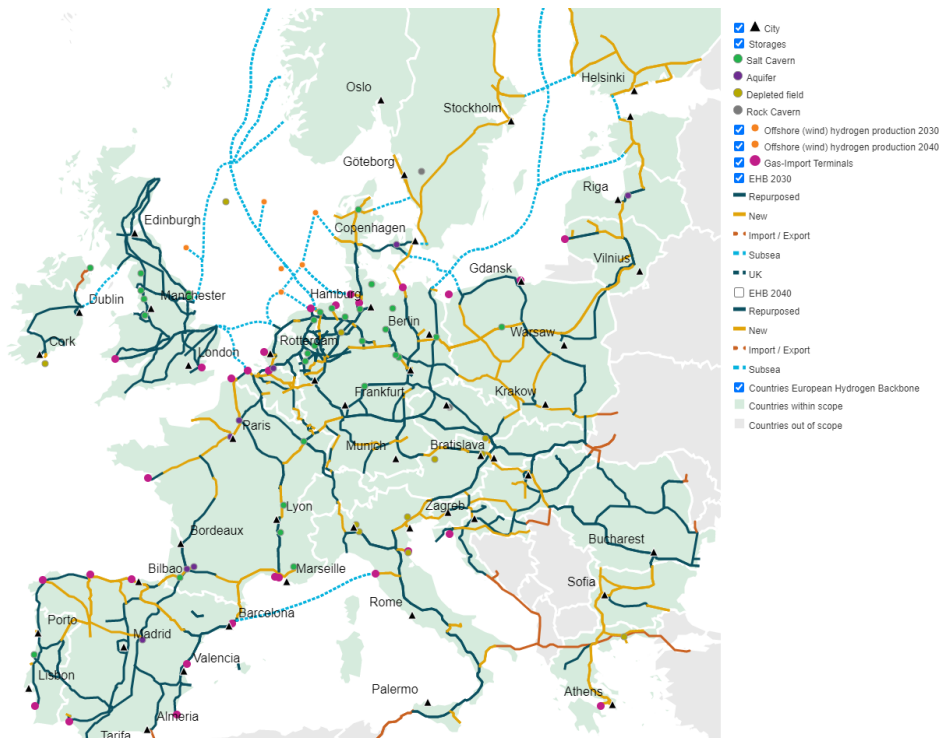
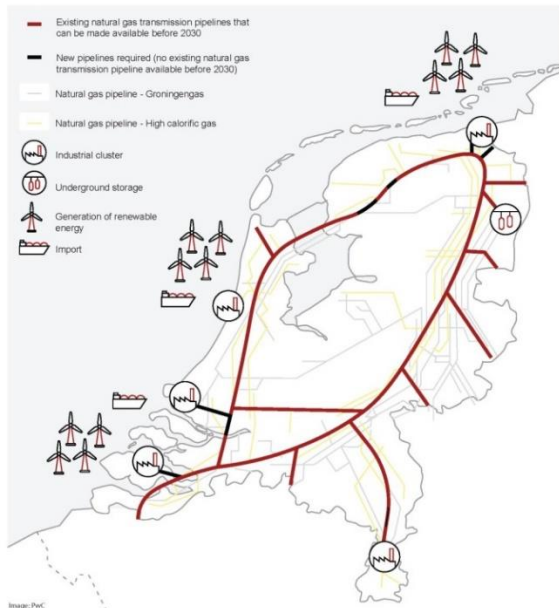


Foto nr. 7: De Europese waterstofruingengraat 2040.

1.8.2 VOORBEELD VAN DE REALISATIE VAN EEN NATIONAAL WATERSTOFNETWERK

HyWay 27: Realisation of a national hydrogen network

The Ministry of Economic Affairs and Climate Policy, together with Gasunie and TenneT carried out the HyWay 27 study. The study concluded that the current natural gas transmission network provides a cost-efficient basis for safe hydrogen transmission. The national hydrogen infrastructure, including connections to storage facilities, is needed to realise the Netherlands' hydrogen ambitions by 2030. This report makes the following recommendations.



- 1. Take a decision in principle**
 Zero-carbon hydrogen requires new transmission supply chains, both in 2030 and in the intervening years as well. In order to achieve this in good time, a decision in principle must be taken in the short term to repurpose a part of the existing natural gas transmission networks for the transmission of hydrogen. Existing pipelines will be ready sooner for the transmission of hydrogen and repurposing them is cheaper than building new pipelines.
- 2. Draw up a rollout plan**
 Where will the transmission network be located and what actions have to be taken? Draw up a rollout plan containing the envisioned contours of the transmission network in 2030. Describe the actions that will be needed in the coming years. Striking the right balance is key. On the one hand, the rollout plan must provide potential hydrogen consumers with clarity on when the infrastructure will be available and, on the other hand, a step-by-step rollout must ensure that there is room to adapt to developments as these emerge.
- 3. Determine how the market will be regulated**
 The further the hydrogen market grows, the more the infrastructure developed will need to be regulated. Who is to be allowed to operate in the market and under what conditions? Only with clarity on how to regulate the hydrogen market can it be decided in the short term who is to be responsible for repurposing the natural gas networks and ultimately for the operation of the newly created hydrogen transmission network.
- 4. Draw up a plan to kick-start the supply chain**
 Investing in a hydrogen transmission network is not a sound decision if there is too little supply and demand. That is why government intervention and clarity on financial resources is necessary if we are to develop the supply chain and, this way, achieve the ambitions for 2030. Furthermore, it must be determined how the public money can best be distributed among the different parts of the chain.

Foto nr. 8: HyWay 27 infographics.

1.9 LOHC

Vloeibare organische waterstofdragers (LOHC) zijn organische verbindingen die waterstof kunnen absorberen en afgeven via chemische reacties. Daarom kunnen LOHC worden gebruikt als opslagmedium voor waterstof. In principe kan elke onverzadigde verbinding (organische moleculen met dubbele of drievoudige bindingen) waterstof binden tijdens hydrogenatie.

LOHC zijn materialen die waterstof in vloeibare vorm kunnen opslaan, waardoor het potentieel gemakkelijker te vervoeren en als brandstof te gebruiken is. Wanneer waterstof wordt opgelost in een LOHC, wordt het een stabiel en relatief veilig opslagmateriaal. De waterstof kan uit de LOHC worden vrijgemaakt door deze te verhitten of door een kleine hoeveelheid druk uit te oefenen.

Er zijn verschillende soorten LOHC ontwikkeld, waaronder LOHC op basis van pyridine, LOHC op basis van amine en LOHC op basis van alcohol. Deze materialen hebben verschillende eigenschappen en kunnen meer of minder geschikt zijn voor verschillende toepassingen.

Een voordeel van LOHC is dat zij waterstof met een relatief hoge dichtheid kunnen opslaan, waardoor het mogelijk wordt grote hoeveelheden waterstof in een klein volume te vervoeren. Dit zou ze nuttig kunnen maken voor toepassingen zoals brandstofcelvoertuigen, waarbij de waterstof aan boord van het voertuig moet worden opgeslagen.

LOHC zijn nog steeds een actief onderzoeksgebied, en er moeten nog veel uitdagingen worden aangepakt voordat zij op grote schaal kunnen worden gebruikt. Er moet bijvoorbeeld verder worden gewerkt aan de verbetering van de efficiëntie van het opslag- en vrijgaveproces, en aan het vinden van materialen die stabiel en veilig zijn gedurende lange perioden.

In 2020 bouwde Japan de eerste internationale keten van waterstofleveranciers ter wereld tussen Brunei en Kawasaki City. Het maakt gebruik van LOHC-technologieën op toluenbasis. Hyundai Motor investeert in de ontwikkeling van stationaire en boordsystemen LOHC.

1.9.1 VOORBEELD VAN HET GEBRUIK VAN LOHC IN DE PRAKTIJK

Waterstofrijke LOHC-technologieën

Hydrogenious LOHC Technologies is een Duitse onderneming die gespecialiseerd is in de ontwikkeling van vloeibare organische waterstofdragers (LOHC) voor de opslag en het transport van waterstof. De LOHC-technologie van het bedrijf gebruikt een speciale klasse van organische verbindingen, cycloalkanen genaamd, om waterstof bij omgevingstemperatuur en -druk in vloeibare vorm op te

slaan. De opgeslagen waterstof kan dan gemakkelijk worden vervoerd en gebruikt als brandstofbron voor voertuigen of in industriële processen. De technologie heeft het potentieel om de efficiëntie en haalbaarheid van het gebruik van waterstof als brandstof aanzienlijk te verhogen.



Foto nr. 9: Stationaire LOHC-infrastructuur - OpslagPLANTS van Hydrogenious.



Foto nr. 10: Stationaire LOHC-infrastructuur - ReleasePLANTS van Hydrogenious.

1.10 SAMENVATTING: TRANSPORT EN OPSLAG VAN WATERSTOF

Waterstof, een schone energiedrager, wordt getransporteerd via vrachtwagens, schepen, spoorwegen en pijpleidingen. Cryogene tankwagens vervoeren LH2 bij -253°C voor efficiënt wegtransport, terwijl maritiem transport geschikt is voor grote hoeveelheden LH2 of gecompriemd waterstofgas. Pijpleidingtransport is efficiënt voor korte afstanden, vanwege de neiging van waterstof om te lekken.

Voor het wegtransport van samengeperste waterstof worden hogedruktanks van koolstofvezel of staal gebruikt. Spoorvervoer, dat grotere hoeveelheden over langere afstanden mogelijk maakt, is relatief kosten- en milieuefficiënt. Een vrachtwagen kan tot 1.100 kg waterstof in gasvorm vervoeren, terwijl vloeibare waterstof tot 3.500 kg haalt. Voertuigen op waterstof gebruiken kleinere tanks die drukken van 350 tot 700 bar aankunnen.

De opslag van LH2 is uitdagend vanwege het energie-intensieve liquefactieproces, met dagelijkse verdampingsverliezen van 3%. Innovaties zoals de ortho-naar-parawaterstof conversie zijn essentieel voor het verbeteren van de efficiëntie. De Toyota Mirai, die 650 km kan rijden met 5,6 kg waterstof, benadrukt de vooruitgang in brandstofceltechnologie en -opslag, wat leidt tot kleinere en lichtere tanks.

Waterstof-verrijkt aardgas (HENG) kan door bestaande aardgaspijpleidingen worden getransporteerd, waarbij aandacht nodig is voor corrosiepreventie. De distributiekosten voor gas worden berekend op basis van energie-eenheden, waarbij de lagere energie-inhoud van waterstof wordt gecompenseerd door de lagere weerstand tijdens transport.

Membraangasscheiding scheidt waterstof uit aardgasmengsels, wat het gebruik van bestaande gasinfrastructuur mogelijk maakt, maar deze technologie moet nog worden geperfectioneerd.

Voor schone waterstof is aanpassing van bestaande gasleidingen nodig. Het hergebruik omvat het reinigen van de pijpleiding, inspectie en eventuele reparaties, en aanpassingen aan operationele parameters. De European Hydrogen Backbone (EHB) is een voorgesteld netwerk om waterstof als schone energiebron in Europa te ondersteunen, met aanzienlijke investeringen nodig.

LOHC-technologieën kunnen waterstof veilig en efficiënt opslaan en vervoeren, wat zeer relevant is voor de waterstofeconomie. Deze technologie is nog in ontwikkeling, met Japan als een pionier in de praktische toepassing van LOHC.

De toekomst van waterstoftransport omvat continue verbeteringen in productie-efficiëntie en infrastructuurontwikkeling, die essentieel zijn voor het ondersteunen van de overgang naar een duurzame energievoorziening en het behalen van klimaat- en energiedoelstellingen

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
Liquefied 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

Tabel nr. 1: Vergelijking van de methoden voor het vervoer van waterstof.

1.11 MULTIPLE-CHOICE VRAGEN

- 1) Op welke temperatuur moet vloeibare waterstof (LH2) worden vervoerd?
 - A) -153°C
 - B) -253°C
 - C) -73°C
 - D) 0°C

- 2) Welk transportmiddel biedt de mogelijkheid om grote hoeveelheden waterstof over lange afstanden te vervoeren?
 - A) Vrachtwagen
 - B) Vliegtuig
 - C) Schip
 - D) Zeppelin

- 3) Wat is een van de uitdagingen bij het transport van waterstof via pijpleidingen?
 - A) Lagere snelheid dan vloeistoftransport
 - B) Hogere kosten dan spoorvervoer
 - C) Neiging tot gemakkelijkere lekkage dan aardgas
 - D) Moeilijkheden met temperatuurcontrole

- 4) Welke tanks worden doorgaans gebruikt voor het wegtransport van samengeperste waterstof?
 - A) Stalen tanks met lage druk
 - B) Aluminiumtanks
 - C) Hogedruktanks van koolstofvezel of staal
 - D) Flexibele containers

- 5) Hoeveel procent van het volume aan LH2 gaat dagelijks verloren tijdens de opslag?
 - A) 1%
 - B) 2%
 - C) 3%
 - D) 4%

- 6) Wat kenmerkt de orthovorm (o-H₂) van waterstofmoleculen?
- A) Anti-parallelle spins
 - B) Parallelle spins
 - C) Lage enthalpie bij hoge temperaturen
 - D) Lage stabiliteit bij lage temperaturen
- 7) Welk risico brengt een zuurstofconcentratie van meer dan 1 mg per kg in waterstof met zich mee?
- A) Verminderde efficiëntie
 - B) Verhoogde corrosie
 - C) Verhoogde druk
 - D) Explosiegevaar
- 8) Wat demonstreert de Toyota Mirai met betrekking tot waterstoftechnologie?
- A) Behoeft aan frequente tankstops
 - B) Beperkte actieradius
 - C) Vooruitgang in brandstofceltechnologie
 - D) Problemen met energiedichtheid
- 9) Wat is een uitdaging bij het gebruik van bestaande aardgaspijpleidingen voor het transport van waterstof?
- A) Verhoogde drukvereisten
 - B) Verminderde brandwaarde van het gas
 - C) Verminderde warmteoverdrachtsefficiëntie
 - D) Materiaalcompatibiliteit en corrosiepreventie
- 10) Wat is de typische concentratie van waterstof in waterstof-verrijkt aardgas (HENG)?
- A) 5% tot 10%
 - B) 10% tot 20%
 - C) 20% tot 30%
 - D) 30% tot 40%

1.11.1 ANTWOORDEN:

B) -253°C - LH2 wordt bij extreem lage temperaturen vervoerd om het volume te verkleinen en transport efficiënter te maken.

C) Schip - Grote hoeveelheden waterstof kunnen efficiënt worden vervoerd over lange afstanden via schepen.

C) Neiging tot gemakkelijkere lekkage dan aardgas - Pijpleidingtransport van waterstof is vooral effectief voor kortere afstanden vanwege lekkageproblemen.

C) Hogedruktanks van koolstofvezel of staal - Voor wegtransport van samengeperste waterstof worden hogedruktanks gebruikt.

C) 3% - Er is een dagelijks verlies van ongeveer 3% van het volume van opgeslagen LH2.

B) Parallele spins - Orthovorm waterstofmoleculen kenmerken zich door atomen met parallelle spins.

D) Explosiegevaar - Een zuurstofconcentratie van meer dan 1 mg per kg in waterstof kan explosiegevaar opleveren.

C) Vooruitgang in brandstofceltechnologie - De Toyota Mirai bereikt een aanzienlijke actieradius op een relatief kleine hoeveelheid waterstof, wat duidt op vooruitgang in de technologie.

D) Materiaalcompatibiliteit en corrosiepreventie - Bestaande aardgaspijpleidingen moeten compatibel zijn met waterstof om corrosie te voorkomen.

B) 10% tot 20% - HENG bevat typisch tussen de 10% en 20% waterstof.

2 WATERSTOFOPSLAG

INLEIDING

Waterstof kan op verschillende manieren worden opgeslagen, onder meer als gas, als vloeistof of in vaste vorm. Elke methode heeft zijn eigen voor- en nadelen, en de meest geschikte methode voor een bepaalde toepassing hangt af van de specifieke eisen en beperkingen van die toepassing.

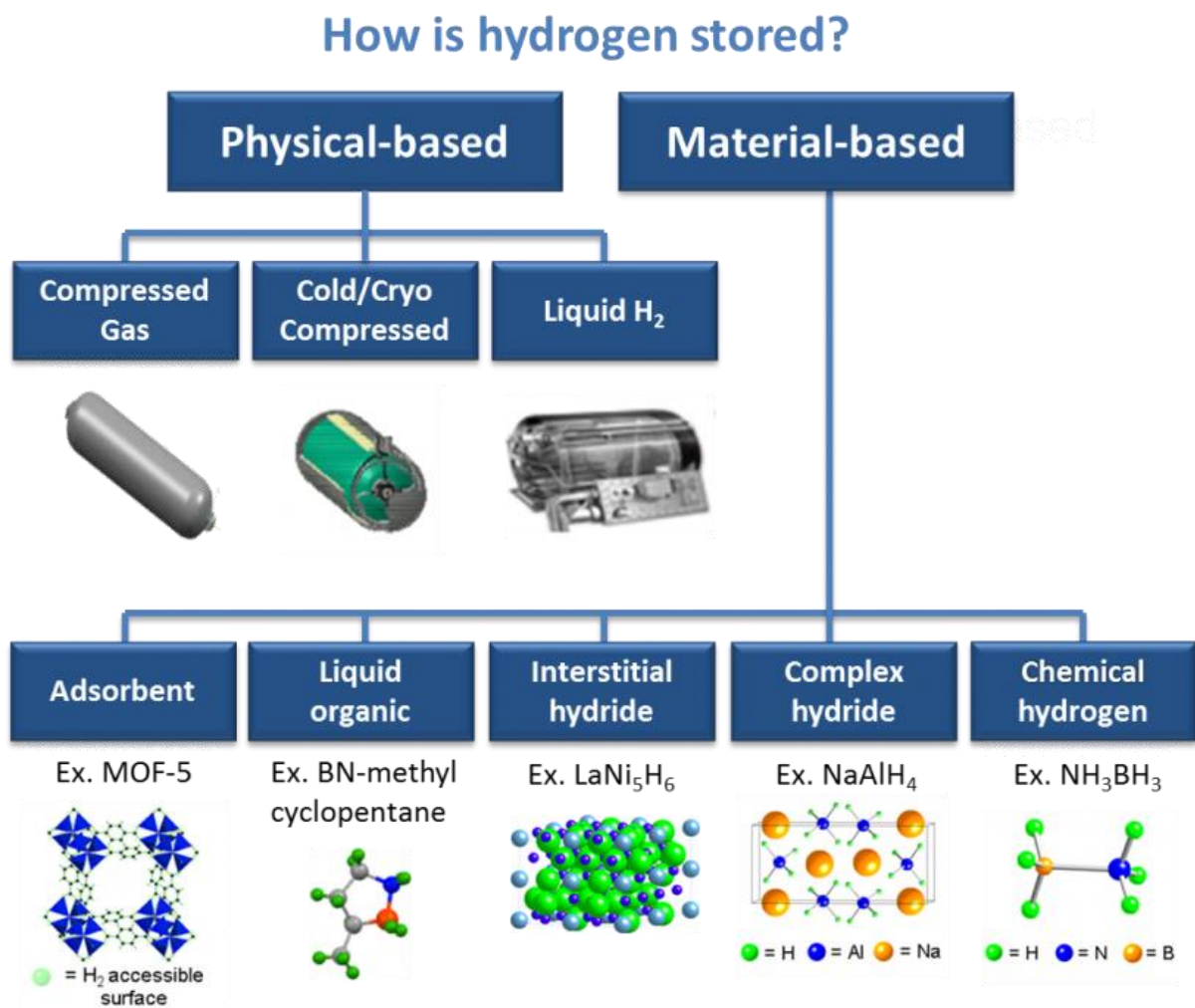


Foto nr. 11: Opslagmethoden voor waterstof.

Eén manier om waterstof op te slaan is als gas, wat kan worden gedaan door het onder druk te zetten in een tank of cilinder. Dit is een eenvoudige en relatief goedkope methode, maar de opslagdichtheid is relatief laag, zodat een groot volume nodig is om een significante hoeveelheid waterstof op te slaan. Bovendien kunnen hogedruktanks zwaar zijn en speciale behandeling en veiligheidsmaatregelen vereisen.

Een andere manier om waterstof op te slaan is als vloeistof, wat kan worden bereikt door het af te koelen tot een temperatuur onder het kookpunt. Vloeibare waterstof heeft een zeer hoge opslagdichtheid, zodat het mogelijk is een grote hoeveelheid op te slaan in een relatief klein volume. De cryogene temperatuur van vloeibare waterstof (-253°C) vereist echter het gebruik van gespecialiseerde systemen voor isolatie en thermisch beheer, die duur kunnen zijn.

Waterstof kan ook in vaste vorm worden opgeslagen, door het te adsorberen aan het oppervlak van een poreus materiaal. Deze methode heeft het voordeel dat zij relatief eenvoudig en veilig is, en een hoge opslagdichtheid kan bereiken. De snelheid waarmee waterstof kan worden geadsorbeerd en gedesorbeerd uit het opslagmateriaal kan echter traag zijn, wat het praktische nut van deze methode in sommige toepassingen kan beperken.

Er bestaan ook andere methoden van waterstofopslag, zoals chemische opslag en metaalhydrideopslag. Bij deze methoden worden chemische verbindingen of metalen gebruikt die reversibel met waterstof kunnen reageren tot stabiele verbindingen, die vervolgens kunnen worden opgeslagen totdat zij nodig zijn. Deze methoden kunnen hoge opslagdichtheden bereiken en zijn relatief veilig, maar zij kunnen worden beperkt door de snelheid waarmee waterstof kan worden geabsorbeerd en vrijgegeven, alsmede door de kosten en de beschikbaarheid van de opslagmaterialen.

TREFWOORDEN

Samengeperste waterstof, druktank, vloeibare waterstof, cryogene opslagtanks, ondergrondse containers, gasstructuren, waterstofhydriden, metaalhydriden

2.1 OPSLAG VAN GECOMPRIMEERDE WATERSTOF

Vanwege de lage dichtheid moet waterstof onder hoge druk in druktanks opgeslagen worden. Deze tanks dienen bestand te zijn tegen druk en schokken en moeten stevig bevestigd worden (met behulp van een momentsleutel) om lekkage te voorkomen. Waterstof heeft een kleine moleculaire omvang, wat betekent dat voor de opslag specifieke materialen nodig zijn. Bij contact met onbehandeld staal of aluminium kan waterstofbrosheid optreden, wat de integriteit van drukvaten kan aantasten. Dit

vereist opnieuw het gebruik van gespecialiseerde materialen. Het comprimeren van waterstof is energie-intensief, aangezien het gas een slechte compressibiliteit heeft en een negatieve Joule-Thomson-coëfficiënt bezit, wat betekent dat er aanzienlijk meer energie nodig is om het te comprimeren dan bij andere gassen. Voor de stationaire opslag van waterstof worden vaak grote hoeveelheden stalen druktanks of composietmaterialen ingezet, zoals beschreven in de 'Vodíková strategie' van de Tsjechische Republiek. (Vodíková strategie České republiky, 2021, s. 81).

Het Joule-Thomson-effect, ook bekend als het Joule-Kelvin-effect, is de temperatuurverandering van een gas of vloeistof wanneer deze uitzet of door een kleine opening of poreus materiaal wordt geperst. Dit effect is genoemd naar James Joule en William Thomson (Lord Kelvin).

Het Joule-Thomson-effect kan worden waargenomen wanneer men een gas onder hoge druk door een kleine opening of een poreus materiaal laat uitzetten. Als het gas uitzet, daalt zijn temperatuur. Dit komt doordat de uitzetting van het gas arbeid verricht in de omgeving, waarvoor energie nodig is. De energie die hiervoor nodig is, wordt onttrokken aan de interne energie van het gas, waardoor de temperatuur daalt.

De Joule-Thomson-coëfficiënt is een maat voor de temperatuurverandering van een gas of vloeistof bij uitzetting. De coëfficiënt is voor de meeste gassen positief, wat betekent dat de temperatuur van het gas afneemt als het uitzet. Voor vloeistoffen kan de Joule-Thomson-coëfficiënt positief of negatief zijn, afhankelijk van de specifieke eigenschappen van de vloeistof.

Het Joule-Thomson-effect heeft praktische toepassingen in koeling en airconditioning, maar ook in de olie- en gasindustrie, waar het wordt gebruikt om de temperatuur en de druk van aardgas in verschillende stadia van het productieproces te meten.

Bij stationaire opstellingen kiest men doorgaans voor lasvrije cilinders van laag-koolstofstaal of gelegeerd staal. Deze cilinders worden geproduceerd met capaciteiten variërend van enkele liters tot ongeveer 50 liter voor standaardtoepassingen. Voor toepassingen in transportmiddelen wordt vaker gebruik gemaakt van composiet drukvaten. Deze zijn beschikbaar voor volumes van enkele tientallen liters tot ongeveer 300 liter. De gebruikelijke werkingsdruk voor deze vaten is 350 bar, maar bij de meest geavanceerde toepassingen zien we drukken tussen 450 en 700 bar. Afhankelijk van de inbouwisen binnen de opslagruimte van een voertuig, kan de klassieke cilindervorm enigszins worden aangepast. Waterstof moet, voordat het in hogedrukreservoirs wordt opgeslagen, gecomprimeerd worden tot de gewenste druk. Voor deze compressie worden meestal zuigercompressoren ingezet. Het energieverbruik voor het comprimeren van waterstof tot 350 bar is ongeveer 30% van de energie-inhoud van de waterstof zelf (Krátky, 2012, s. 37).



Foto nr. 12: Waterstof druktanks.

De volgende mogelijkheid van waterstofopslag in gasvorm is opslag in ondergrondse opslagplaatsen. Dat zijn meestal enkele ontgonnen zoutmijnen of grotten met aardgas en lege gasvelden. In de wereld wordt deze methode op verschillende plaatsen gebruikt, bijvoorbeeld in Amarillo in Texas (850 miljoen m³), in het Franse Beynes (330 miljoen m³), in het Engelse Billington (2,2 miljoen m³). Andere opslagplaatsen zijn bijvoorbeeld te vinden in Duitsland en Nederland (Krček, 2010, s. 20).

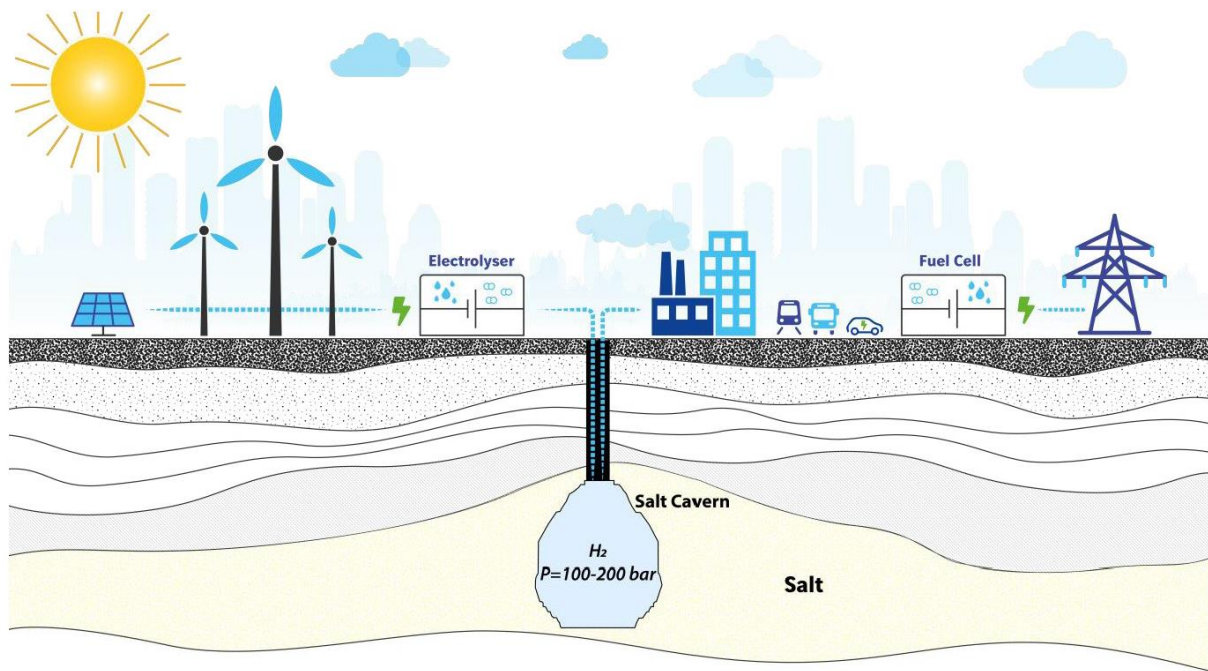


Foto nr. 13: Waterstofopslag in zoutcaverne.

Een andere methode is ondergrondse opslag. Hiervoor worden holtes in zoutmijnen en lege gasvoorraden gebruikt. Zo kan waterstof worden opgeslagen bij drukken tot 110 bar. Hogere drukken kunnen de capillaire kracht overschrijden die het water in de microporiën houdt en resulteren in waterstoflekkage.

2.2 OPSLAG VAN VLOEIBARE WATERSTOF

Bij het ontwikkelen van opslagsystemen voor vloeibare waterstof dient men rekening te houden met diverse kritieke aspecten. Materiaalkeuze voor de opslagtank is cruciaal; deze moet bestand zijn tegen de extreem lage temperaturen van vloeibare waterstof (-253°C) en de drukvariaties door thermische uitzetting en krimp van het gas. Roestvast staal en aluminium zijn veelgebruikte materialen voor deze tanks en vereisen specifieke behandelingen om weerstand tegen corrosie en scheurvorming bij lage temperaturen te garanderen.

Thermische isolatie is ook essentieel om te voorkomen dat externe warmte de vloeibare waterstof doet verdampen, wat de druk binnenin de tank verhoogt. Dit wordt meestal bereikt met isolatielagen zoals schuim of vacuümgeïsoleerde panelen.

De afmetingen van de opslagtank moeten zowel toereikend zijn voor de vereiste hoeveelheid waterstof als praktisch voor de toepassing. Te grote tanks kunnen problemen opleveren met gewicht en ruimte, terwijl te kleine tanks mogelijk niet voldoende capaciteit bieden.

Veiligheid is een ander belangrijk aspect; het systeem moet lekvrij zijn en uitgerust met veiligheidsmechanismen zoals overdrukventielen en noodstopfuncties. Meerlagige vaten met superieure isolatie worden gebruikt voor de opslag, met een maximale overdruklimiet van 5 bar, voorzien van een overdrukventiel om deze druk te reguleren.

Tijdens de opslag van waterstof in cryogene tanks is er een constante, zij het langzame, verdamping door warmte-influx, waardoor de druk stijgt. Om tankschade te voorkomen, moet deze overdruk beheerst worden door het vrijlaten van de verdampte waterstof. De verdampingsverliezen bij gangbare tanks kunnen oplopen tot 3% per dag, afhankelijk van de isolatiekwaliteit. In sommige gevallen wordt de verdampte waterstof opgevangen en gecomprimeerd in extra drukvaten.

Het liquefactieproces van gas naar vloeistof is technisch complex en energie-intensief. De minimale theoretische energiebehoefte voor het vloeibaar maken van waterstof uit omgevingstoestand (300 K, 1,01 bar) is 3,3 kWh/kg voor vloeibare waterstof (LH2) of 3,9 kWh/kg voor omzetting naar para-waterstof (para-LH2), wat de standaard is. Para-waterstof is een modificatie van waterstof waarbij de spins van de protonen in het waterstofmolecuul gelijkgericht zijn, wat gunstig is voor opslag. De werkelijke energiebehoefte voor liquefactie ligt echter aanzienlijk hoger, meestal tussen de 10-13 kWh/kg LH2, afhankelijk van de schaal van de operatie. Nieuwere methoden zoals actieve magnetische regeneratieve liquefiërs kunnen deze behoefte reduceren tot ongeveer 7 kWh/kg LH2. Ter vergelijking: de lagere verwarmingswaarde (LHV) van waterstof is 33,3 kWh/kg H₂. De benodigde energie voor compressie voor lokale productie varieert van ongeveer 5 tot 20% van de LHV. De huidige liquefactieprocessen (inclusief omzetting naar para-LH2) vereisen 30-40% van de LHV, terwijl de theoretische energiebehoefte voor opslag bij 700 bar en als LH2 slechts 4-10% van de LHV is. (DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record, 2009, blz. 1).



Foto nr. 14: Tank voor vloeibare waterstof.

2.3 OPSLAG VAN WATERSTOF IN ONDERGRONDSE CONTAINERS IN EEN MENGSEL MET METHAAN OF AMMONIAK

Waterstof kan ondergronds worden opgeslagen in containers in een mengsel met methaan of ammoniak, een proces dat bekend staat als "waterstofgasinjectie". Deze methode wordt gebruikt om overtollige waterstof op te slaan die wordt geproduceerd in tijden van geringe vraag, zodat het kan worden teruggewonnen en gebruikt als brandstof of grondstof wanneer het nodig is. Deze aanpak heeft verschillende voordelen:

- Veiligheid: Dankzij waterstofgasinjectie kan waterstof ondergronds worden opgeslagen in een gecontroleerde omgeving, waardoor het risico van lekken en ongevallen wordt beperkt.
- Efficiëntie: Waterstof kan in hoge dichtheid worden opgeslagen wanneer het wordt gemengd met methaan of ammoniak, waardoor meer waterstof kan worden opgeslagen in een kleiner volume.
- Duurzaamheid: injectie van waterstofgas kan de uitstoot van broeikasgassen helpen verminderen doordat overtollige waterstof kan worden opgeslagen en gebruikt als brandstof in plaats van in de atmosfeer terecht te komen.

De toepassing van waterstofgasinjectie brengt verschillende uitdagingen met zich mee, waaronder de noodzaak om geschikte opslagcontainers te ontwikkelen en de kosten van de bouw en exploitatie van de opslagfaciliteiten. Deze aanpak kan echter een belangrijke rol spelen in de toekomstige opslag en distributie van waterstof.

Bij waterstofgasinjectie wordt overtollige waterstof in ondergrondse containers opgeslagen in een mengsel met methaan of ammoniak. Hier wordt nader uitgelegd hoe dit proces werkt:

- Waterstof wordt op verschillende manieren geproduceerd, waaronder elektrolyse, methaanreforming met stoom en vergassing van biomassa. In tijden van geringe vraag wordt een overschot aan waterstof geproduceerd, dat moet worden opgeslagen totdat het nodig is.
- De waterstof wordt geïnjecteerd in ondergrondse opslagcontainers, waar het wordt gemengd met methaan of ammoniak. Het methaan of de ammoniak verhoogt de dichtheid van het mengsel, waardoor meer waterstof in een kleiner volume kan worden opgeslagen.
- Het waterstof-methaanmengsel wordt ondergronds opgeslagen, gewoonlijk op een diepte van enkele honderden meters. De opslagcontainers zijn ontworpen om de druk en de temperatuur op deze diepte te weerstaan.

- Wanneer de waterstof nodig is, wordt deze uit de opslagtanks gehaald en gescheiden van het methaan of de ammoniak. Dit kan op verschillende manieren gebeuren, waaronder pressure swing adsorptie en cryogene destillatie.
- De gezuiverde waterstof kan dan worden gebruikt als brandstof of grondstof in diverse toepassingen, waaronder vervoer, energieopwekking en industriële processen.

2.4 WATERSTOFOPSLAG IN HYDRIDEN

Waterstof kan worden opgeslagen in hydriden, dat zijn materialen die waterstofgas kunnen absorberen en afgeven. Er zijn verschillende soorten hydriden, waaronder metaalhydriden, covalente hydriden en ionische hydriden.

Metaalhydriden worden gevormd wanneer waterstofgas met een metaal reageert tot een vaste verbinding. Deze verbindingen hebben een grote opslagcapaciteit voor waterstof, maar zijn vaak zwaar en omvangrijk, en vereisen een hoge druk om de waterstof vrij te maken.

Covalente hydriden worden gevormd wanneer waterstofatomen zich covalent binden met andere atomen om een verbinding te vormen. Deze verbindingen hebben een matige capaciteit voor waterstofopslag en kunnen bij lagere druk vrijkomen dan metallische hydriden.

Ionische hydriden worden gevormd wanneer waterstofionen zich met andere ionen verbinden tot een verbinding. Deze verbindingen hebben een grote opslagcapaciteit voor waterstof, maar zijn over het algemeen niet zo stabiel als metallische of covalente hydriden en hebben de neiging om bij hoge temperaturen te ontbinden.

Het gebruik van hydriden voor waterstofopslag kent verschillende uitdagingen, waaronder de kosten en de moeilijkheid om de hydriden te produceren en te hanteren, alsmede de lage efficiëntie van het waterstofvrijmakingsproces. Onderzoekers werken aan de ontwikkeling van nieuwe materialen en methoden om deze uitdagingen te overwinnen en waterstofopslag in hydriden praktischer en kosteneffectiever te maken.

Bij normale temperatuur zijn hydriden stabiel, lossen ze niet op en zijn het relatief veilige waterstoftanks. Hun ontbinding vindt plaats bij hoge temperaturen, waarbij waterstof vrijkomt en naar een brandstofcel wordt gebracht.

De waargenomen parameters bij deze systemen zijn voornamelijk de temperatuur waarbij de desorptie van waterstof uit een materiaal plaatsvindt, de gewichtscapaciteit van de absorber (in het

geval van het gehele systeem), de volumecapaciteit van de absorber en last but not least de prijs en de complexiteit van het systeem.

Een van de eisen is dat de ontleding plaatsvindt bij een iets hogere temperatuur (150 - 200°C) om te voorkomen dat de hydrideverwarming te veel energie verbruikt.

Er zijn efficiënte systemen ontworpen die grote hoeveelheden waterstof kunnen absorberen. Bij verschillende soorten hydriden zijn er verschillende hoeveelheden waterstof die de materialen kunnen absorberen. Sommige hydriden zijn gemakkelijk te verwerken vloeistoffen bij kamertemperatuur en atmosferische druk, andere zijn vaste stoffen.

Deze materialen hebben een goede volumetrische energiedichtheid, maar in verhouding tot hun gewicht is hun energiedichtheid niet ideaal. Voor sommige verbindingen met lichte metalen, zoals magnesium, is het totale gewicht van het systeem slechts 30% hoger in vergelijking met de systemen voor de opslag van vloeibare waterstof. Deze ongunstige parameters worden gecompenseerd door een grotere behoefte aan thermische desorptie bij hoge temperatuur, een lage druk van de geproduceerde waterstof en, last but not least, een hoge prijs van de hydriden.

Een andere belangrijke eigenschap is omkeerbaarheid, of het vermogen van een materiaal om opnieuw waterstof op te nemen nadat het de opgeslagen waterstof heeft verbruikt. Dit houdt verband met het "opladen" van hydriden en het herhaalde gebruik ervan, net als bij batterijen (Krátky, 2012, s. 41).

2.4.1 METALEN HYDRYDRIDES

Waterstof, erkend als een energiedrager, kan efficiënt worden opgeslagen in metaalhydriden, die ontstaan door de chemische combinatie van waterstof met metalen. Deze technologie maakt gebruik van de eigenschap van metalen om waterstofatomen in hun kristalrooster te absorberen en vast te houden, en deze onder bepaalde voorwaarden weer vrij te geven.

Er zijn drie hoofdcategorieën van metaalhydriden voor waterstofopslag:

1. Intermetallische hydriden: Dit zijn verbindingen van twee of meer metalen die in staat zijn om significant hoeveelheden waterstof op te slaan. Ze zijn stabiel voor langdurige opslag, maar de vrijgave van waterstof vereist vaak hoge temperaturen of drukken.
2. Complexe hydriden: Deze bestaan uit een metaal en een niet-metaal en staan bekend om hun vermogen om waterstof bij relatief lagere temperaturen vrij te geven in vergelijking met intermetallische hydriden, hoewel ze minder stabiel kunnen zijn.
3. Eenvoudige hydriden: Materialen zoals magnesiumhydride kunnen kleinere hoeveelheden waterstof opslaan en zijn in staat om waterstof bij lage temperaturen vrij te geven, maar zijn minder stabiel dan intermetallische hydriden.

Het proces van waterstofopslag in metaalhydriden is afhankelijk van de opname van atomaire waterstof in het metaalrooster, wat gepaard gaat met warmteproductie (exotherm proces). Bij de vrijgave van waterstof moet warmte worden toegevoerd. De opslagcapaciteit van metaalhydriden kan worden hergebruikt zonder capaciteitsverlies.

Deze technologie heeft een bijzondere potentie voor mobiele toepassingen, zoals in voertuigen die waterstof gebruiken als brandstof. Lage druk en temperatuur, compatibel met de werking van polymereembraanbrandstofcellen, zijn wenselijk voor waterstofdesorptie.

Onderzoek richt zich op thermodynamica, adsorptie- en desorptiekinetiek, en de volumetrische en gravimetrische (gewichtsgelateerde) capaciteiten, naast de kosten en de complexiteit van het proces. Eenvoudige hydriden zoals LaNi_5H_6 zijn voorbeelden van stoffen die onder deze omstandigheden kunnen worden gebruikt, hoewel de lage gravimetrische capaciteit en hoge kosten een uitdaging vormen voor de automobiellindustrie.

Magnesium-gebaseerde materialen en complexe hydriden, zoals LiBH_4 , bieden potentieel hogere gravimetrische capaciteiten, maar hebben uitdagingen met betrekking tot de omkeerbaarheid van waterstofvrijgave en operationele temperaturen. Het verbeteren van de stabiliteit en het verlagen van

de productiekosten blijven belangrijke onderzoeksgebieden voor de ontwikkeling van effectieve waterstofopslagoplossingen.

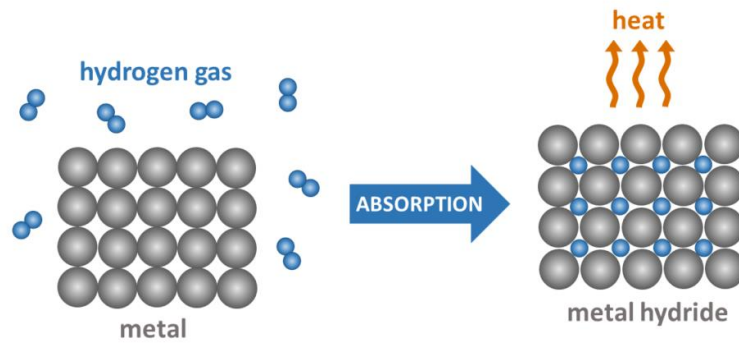


Foto nr. 15: Exotherme waterstofabsorptiereactie.

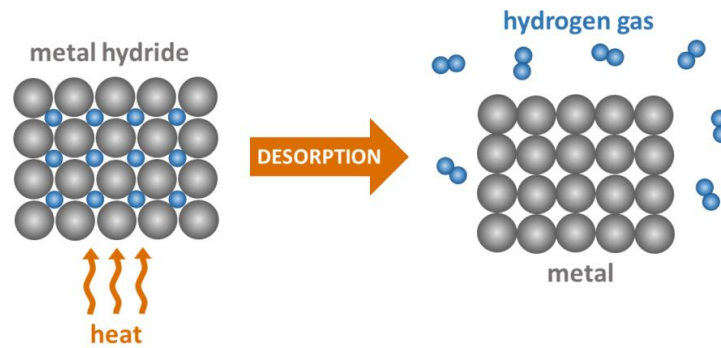


Foto nr. 16: Waterstofdesorptiereactie van metalhydride.

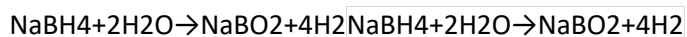
2.4.2 WATERSTOFOPSLAG IN CHEMISCHE HYDRIDEN

Opslag van waterstof in niet-metalen chemische hydriden verwijst naar verbindingen zoals boor- en stikstofhydriden, die geen metalen elementen bevatten. Deze hydriden kunnen waterstof vrijgeven door te reageren met stoffen zoals water of alcohol. Deze reactie is echter meestal minder gemakkelijk omkeerbaar dan die bij metaalhydriden, wat de toepassing in voertuigen complex maakt. Na de reactie moeten de resterende brandstof en bijproducten uit het voertuig worden verwijderd en verder verwerkt.

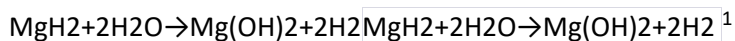
Bij het gebruik van deze hydriden als waterstofopslagmedium moet het systeem zo worden ontworpen dat het de chemische reactie efficiënt faciliteert en de afgegeven waterstof effectief kan worden benut. Bovendien moeten de systemen omgaan met de bijproducten van de reactie, die moeten worden afgevoerd en gerecycleerd of verwerkt. Deze extra stappen maken de logistiek en infrastructuur voor het gebruik van niet-metalen hydriden als waterstofdragers in voertuigen uitdagender in vergelijking met directe waterstofopslagmethoden."

2.4.3 HYDROLYSE

Hydrolyse is een chemische reactie waarbij waterstof geproduceerd wordt door de interactie van chemische hydriden met water. Een veelgebruikt voorbeeld van een hydrolyse reactie is de interactie tussen natriumborohydride en water:



Om te voorkomen dat de reactie onbedoeld plaatsvindt tijdens het hanteren van het hydride, wordt een stabilisator toegevoegd. Wanneer de waterstofproductie gewenst is, wordt deze stabilisator gemengd met water, wat resulteert in de productie van zeer zuivere waterstof. De gravimetrische energiedichtheid, of de hoeveelheid energie opgeslagen per gewichtseenheid van de hydride, voor natriumborohydride is ongeveer 4%. Magnesiumhydride (MgH_2) kan ook gebruikt worden voor hydrolyse en heeft onder laboratoriumomstandigheden een gravimetrische energiedichtheid tot 11%:



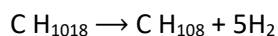
Deze waarden voor gravimetrische energiedichtheid geven aan hoeveel waterstof deze materialen kunnen opslaan en vrijgeven, wat een kritieke maatstaf is voor hun toepasbaarheid in waterstofopslagssystemen."

In deze bijgewerkte tekst worden technische termen zoals 'gravimetrische capaciteit' toegelicht als 'gravimetrische energiedichtheid', wat een meer begrijpelijke term is voor iemand op EQF niveau 4. Ook zijn de chemische reactievergelijkingen gecorrigeerd om de juiste stoichiometrische balans weer te geven.

¹ ENERGY.GOV: OFFICE OF ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY [online]. Dostupné z: <http://energy.gov/eere/fuelcells/fuel-celltechnologies-office>

2.4.4 HYDROGENERING/DEHYDROGENERINGSREACTIES

Hydrogenering is een chemische reactie waarbij een waterstofmolecuul aan de verbinding wordt toegevoegd. De omgekeerde reactie is dehydrogenering, waarbij waterstof uit de verbinding vrijkomt. Hydrogenering en dehydrogenering als mogelijkheid voor waterstofopslag worden al vele jaren bestudeerd. Een van deze reacties is de reactie decalin-naftaleen, waarbij bij 210 °C 7,3% van de massa als waterstof kan vrijkomen. Het voordeel van deze methode is dat er geen water nodig is.



Nieuwe studies richten zich op de reactie van lichte metalen met methanol of ethanol. Doelbewuste waterstofproductie zou mogelijk moeten zijn bij kamertemperatuur. Het nadeel is hetzelfde als bij hydrolyse; de opwerking van de bijproducten is ingewikkeld. Het nadeel voor de automobielenindustrie ligt in de behoefte aan alcohol, wat het gewicht en de prijs van het hele proces verhoogt.

2.4.5 DE SORPTIE VAN WATERSTOF

Het onderzoek naar waterstofopslag met behulp van sorptie is de afgelopen jaren een belangrijk wetenschappelijk onderwerp geweest. Sorptie is een proces waarbij een stof (absorbens) zich hecht aan het oppervlak van een andere stof (adsorbens). De absorptiecapaciteit van een stof neemt toe met de grootte van het oppervlak. Twee bekende methoden zijn fysieke absorptie, waarbij gebruik wordt gemaakt van aantrekkingskracht, en chemische sorptie, waarbij gebruik wordt gemaakt van chemische bindingen.

2.4.6 KOOLSTOF NANOBUIZEN

Uit nieuwe studies blijkt dat de opslagcapaciteit van waterstof in koolstofnanobuizen (CNT) bij kamertemperatuur en een druk van 8MPa de waarde van 0,42% van de massafractie niet overschrijdt. CNT bundelen de opslag van een grote hoeveelheid waterstof in cryogene omstandigheden. Vele theoretische en experimentele studies hebben bevestigd dat de waterstofopslagcapaciteit in koolstofnanostructuren wordt bemiddeld door een zwakke interactie tussen H₂ en CNT bij kamertemperatuur.^{2,3}

2.4.7 BOORNITRIDE NANOBUISJES

Een ander materiaal dat geschikt is voor de opslag van waterstof zijn nanobuizen op basis van koolstof en boornitride (BNNT's). Door heteroatomen van boornitride in CNT in te voeren, is de interactie van de materialen met H₂ sterker dan met CNT alleen. Studies hebben aangetoond dat de capaciteit van BNNTS bij kamertemperatuur tot 2,6% bedraagt en kan worden verhoogd tot 4,2% van de massafractie van waterstof wanneer de BNNT-structuur instort.

² FROUDAKIS, George E. Waterstofopslag in nanobuizen en nanostructuren. *Materialstoday*[online]. 2011, vol. 14, issues 7-8. Beschikbaar op: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702111701626>

³ Waterstofopslag in nanobuizen & nanostructuren, online, Beschikbaar op: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702111701626>

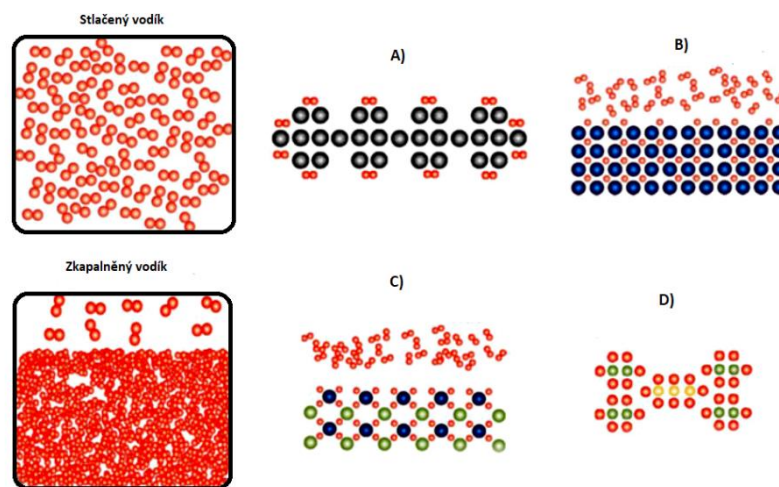
2.4.8 GEPILEERD GRAFEEN

Materialen op basis van koolstof bieden veelbelovende mogelijkheden voor de opslag van waterstof binnen industriële toepassingen. Een van de uitdagingen die de adoptie beperkt, is de beperkte opslagcapaciteit. Het is essentieel om het aantal geabsorbeerde waterstofmoleculen te maximaliseren. Studies hebben aangetoond dat de absorptiecapaciteit gerelateerd is aan de porositeit van het materiaal. Daarom is er een nieuw materiaal ontwikkeld, gestapeld grafeen, dat twee verschillende vormen van koolstof combineert: koolstofnanobuizen (CNT's) en grafeenvlakken. Dit leidt tot een driedimensionaal materiaal met verstelbare poriegroottes.

Te kleine poriën in het materiaal blokkeren de intrede van waterstof, terwijl te grote poriën leiden tot inefficiënt gebruik van de beschikbare ruimte. Poriën die optimaal zijn qua grootte bieden de meest effectieve condities voor waterstofopslag. De grootte van de poriën kan worden aangepast door de lengte of diameter van de CNT's te variëren, evenals de afstand tussen deze nanobuizen.

Door de structuur van deze materialen te optimaliseren, kan de opslagdichtheid van waterstof worden verhoogd, wat een stap voorwaarts is naar de commerciële haalbaarheid van koolstofgebaseerde waterstofopslag.

Fig. 8: Verschillende methoden van waterstofopslag en de beginselen ervan.



De figuren in de eerste kolom tonen samengeperste en vloeibaar gemaakte waterstof. Foto A toont waterstofopslag door absorptie aan het oppervlak van vaste stoffen, waar waterstof gebonden is in waterstofmoleculen H₂ of atomen H. Foto B toont de absorptie van waterstofatomen die in het materiaalrooster zijn ingebracht (deze methode toont een grote hoeveelheid opslag in kleine volumes, bij lage druk en bijna kamertemperatuur). Foto's C en D tonen complexe hydriden, waar

waterstof strak gebonden is in molecuulstructuren in de vorm van chemische verbindingen. De dichtheid neemt toe van A naar D. ⁴

⁴ *Programma brandstofceltechnologieën* [online]. Gepubliceerd: Januari 2011. Op http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/ftc_h2_storage.pdf

2.5 GEAVANCEERDE KOOLSTOFMATERIALEN VOOR WATERSTOFOPSLAG: POTENTIEEL EN UITDAGINGEN

Koolstofmaterialen zoals grafeen en koolstofnanobuizen zijn onderzocht voor hun potentieel in waterstofopslag vanwege hun aanzienlijke oppervlakte-areaal dat fysieke absorptie van waterstofgas mogelijk maakt. Dit maakt het mogelijk om aanzienlijke hoeveelheden waterstof compact op te slaan. Desondanks is de opslagcapaciteit van deze materialen begrensd door factoren zoals oppervlakteareaal en poriegrootte, waardoor ze slechts beperkte hoeveelheden waterstof kunnen vasthouden. Bijkomend is het tempo van waterstofabsorptie en -afgifte vaak traag, wat de toepasbaarheid voor snelle waterstofopslagsystemen belemmert.

Waterstof kan op drie manieren in koolstofmaterialen worden vastgelegd: fysieke adsorptie, chemische adsorptie en via een chemische reactie. Bij fysieke adsorptie worden waterstofmoleculen door Van der Waals-krachten aangetrokken tot het koolstofoppervlak. Deze reversibele methode maakt de vrijgave van waterstof mogelijk door drukverlaging of temperatuurverhoging, hoewel de capaciteit wordt beperkt door het materiaaloppervlak. Chemische adsorptie daarentegen, waarbij een chemische binding tussen waterstof en het koolstofmateriaal ontstaat, vereist meer energie om de waterstof te onttrekken vanwege de sterkere binding. Het is ook reversibel, maar is efficiënt bij lagere drukken en temperaturen.

In tegenstelling tot de andere twee methoden, resulteert een chemische reactie in de vorming van een nieuwe verbinding, waardoor de opgeslagen waterstof niet eenvoudig kan worden teruggewonnen. Dit type opslag is dus niet omkeerbaar, maar kan wel een grotere hoeveelheid waterstof bevatten in een kleiner volume.

Koolstofmaterialen hebben diverse voordelen voor waterstofopslag, zoals hoge oppervlaktespanning, sterkte en een licht gewicht. De uitdagingen met betrekking tot opslagcapaciteit en snelheid van waterstofabsorptie en -afgifte blijven echter bestaan. Onderzoek is voortdurend gericht op enkelwandige koolstofnanobuisjes vanwege hun potentieel voor efficiënte waterstofopslag. Deze nanobuizen, bestaande uit enkele lagen grafiet opgerold tot buizen met diameters variërend van 0,7 tot 3 nm, zijn het onderwerp van wereldwijde onderzoeksinspanningen. (Krčák, 2010, s. 22).

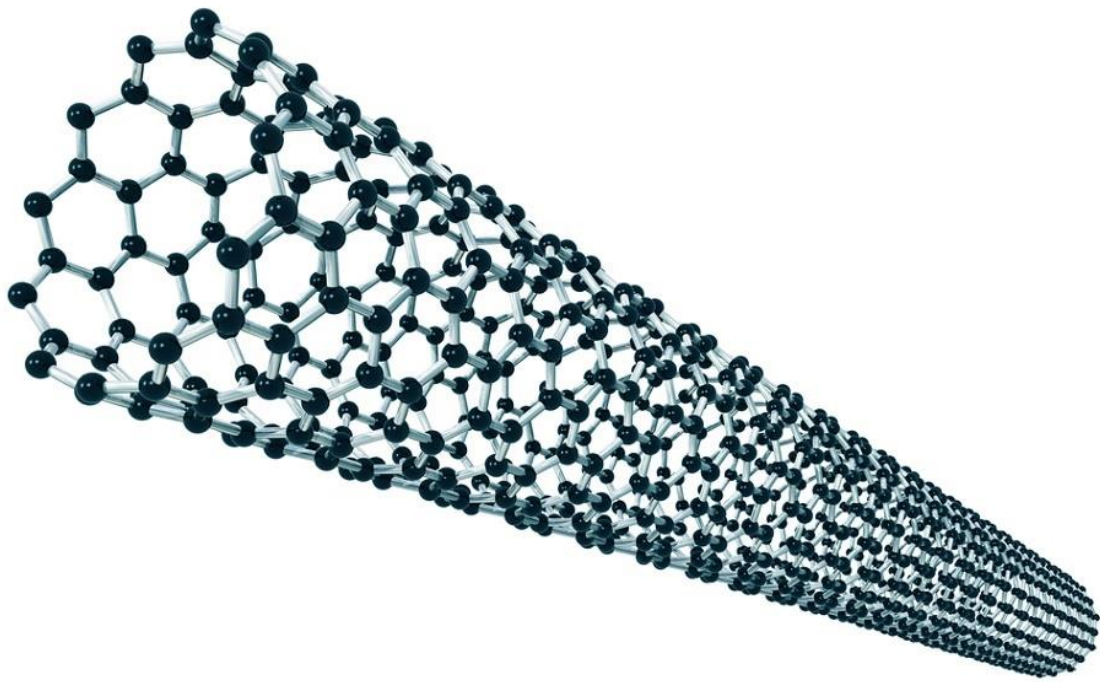


Foto nr. 17: Koolstofnanobuizen.

2.6 SAMENVATTING

Gecomprimeerde waterstofopslag verwijst naar de opslag van waterstofgas onder hoge druk om het volume dat het inneemt te verminderen. Dit kan op een aantal verschillende manieren gebeuren, waaronder het gebruik van hogedruktanks of -cilinders.

Gecomprimeerde waterstofopslag maakt de opslag van een relatief grote hoeveelheid waterstof in een relatief kleine ruimte mogelijk. Dit maakt het een aantrekkelijke optie voor gebruik in voertuigen en andere toepassingen waar de ruimte beperkt is. Het is echter belangrijk op te merken dat de hoge druk die vereist is voor de opslag van gecomprimeerde waterstof veiligheidsrisico's kan opleveren, en de tanks en cilinders die voor de opslag van het gas worden gebruikt, moeten zorgvuldig worden ontworpen en onderhouden om deze risico's tot een minimum te beperken.

Opslag van vloeibare waterstof verwijst naar de opslag van waterstof in vloeibare vorm, in plaats van als gas of vaste stof. Om waterstof in vloeibare vorm op te slaan, moet het worden gekoeld tot een temperatuur van ongeveer -253°C , wat ver onder het kookpunt ligt.

Vloeibare waterstofopslag maakt de opslag van een zeer grote hoeveelheid waterstof in een relatief klein volume mogelijk. Dit maakt het een aantrekkelijke optie voor gebruik in uiteenlopende toepassingen, waaronder de ruimtevaart, waar gewicht en volume kritische overwegingen zijn.

De voor de opslag van vloeibare waterstof vereiste lage temperatuur maakt het moeilijk te hanteren en te vervoeren, en vereist speciale apparatuur en isolatie om warmteoverdracht en verdamping te voorkomen. Bovendien kan vloeibare waterstof door de lage temperatuur vatbaar zijn voor verbrossing van bepaalde materialen, wat problemen kan veroorzaken met tanks en andere opslagvaten.

Het is mogelijk waterstof in ondergrondse containers op te slaan in een mengsel met methaan of ammoniak, een proces dat bekend staat als "waterstofmenging". Deze aanpak kan mogelijk worden gebruikt om overtollige waterstof op te slaan die wordt geproduceerd uit hernieuwbare energiebronnen, zoals wind- of zonne-energie, en deze vervolgens te mengen met aardgas voor gebruik als brandstof.

Waterstofmenging maakt het mogelijk waterstof op te slaan en te vervoeren met gebruikmaking van bestaande infrastructuur, zoals aardgaspijpleidingen. Dit kan kosteneffectiever en logistiek eenvoudiger zijn dan de aanleg van nieuwe infrastructuur speciaal voor de opslag en het vervoer van waterstof.

Een van de belangrijkste problemen is dat waterstof en methaan of ammoniak verschillende fysische en chemische eigenschappen hebben, waardoor het moeilijk kan zijn ze op een veilige en doeltreffende manier met elkaar te mengen. Bovendien is waterstof duurder om te produceren dan methaan, zodat de economische aspecten van waterstofmenging niet altijd gunstig zijn.

Waterstofopslag in hydriden verwijst naar het gebruik van materialen die grote hoeveelheden waterstof kunnen absorberen en afgeven, bekend als "hydriden", als een manier om waterstof op te slaan. Er zijn verschillende soorten hydriden die voor waterstofopslag kunnen worden gebruikt, waaronder metaalhydriden, chemische hydriden en complexe hydriden.

De belangrijkste voordelen van waterstofopslag in hydriden is dat waterstof kan worden opgeslagen in een relatief compacte en lichte vorm. Dit maakt het een aantrekkelijke optie voor gebruik in uiteenlopende toepassingen, zoals draagbare elektronische apparaten en brandstofcelvoertuigen.

Hydriden hebben een relatief lage capaciteit voor waterstofopslag, hetgeen betekent dat een groot volume van het materiaal nodig is om een praktische hoeveelheid waterstof op te slaan. Bovendien is het proces van absorptie en afgifte van waterstof uit hydriden vaak traag en vereist het gebruik van warmte, wat energie-intensief en inefficiënt kan zijn.

Waterstofopslag in koolstofhouders verwijst naar het gebruik van materialen gemaakt van koolstof, zoals koolstofnanobuizen of grafeen, als een manier om waterstof op te slaan. Deze materialen staan bekend om hun grote oppervlakte en sterke chemische bindingen, waardoor zij grote hoeveelheden waterstof kunnen adsorberen en opslaan.

Een van de belangrijkste voordelen van waterstofopslag in vaten op koolstofbasis is dat zij een grote capaciteit voor waterstofopslag hebben, hetgeen betekent dat een relatief klein volume van het materiaal nodig is om een praktische hoeveelheid waterstof op te slaan. Bovendien zijn op koolstof gebaseerde materialen relatief licht en sterk, waardoor zij geschikt zijn voor gebruik in uiteenlopende toepassingen.

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

Tabel nr. 2: Vergelijking van de waterstofopslagmethoden.

2.7 VRAGEN

1) Welke methode voor waterstofopslag vereist gespecialiseerde systemen voor isolatie en thermisch beheer?

- A) Gasvormige opslag
- B) Vloeibare opslag
- C) Opslag in vaste vorm
- D) Opslag in hydriden

2) Wat is een nadeel van het opslaan van waterstof als gas?

- A) Hoge opslagdichtheid
- B) Goedkope methode
- C) Traag adsorptie-/desorptieproces
- D) Groot volume nodig

3) Wat is de gebruikelijke werkingsdruk voor composiet drukvaten in vrachtwagens?

- A) 150 bar
- B) 350 bar
- C) 450 bar
- D) 700 bar

4) Welke van de volgende is geen methode van waterstofopslag?

- A) Chemische opslag
- B) Metaalhydrideopslag
- C) Opslag in ondergrondse containers
- D) Opslag in hogedrukreservoirs met helium

5) Wat is de cryogene temperatuur van vloeibare waterstof?

- A) -153°C
- B) -253°C
- C) -353°C
- D) -453°C

6) Welk effect beschrijft de temperatuurverandering van een gas of vloeistof bij uitzetting of compressie?

- A) Boyle's effect
- B) Charles's effect
- C) Joule-Thomson-effect
- D) Kelvin-Planck-effect

7) Voor welk type hydriden is een hogere temperatuur nodig om waterstof vrij te maken?

- A) Metaalhydriden
- B) Covalente hydriden
- C) Ionische hydriden
- D) Chemische hydriden

8) Wat is de waargenomen parameter voor de efficiëntie van hydride-systemen?

- A) Volume van de opslagtank
- B) Prijs van het hydride
- C) Temperatuur van desorptie
- D) Kleur van de hydride

9) Wat zijn de gebruikelijke materialen voor cryogene opslagtanks voor vloeibare waterstof?

- A) Plastic en koper
- B) Roestvrij staal en aluminium
- C) Glas en titanium
- D) Koolstofvezel en nikkel

10) Welk type materiaal heeft een potentiële waterstofopslagcapaciteit bij kamertemperatuur en een druk van 8 MPa?

- A) Boornitride nanobuisjes
- B) Koolstof nanobuizen
- C) Gepileerd grafeen
- D) Metaal-organische raamwerken

2.7.1 ANTWOORDEN:

1B) Vloeibare opslag - vereist isolatie en thermisch beheer vanwege de extreem lage temperaturen.

2D) Groot volume nodig - gasvormige opslag heeft een relatief lage opslagdichtheid.

3B) 350 bar - de standaard werkingsdruk voor composiet drukvaten in transportmiddelen.

4D) Opslag in hogedrukreservoirs met helium - dit is niet vermeld als een methode van waterstofopslag.

5B) -253°C - de cryogene temperatuur nodig om waterstof vloeibaar te maken.

6C) Joule-Thomson-effect - beschrijft de temperatuurverandering bij uitzetting of compressie.

7A) Metaalhydriden - vereisen vaak een hoge druk of temperatuur om waterstof vrij te maken.

8C) Temperatuur van desorptie - belangrijk voor de efficiëntie van het systeem.

9B) Roestvrij staal en aluminium - materialen die bestand zijn tegen de extreem lage temperaturen.

10B) Koolstof nanobuizen - hebben getoonde capaciteit voor waterstofopslag bij kamertemperatuur en hoge druk.

3 ONDERDELEN

3.1 INLEIDING

Er zijn verschillende manieren om waterstof op te slaan, afhankelijk van het type en de gewenste druk en temperatuur. Enkele gangbare onderdelen voor de opslag van waterstof zijn:

- gecomprimeerde waterstofcilinders: Dit zijn hogedrukhouders van staal, aluminium of composietmaterialen. Zij worden gebruikt voor de opslag van waterstof in samengeperste vloeibare of gasvormige toestand.
- Cryogene tanks: Deze tanks worden gebruikt voor de opslag van gassen in cryogene toestand (zeer lage temperatuur), zoals vloeibare waterstof of vloeibare zuurstof.
- Hogedruk opslagtanks: Dit zijn grote tanks die worden gebruikt om gassen onder hoge druk op te slaan. Ze kunnen gemaakt zijn van staal, aluminium of andere materialen en worden gewoonlijk gebruikt voor de opslag van waterstof in gasvormige toestand.
- Opslag via pijpleidingen: Waterstof kan ook worden opgeslagen in pijpleidingen, die worden gebruikt om het gas van de ene plaats naar de andere te vervoeren. Deze pijpleidingen liggen meestal onder de grond en kunnen worden gebruikt om gassen gedurende lange tijd op te slaan.

Het is belangrijk dat bij de opslag van waterstof de juiste veiligheidsprocedures en -voorschriften worden gevolgd om het risico van ongevallen of het vrijkomen van waterstof te minimaliseren.

3.2 TREFWOORDEN

Brandstofcelvoertuigen, Composietmaterialen, Cryogene tanks, Energie-dichtheid, Energieverlies, Hogedruk opslagtanks, Lage temperaturen opslag, Overdrukventielen, Stationaire en mobiele opslag, Strategische opslag, Veiligheidsnormen en -voorschriften, Veiligheidsvoorzieningen, Waterstof druktanks, Waterstofcompressie.

3.3 DRUKTANKS

Waterstof druktanks zijn containers die ontworpen zijn om waterstofgas onder hoge druk op te slaan. Zij zijn vaak gemaakt van composietmaterialen zoals koolstofvezel of glasvezel, die licht en sterk genoeg zijn om de druk van het gas in de tank te weerstaan.

Waterstofgas wordt opgeslagen in druktanks om de hoeveelheid gas die in een bepaald volume kan worden opgeslagen te vergroten. Wanneer waterstof onder hoge druk wordt opgeslagen, neemt de energiedichtheid ervan toe, waardoor het veel minder ruimte in beslag neemt. Dit maakt het mogelijk grote hoeveelheden waterstof op te slaan in een relatief kleine tank, waardoor het een aantrekkelijke optie wordt voor gebruik in brandstofcelvoertuigen en andere toepassingen waar de ruimte beperkt is.

Er zijn verschillende soorten waterstofdruktanks, waaronder tanks die ontworpen zijn om opnieuw te worden gevuld, en tanks die ontworpen zijn om te worden verwijderd nadat zij zijn gelegeerd. Sommige tanks zijn ook ontworpen om te worden gebruikt in combinatie met andere soorten opslagsystemen, zoals cryogene tanks, die worden gebruikt om waterstof in vloeibare vorm bij zeer lage temperaturen op te slaan.

Om de veiligheid van het gas in de tank te garanderen, zijn drukwaterstoftanks uitgerust met verschillende veiligheidsvoorzieningen, zoals overdrukventielen en barst schijven. Deze voorzieningen helpen voorkomen dat de tank scheurt of barst in geval van overdruk.

Over het geheel genomen zijn waterstofdruktanks een belangrijk onderdeel van de infrastructuur die nodig is voor de opslag en het vervoer van waterstofgas, en spelen zij een cruciale rol bij de ontwikkeling en invoering van waterstofbrandstofceltechnologieën.

Drukvaten kunnen zowel voor stationaire opslag als voor mobiele waterstofopslag worden gebruikt. Voor statische toepassingen worden gewoonlijk naadloze stalen cilinders van laag koolstofstaal of gelegeerd staal gebruikt. Zij worden geproduceerd in een breed scala van volumes, afhankelijk van het geplande gebruik.

Voor mobiele toepassingen worden gewoonlijk druktanks van composietmateriaal gebruikt. Zij worden gemaakt in volumes van tientallen liters tot ongeveer 300 l. Een typische werkdruk is 350 bar, in de nieuwste toepassingen van 450 tot 700 bar (de tijdelijke technologische grens ligt bij 1000 bar).

Cilinders van 12 meter lang met een buitendiameter van ongeveer 80 cm kunnen worden gebruikt als tanks voor tankstations van waterstofvoertuigen of als tanks voor energieoverschotten uit hernieuwbare energie (Vodíková strategie České republiky, 2021, s. 111).

Het feit dat het een beproefde technologie is die gecontroleerd is en voldoet aan alle toenemende eisen inzake waterstofopslag wordt als een voordeel beschouwd. Zij is geschikt voor de opslag van kleine hoeveelheden in onregelmatige voorraden. Met de ontwikkeling van waterstoftechnologieën zullen de voorwaarden voor waterstofopslag dramatisch toenemen. De vraag blijft of de huidige

ontwikkeling van de technologieën niet zal leiden tot een afname van de opslagbehoeften en het vervoer van waterstof onder hoge druk. Een nadeel van druktanks kunnen hun veiligheidsaspecten en technologische beperkingen zijn, zoals de druk, het materiaal of het volume van drukcilinders (Vodíková strategie České republiky, 2021, s. 111-112).



Foto nr. 18: Samengestelde druktank.

3.4 OPSLAG VAN SAMENGEPERST GAS

De opslag van waterstof als samengeperst gas vergt minder energie dan de opslag in vloeibare vorm. Vaten voor stationaire waterstofopslag zijn gemaakt van een legering van koolstofarm of chroomstaal zonder lasnaad. De druk in deze tanks bedraagt ongeveer 200 bar. In Tsjechië zijn vaten met een volume van 61 kg en 50 l meestal gebruikelijk. Voor zeer zuivere waterstof worden cilinders met een volume van 1 l of 2 l gebruikt. Om de capaciteit te vergroten worden kleine containers gegroepeerd en samengevoegd. Meestal zitten er tien cilinders in een groep. Samengestelde cilinders worden gebruikt voor het vervoer van waterstof. Deze worden gemaakt in volumes van 10 l tot 300 l en zijn gecoat met een dunne laag metaal of speciaal polymeer. Deze laag voorkomt lekkage. De druk in de cilinders ligt tussen 350 en 700 bar, en de technologische grens van deze containers is 1000 bar. In het geval van

toepassingen met een groot volume is het beter om brandstofcelvoertuigen te gebruiken. De brandstofcelvoertuigen zijn uitgerust met talrijke cilinders met een volume van 50 l of negen horizontale druktanks. Bij levering aan de klant wordt het gas overgebracht in stationaire druktanks. De stationaire druktanks zijn gestandaardiseerde cilindrische vaten die onder een druk van 50 bar werken. Zij zijn vervaardigd in volumes van 25, 50 en 90 m³.

Waterstof in gasvorm kan worden opgeslagen in holle glazen microsferen (HGM). Deze methode is nog in ontwikkeling. Het zou een veilige vorm van waterstofopslag voor mobiele toepassingen moeten zijn. De HGM worden gevuld met waterstof onder een druk van 350-700 bar en 300°C door middel van



diffusie. Het gas wordt vervolgens opgevangen bij afkoeling tot kamertemperatuur. Om het gas vrij te maken moet HGM worden verwarmd tot 200 - 300°C.⁵

Fig 5: Dwarsdoorsnede van de waterstofcilinder

3.5 CRYOGENE TANKS

Cryogenic tanks zijn speciaal ontworpen opslagvaten die worden gebruikt om materialen bij extreem lage temperaturen op te slaan. Ze worden gebruikt om een verscheidenheid aan materialen op te slaan, waaronder gassen zoals waterstof, zuurstof en stikstof, maar ook biologische materialen zoals menselijke cellen en weefsels.

⁵ RIIS, Trygve, Gary SANDROCK, Oystein ULLEBERG a Preben J. S. VIE. Waterstof

Opslag: Hiaten en prioriteiten. [online]. Beschikbaar op: http://ieahia.org/pdfs/HIA_Storage_G&P_Final_with_Rev.pdf

Cryogene tanks zijn gemaakt van materialen die bestand zijn tegen deze extreem lage temperaturen, zoals roestvrij staal of aluminium. Ze zijn ook zwaar geïsoleerd om de kou binnen en de warmte buiten te houden.

Er zijn twee hoofdtypen cryogene tanks: stationaire tanks en draagbare tanks. Stationaire tanks worden gebruikt om grote hoeveelheden materiaal op te slaan en worden gewoonlijk op een vaste plaats geïnstalleerd, terwijl draagbare tanks worden gebruikt om kleinere hoeveelheden op te slaan en van de ene naar de andere plaats kunnen worden verplaatst.

Cryogene tanks worden gebruikt in verschillende industrieën, waaronder de medische, chemische en energie-industrie. Ze zijn een belangrijk hulpmiddel voor de opslag en het transport van materialen bij extreem lage temperaturen en spelen een vitale rol in vele wetenschappelijke en technologische toepassingen.

Cryogene tanks kunnen worden gebruikt voor de opslag van waterstof in vloeibare vorm, bij een temperatuur van -253°C . Dit is een van de meest efficiënte manieren om waterstof op te slaan, omdat het gas dan veel dichter kan worden opgeslagen.

De opslag van waterstof in een cryogene tank vereist echter speciale apparatuur en zorgvuldige behandeling, aangezien de extreem lage temperatuur gevaarlijk kan zijn. De tank moet zwaar geïsoleerd zijn om de waterstof koud te houden en te voorkomen dat hij opwarmt en verdampt. Bovendien moet de tank worden uitgerust met veiligheidsvoorzieningen zoals overdrukventielen om te voorkomen dat de tank door overdruk barst.

Cryogene tanks worden gewoonlijk gebruikt voor de opslag van grote hoeveelheden waterstof, en ze worden gewoonlijk op een vaste plaats geïnstalleerd. Ze worden vaak gebruikt in de chemische en energie-industrie en in onderzoek en ontwikkeling.

In het algemeen zijn cryogene tanks een belangrijk instrument voor de opslag en het vervoer van waterstof, maar zij vereisen een speciale behandeling en uitrusting vanwege de extreme temperatuur en druk.



Foto nr. 19: Cryogene tanks.

3.6 HOGEDRUK OPSLAGTANKS

Hogedrukopslagtanks zijn grote drukvaten die worden gebruikt om gassen onder hoge druk op te slaan. Ze kunnen worden gemaakt van verschillende materialen, waaronder staal, aluminium en vezelversterkte kunststoffen, en zijn ontworpen om sterk en toch licht te zijn. Deze tanks worden doorgaans gebruikt voor de opslag van gassen in gasvormige toestand, zoals waterstof.

Hogedrukopslagtanks worden gebruikt in een verscheidenheid van toepassingen, waaronder brandstofopslag voor waterstofvoertuigen. Zij worden doorgaans ontworpen en gebouwd volgens veiligheidsvoorschriften en -normen om het risico van ongevallen of het vrijkomen van het opgeslagen gas tot een minimum te beperken.

Het is belangrijk om de juiste veiligheidsprocedures te volgen bij het hanteren en opslaan van hogedrukopslagtanks. Dit houdt in dat de tanks moeten worden opgeslagen op een veilige plaats, uit de buurt van ontstekingsbronnen, en dat ze voorzichtig moeten worden behandeld en vervoerd om

schade te voorkomen. Bovendien is het belangrijk om hogedrukopslagtanks regelmatig te inspecteren en te onderhouden om ervoor te zorgen dat ze in goede staat verkeren en om lekken of andere problemen te voorkomen.

Hogedrukopslag kan een grote hoeveelheid waterstof opslaan in een relatief kleine ruimte. Een grote kans voor hogedrukopslag is het strategische gebied dat absoluut noodzakelijk is voor de verdere ontwikkeling van waterstof en de besparingen die voortvloeien uit de omvang van de mogelijke waterstofopslag. Bij de bouw van installaties voor hogedrukopslag moet men rekening houden met hoge initiële investeringen. De bouw is alleen zinvol op het punt van productie of verbruik en wordt bepaald door waterstofcompressie en energieverlies. Ook veiligheidsaspecten mogen niet worden verwaarloosd (Vodíková strategie České republiky, 2021, s. 115).

3.7 SAMENVATTING

Gecomprimeerde waterstofcilinders zijn hogedrukhouders voor de opslag van waterstofgas bij drukken van 350 tot 700 bar. Deze cilinders zijn gemaakt van zeer sterke materialen zoals staal of composietmaterialen en zijn ontworpen om sterk en toch licht te zijn. Zij worden gewoonlijk gebruikt als brandstof voor waterstofvoertuigen, als chemische grondstof en voor andere industriële en commerciële toepassingen.

Cryogene waterstoftanks zijn opslagvaten die worden gebruikt om waterstofgas op te slaan bij extreem lage temperaturen, meestal in het bereik van -253°C of kouder. Deze tanks zijn gemaakt van materialen die bestand zijn tegen de extreme koude en druk van de opgeslagen waterstof, zoals roestvrij staal of composieten met een hoge sterkte.

Hogedrukwaterstofopslagtanks zijn drukvaten die worden gebruikt om waterstofgas onder hoge druk op te slaan. Deze tanks zijn gemaakt van zeer sterke materialen zoals staal of composietmaterialen en zijn ontworpen om sterk en toch licht te zijn. Ze worden vaak gebruikt als brandstof voor waterstofvoertuigen, als chemische grondstof en voor andere industriële en commerciële toepassingen.

Hogedrukwaterstofopslagtanks hebben verscheidene voordelen ten opzichte van andere soorten brandstofopslag. Ze zijn relatief licht, waardoor ze zeer geschikt zijn voor gebruik in voertuigen. Ze zijn ook gemakkelijk bij te vullen en kunnen in een breed temperatuurbereik worden gebruikt. Waterstof is echter een licht ontvlambaar gas, dus is het belangrijk om de juiste veiligheidsprocedures te volgen bij het hanteren en opslaan van hogedrukwaterstofopslagtanks. Dit houdt in dat de tanks op een veilige plaats worden opgeslagen, uit de buurt van ontstekingsbronnen, en dat ze voorzichtig worden behandeld en vervoerd om schade te voorkomen.

3.8 VRAGEN

1) Welk materiaal wordt typisch gebruikt voor de fabricage van waterstof druktanks voor mobiele toepassingen vanwege zijn lichte gewicht en sterkte?

- A) Staal
- B) Aluminium
- C) Composietmaterialen
- D) Koper

2) Wat is een primair voordeel van het opslaan van waterstof onder hoge druk in druktanks?

- A) Eenvoudige constructie
- B) Verhoogde energiedichtheid
- C) Lagere productiekosten
- D) Verbeterde thermische isolatie

3) Welke typische werkdruk wordt gehanteerd voor moderne mobiele waterstof druktanks?

- A) 100-200 bar
- B) 200-300 bar
- C) 350-700 bar
- D) 700-1000 bar

4) Voor welk doel worden cilinders met een lengte van 12 meter en een buitendiameter van 80 cm voornamelijk gebruikt?

- A) Opslag van waterstof voor industriële toepassingen
- B) Opslag van zuurstof in ziekenhuizen
- C) Tanks voor waterstof tankstations
- D) Opslag van aardgas

5) Wat kenmerkt de technologie gebruikt in waterstof druktanks en wordt als een voordeel beschouwd?

- A) Flexibiliteit in design
- B) Duurzaamheid en robuustheid
- C) Innovatie en complexiteit
- D) Betrouwbaarheid en beproefdheid

6) Wat is de maximale technologische druklimiet voor containers die gebruikt worden voor het transport van waterstof?

- A) 350 bar
- B) 500 bar
- C) 700 bar
- D) 1000 bar

7) Wat is de noodzakelijke voorwaarde voor het vullen van holle glazen microsferen (HGM) met waterstof?

- A) Lage druk en lage temperatuur
- B) Hoge druk en hoge temperatuur
- C) Hoge druk en lage temperatuur
- D) Lage druk en hoge temperatuur

8) Welke temperatuur wordt gehanteerd bij de opslag van waterstof in cryogene tanks?

- A) -153°C
- B) -253°C
- C) -353°C
- D) -196°C

9) Wat is de rol van veiligheidsvoorzieningen zoals overdrukventielen en barstschijven in waterstof druktanks?

- A) Om de temperatuur binnen te reguleren
- B) Om de opslagcapaciteit te vergroten
- C) Om overmatige druk te voorkomen
- D) Om de tanks gemakkelijker te vervoeren

10) Wat is een uitdaging die gepaard gaat met de bouw van installaties voor hogedrukopslag van waterstof?

- A) Lage initiële investeringen
- B) Lage operationele kosten
- C) Veiligheidsaspecten en technologische beperkingen
- D) Eenvoud in design en constructie

3.8.1 ANTWOORDEN MET OMSCHRIJVING:

1C) Composietmaterialen

Omschrijving: Voor mobiele toepassingen zijn composietmaterialen zoals koolstofvezel of glasvezel favoriet vanwege hun hoge sterkte-gewichtsverhouding.

2 B) Verhoogde energiedichtheid

Omschrijving: Door waterstof onder hoge druk op te slaan, wordt de energiedichtheid verhoogd, wat essentieel is voor efficiënte energieopslag en -transport.

3C) 350-700 bar

Omschrijving: Moderne mobiele toepassingen vereisen een werkdruk van 350 tot 700 bar om een optimale opslag van waterstof te waarborgen.

4C) Tanks voor waterstof tankstations

Omschrijving: Lange cilinders van 12 meter worden gebruikt voor de opslag van waterstof bij tankstations of voor het bewaren van energieoverschotten van hernieuwbare bronnen.

5D) Betrouwbaarheid en beproefdheid

Omschrijving: De technologie achter waterstof druktanks is beproefd en betrouwbaar, wat een belangrijk voordeel is bij de opslag van waterstof.

6D) 1000 bar

Omschrijving: De technologische grens voor de druk die gebruikt wordt voor het transport van waterstof in containers ligt op 1000 bar.

7B) Hoge druk en hoge temperatuur

Omschrijving: Het vullen van HGM met waterstof vereist een proces bij hoge druk en hoge temperatuur voor effectieve diffusie.

8B) -253°C

Omschrijving: Cryogene tanks worden gebruikt voor de opslag van waterstof bij -253°C om de gasdichtheid significant te verhogen.

9C) Om overmatige druk te voorkomen

Omschrijving: Veiligheidsvoorzieningen zoals overdrukventielen en barstschijven zijn essentieel om de veiligheid te waarborgen door overmatige druk te reguleren.

10C) Veiligheidsaspecten en technologische beperkingen

Omschrijving: Bij het opzetten van hogedrukopslaginstallaties voor waterstof moeten hoge initiële investeringen, veiligheidsaspecten en technologische beperkingen worden aangepakt.

- GUPTA B. Ram. *Waterstofbrandstof, productie, vervoer en opslag*. 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: Analyse van het gebruik van waterstof in de energievoorziening*. 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-a-european-hydrogen-backboneplan%2F%245741%2F%245742&usg=AOvVaw2HDA_t_6gG1ZBmw_EUMdh9s
- De toekomst van gasscheiding via membraantechnologieën [foto]. *Monteco* [online]. 9.5.2017 [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: <https://monteco.com/the-future-of-gas-separation-through-membrane-technologies/>
- Stationaire LOHC-infrastructuur [foto]. *Waterstofrijke LOHC* [online]. [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: <https://hydrogenious.net/what/>

- SATYAPAL, Sunita. DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record [foto]. *Energie-eisen voor de compressie en vloeibaarmaking van waterstofgas in relatie tot de opslagbehoeften van voertuigen* [online]. 26.10.2009 [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/9013_energy_requirements_for_hydrogen_gas_compression.pdf
- Onderzoeksinstituut voor metaalhydriden [foto]. *Hystorsys* [online]. [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: <https://www.hystorsys.no/our-story/>
- Koolstofnanobuizen voor toepassingen van energieopslag [foto]. *AZONANO* [online]. 21.10.2016 [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=4298>
- Waterstofopslag: Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office [foto]. *ENERGY.GOV* [online]. [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>
- Realisatie van een nationaal waterstofnetwerk [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>
- *Lezing 3 Waterstofopslag: Europees Train de Trainer Programma voor Responders* [online]. HyResponder, 2021 [cit. 2023-01-16].
- Vloeibare waterstof wordt gezien als "heilige graal" voor de invoering van waterstof in de mobiliteitssector: COO van Linde. *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>

5 LIJST VAN AFBEELDINGEN EN TABELLEN

Tabel nr. 1: Vergelijking van de methoden voor het vervoer van waterstof.

Tabel nr. 2: Vergelijking van de waterstofopslagmethoden.

Foto nr. 1: Waarschuwbord

Foto nr. 2: Vervoer van waterstof in containers over de weg

Foto nr. 3: Vervoer van vloeibare waterstof in een containerschip

Foto nr. 4: Membraangasscheiding

Foto nr. Foto 5: Vervoer van waterstof via pijpleidingen

Afbeelding nr. 6: De Europese waterstofruggengraat 2030

Afbeelding nr. 7: De Europese waterstofruggengraat 2040

Afbeelding nr. 8: HyWay 27 infografieën

Foto nr. 9: Stationaire LOHC-infrastructuur - OpslagPLANTS van Hydrogenious

Foto nr. 10: Stationaire LOHC-infrastructuur - ReleasePLANTS van Hydrogenious

Foto nr. 11: Opslagmethoden voor waterstof

Foto nr. 12: Waterstof druktanks

Foto nr. 13: Waterstofopslag in zoutcaverne

Foto nr. 14: Tank voor vloeibare waterstof

Afbeelding nr. 15: Exotherme waterstofabsorptiereactie

Foto nr. 16: Waterstofdesorptiereactie van matalhydride

Foto nr. 17: Koolstofnanobuizen

Foto nr. 18: Samengestelde druktank

Foto nr. 19: Cryogene tanks

6 LIJST VAN AFKORTINGEN

EHB - De Europese waterstofruugengraat

MIE - minimale ontstekingsenergie

LNG - vloeibaar aardgas

LOHC - vloeibare organische waterstofdragers

LH2 - vloeibare waterstof

HENG - met waterstof verrijkt aardgas

CO₂ - kooldioxide

CNG - gecompriemd aardgas

MOF - metaal organische kaders

EU - Europese Unie

UK - Verenigd Koninkrijk

EIA - milieueffectbeoordeling

LHV - lagere verwarmingswaarde

DOE - ontwerp van experiment

ADR - accord dangereuses route