



Werkpakket 7A: waterstof logistiek

Hans Gelten

Martin Buitink

Benno Aalderink

April 2025, Saxion University of Applied Science

Inhoudsopgave

1.	Introductie.....	3
2.	Beschrijving H ₂ Modus werkpakket 7a: logistiek	3
2.1	Activiteiten en oplevering	3
2.2	Inventarisatie van partners	3
3.	State-of-the-art beschrijving H ₂ transport	4
3.1	Gecomprimeerde waterstof (CH ₂)	4
3.2	Vloeibare waterstof (LH ₂)	4
3.3	Cryo-gecomprimeerde waterstof (CCH ₂)	5
3.4	Vloeibare organische waterstofdragers (LOHC)	5
3.5	Fysisch geadsorbeerde waterstof (FH)	6
3.6	Metaal- of complexe hydriden (MH)	7
3.7	Omzetting naar methanol of ammoniak	7
4.	Overzicht van opslag- en transporttechnieken	8
5.	Transport van waterstof.....	9
6.	Inleiding rekenmodel en casussen	10
7.	Uitleg en gebruik rekenmodel.....	10
8.	Referenties	12

1. Introductie

Waterstof kan fysiek opgeslagen worden als een (gecomprimeerd) gas, cryogene vloeistof of met behulp van andere materialen waaraan het tijdelijk gebonden kan worden. De eerste twee vormen, en met name gecomprimeerd gas, worden vandaag het meeste toegepast. Kenmerkend aan de gasvormige opslag zijn de typische metalen of composieten hogedrukvaten (200, 350 of 700 bar) ("Waterstoftank", Wikipedia, 2025). Compressie is nodig om de benodigde ruimte voor het waterstofgas te beperken. Nadeel is dat er door het comprimeren 13 tot 18% energie verloren gaat, afhankelijk van de gewenste druk. Waterstof in gasvorm wordt vandaag onder druk getransporteerd via hogedrukcilinders. Indien deze op een truck worden geïnstalleerd, spreken we van tube trailers, die per truck zo'n 200 à 300 kg H₂ kunnen transporteren. Bij extreem lage temperaturen (-252°C) is transport en opslag van waterstof onder vloeibare vorm mogelijk. Dit gebeurt onder lage druk, maar de benodigde koeling kost veel energie – tot wel 40% van de energie die in de waterstof opgeslagen is.

Dit document geeft een overzicht van de verschillende mogelijkheden om waterstof op te slaan en te transporteren. Het is bedoeld als onderlegger voor verdere discussie binnen het project H2Modus, waarin specialisten rondom opslag en transport zijn betrokken en uiteindelijk moet gaan leiden tot een generiek (economisch) model voor verschillende toepassingen en use-cases.

2. Beschrijving H₂Modus werkpakket 7a: logistiek

2.1 Activiteiten en oplevering

Omschrijving

Hoewel de inzet van groene waterstof ter vervanging van diesel en benzine een waardevolle bijdrage kan leveren in het verduurzamen van mobiele machines, moet er wel waterstof voor deze machines beschikbaar zijn. Ook zullen de bijbehorende kosten van groene waterstof op de kort termijn niet snel kunnen concurreren met diesel en benzine oplossingen. Op de langere termijn is de verwachting dat de kosten van groene waterstof nog behoorlijk gaan dalen. Daarnaast is de logistieke toegang tot waterstof voor mobiele machines essentieel voor het succesvol inzetten van deze systemen. Dit vertaalt zich allemaal in kaders en kosten. Inzicht hierin is van strategisch belang voor de partners uit WP5 van het project. Een financieel model als gereedschap, passende bij de doelgroep en schaalbaar naar de toepassing kan hierbij dit gewenste inzicht verschaffen. Dit helpt de partners strategisch te kunnen kiezen in de doorontwikkeling van hun prototypen zoals behandeld in WP5. WP7a draagt daarmee bij aan de beantwoording van deelvraag 5.

Activiteiten

- Inventarisatie logistieke mogelijkheden levering (groene) waterstof per toepassing
- Ontwikkeling financieel model generiek bruikbaar voor de doelgroep

Producten

- Rapportage
- Modelleringsstool

2.2 Inventarisatie van partners

Voor het rapport en het ontwikkelde model is overleg geweest met de verschillende partijen voor algemene informatie, inzicht in de ontwikkelingen rond waterstof gebruik, transport en opslag en voor aanleveren en reviewen van data voor het Excel rekenmodel. Hieronder is een overzicht gegeven van partijen waarmee gesproken is.

- Hexagon Purus | Wystrach: gespecialiseerd op het gebied van sleuteltechnologieën die nodig zijn voor emissievrije mobiliteit, het leveren van waterstof Type 4 hogedrukcilinders en -systemen, batterijsystemen en voertuigintegratieoplossingen voor brandstofcel-elektrische en batterij-elektrische voertuigen. De producten worden gebruikt in een verscheidenheid aan mobiele systemen, waaronder lichte, middelzware en zware voertuigen. Ook het toepassingsgebied is divers, o.a. bestaande uit, grondopslag, distributie, tanken, maritiem, spoor en ruimtevaart (<https://hexagonpurus.com/>).
- Dens (MKB): ontwikkelaar en producent van de Hydrozine generator. Dens ontwerpt de systemen op een modulaire manier. Deze aanpak maakt de verschillende modules binnen het systeem schaalbaar, waardoor ze als standalone componenten kunnen functioneren. Producten zijn o.a. mobiele en stationaire batterijsystemen en geïntegreerde batterijoplossingen. Deze systemen maken allen gebruik van mierenzuur (een vloeibare organische waterstofdrager, of LOHC) als energieopslagmedium: een innovatieve nieuwe manier van energie opwekken, gebruiken en opslaan om de

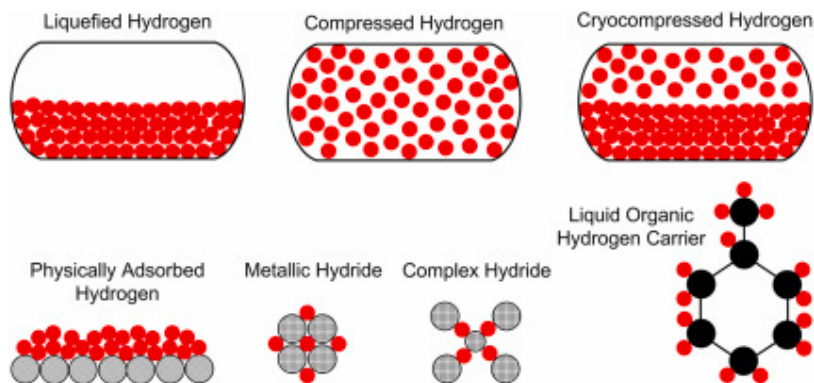
energietransitie van fossiel naar duurzaam te realiseren. Voor de opwekking van elektriciteit wordt grootschalige zonne- en windenergie gezien als de manier om het energienet te verduurzamen (<https://www.dens.one/>).

- Roger Energy: is betrokken bij een breed scala aan projecten in de hele waterstofwaardeketen en ondersteunt bedrijven in verschillende industrieën om de overgang naar groene waterstof te maken. Gericht op de productie, levering en toepassing van groene waterstof om een emissievrije vervanging te bieden voor fossiele brandstoffen voor de aandrijving van transport en zwaar materieel (<https://www.roger.energy/>).

3. State-of-the-art beschrijving H₂ transport

De volgende opties zijn de belangrijkste methoden voor waterstofopslag i.c.m. transport:

- Gecomprimeerde waterstof (CH₂)
- Vloeibaar gemaakte waterstof (LH₂)
- Cryo-gecomprimeerde waterstof (CCH₂)
- Fysisch geadsorbeerde waterstof (FH)
- Metaalhydriden / complexe hydriden (MH)
- Vloeibare organische waterstofdragers (LOHC)
- Omzetting naar ammoniak (NH₃) of methanol (MeOH)



Figuur 1: Visuele interpretatie van de verschillende technieken om waterstof op te slaan (Usman, 2022)

Voor een uitgebreidere evaluatie wordt hieronder de methode beschreven en waarbij alle voor- en nadelen worden beschreven (Usman, 2022).

3.1 Gecomprimeerde waterstof (CH₂)

De meest gebruikte methode van waterstofopslag is gecomprimeerde waterstof onder hoge druk. De compressie van waterstof is niet alleen een goed ontwikkelde technologie, maar biedt ook hoge snelheden van waterstofvulling en -afgifte. Bovendien wordt er geen energie gebruikt voor het laten vrijkomen van waterstof. Compressie van waterstof tot een hoge druk verbruikt echter ongeveer 13-18% van de lagere verwarmingswaarde van waterstof, wat kosten met zich mee brengt. Waterstof wordt opgeslagen in cilindrische vaten. Een lichtgewicht en goedkoop vatmateriaal dat bestand is tegen hoge druk is vereist. Het geselecteerde wandmateriaal moet bestand zijn tegen waterstofdiffusie en de mogelijke verbrossing veroorzaakt door de opgeslagen waterstof.

1. Voordelen: Gecomprimeerde waterstof is een eenvoudige en gevestigde technologie. Het biedt een relatief economisch betaalbare optie met een minimale kapitaalinvestering en is economisch haalbaar op kleine schaal. Het is compatibel met het gebruik van waterstof in brandstofcellen (geen vervuiling) en vertoont een goede efficiëntie.
2. Nadelen: Gecomprimeerde waterstof heeft een lage energiedichtheid en heeft veiligheidsproblemen die verhoogde waakzaamheid en voorzorgsmaatregelen vereisen.

3.2 Vloeibare waterstof (LH₂)

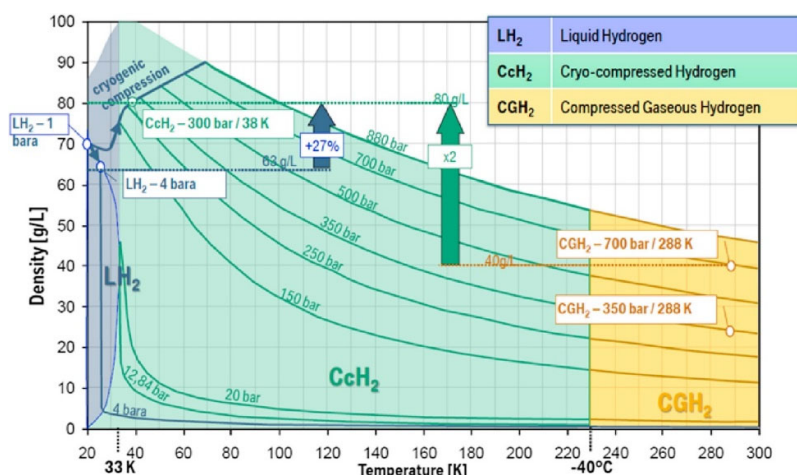
In vloeibare of cryogene vorm heeft waterstof een veel hogere dichtheid en daarom neemt de volumetrische energiedichtheid in grote mate toe. De kritische temperatuur van waterstof is -240 °C (waarboven waterstof niet vloeibaar

kan worden gemaakt), daarom moet waterstof worden gekoeld onder de kritische temperatuur voor de liquefactie. Waterstof wordt echter veelal vloeibaar gemaakt door afkoeling tot $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ (kooktemperatuur van waterstof onder atmosferische druk) voor opslag als vloeistof. Net als compressie van waterstof is opslag van vloeibare waterstof een gevestigde technologie. 40 % van de energie inhoud kan verloren gaan gedurende het proces, terwijl dat voor gecompriëerde waterstof ongeveer 13 tot 18% is. (Barthelemy et al., 2017)

1. Voordelen: Vloeibare waterstof is een volwassen technologie. Het heeft een gunstige volumetrische energiedichtheid en kan direct worden gebruikt met brandstofcellen (geen vervuiling).
2. Nadelen: Vloeibare waterstof heeft een lagere energie-efficiëntie, inclusief verdampingsverliezen. Het vereist een complex systeem met hoge kapitaalkosten en is minder geschikt voor lage productiehoeveelheden. Net als bij gecompriëerde waterstof vereisen veiligheidsrisico's meer zorgvuldigheid. Het is moeilijker op te slaan voor langere tijd, vanwege verdamping, daarom is het geschikter voor gaslevertrucks dan tanks in voertuigen (Barthelemy et al., 2017)

3.3 Cryo-gecompriëerde waterstof (CCH₂)

In de cryo-compressie worden de aspecten van zowel de samengeperste gasvormige waterstof als de cryogene waterstof gecombineerd. De waterstof wordt opgeslagen bij cryogene temperaturen (-163 tot $-248\text{ }^{\circ}\text{C}$) en onder een minimale waterstofdruk van 50-700 bar, veel hoger dan de kritische druk van waterstof (13 bar).



Figuur 1: Dichtheid van waterstof voor verschillende temperaturen en drukken (Barthelemy et al., 2017)

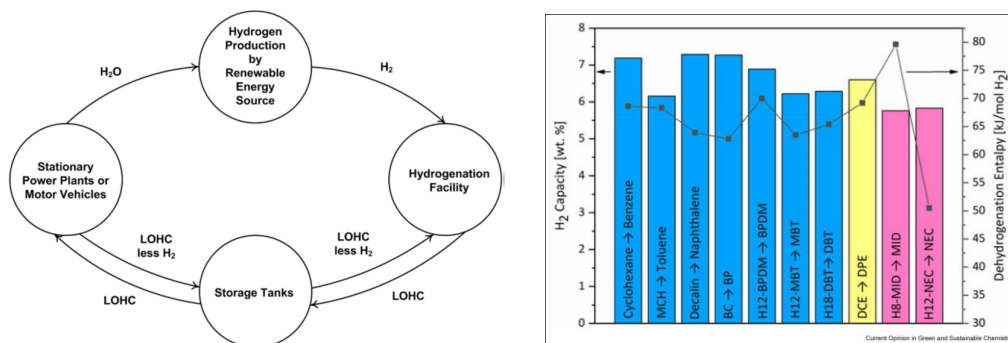
1. Voordelen: Hogere waterstof dichtheid in verhouding tot vloeibare waterstof, minder verdampingsverliezen, waterstof is snel beschikbaar en de tank is snel te vullen. Ook geschikt voor brandstofcellen vanwege de hoge zuiverheid van waterstof.
2. Nadelen: Waterstof infrastructuur is net als bij CH₂ en LH₂ uitdagend. Condities zijn zwaar door de combinatie van extreme druk en temperatuur. Ook vereist de opslag veel energie. De vaten zijn duurder vanwege gebruik van een Type 3 tank (dubbelwandig)

3.4 Vloeibare organische waterstofdragers (LOHC)

LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carriers – Vloeibare organische waterstof dragers) zijn vaak stoffen die stabiel en vloeibaar zijn en die waterstof kunnen opnemen en weer afgeven. De drager wordt gebonden met waterstof via een hydrogeringsreactie, een proces onder hoge druk en hoge temperatuur. Dit proces kost veel energie. Voorbeelden van vloeibare organische waterstof dragers zijn toluen, N- ethylcarbazool en Dibenzyltolueen. Ook andere stoffen, zoals mierenzuur (formic acid, CH₂O₂), zijn geschikt om te dienen als LOHC (Kim et al., 2022). Om LOHC te gebruiken is nog veel innovatie en opschaling van productieprocessen noodzakelijk.

In LOHC wordt waterstof chemisch opgeslagen door te reageren met een waterstofdeficiënt organisch molecuul. Het organische hydride wordt in de reactor gedehydrogeneerd, waarbij de benodigde waterstof weer vrij komt voor de energieproductie, hetzij in een stationaire energiecentrale, hetzij in een toepassing op een voertuig. Het gedehydrogeneerde product wordt bij het tankstation verwijderd en het organisch hydride wordt opgeladen. Het gedehydrogeneerde organische hydride wordt getransporteerd naar een off-site hydrogeneringsinstallatie en gehydrogeneerd. Het resulterende organisch hydride wordt uiteindelijk weer naar het tankstation getransporteerd.

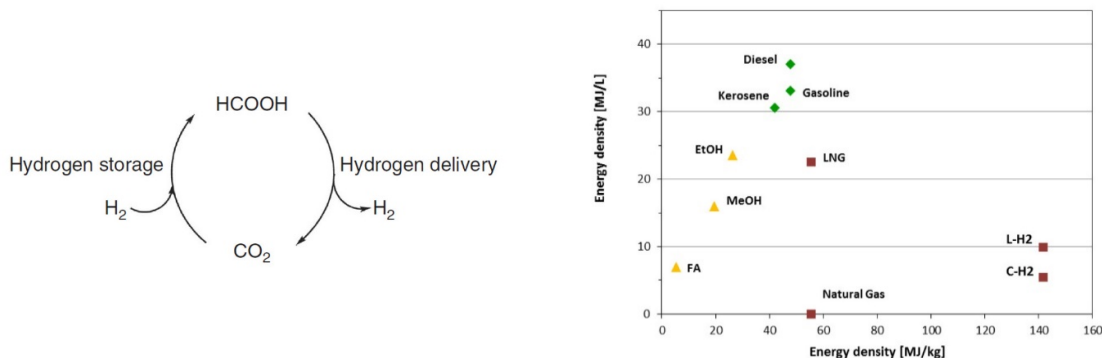
Gedurende de hele cyclus blijven de koolstofatomen in het LOHC molecuul in de cyclus en komt het niet in de atmosfeer. Fig. 2 toont het concept van de organische hydridecyclus voor on-board en stationaire toepassingen.



Figuur 2: Typische cyclus bij gebruik van LOHC (links) en H₂ capaciteit voor verschillende LOHC materialen (rechts) (Perreault et al., 2023)

Bij het bedrijf DENS (1 van de partners van H2Modus) worden LOHC systemen ontwikkeld op basis van mierenzuur (formic acid). De DENS Hydrozine Generator is een schone en efficiënte stroombron voor het leveren van elektrische energie op plaatsen waar een netaansluiting niet voldoende of niet beschikbaar is. De generator werkt op hydrozine, een vloeistofvrije eco-brandstof en produceert elektriciteit zonder schadelijke emissies. Met de DENS Hydrozine Generator wordt de impact op het milieu verminderd en toch de nodige energie opgeleverd.

Ideaal werkt de hydrozine-mierenzuur cyclus op de volgende manier en hoewel de energiedichtheid per kg (massa) laag is, ligt de dichtheid per liter (volume) wel duidelijk hoger dan aardgas of gecompriëerde waterstof:



Figuur 3: Mierenzuur-hydrozine cyclus + energiedichtheid vergeleken met andere brandstoffen (mierenzuur = FA)

De energie-LOHC cyclus van DENS heeft de volgende stappen voor het leveren van on-demand energie: i) De productie van Hydrozine vindt plaats met drie ingrediënten: hernieuwbare energie, water en biogene CO₂ (niet-fossiele koolstofdioxide), ii) In de DENS reformer wordt het Hydrozine omgezet in H₂ (waterstof) en CO₂ gas. Dit gasmengsel wordt vervolgens naar de brandstofcel gevoerd, iii) De waterstof uit het gasmengsel wordt met behulp van zuurstof uit de buitenlucht omgezet in waterdamp en elektrische energie. Doordat zowel het proces als de omzetting in de brandstofcel bij lage temperaturen plaatsvindt, worden er geen schadelijke stoffen zoals zwaveloxiden, stikstofoxiden of fijnstof gevormd. Daarnaast is het proces volledig stil en iv) Bij het gebruik van de brandstof komt een gelijke hoeveelheid CO₂ vrij als bij H₂O (water), waardoor het gehele gebruik 100% hernieuwbaar en 100% toekomstbestendig is.

Kritische opmerking bij het systeem is dat er geen gegevens bekend zijn van de efficiëntie van de omzettingen die plaatsvinden (CO₂ en H₂O naar mierenzuur) en terug, of de stabiliteit en kosten van de katalysator.

1. Voordelen: De mogelijkheid om gebruik te maken van de bestaande vloeistofinfrastructuur, de stabiliteit op lange termijn, makkelijk te hanteren substantie en transporteerbaarheid over lange afstanden.
2. Nadelen: Hoge temperatuur en energie nodig om LOHC te dehydrogeneren, materialen zijn niet makkelijk te verkrijgen, giftig en/of niet milieu vriendelijk wanneer deze in de buitenlucht komen

3.5 Fysisch geadsorbeerde waterstof (FH)

In de fysisch geadsorbeerde vorm wordt waterstof aan het oppervlak van de vaste stoffen geadsorbeerd en volgt de adsorptie van der Waals interacties of dispersieve krachten en vormt dus geen covalente binding met de vaste stof. In tegenstelling tot waterstof opgeslagen in veel metaalhydriden en complexe metaalhydriden (waar wel een covalente binding wordt aangegaan), wordt de waterstof omkeerbaar opgeslagen aan het oppervlak van de vaste stof.

1. Voordelen: Snelle loading en unloading van waterstof, geen warmte transport problemen
2. Nadelen: Lage dichtheden bij kamertemperatuur. Cryogene condities zijn nodig voor hogere dichtheden: temperaturen van 77 K zijn nodig voor acceptabele opslag capaciteiten (Amirthan & Perera, 2022).

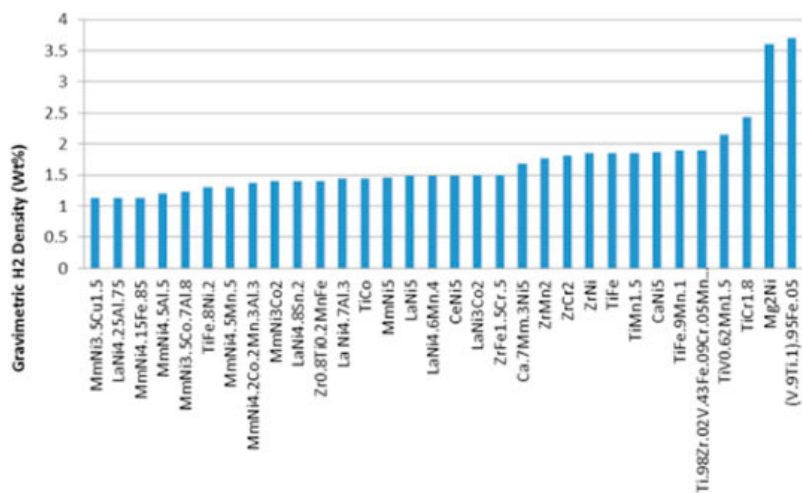
Bijvoorbeeld het koolstof rooster is geschikt voor adsorptie van waterstof en dit wordt uitvoerig beschreven in een artikel van Amirthan & Perera, 2022.

3.6 Metaal- of complexe hydriden (MH)

Waterstof reageert chemisch met metalen en metaallegeringen om metaalhydriden te vormen (covalente binding). Het hydride wordt gevormd wanneer een waterstofmolecuul aan het oppervlak wordt gedissocieerd tot atomaire waterstof en vervolgens diffundeert in de bulk en chemisorbeert in de metaal- of legeringsstructuur. De hydridevorming vindt plaats door directe reactie van waterstof met het metaal of door de elektrochemische dissociatie van watermolecuul.

1. Voordelen: Metaalhydriden bieden hoge volumetrische energiedichtheden, verbeterde veiligheid, lage kosten en hoge efficiëntie, bij een lage druk in vergelijking met gasopslag. Geschikt voor middel en lange opslag duur (Klopčič et al., 2023).
2. Nadelen: De technologie is nog erg nieuw (kinderziektes, de eerste commerciële systemen komen momenteel op de markt (<https://gknhydrogen.ch/>). Veel hydriden hebben dehydrogenerende temperaturen die te hoog zijn voor brandstofcellen, of hoge kosten materialen.

De absorptie van waterstof is exotherm, en desorptie is endotherm, de warmteoverdracht moet dus goed geregeld worden (Barthelemy, Weber en Barbier 2017). Als bij het absorberen de temperatuur toeneemt, zal ook de druk toenemen, hierdoor zal de absorptie stoppen. Bij desorptie moet de temperatuur op niveau gehouden worden om gevraagde druk van het waterstof te krijgen (Klopčič et al., 2023). De meeste omkeerbare opslag mediums hebben een Wt% kleiner dan 3 (Barthelemy et al., 2017), zie ook Figuur . LiBH_4 en NaBH_4 hebben respectievelijk 18.4 wt% en 10.6 wt% zijn, maar moeilijk omkeerbaar.



Figuur 4: Metaalhydriden en hun capaciteit (Barthelemy et al., 2017)

v. Beckhoven et al., 2020 beschrijft dat voor metaal hydride het gewicht van H₂ tussen de 1.2-1.8% wt ligt. Onder de complexe hydriden valt ook alanates als NaAlH_4 . Milanese et al., 2018 beschrijft deze en andere complexe hydriden. Deze complexe hydride is veel onderzocht en kan in drie stappen uiteenvallen in waterstof. (Milanese et al., 2018) beschrijft dat bij de eerste stap 3.7 wt% H₂ en bij de tweede 1.8 wt% H₂ vrij komt. De eerste stap vindt plaats bij een temperatuur van 30 °C en de tweede stap bij 450 °C. De reacties treden alleen langzaam op. Door toevoeging van Ti kan het opladen en ontladen met H₂ sneller, maar het is onvoldoende voor praktische toepassingen.

3.7 Omzetting naar methanol of ammoniak

Een andere mogelijkheid is het omzetten van waterstof (H₂) en stikstof (N₂) naar ammoniak (NH₃). Bij atmosferische druk wordt ammoniak vloeibaar bij -33 °C, waarmee het een veel hoger kookpunt heeft dan waterstof en dus veel makkelijker te vervloeien is. Bij een druk van ongeveer 10 bar is ammoniak vloeibaar bij kamertemperatuur. Dat maakt transport relatief eenvoudig. Ammoniak heeft een hoge energiedichtheid, is CO₂-vrij en er bestaat al een wereldmarkt voor met bijbehorende infrastructuur. De ammoniak kan direct worden toegepast in sommige productieprocessen. Vandaar dat ammoniak een interessante manier is om waterstof te transporteren.

1. Voordelen: Grote afzetmarkt voor ammoniak en goede infrastructuur voor ammoniaksynthese. Ook kan ammoniak worden bewaard in licht gekoelde tanks van -33 °C of bij kamertemperatuur onder een druk van 8-10 bar. Dit maakt het opslaan en vervoeren van ammoniak relatief makkelijk en betaalbaar.
2. Nadelen: De infrastructuren voor het produceren van ammoniak aanwezig, maar is het kraken hiervan nog vrij nieuw en niet energiezuinig. Bovendien zijn er na het kraken extra stappen nodig om de waterstof te zuiveren voor gebruik. Ammoniak is een giftige stof die bij lekkage een negatief effect kan hebben op lucht-, bodem- en waterkwaliteit en op de gezondheid van omwonenden. Vanwege de mogelijk zeer ernstige gevolgen is het daarom de vraag in hoeverre opslag en transport van ammoniak verantwoord is, vooral in de buurt van dichtbevolkte gebieden. Voor vervoer over zee wordt momenteel zeer serieus gekeken naar ammoniak als waterstofdrager.

Een andere waterstof drager in deze categorie is Methanol. Methanol wordt geproduceerd door hydrogenatie van CO₂ met waterstof, waarbij per molecuul CO₂ drie moleculen waterstof nodig zijn. Afhankelijk van de origine van de CO₂ en/of H₂ bron levert dit groene, blauwe of grijze methanol op.

Aangezien het kookpunt van Methanol bij 65 °C ligt, is het een vloeistof bij atmosferische druk en kamertemperatuur, wat transport (zeker over lange afstanden) erg aantrekkelijk maakt. Ook heeft Methanol een hoge energiedichtheid per volume, zoals zichtbaar in figuur 3.

Daarnaast heeft Methanol meerdere aantrekkelijke alternatieven om gebruikt te worden, waardoor een brede toepasbaarheid ontstaat: i) Methanol is een precursor voor een verscheidenheid aan chemische eindproducten, ii) Methanol kan gebruikt worden als brandstof (warmte) en iii) er bestaan Direct Methanol Fuel Cell (DMFC) voor energie uit Methanol.

1. Voordelen: Grote afzetmarkt en goede infrastructuur voor Methanol. Vloeibaar bij atmosferische druk e kamertemperatuur, makkelijk opslaan en vervoer, minder giftig als ammoniak.
2. Nadelen: Groene methanol (vanuit elektrolyse) is duur, efficiëntie is (te) laag

4. Overzicht van opslag- en transporttechnieken

De eerder genoemde bevindingen per technologie en methode zijn samengevat in tabel 2. Deze vergelijking komt uit een review van Yang et al. 2023:

Tabel 2: Overzicht verschillende technieken voor opslag en transport van waterstof

Items		Physical-based H ₂ storage				Material-based H ₂ storage				
		CGH ₂			LH ₂	CcH ₂	Power fuels		LOHC	Metal hydride
		35 MPa	70 MPa	UHS			NH ₃	CH ₃ OH		
	Gravimetric density (wt%, without tank)	100	100	100	100	100	17.7 [56]	12.5 [56]	6.2 [31]	1.8 (FeTiH _{0.9}) [40] 10 (LiAlH ₄) [71] 7.6 (MgH ₂) [72]
	Gravimetric capacity (wt%, with tank)	4.2 (III)* [73] 5.5 (IV)* [73]	3.6 (III) [73] 5.2 (IV) [73] 5.7 (IV) [5]		7–12 [74]	10 (66 K, 35 MPa) [27] 8.7 (72 K, 50 MPa) [27] 7 (78 K, 70 MPa) [27]	n/a	n/a	n/a	n/a
	Volumetric density (g/L, without tank)	23.3 (300 K) [75]	39.0 (300 K) [75]	n/a	71.7 (20 K, 0.4 MPa) [25]	60 (35 K, 5 MPa) [25] 67.8 (120 K, 70 MPa) [25] 69.1 (66 K, 35 MPa) [27] 74.7 (72 K, 50 MPa) [27] 80.3 (78 K, 70 MPa) [27]	107 (293 K) [76] 123 (1 MPa) [56]	99 [56]	56 [32]	150 [54] 86 (MgH ₂) [56] 110 (MgH ₂) [72]

Items	Volumetric capacity (g/L, with tank)	17.4 (III) [73] 17.6 (IV) [73]	25 (III) [73] 26.3 (IV) [73]	n/a	40 [74]	50.9 (66 K, 35 MPa) [27] 51.3 (72 K, 50 MPa) [27] 49.6 (78 K, 70 MPa) [27]	n/a	n/a	n/a	n/a		
	Operating temperature (°C)	−40 to 80	−40 to 80	Ambient temperature	−253	Cryogenic temperatures	n/a	n/a	n/a	n/a		
	Cycle life	5500 for LDV; 15 000 for HDV ^b	5500 for LDV; 15 000 for HDV ^b	1–10 cycles/year ^c		5500 for LDV; 15 000 for HDV ^b	n/a	n/a	n/a	n/a		
	System fill rate (kg/min)	1.5–2 [77]	1.5–2 [77]	n/a	1.5–2 [77]	1.5–2 [77]	n/a	n/a	n/a	n/a		
	H ₂ release rate (g/s)	n/a	>2 [71]	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0.25 ^d	0.005–0.28 [78]		
	Physical-based hydrogen storage					Material-based storage						
		CGH ₂			LH ₂	CcH ₂	Power fuels		LOHC	Metal hydride		
	Energy consumption (kWh/kgH ₂)		35 MPa	70 MPa	UHS			NH ₃	CH ₃ OH			
		To prepare storage condition	1–2.8 [79]	1–3.3 [79]	n/a	6–10 [17]	n/a	8.2–13.3 (calculated in the text)	−2.3 [68]	−9 ^e [31]	Pressure + exothermic	
		To release H ₂	0	0	n/a	0	0	6.3 [56]	6.7 [56]	9 ^f [31]	10.3 (MgH ₂), 0.97 (AlH ₃) [56]	
		TRL	>9	>9	4–6	>9	4–6	> 9	>9	4–6	4–6	
		Long-distance H ₂ transport	Yes ^g	No	No	Yes	No	Yes	Possible	Yes	possible	
		Transport to HRS	Yes ^h	No	No	Yes	No	Yes	Possible	Yes	possible	
		Long-term H ₂ storage	Yes ^h	No	Yes	No	No	Yes	Possible	Yes	possible	
		H ₂ storage at HRS	Yes ^h	No	No	Yes	No	No	No	No	no	
	H ₂ storage in FCEV	Yes	Yes	No	Possible	Possible	n/a	n/a	n/a	n/a		
Items		Physical-based H ₂ storage					Material-based H ₂ storage					
		CGH ₂			LH ₂	CcH ₂	Power fuels		LOHC	Metal hydride		
		35 MPa	70 MPa	UHS			NH ₃	CH ₃ OH				
Application fields	Current technical limitations for application	Relatively low storage system capacity (gravimetric and volumetric)	Relatively low storage system capacity, high cost of the tank, only for LDV	Difficulties in finding a geographically suitable UHS site	Boil-off; energy consumption for the liquefaction process	Validation of performance, durability, safety, and mass production capability due to higher cost [30]	For all: high energy consumption for dehydrogenation process; gas separation/purification needed for CH ₃ OH: DAC for green methanol production for NH ₃ ; high energy consumption for the hydrogenation process				High material cost, low H ₂ release rate, relatively high release temperature	
	Current/potential application	H ₂ storage in HDV	H ₂ storage in LDV	A great amount of H ₂ storage for a long period	H ₂ transport to HRS; H ₂ storage in HDV (in R&D)	H ₂ storage in HDV and LDV (in R&D)	Long-distance H ₂ transport; long-term H ₂ storage, H ₂ storage in HDV and LDV possible					

^aIII: type III pressure vessel; IV: type IV pressure vessel.

^bCycle life as regulated in SAE J2579; LDV, light-duty vehicle; HDV, heavy-duty vehicle.

^cFor aquifers as well as depleted oil and gas fields: 1 to maximum of 2 cycles/year; for salt caverns: ≤10 cycles/year [11].

^dFrom the technical datasheet of 'Release Box 10' from Hydrogenious LOHC technologies GmbH [80].

^eHeat released during catalytic hydrogenation of H₂-DBT at 10–50 bar and 80–320°C.

^fHeat consumed during catalytic dehydrogenation of H₁₈-DBT at 1–5 bar and 260–320°C.

^gOr with lower pressure, CGH₂ transportation through pipeline and/or shipping (see Sections 3.2 and 3.3).

^hOr with lower pressure.

In een interessant en diepgaander review (Amirthan & Perera, 2022) van deze overwegingen komt gecomprimeerde waterstof nog steeds naar voren als de huidige beste keuze, vanwege de volwassen status, hoge efficiëntie en kosteneffectiviteit. Het lijkt op te wegen tegen de zorgen in verband met de lagere volumetrische energiedichtheden en verhoogde veiligheidseisen.

5. Transport van waterstof

Veel literatuur en onderzoeksresultaten zijn beschikbaar rond het vergelijken van de verschillende waterstoftransport mogelijkheden. Volgens een uitgebreide review in 2023 (Muthukumar et al., 2023) is het transport van waterstof een combinatie tussen afstand, hoeveelheid en kosten. Grofweg kan de volgende schets gemaakt worden:

- Waterstof kan worden vervoerd door middel van tankwagens, tubetrailers, pijpleidingen of schepen. Het vervoermiddel dat de voorkeur geniet, hangt af van zowel het transfervolume als de afstand.
- Transport van gecompriemd gas (380 kg op 250 bar of 560-900 kg op 500 -700 bar) is effectief tot 400 km met kosten tussen 0.5 - 0.7 €/kg.
- Voor afstanden tussen 400 en 4000 km is waterstof in vloeibare vorm rendabeler, met kosten rond 0.7 - 2.3 €/kg. Hierbij wordt ongeveer 4000 – 4300 kg H₂ getransporteerd.
- Waterstof door leidingen kan gebruikt worden om grote hoeveelheden waterstof te transporteren. Richtlijnen zijn: 10 - 100 ton per dag is rendabel tot 1800 km voor <1.8 €/kg. Grotere hoeveelheden (100 – 1000 ton per dag) is pas rendabel bij langere afstanden van 5000-7000 km (0.05 – 1.8 €/kg). De investeringen van een pijpleiding zijn vrij hoog.

Bij het project H2Modus ligt de focus op decentrale mobiliteit, waarbij het dus om relatief kleine afstanden gaat (<400 km) en waarbij de hoeveelheden waterstof ook relatief beperkt zijn. Het rekenmodel zal daarom uitgaan van gecompriemd gas, getransporteerd via vrachtwagens of tubetrailers.

6. Inleiding rekenmodel en casussen

Werkpakket 7a van H2Modus richt zich naast bovenstaande theoretische beschouwing van waterstof transport ook op het ontwikkelen van een rekenmodel. Bedrijven, projecten en initiatieven kunnen daarmee aan de hand van hun load-profiel grofweg de kosten bepalen voor het waterstof transport vanuit de productie-site naar de applicatie. Voor het rekenmodel zijn de volgende grenzen of aannames van toepassing:

- Voor transport wordt alleen gekeken naar gecompriemd gas, alle andere hierboven genoemde mogelijkheden zijn buiten beschouwing gelaten.
- Het model heeft de volgende grenzen:
 - Aan de voorkant wordt bij de waterstofproductie-site niet gekeken naar de kosten van de waterstofproductie zelf, alleen het transport van waterstof wordt berekend in dit model.
 - Bij de applicatie houdt het rekenmodel op bij de opslag van waterstof, de keten vanaf de opslag naar het daadwerkelijke gebruik valt buiten de scope van dit model.
- Het rekenmodel gaat uit van toepassing van waterstof ter vervanging van diesel-generatoren. Toepassingen voor het vervangen van aardgas (hoge temperatuur processen) zit buiten de scope van het model.
- Bij het project H2Modus zijn geen load-profielen van concrete toepassingen beschikbaar. Er is daarom gekozen voor een tweetal hypothetische use-cases:
 - Kleinschalig proces: Maaien van een natuurgebied, waarbij 1 grasmaaier betrokken is. Voor de locatie is Aamsveen gekozen, dit is een Natura 2000 natuurgebied van 144 ha tussen Enschede en de Duitse grens ([Overijssel | natura 2000](#))
 - Grootschalig proces: Bouwplaats met meerdere grotere units (3 hijskranen, 5 graafmachines en 3 shovels). Hierbij is de locatie van de bouwplaats gekozen in of rond Arnhem-Nijmegen, en wordt aangenomen dat er 3 bouwprojecten per jaar plaatsvinden.
- Voor de decentrale productie-site van waterstof wordt het Energie Expertisecentrum Flevoland in Marknesse genomen. Hier gaat Roger Energy een productie-site realiseren met een capaciteit van 20-25 megawatt voor waterstof productie voor zwaar transport, de bouw en industrie. Naar verwachting zal de fabriek medio 2027 gaan draaien/produceren (<https://www.eef-flevoland.nl/roger-energy-krijgt-ontwikkeling-voor-waterstof-onderzoek-test-en-productiefaciliteit/>).

7. Uitleg en gebruik rekenmodel

Het rekenmodel voor de kosten van de waterstoflogistiek (levering en opslag) zijn voor verschillende use cases te berekenen, gebruikmakend van de ontwikkelde Excel sheet. Het rekenmodel gaat uit van de volgende 3 scenario's, die worden vergeleken met conventioneel gebruik van diesel:

- Gebruik van waterstof op basis van een waterstoftankstation op locatie:** een tankstation op locatie, een container waterstof wordt hiernaartoe gebracht, het tankstation bevat een compressor en koeling om het waterstof snel naar een van de machines te pompen.
- Gebruik van waterstof op basis van een waterstofvulpaneel op locatie:** Een container wordt naar het vulpaneel toe gebracht. Het vulpaneel heeft alleen geen compressor en koeling. Hierdoor duurt het laden van de machines langer. Een vulpaneel wordt ontworpen voor één type machine. Dit scenario is dus niet geschikt voor verschillende typen machines.

- iii. **Gebruik van waterstof op basis van een waterstof tubetrailer:** een tankwagen rijdt langs de machines. De machines hoeven dus niet naar een vast punt te komen. De tankwagen heeft wel een drukregeling maar koelt niet. Hierdoor tanken de machines in de winter sneller dan in de zomer door verschil in buitentemperatuur. Deze temperatuurschommelingen hebben een groot effect op de laadsnelheid. Aangenomen is dat een tankwagen maximaal 2 keer op een dag langs kan komen

Het rekenmodel berekent voor een opgegeven machinepark aan de hand van het dieselvebruik uit hoeveel waterstof noodzakelijk is (in kg/week), hoe vaak transport nodig is vanuit de decentrale productie-site en welke totale kosten hiermee gemaakt worden (in €/jaar). Het invullen van het rekenmodel gaat via een aantal eenvoudige stappen en invulvelden:

- Tabblad **Beschrijving**: hier staat een algemene beschrijving over het model en hoe dit ingevuld moet worden.
- Tabblad **Machinepark**: vanuit de literatuur (TNO, 2022) zijn een aantal type machines aan het rekenmodel toegevoegd. In deze tabel kan het aantal machines (kolom B) en de maximale grootte van de waterstoftank op de machine (kolom L) worden ingevuld.
De tabel kan worden uitgebreid met andere applicaties, waarbij extra invulvelden noodzakelijk zijn rondom draaiuren per jaar (kolom E) en brandstofverbruik per jaar (kolom F).
- Tabblad **Scenario's**: noodzakelijk invulvelden zijn de huidige of toekomstige dieselprijs en gebruikskosten van het systeem (kolom B).
- Tabblad **Scenario's**: rondom waterstof moeten de huidige of toekomstige transportkosten en prijs van groene waterstof worden ingevuld (kolom B). Ook de afstand tussen de decentrale productiesite en de use case locatie kan worden aangepast.
- Tabblad **Scenario's**: voor de drie verschillende scenario's moeten de kosten worden aangepast, geldend voor de specifieke use case en de huidige of toekomstige situatie (kolom B).
- **Tabblad Kosten per kg H₂**: grafische weergave van de verschillende scenario's en de LCoH (in €/kg) uitgezet tegen de vraag (in kg/week).

Het rekenmodel zal aan de hand van de opgegeven data voor de drie verschillende scenario's de output berekenen (kolom G t/m N). Output bestaat uit de kosten voor transport van waterstof (per jaar), hoe vaak de tankwagen moet langskomen (per jaar en per aantal weken), afschrijvingen van de investeringskosten (per jaar) en de uiteindelijke totale kosten om over te stappen naar het specifieke scenario voor de specifieke use case. De verschillende scenario's worden vergeleken, zowel de cumulatieve kosten als een grafische weergave.

Belangrijkste inzichten tot nu toe met de meest recente versie van deze tool zijn: Een tankstation is per kg/H₂ op een gegeven moment het voordeligst en kan snel laden. Een vulpaneel is niet gewenst, laadtijd is namelijk erg lang en vulpaneel is geschikt voor slechts één type machine. Een tankwagen zal goedkoper (per kg H₂) zijn bij kleinere hoeveelheden en laad vooral in de winter snel.

8. Referenties

- Amirthan, T., & Perera, M. S. A. (2022). The role of storage systems in hydrogen economy: A review. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 108, 104843. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104843>
- Barthelemy, H., Weber, M., & Barbier, F. (2017). Hydrogen storage: Recent improvements and industrial perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(11), 7254-7262. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.178>
- Kim, C., Lee, Y., Kim, K., Lee, U. (2022). Implementation of Formic Acid as a Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC): Techno-Economic Analysis and Life Cycle Assessment of Formic Acid Produced via CO₂ Utilization. *Catalysts*, 12, 1113. <https://doi.org/10.3390/catal12101113>
- Klopčič, N., Grimmer, I., Winkler, F., Sartory, M., & Trattner, A. (2023). A review on metal hydride materials for hydrogen storage. *Journal of Energy Storage*, 72, 108456. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108456>
- Milanese, C., Garroni, S., Gennari, F., Marini, A., Klassen, T., Dornheim, M., & Pistidda, C. (2018). Solid State Hydrogen Storage in Alanates and Alanate-Based Compounds: A Review. *Metals*, 8(8), 567. <https://doi.org/10.3390/met8080567>
- Muthukumar, P., Kumar, A., Afzal, M., Bhogilla, S., Sharma, P., Parida, A., Jana, S., Kumar, E. A., Pai, R. K., & Jain, I. P. (2023). Review on large-scale hydrogen storage systems for better sustainability. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(85), 33223-33259. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.304>
- Perreault, P., Van Hoecke, L., Pourfallah, H., Kummamuru, N. B., Boruntea, C.-R., & Preuster, P. (2023). Critical challenges towards the commercial rollouts of a LOHC-based H₂ economy. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 41, 100836. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2023.100836>
- TNO, 2022. Rekenregels en emissiefactoren voor het bepalen van de emissiereductie bij inzet van uitstootvrij bouwmaterieel. [https:// repository.tno.nl/SingleDoc?find=UID%2050bfbc7b-70fe-406b-87d3-89a737cdfa04](https://repository.tno.nl/SingleDoc?find=UID%2050bfbc7b-70fe-406b-87d3-89a737cdfa04)
- Usman, M. R. (2022). Hydrogen storage methods: Review and current status. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, 112743. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112743>
- v. Beckhoven, J., Hendriks, T., Pan, T., & Pulles, K. (2020). *Hydrogen and hydrogen carriers for inland shipping*. HyNed, HyMove, HAN and KIWA.
- Wikipedia. *Waterstof tanks*. URL: [https://nl.wikipedia.org/wiki/Waterstof tank](https://nl.wikipedia.org/wiki/Waterstof_tank) (mei 2025)