

**VIL**  
EMPOWERING  
LOGISTICS



**HYDROLOG**



# COLOFON

**Redactie**

Filip Van Hulle  
Yannick Van den Broeck

**Eindredactie**

Stephanie Florizoone  
Ludo Sys  
Liesbeth Geysels

**Verantwoordelijke Uitgever**

Liesbeth Geysels

©VIL 2021  
Koninklijkelaan 76  
B-2600 Berchem  
T: +32 (0)3 229 05 00  
[www.vil.be](http://www.vil.be)

Fotomateriaal: deelnemende bedrijven en andere bronnen

Alle rechten voorbehouden.  
Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd,  
opgeslagen in een geautomatiseerd  
gegevensbestand en/of openbaar gemaakt in  
enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch,  
mechanisch, door fotokopieën, opnamen of  
op enige andere manier zonder voorafgaande  
schriftelijke toestemming van de uitgever.

# INHOUD

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Woord Vooraf</b>   | <b>4</b>  |
| <b>1 Duurzaam transport met waterstof</b>                       | <b>6</b>  |
| Wat is waterstof?   | 6         |
| Onderzoeksvragen en methodologie                                | 6         |
| Behandelde logistieke vloten                                    | 7         |
| Zero-emissie in de interne logistiek                            | 8         |
| <b>2 Waterstof en interne logistiek</b>                         | <b>10</b> |
| Toepassingsmogelijkheden waterstof binnen interne logistiek     | 12        |
| Status en beschikbaarheden logistieke toepassingen op waterstof | 14        |
| Perspectieven naar de toekomst                                  | 16        |
| <b>3 Waterstofinfrastructuur</b>                                | <b>18</b> |
| H <sub>2</sub> : onsite productie of aanlevering                | 18        |
| Tankinfrastructuur  | 20        |
| <b>4 Indicatieve TCO</b>  | <b>21</b> |
| <b>5 Proof of concept</b>                                       | <b>24</b> |
| Opzet en scope  | 24        |
| Vergunningstraject  | 24        |
| Veiligheid  | 26        |
| Demonstraties en resultaten                                     | 29        |
| Ervaringen  | 35        |
| <b>6 Conclusie</b>  | <b>36</b> |



## WOORD VOORAF

Met het project Hydrolog wil VIL inzicht verschaffen in de mogelijke waterstoftoepassingen voor de interne logistiek, de baten en kosten, een blik werpen op toekomstige ontwikkelingen en een leidraad bieden voor bedrijven om aan de slag te gaan met waterstof.

Het project Hydrolog focust op logistieke handelingen die plaatsvinden binnen een bedrijfsomgeving, de zogenoemde interne logistiek.

Dit is het proces van het strategisch managen van de doorstroming van producten en processen binnen de muren van de organisatie. Het gaat

dan met name over intern transport, behandeling van materialen, opslag en verpakking. Het intern transporteren van goederen en materialen vormt het uitgangspunt van dit project.

Dit kunnen zowel grondstoffen, halffabrikaten als ook eindproducten zijn. Dergelijke transportbewegingen vinden o.a. plaats op de kaai in de

haven, in productieplants, pakhuizen, distributiecentra, de retailsector, ...

Er werd gekeken naar de beschikbaarheid, de toepassingsmogelijkheden en de toekomstperspectieven van waterstof als aandrijving voor interne logistieke transporttoepassingen.



De nadruk lag in het bijzonder op de transportbewegingen in (bedrijfs) magazijnen en specifieke logistieke activiteiten in een haven- en luchthavenomgeving en niet bij voertuigen/rollend materieel die zich op de openbare weg begeven voor transport-, distributie- of logistieke doeleinden, zoals vrachtwagens, kranen, graafmachines, bulldozers, bakwagens, ...

Dit rapport bundelt de belangrijkste inzichten in de uitdagingen en de op-

portunities, alsook de voornaamste resultaten uit de Proof of Concept waarin het idee van werken met waterstof werd uitgetest.

VIL dankt iedereen die rechtstreeks of onrechtstreeks heeft meegewerkt aan de realisatie van dit project en in het bijzonder de deelnemende bedrijven Antwerp Euroterminal, Aertssen, Air Liquide, Brussels Airport, Delhaize, DEME Group, Ecosource, Engie, Fluxys, Inovyn, Kalmar Global, Motrac, MPET, POM Limburg, PSA Antwerp,

Rentaloc, STILL en Toyota Material Handling. Ook dank aan onze partner in dit project, WaterstofNet, en het Agentschap Innoveren en Ondernemen (VLAIO) dat dit project financieel mee ondersteunde.

# 1. DUURZAAM TRANSPORT MET WATERSTOF

## Wat is waterstof?

Waterstof ( $H_2$ ) is het meest voorkomende, lichtste en eenvoudigste element in het universum.  $H_2$  is een kleurloos, reukloos en niet-giftig gas bij kamertemperatuur, wordt vloeibaar bij  $-252,77\text{ }^\circ\text{C}$  en een vaste stof bij  $-259,2\text{ }^\circ\text{C}$ . Waterstof heeft ten opzichte van andere brandstoffen een zeer lage energie-inhoud per volume eenheid ( $\text{MJ}/\text{m}^3$ ), maar wel een hoge energie-inhoud per massa eenheid ( $\text{MJ}/\text{kg}$ ). Aangezien het 14 keer lichter is dan lucht, heeft het compressie nodig om bepaalde hoeveelheden op te slaan en om gebruikt te worden.

Het komt van nature quasi niet in afzonderlijke vorm voor maar wordt gemaakt uit andere moleculen door waterstof ( $H_2$ ) af te splitsen. Een groot deel van de waterstofatomen die op aarde voorkomen, is gebonden in water. Waterstof is vrij van broeikasgasemissies bij gebruik, maar moet wel geproduceerd worden. De productiewijze ervan bepaalt de duurzaamheid van de waterstof.

Grijze waterstof wordt gemaakt van methaan ( $\text{CH}_4$ ) via het zogenoemde Steam Methane Reforming (SMR) proces. Bij de productie wordt het koolstofatoom afgesplitst van het aardgas-molecuul door dit te koppelen aan zuurstof, met  $\text{CO}_2$  als resultaat. Zowat 90 % van de waterstofproductie wereldwijd is grijze waterstof op fossiele basis en wordt gebruikt voor de behandeling van petrochemicaliën en voor de productie van ammonia en methanol. In Vlaanderen wordt de productie van grijze waterstof geschat op 207 kiloton.<sup>1</sup>

Grijze waterstof kan low carbon gemaakt worden door het grootste deel van de vrijgekomen  $\text{CO}_2$  in het

productieproces af te vangen en vervolgens te stockeren (carbon capture and storage – CCS) of te gebruiken als grondstof (carbon capture and usage). We spreken dan van blauwe waterstof, waarbij de productiebron evenwel nog steeds fossiel is. Zogenaamde rest-waterstof die als bijproduct vrijkomt bij bijvoorbeeld de productie van chloor, wordt ook blauwe waterstof genoemd aangezien deze ook een laag koolstofgehalte kent. De  $\text{CO}_2$ -uitstoot wordt immers berekend bij de productie van het eigenlijke product.

Algemeen gesproken wordt blauwe waterstof als een overgangsfase gezien richting groene waterstof. Groene waterstof wordt gemaakt uit water met behulp van hernieuwbare energiebronnen via het elektrolyse proces dat ervoor zorgt dat water ( $\text{H}_2\text{O}$ ) zich splitst in zuurstof ( $\text{O}_2$ ) en waterstof ( $\text{H}_2$ ). De productie van een kilo waterstof vergt ongeveer 50 kWh en het resultaat heeft een energiewaarde van 35 kWh (rendement 70 %). De productiewijze bepaalt ook de kostprijs van waterstof, zoals onderstaande grootteorde (voor Nederland, voorjaar 2020) aangeeft. De prijs van groene waterstof ligt (in Vlaanderen) eerder in de categorie 6 - 8 € per kg:<sup>2</sup>

| Productieprijs (excl. compressie, transport, belasting, ...) |                    |
|--|--------------------|
| Grijze waterstof   | 1,50 - 2,50 € / kg |
| Blauwe waterstof   | 2,25 - 3,25 € / kg |
| Groene waterstof   | 3,00 - 6,00 € / kg |

Waterstof is dus een energiedrager die zich leent voor toepassingen binnen diverse gebieden, zoals grondstof voor de industrie, aandrijving voor allerlei transporttoepassingen, opslagmedium voor (overtollige) hernieuwbare elektriciteit of als bron van elektriciteit/warmte. In dit project staat waterstof

centraal als zero-emissie aandrijving van logistieke toepassingen.

De prijs van groene waterstof wordt voornamelijk bepaald door de prijs van elektriciteit en de prijs van de elektrolyse-installatie (levensduur en gebruiksduur per jaar). De elektrolyse-techniek is allesbehalve nieuw, maar wordt nog maar op een betrekkelijk kleine schaal toegepast wat het een dure technologie maakt. Een opschalingsscenario van elektrolyse in combinatie met een grotere beschikbaarheid van (goedkope) groene stroom moet de prijs van groene waterstof het komende decennium drukken. Dit zal bovendien sterk regio-afhankelijk zijn: voor Europa wordt een prijs rond 2,5 € per kg in 2030 voorspeld.<sup>3</sup>

## Onderzoeksvragen en methodologie

Dit project wil antwoorden bieden op een aantal onderzoeksvragen. Een verkenning betreft de toepassingsmogelijkheden van waterstof binnen de interne logistiek. Waterstof biedt, samen met batterij-elektrische aandrijvingen, zero-emissie oplossingen voor interne transporttoepassingen. Dit project brengt in kaart wat vandaag de dag het potentieel is van waterstof voor interne logistieke applicaties, wat de huidige beschikbaarheden zijn en wat de perspectieven zijn voor de toekomst.

Material handling equipment op waterstof behoeft een specifiek gebruiksprofiel om maximaal te renderen en zo kostenefficiënt mogelijk te zijn. In het bijzonder met het voornaamste zero-emissie alternatief, namelijk batterij-elektrische oplossingen, is een diepgaande vergelijking nodig op vlak van CAPEX (kapitaaluitgaven), OPEX (operationele uitgaven),

<sup>1</sup> Isabel François et al (2018), "Het potentieel voor groene waterstof in Vlaanderen", p.6

<sup>2</sup> <https://opwegmetwaterstof.nl/kostenaspecten-van-waterstof/>

<sup>3</sup> Hydrogen Council 2020, "Path to hydrogen competitiveness A cost perspective", p.21





randvoorwaarden, ... De inzetbaarheid van beide technologieën wordt vertaald naar material handling equipment voor interne logistiek waarbij de specificiteit, dan wel de complementariteit aangegeven wordt.

Waterstoftoepassingen staan niet op zichzelf, maar hebben infrastructuur nodig om te kunnen functioneren. Een tweede onderzoeksvraag gaat na wat er als bedrijf nodig is om aan de slag te kunnen gaan met waterstof voor de eigen interne logistiek. Nadat duidelijk wordt welke toepassingen in welke omstandigheden ingezet kunnen worden, kan er gekeken worden naar de totale eigendomskosten (Total Cost of Ownership - TCO) voor een vloot van material handling equipment op waterstof.

De randvoorwaarden die een rol spelen in een switch naar waterstof komen aan bod tijdens de Proof of Concept.

Het gaat over het wettelijk kader en welke regelgeving van toepassing is voor bijvoorbeeld vergunningen of het waarborgen van de veiligheid.

Om deze onderzoeksvragen te kunnen beantwoorden, werd een diepgaande literatuurstudie uitgevoerd op basis van wetenschappelijke bronnen uit binnen- en buitenland. Aangezien logistieke toepassingen op waterstof zich nog grotendeels in test- en demonstratiefases bevinden, is het tevens van belang te kijken naar beschikbare conclusies en data uit de meest relevante Europese projecten.

Wat Hydrolog niet ambiëert is een analyse van de milieu-impact van waterstofaangedreven material handling equipment, met name de productie en/of transport van de waterstof, de milieu-impact van de productie van waterstofgerelateerde onderdelen (brandstofcel, opslagtank, tankinfra-

structuur, ...) of de recyclage van deze materialen op het einde van hun levenscyclus.

## Behandelde logistieke vloten

Het is van belang om een zicht te krijgen op de verschillende soorten materiaalbehandelingstoepassingen die momenteel het meest gangbaar zijn op bedrijfsites en in een (lucht) havenomgeving.

Material handling equipment wordt onderverdeeld in een aantal categorieën: transportapparatuur, plaatsingsapparatuur (bv. liften), materiaal voor eenheidsladingen (bv. pallets) en opslagtoepassingen (bv. rekken). In dit project wordt enkel naar transporttoepassingen gekeken en in het bijzonder toepassingen die in staat



zijn het vervoer van goederen binnen een fabrieks- of bedrijfsterrein over significante afstanden te verzorgen. Dit om het onderscheid te maken met bijvoorbeeld conveyors, kranen, ... die op vaste posities opereren.

Dit project beperkt zich tot material-handling equipment dat gemotoriseerd is (zodanig dat het in theorie ook zero-emissie aangedreven kan worden) en waarbij een bestuurder vereist is, in tegenstelling tot bijvoorbeeld automatisch geleide voertuigen of transpaletten.

Binnen een magazijn of bedrijfssite gaat het om toepassingen voor het vervoer van goederen die op een pallet staan. Vorkheftrucks zijn hier de bekendste en meest toegepaste applicatie. Vorkheftrucks kennen vele varianten voor zowat elke mogelijke toepassing of uitdaging, zoals voorladers, stapelaars, hoogbouwtrucks, zijladers, vierwegheftrucks, terreinheftruck, verreikers, pallettrucks, orderverzameltrucks, ... Heftrucks vormen dan ook in het bijzonder het uitgangspunt van dit project.

Havens en luchthavens maken uiteraard ook gebruik van heftruckvarianten, maar kennen daarnaast ook een ruim arsenaal aan specifieke logistieke voertuigen. Bij luchthavens gaat het

enerzijds om vrachtwagenvarianten, zoals tankwagens, watervrachtwagens, cateringtrucks, ruimdiensten, ... of bussen voor het vervoer van passagiers en anderzijds om 'luchthaveneigen' applicaties zoals rijdende platformen of trappen, bagageladers, (cargo)trekkers, vliegtuigslepers of tractoren.

Havens hebben een eigen logistieke context die verband houdt met het behandelen van containers, met name het laden en lossen van zeeschepen via kranen, de stockage van containers en het overladen naar andere transportmodi zoals treinen, vrachtwagens of binnenvaartschepen.

## Zero-emissie in de interne logistiek

De vloot van heftrucks op bedrijfs-sites en in warenhuizen wordt vandaag aangedreven door diesel, LPG en batterij-elektrische oplossingen. In regel geldt dat hoe zwaarder of intensiever de toepassing, hoe meer er van dieselmotoren gebruik wordt gemaakt. Een ander onderscheid, is de opdeling tussen inzet in een afgesloten omgeving of op open terrein. In het laatste geval kan vaker geopteerd worden voor diesel of LPG, terwijl indoor zero-emissie gebruikt wordt.

Luchthavens leunen nog hoofdzakelijk op dieselaangedreven voertuigen voor hun specifieke logistieke handelingen, zoals het voortduwen van vliegtuigen of het vervoeren van bagage en passagiers. Een enquête uit 2013 van Ground Support Worldwide spreekt van een penetratie van 10 %. Voor de meest gebruikte toepassingen bestaan intussen batterij-elektrische varianten. Zij vormen een milieuvriendelijk alternatief voor dieselaandrijving, aangezien

hun inzet meestal periodiek is. Deze batterij-aangedreven toepassingen zijn evenwel nog duur in aankoop en schieten soms te kort als een intensieve inzet vereist is en vragen een doorgedreven planning naar laadinfrastructuur en laadtijden.

Havens kampen met gelijkaardige duurzaamheidsuitdagingen. Het materiaal dat zij gebruiken voor het behandelen van containers, is dikwijls nog zwaarder en onderhevig aan een intensieve inzet en daarom voor hun aandrijving nog meer afhankelijk van verbrandingsmotoren op diesel. Het energieverbruik van vrachtbehandelingsapparatuur heeft een aanzienlijke invloed op de duurzaamheidsprestaties en energiekosten van een haven.

Een vergelijkende studie inzake technische, economische en ecologische aspecten van aandrijfmechanismen voor havengebonden werktuigen van Tom Van Den Noortgaete uit 2015 bracht in de haven van Antwerpen 1.700 havengebonden werktuigen in eigendom van het havenbedrijf en private havenoperatoren in kaart. Het geheel aan vorkliften, heftrucks, reach stackers, straddle carriers en mobiele havenkranen waren toen goed voor een jaarlijkse uitstoot van 881 ton Nox, 767 ton CO<sub>2</sub>, 42 ton fijn stof en een SOx-uitstoot van 358 kg. (Figuur 1)

De studie stelt dat het leeuwendeel van de havengebonden werktuigen dieselaangedreven zijn en dat voor toepassingen met een vermogen lager dan 30 kW piek een batterij-elektrische oplossing een mogelijk alternatief kan zijn voor verbrandingsmotoren, terwijl waterstof toen voornamelijk nog als langetermijnoplossing bekeken moest worden.

Wal- en brugkranen kunnen rechtstreeks elektrisch aangedreven worden



zonder batterijen. Hun milieu-impact is dan sterk afhankelijk van de gebruikte elektriciteitsmix. Voor andere haventoe-passingen beginnen zich stilaan zero-emissie alternatieven aan te bieden. Voor container handlers of zware reach stackers zijn er momenteel geen volledig batterij-elektrische alternatieven beschikbaar, maar wel hybride of LNG-exemplaren. Volelektrische toestellen worden getest in demoprojecten en worden commercieel beschikbaar verwacht in de periode 2023-2030. Yard trekkers zijn wel al beschikbaar met batterij aandrijving.

Zowel luchthavens als havens adopteren in toenemende mate strategische visies en plannen die inzetten op klimaatneutraliteit van hun activiteiten. Uiteraard stimuleert dit de omslag naar

het gebruik van zero-emissie toepassingen voor hun logistieke activiteiten. Batterij-elektrische toepassingen zijn reeds commercieel beschikbaar in Europa, terwijl brandstofcel-elektrische toepassingen op waterstof nog in demonstratie- en testfasen verkeren. Meer en meer wordt echter duidelijk dat batterij-elektrische toepassingen hun beperkingen hebben wat betreft maximale capaciteit en inzetbaarheid, waardoor in toenemende mate naar brandstofceltoepassingen gekeken wordt in heavy duty omgevingen zoals (lucht)havens.

In bedrijfsomgevingen wordt ingezet op een omslag naar zero-emissie logistiek voor de evidente reden dat het de arbeidsomstandigheden verbetert en gezondheidsrisico's voor de opera-

toren van de toestellen vermindert. Daarnaast vormen ook brandstofbesparingen en de daaraan verbonden kostenreducties een belangrijke drijfveer. Bedrijven hebben dikwijls eigen doelstellingen om de uitstoot van broeikasgassen terug te dringen en een zero-emissie logistiek park draagt daartoe bij. Minder tastbaar, maar zeker niet onbelangrijk, is de positieve impact op het imago van een bedrijf als het zero-emissie material handling kan uitspelen naar zijn klanten toe.

**Figuur 1**

|                            | Aantal | Aandeel | Aantal werktuigen per stage |     |      |      |    | Vermogen [kW] | CO <sub>2</sub> [ton/jaar] | NOx [ton/jaar] | PMx [ton/jaar] | SOx [ton/jaar] |
|----------------------------|--------|---------|-----------------------------|-----|------|------|----|---------------|----------------------------|----------------|----------------|----------------|
|                            |        |         | I                           | II  | IIIa | IIIb | IV |               |                            |                |                |                |
| Vorkliften en heftrucks    | 831    | 48,9%   | 130                         | 34  | 591  | 63   | 14 | 70            | 190,50                     | 210,62         | 13,67          | 0,077          |
| Straddle carriers          | 363    | 21,4%   | 2                           | 139 | 33   | 188  | 1  | 250           | 260,30                     | 292,53         | 9,07           | 0,126          |
| Mobiele havenkranen        | 47     | 2,8%    | 12                          | 16  | 12   | 8    | 0  | 800           | 106,75                     | 151,66         | 7,03           | 0,046          |
| Reach stackers             | 93     | 5,5%    | 4                           | 0   | 84   | 2    | 3  | 250           | 67,49                      | 74,09          | 3,71           | 0,033          |
| Terminal trekkers          | 78     | 4,6%    | 13                          | 9   | 49   | 7    | 0  | 110           | 33,69                      | 35,83          | 2,19           | 0,012          |
| RORO tractors              | 88     | 5,2%    | 1                           | 3   | 84   | 0    | 0  | 205           | 47,91                      | 54,76          | 2,74           | 0,023          |
| Empty container handlers   | 79     | 4,6%    | 2                           | 0   | 64   | 2    | 11 | 170           | 35,23                      | 34,94          | 1,73           | 0,017          |
| Overige machines           | 120    | 7,1%    | 15                          | 3   | 93   | 2    | 7  | -             | 24,70                      | 26,50          | 1,4            | 0,023          |
| Wieladers                  | 44     | -       | -                           | -   | 13   | -    | -  | 150           | -                          | -              | -              | -              |
| Transport tussen terminals | 33     | -       | -                           | -   | -    | -    | -  | -             | -                          | -              | -              | -              |
| SKID steer                 | 9      | -       | -                           | -   | 9    | -    | -  | 50            | -                          | -              | -              | -              |
| Rail-route trekker         | 2      | -       | -                           | -   | 1    | 1    | -  | -             | -                          | -              | -              | -              |
| Andere type machine        | 32     | -       | -                           | -   | -    | -    | -  | -             | -                          | -              | -              | -              |
| Totaal                     | 1699   |         | 179                         | 204 | 1010 | 272  | 36 |               | 766,56                     | 880,92         | 41,54          | 0,358          |



## 2. WATERSTOF EN INTERNE LOGISTIEK

Wereldwijd gaat de meeste aandacht voor waterstof als duurzame energiedrager naar het gebruik ervan in transport. De nadruk hierin ligt op batterij-elektrische aandrijvingen, maar er is een toenemende belangstelling voor aandrijflijnen waarin niet alleen batterijen, maar ook waterstof gevoede brandstofcellen een rol spelen.

Brandstofcellen zijn elektrochemische toestellen die chemische energie direct omzetten in elektrische energie om bijvoorbeeld een elektromotor aan te drijven. Een typische brandstofcel heeft een rendement van ca. 50 %, dit is hoger dan een verbrandingsmotor

maar lager dan een elektromotor gevoed door een batterij, zoals blijkt uit onderstaande tabel.

Het rendement bij energieomzettingen is de verhouding tussen de uitgaande nuttige energie en de energie die erin

gaat. Daarbij treden zo goed als altijd verliezen op. In een verbrandingsmotor wordt uiteindelijk maar ongeveer 30 % van de energie die in de brandstof aanwezig is in bewegingsenergie omgezet, de rest wordt afgevoerd als warmte. Elektromotoren hebben een rendement tot wel 90 % en brandstofcellen opereren met een efficiëntie van ongeveer 50 %. Het tank to wheel principe rekent hier nog de energieverliezen bij die eigen zijn aan het gebruik van een voertuig zelf.

In theorie kan zowat elk transportmiddel aangedreven worden door een brandstofcel of een verbrandingsmotor op waterstof of een daarvan afgeleide brandstof (bv. methanol of synthetische brandstoffen). Omwille van bovenvermelde efficiëntie- en rendementsvoordelen van brandstofcellen in combinatie met een elektromotor,

|           | Motor efficiëntie | Efficiëntie van tank to wheel |
|-----------|-------------------|-------------------------------|
| Gas       | 20 %              | 15 %                          |
| Diesel    | 30 %              | 20 %                          |
| Electric  | 82 %              | 74 %                          |
| Fuel cell | 50 %              | 43 %                          |

worden waterstofvoertuigen voor de grote meerderheid aangedreven door brandstofcellen en dus niet door verbrandingsmotoren.

In de overgrote meerderheid van de transporttoepassingen gaat het om waterstof in gasvorm dat onder druk gebracht wordt. In het geval van bussen, vrachtwagens en ook logistieke toepassingen gaat het zo goed als altijd om 350 bar, terwijl voor personenwagens geopteerd wordt voor 700 bar. Batterij-elektrisch en waterstof-elektrisch rijden is complementair, waarbij kleinere transportmiddelen met beperkte eisen aan actieradius, vooral batterij-elektrisch zullen zijn, terwijl zwaardere transportmiddelen met een grote actieradius en/of energiebehoefte zich meer lenen voor op waterstof gebaseerde oplossingen.

Figuur 2 stelt deze complementariteit grafisch voor waarbij batterij- en waterstofvoertuigen elk hun opti-

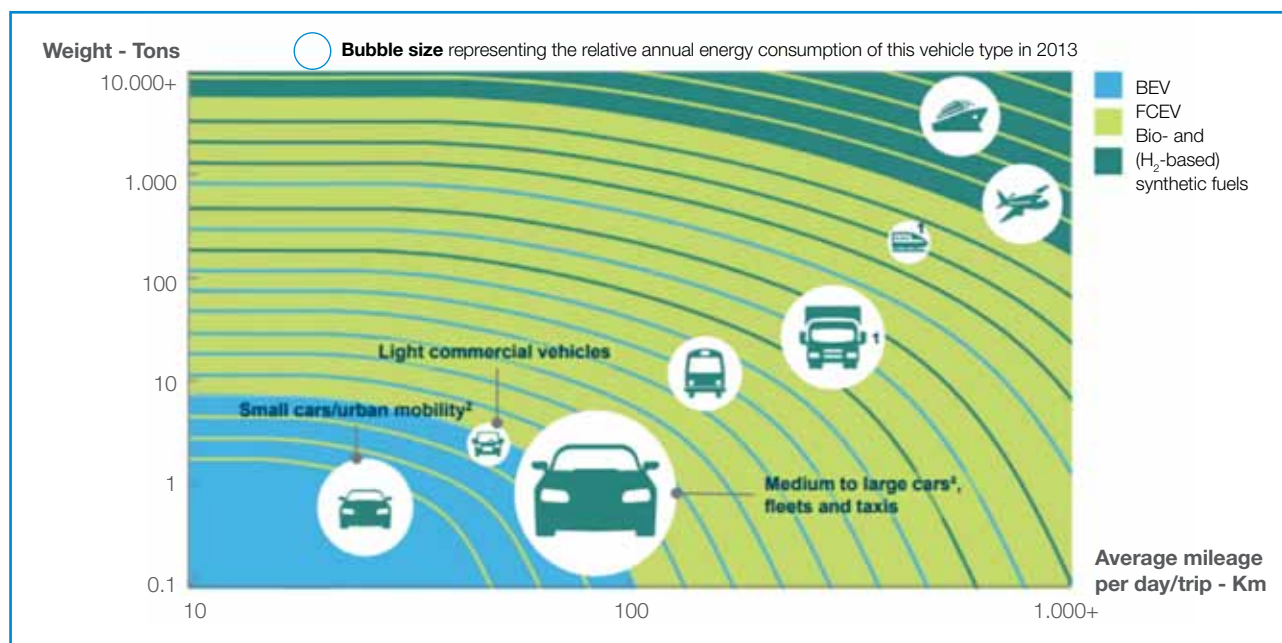
maal speelveld hebben gelet op het gewicht en de af te leggen afstand. Batterijvoertuigen scoren best in de categorie lichtgewicht en een beperkte verplaatsing, waterstof in het brede middensegment van middelzware tot zware toepassingen met grotere afstandsvereisten. Synthetische brandstoffen tot slot (eveneens op waterstofbasis) lijken het meest geschikt als aandrijving van zeer zware en energie-intensieve toepassingen. Elke technologie heeft echter ook een onder- en een bovengrens waar overlappings optreden en gekeken moet worden naar de concrete inzet van het voertuig om de meest geschikte aandrijftechnologie te bepalen.

Het voordeel van waterstofvoertuigen ten opzichte van batterijvoertuigen is hun korte tanktijd (enkele minuten), hun grotere actieradius en de hoge energiedensiteit (per eenheid van massa) van waterstof die 40 keer hoger ligt dan batterijen waardoor voertuigen met

een grote energiebehoefte bij uitstek geschikt zijn voor een aandrijving op waterstof. Batterijen nemen toe in massa naarmate er meer capaciteit en/of vermogen gevraagd wordt. Nuvera berekende bijvoorbeeld dat een reach-stacker bij maximale inzet een lithium ion batterij van 800 kWh nodig heeft met het gewicht van 4,5 à 5 ton maar slechts ruimte en draagkracht biedt aan een batterij met een capaciteit van 400 kWh en dus maar de helft van de energiebehoefte.<sup>4</sup>

Nadeel van de waterstoftechnologie is momenteel de hoge prijs van groene waterstof, de hoge kostprijs van tankinfrastructuur en in het verlengde daarvan de beperkte beschikbaarheid van (openbare) tankinstallaties. Waterstofvoertuigen zijn op technologisch vlak minder volwassen dan hun batterij-elektrische tegenhangers, waardoor ze nog niet gestandaardiseerd zijn en dus duurder in productie en aanschaf. Een aantal specifieke

**Figuur 2 - Complementariteit van batterij- en waterstofvoertuigen**



<sup>4</sup> Nuvera (2019), "Enabling Electrification: A Fuel Cell Case Study at the Ports", <https://www.nuvera.com/blog/enabling-electrification-a-fuel-cell-case-study-at-the-ports>

Bron: Toyota, Hyundai, Daimler

toepassingen zitten in fase van prototypes of (vroeg) demonstratie. Dat maakt dat er globaal gesproken veel minder waterstoftoepassingen beschikbaar zijn in vergelijking met batterij-elektrische tegenhangers.

De verwachtingen zijn evenwel dat de total cost of ownership van waterstoftoepassingen het komende decennium mits de benodigde opschaling significant zal dalen. Het gaat dan met name over de grootste kostenposten, zijnde de waterstof zelf en de dure componentkosten (elektrolyse, fuel cells, compressie, tanks, ...). De Hydrogen Council - een initiatief van 92 toonaangevende energie-, transport-, industrie- en investeringsmaatschappijen met een gezamenlijke langetermijnvisie om de waterstofeconomie te ontwikkelen - voorspelt dat mits de nodige investeringen en het vervullen van randvoorwaarden de meeste waterstoftoepassingen competitief zullen zijn met koolstofarme tegenhangers tegen 2030. In een aantal gevallen is er zelfs al sprake van een

competitief model in vergelijking met de bestaande fossiele toepassingen van vandaag, zoals geïllustreerd wordt in figuur 3.

## Toepassingsmogelijkheden waterstof binnen interne logistiek

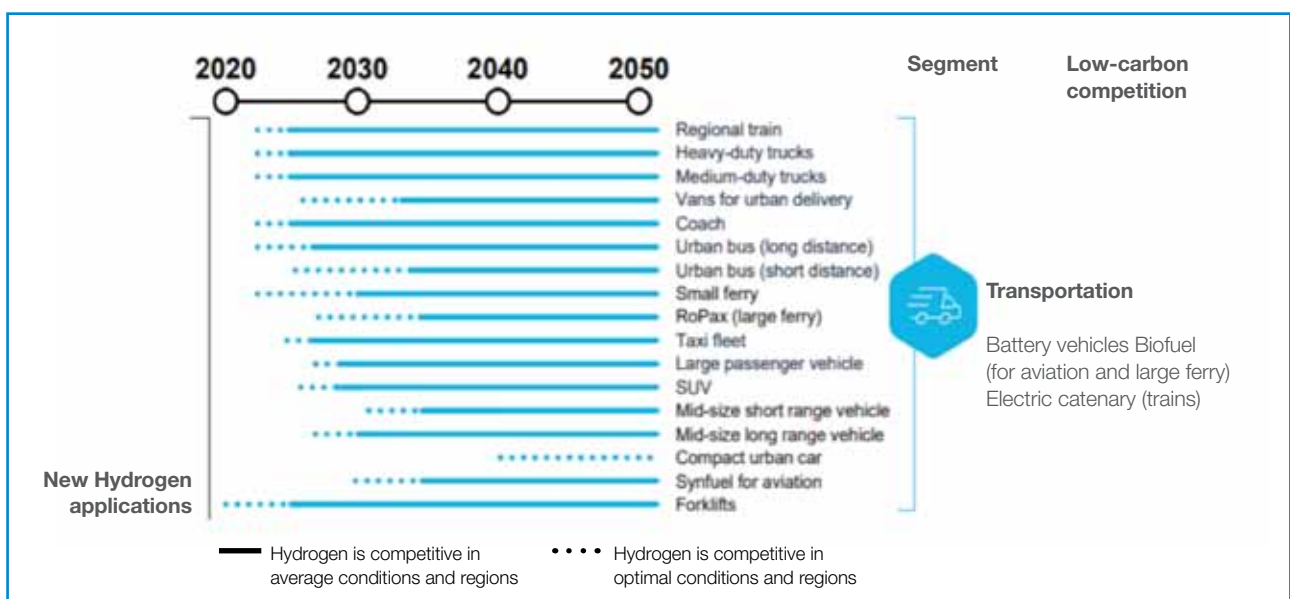
Technology Readiness Levels (TRL - technologiegereedheid) is een type meetstelsel dat wordt gebruikt om de maturiteit van een bepaalde technologie te beoordelen. Er zijn negen technologiebereidheidsniveaus. TRL 1 is de laagste en markeert de start van onderzoek rond een bepaald basisprincipe, terwijl TRL 9 de hoogte is waarbij een technologie zich bewezen heeft en klaar is voor commercialisatie.

Waterstofaangedreven heftrucks hebben een hoog TRL niveau wat wil zeggen dat hun technologische onderbouw matuur en klaar voor de

markt is. In die mate zelfs dat heftrucks op brandstofcellen gelden als de meest inzetbare waterstoftransportapplicatie en in principe vandaag al competitief kunnen zijn met de klassieke aandrijvingen zoals verbrandingsmotoren op fossiele brandstoffen (diesel en LNG) en zelfs batterij-elektrische toepassingen. Het gaat om lichtere heftrucks geschikt voor gebruik in een magazijn met een hefvermogen van 2,5 tot 3,5 ton. In de meeste gevallen gaat het om omgebouwde elektrische heftrucks naar een brandstofceloplossing waarbij de batterij vervangen wordt door een fuel cell en gastank. (Figuur 4)

Container handling equipment voor havenactiviteiten aangedreven op waterstof bevindt zich op TRL-schaal 5 wat vroege demonstratiefase betekent. Havens bieden echter een uitstekende proeftuin voor brandstofcellen omwille van de hoge intensiteit en de heavy duty toepassingen en kunnen in deze context bij uitstek hun levensvatbaarheid tonen als alternatieven voor verbrandingsmotoren. Havens bieden opportuniteiten voor toepassingen van

**Figuur 3 - Competitiviteit koolstofarme en fossiele toepassingen**



Bron: Hydrogen Council, "Path to hydrogen competitiveness. A cost perspective", 2020, p.10

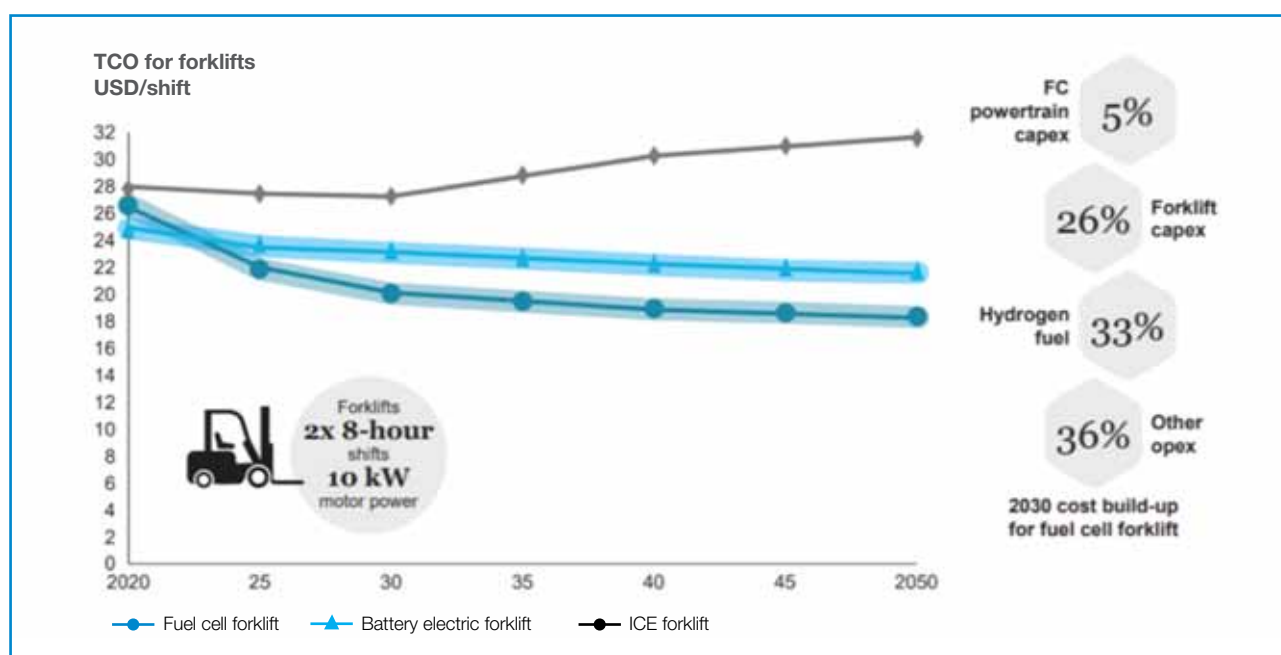
waterstof, bijvoorbeeld als brandstof voor schepen of als walstroom. Havens zijn tevens logistieke hubs met veel truckbewegingen en waar naar verwachting in de toekomst waterstof als grondstof zal toekomen

en vanuit havens verder verspreid worden naar het hinterland. Ook cargo handling equipment op waterstof zit op TRL-level 5 met de ontwikkeling van prototypes en de eerste demonstratieprojecten, die

evenwel grotendeels buiten Europa verlopen.

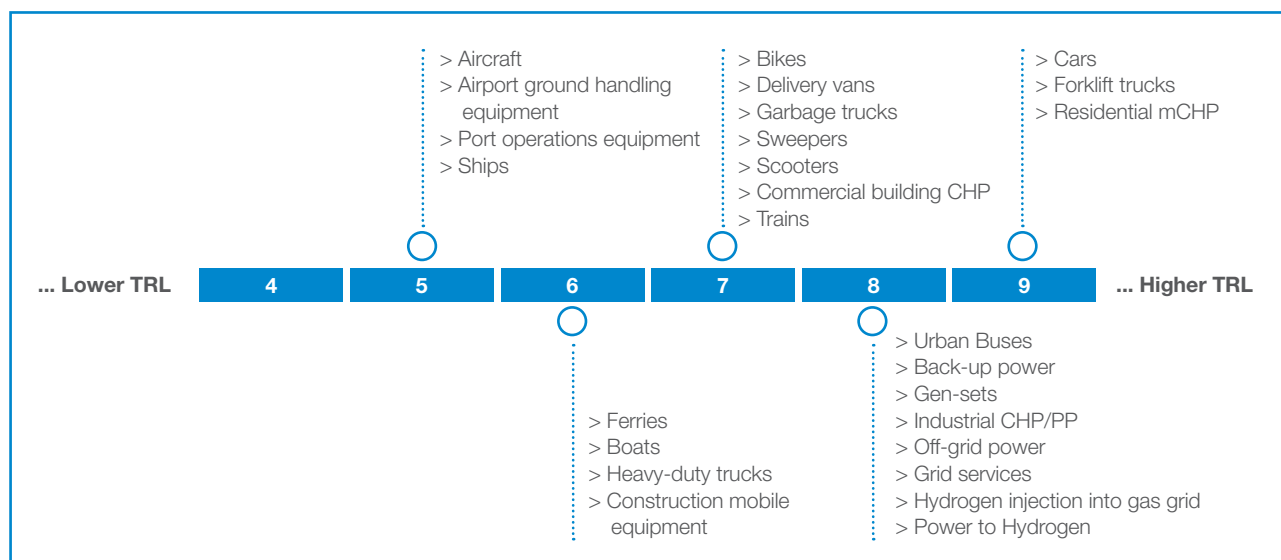
Figuur 5 vat de TRL-levels van de behandelde logistieke vloten op waterstof samen.<sup>5</sup>

**Figuur 4 - TCO voor heftrucks**



Bron: Hydrogen Council, "Path to hydrogen competitiveness. A cost perspective", 2020, p.45

**Figuur 5 - TRL-levels van logistieke vloten op waterstof**



5 Roland Berger (2017), "Development of Business Cases for Fuel Cells and Hydrogen Applications for Regions and Cities", p.7



## Dagelijks waterstofverbruik van port handling equipment (bron: PNNL)

RTG Crane - 45 kg/day



Forklift - 5 kg/day

Craddle Carrier - 46 kg/day



## Status en beschikbaarheden logistieke toepassingen op waterstof

### Status

Eind 2019 waren er wereldwijd meer dan 30.000 brandstofcelheftrucks tot 3,5 ton in gebruik, zo goed als allemaal in de Verenigde Staten. In Europa rijden ongeveer 300 waterstofheftrucks rond. Zwaardere heftrucks op waterstof zijn

nog zeldzaam. SSAB, een Zweeds-Fins bedrijf gespecialiseerd in het verwerken van grondstoffen tot staal, test in het Zweedse Oxelösund een middelgrote elektrische vorklift van Kalmar met een hefvermogen van 16 ton die werd omgebouwd naar waterstof. De heftruck heeft een 54 kW Fuel Cell van PowerCell, een 60 kWh lithium-ion batterij en 9 kg waterstof aan boord en werd getest tussen 2017 en 2019.<sup>6</sup> Hyster-Yale Materials Handling (Hyster) geldt als één van de voortrekkers van

brandstofcelontwikkelingen voor heavy duty heftrucks via dochteronderneming Nuvera die brandstofceloplossingen ontwikkelt.

Het Environmental Protection Agency van de Verenigde Staten identificeerde eind 2019 19 fuel cell gerelateerde havenprojecten in het land, waarvan elf in ontwerpfase en acht in lopende demonstratie. De demonstraties betreffen o.a. drayage trucks, container heftrucks, cargo trekkers en waterstoftankstations.

Het Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) deed op basis van het huidige dieselvebruik een inschatting van het dagelijkse waterstofverbruik van port handling equipment, zoals figuur 6 weergeeft. PNNL berekende eveneens wat het theoretische jaarverbruik zou zijn van alle port handling equipment indien aangedreven op waterstof voor de havens van Seattle en Tacoma en kwam hierbij op een jaartotaal van ruim 4.400 ton. Al deze voertuigen op waterstof laten rijden zou tevens resulteren in een CO<sub>2</sub>-besparing van meer dan 44.000 ton. Het totaal potentieel aan waterstof voor deze havens schat men op 22.000 ton H<sub>2</sub> (incl. aanmeren en manoeuvreren zeeschepen, havenboten, locomotieven, trucks, ...).



Middelzware elektrische heftruck (16 ton) van Kalmar die een waterstofaandrijving kreeg (bron: Kalmar)

<sup>6</sup> <https://www.powercell.se/en/cases/ssab/>



Container Handler - 56(L) 25(E) kg/day

Reach Stacker - 33 kg/day



Yard Tractor - 21 kg/day

In Europa werd midden 2019 het H<sub>2</sub>Ports-project afgetrapt in Valencia. De bedoeling is om gedurende twee jaar twee types port handling equipment in real-life omstandigheden te testen. Het gaat om een reach stacker van 54 ton in de MSC terminal met een fuel cell vermogen tussen de 90 en de 120 kW en een yard tractor op de Valencia Terminal Europa met een fuel cell vermogen van 85 kW. Dit is het eerste project in Europa dat port handling equipment met brandstofcellen zal testen. De reach stacker is van de Hyster-Yale groep en de yard tractor betreft een elektrisch exemplaar waar waterstof als range extender zal functioneren. De reach stacker van Hyster krijgt twee fuel cells van Nuvera, terwijl de yard tractor "FCmove" brandstofcellen van Ballard krijgt.

In Nederland hebben Terberg Benschop B.V. en zepp.solutions B.V. een demonstratiemodel yard trekker met brandstofcellen ontwikkeld. De specificaties van deze YT203-H2 voldoen aan alle operationele eisen voor toepassing in de logistiek, distributie en havens. Qua vermogen en autonomie benadert dit prototype de elektrische YT203-EV waarvan het is afgeleid, maar kent een veel kortere tanktijd. De YT203-EV heeft een combinatie-

gewicht van 38 ton met een hef-capaciteit van de koppelschotel van max. 36 ton. De nieuwe YTxx3 serie van Terberg is bovendien uitgerust met een nieuw modulair chassis dat de toekomstige implementatie van brandstofcellen toelaat.

Het H<sub>2</sub>-prototype heeft momenteel vier waterstoftanks met in totaal ongeveer 16 kg waterstof bij 350 bar. De fuel cell zit qua vermogen in de range 40 - 45 kW en werkt volgens het principe van range extender waarbij de accu

gevoed wordt door de fuel cell. Deze oplossing levert een autonomie op van ongeveer acht uur en is ook lichter dan de batterijversie. Commercialisatie wordt verwacht eind 2021 en de prijs zou gelijkaardig zijn aan de batterijversie, die nog steeds driemaal zo duur is als een dieselvariant (ongeveer 80.000 €).

In luchtvaartcontext staan de brandstofcel cargo trekkers het verst in hun ontwikkeling. MULAG heeft de "Comet 3/4 FC" in de catalogus staan, die tot



Terberg YT203-H2 (bron: Terberg)



Comet 4FC van MULAG voor het voortrekken van bagage op luchthavens. (bron: MULAG)

24u autonomie heeft na een tankbeurt van enkele minuten.<sup>7</sup> Typisch hebben cargo trekkers een trekcapaciteit tussen de 1.700 en 2.200 kilogram en rijden aan een snelheid tussen de 20 en 27 km/u. Daarvoor behoeven ze een vermogen van 17 tot 22 kW.

Ook de markt van waterstof constructiemachines (construction equipment) is zich aan het ontwikkelen. Algemeen gesproken bevindt deze technologie zich op TRL niveau 6 en dus nog in de prototypefase. (Figuur 6)

#### Beschikbaarheden

De meeste brandstofcelvorkliften die momenteel in gebruik zijn, betreffen

elektrische heftrucks die zijn omgebouwd naar een fuel cell-oplossing. Positief is dat in principe zowat elke elektrisch aangedreven logistieke toepassing omgebouwd kan worden naar waterstof. Bedrijven die brandstofceloplossingen ontwikkelen, hebben zich op deze markt toegelegd en met name het Amerikaanse bedrijf Plug Power. Zij gingen reeds samenwerkingen aan met diverse leveranciers van material handling equipment en beheersen het grootste deel van de markt (zo'n 95 %) met hun GenDrive oplossingen.

De focus van Plug Power ligt evenwel op de Amerikaanse markt, wat een introductie en verdere opschaling van hun technologie in Europa afremt. De overname van HyPulsion (Frankrijk) en daarmee de creatie van Plug Power Europe, kan gezien worden als een strategische zet van het bedrijf richting meer Europese activiteiten. Intussen heeft het bedrijf sales offices in Frankrijk, Duitsland en het Verenigd

Koninkrijk en een service en operations centrum in België.

In Europa sloot Plug Power samenwerkingenverbanden met OEM's Linde MH, Still, Jungheinrich, Crown Europe, Toyota Europe en Yale / Hyster.

## Perspectieven naar de toekomst

Vorkliften op waterstof zijn de meest volwassen waterstoftoepassing en onder bepaalde omstandigheden vandaag al concurrentieel met diesel/LPG modellen of zelfs batterij-elektrische voertuigen. De verwachtingen zijn dat deze concurrentiepositie in de toekomst alleen maar beter zal worden.

Hydrogen Europe voorspelt dat tegen 2030 brandstofcel vorkliften de eerste keuze zullen zijn voor grote sites die nood hebben aan een intensieve inzet

**Figuur 6 - Status logistieke toepassingen op waterstof**

| Toepassing   | Vermogen fuel cell           | Autonomie | Hoeveelheid H <sub>2</sub> | Commercieel beschikbaar    |
|--|------------------------------|-----------|----------------------------|----------------------------|
| Counterbalance heftruck klasse I-III 2,5 – 3,5 ton | 10 - 12 kW                   | 6 - 8 u   | 1,5 – 2,5 kg               |                            |
| Reach truck 1,2 – 1,6 ton                          | 11 kW                        | 8 u       | 1 kg                       |                            |
| Pallettruck 2 – 2,5 ton                            | 1,5 - 4 kW                   | 8 u       | < 1 kg                     |                            |
| Order picker 1,6 – 2,5 ton                         | +/- 3 kW                     | 8 u       | +/- 1 kg                   |                            |
| Middelzware heftruck 8 -20 ton                     | 20 - 30 kW                   | ?         | 9 kg                       | Prototype<br>16 ton Kalmar |
| Zware heftruck 21 - 50 ton                         | 30 - 50 kW                   | ?         | ?                          | Intenties<br>Hyster-Yale   |
| Container handler 52 ton                           | 50 (range extender) - 150 kW | < 8 u     | 20 kg                      | Prototype<br>Hyster-Yale   |
| Terminal /yard trekker 38 ton                      | 40 (range extender) - 85 kW  | > 8 u     | 16 - 20 kg                 | Prototype<br>Terberg       |
| Reach stacker 54 ton                               | 90 kW                        | ?         | ?                          | Prototype<br>Hyster-Yale   |
| Cargo trekker 11,5 - 25 ton                        | 15 - 22 kW                   | 24 u      | 1,8 - 3,6 kg               |                            |

<sup>7</sup> [https://www.mulag.de/fileadmin/content/media/01\\_flughafenfahrzeuge/produkte/flughafenschlepper/comet3fc/mulag\\_comet3fc\\_dok0911\\_453en.pdf](https://www.mulag.de/fileadmin/content/media/01_flughafenfahrzeuge/produkte/flughafenschlepper/comet3fc/mulag_comet3fc_dok0911_453en.pdf)



van heftrucks. Waar we momenteel nog op fuel cell kosten zitten van ongeveer 2.500 €/kW, moet dit omwille van opschaling en verdere commercialisering naar minder dan 1.250 €/kW evolueren in 2025 en tot minder dan 450 €/kW in 2030.

De Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking onderschrijft de stelling dat brandstofcel vorkliften in een “ambitieuze scenario” waarbij overheden en bedrijven samenwerken, rond 2025 ‘geaccepteerd’ zijn door de markt met een marktaandeel van 1 %.<sup>8</sup> De Hydrogen Council spreekt van een daling van TCO van brandstofcel vorkheftrucks met ongeveer 20 % tot 2030 en een verdere daling van ongeveer 30 % in 2050. De grootste kostenposten betreffen met name de brandstofcel, de opslagtank en de waterstofprijzen.<sup>9</sup>

Het voorspelde marktaandeel van fuel cell material handling vehicles voor (lucht)havens is richting 2030 groter, met name 50 %, omdat voor dergelijke toepassingen meer zero-emissie alternatieven bestaan. Deze applicaties staan echter minder ver in de ontwikkeling. Doorgedreven demonstraties tussen 2020 en 2025 zijn daarom nodig om een uitrol tussen 2025 en 2030 mogelijk te maken. Daarnaast belemmeren hoge veiligheidsnormen op luchthavens mogelijk de start van testprojecten en het succesvol verkrijgen van wettelijke vergunningen, voor tankinfrastructuur.

Incentives vanuit de overheid zouden een belangrijke impuls kunnen geven aan de markt van brandstofcelheftrucks, zoals de Amerikaanse markt bewijst (cfr. federal fuel cell investment tax credit).



<sup>8</sup> Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (2019), “Hydrogen roadmap Europe: a sustainable pathway for the European energy transition”, p.45  
<sup>9</sup> Hydrogen Council 2020, “Path to hydrogen competitiveness A cost perspective”, p.46

## 3. WATERSTOFINFRASTRUCTUUR

### H<sub>2</sub>: onsite productie of aanlevering

Waterstof moet eerst lokaal geproduceerd of aangeleverd worden alvorens het via tankinfrastructuur tot in de voertuigen getankt kan worden. Het kan enerzijds op continue wijze lokaal geproduceerd worden d.m.v. elektrolyse of stoomreforming van aardgas. Anderzijds kan waterstof op continue of discontinue wijze aangeleverd worden.

Continue aanlevering van waterstof is enkel mogelijk indien de beoogde site van een tankstation rechtstreeks kan aansluiten op een waterstofleidingnetwerk. In de Benelux exploiteert Air Liquide een netwerk van ondergrondse waterstoftransportleidingen met

een diameter van 100 en 150 mm op een druk van maximaal 100 bar. Het volledige leidingnetwerk is ca. 900 km lang. Een waterstoftankstation kan in principe rechtstreeks worden aangesloten op dit leidingnetwerk, waarbij ondergrondse en bovengrondse leidingsegmenten op het tankstation over het algemeen een totale lengte van 5 - 20 meter hebben. Momenteel zijn er op deze manier drie waterstoftankstations aangesloten op dit netwerk. (Figuur 7)

Voor de productie van waterstof wordt gebruik gemaakt van grootschalige SMR (steam methane reforming) plants, operationeel in de havens van Antwerpen en Rotterdam en van beschikbare restwaterstof, geproduceerd als bijproduct in chloor-elektrolyse fabrieken. Het betreft dus zowel grijze als blauwe waterstof.

Bij discontinue levering per vrachtwagen wordt het onderscheid gemaakt tussen tube-trailers en trekkers die verwisselbare flessen- of cilinderbatterijen neerzetten en rechtstreeks op het station worden aangesloten. De verwisselbare flessen- of cilinderbatterijen treden dan op als mobiele opslag. Een truck kan per keer maximaal twee bundels van elk 16 flessen van 50 liter op maximaal 200 bar leveren.

Bij een aanlevering via tubetrailers is er nog een opslagvat nodig in of bij het tankstation om de geleverde waterstof onder druk te stockeren. Tubetrailers kunnen door de band genomen 250 – 333 kg waterstof per keer leveren.

Lokale productie gebeurt via elektrolyzers die elektriciteit gebruiken om water te splitsen in waterstof en

**Figuur 7 - Bestand 900 km leidingnetwerk voor waterstof van Air Liquide**



Bron: Air Liquide





zuurstof. Indien daarbij hernieuwbare elektriciteit gebruikt wordt (bv. elektrolyser rechtstreeks gekoppeld aan een windmolen of bij netstroom met gebruik van groenestroomcertificaten), dan spreken we van groene waterstof.

Omdat de benodigde energie bij dit proces hoger is dan de energie-inhoud van de geproduceerde waterstof (rendement +/- 75 %), wordt deze methode meestal gebruikt op sites met lokale opwekking van

(overschot) groene stroom uit wind- of zonne-energie.

Elektrolyzers worden doorgaans ondergebracht in containerconstructies. De grootte is afhankelijk van het beoogde afleverdebiet, waarbij kleine elektrolyse-installaties in een 20 voet containerbehuizing passen, terwijl grotere installaties een 40 voet container behoeven. Een inschatting van de kosten (investering- en operationele kosten) van elektrolyzers wordt

weergegeven in figuur 8 (cijfers voor 2020 met voorspelling richting 2050).

Stoomreforming van aardgas (Steam Methane Reforming – SMR) is het proces waarbij stoom op hoge temperatuur (700 °C – 1.000 °C) wordt gebruikt om waterstof te produceren uit een methaanbron, zoals aardgas. Dit productieproces kent een hoge efficiëntie en lage operationele en productiekosten, maar uiteraard is aardgas geen hernieuwbare energiebron, is er

**Figuur 8 - Investerings- en operationele kosten van elektrolyse**

| Hydrogen production by electrolyzers* | Capex (€/kW) | OPEX (%/yr Capex) | System efficiency (HHV**) | Electricity (4000 - 5000 hr) (€/MWh) | Hydrogen (€/kg) |
|---------------------------------------|--------------|-------------------|---------------------------|--------------------------------------|-----------------|
| 2020-2025                             | 300 - 600    | 1.5 %             | 75 - 80 %                 | 25 - 50                              | 1,5 - 3,0       |
| 2025-2030                             | 250 - 500    | 1 %               | 80 - 82 %                 | 15 - 30                              | 1,0 - 2,0       |
| Up to 2050                            | < 200        | < 1 %             | > 82 %                    | 10 - 30                              | 0,7 - 1,5       |

\* Hydrogen production cost for hydrogen delivered at 30 bar pressure and 99,99% purity \*\* HHV = Higher Heating Value



Tube trailer met drukcilinders op 200 bar - CM Welding



PEM elektrolyser ITM Power)



Voorbeeld waterstof-tankstation voor bussen in Delft - Petrol World

een significante CO<sub>2</sub>-uitstoot en zijn er veiligheidsrisico's aan verbonden.

## Tankinfrastructuur

Een waterstof-tankstation is een samenbouwinstallatie, waarbij waterstof onder druk wordt aangeleverd op het station of ter plaatse wordt geproduceerd, vervolgens op een (hogere) druk wordt gebracht en tenslotte wordt afgeleverd op een druk van 350 bar of 700 bar aan elektrische voertuigen die gevoed worden vanuit een brandstofcel. Logistieke toepassingen op waterstof worden getankt op 350 bar, personenwagens op 700 bar. Globaal bestaat een waterstofinstallatie uit een compressor, een bufferopslag, een koeler en de tankzuil.

Afhankelijk van de beoogde afnemers wordt de waterstof op het station met behulp van compressoren samengedrukt en gestockeerd in buffervaten. Voor een aflevering van waterstof op 350 bar wordt de compressie doorgaans opgedeeld in twee stappen en wordt het gecompriëerde gas na de eerste stap opgeslagen in een middendruk buffer (200 - 500 bar). In geval van een trage aanvoer van waterstof op een beperkte druk en daaraan gekoppeld laag compressiedebiet en/of grote afneemvolumes op 350 bar, dan is een grote middendruk buffer noodzakelijk. Een laatste mogelijkheid is dat er een extra lagedruk buffer (80 - 250 bar) wordt geplaatst vanwaar de middendruk of hogedruk buffer wordt gevoed.

De opslag kan ook mobiel worden uitgevoerd in de vorm van een tube- of cilindertrailer of via waterstofbundels (gasflessenpakketten). Bij het afleveren vanuit waterstofbundels wordt een cascadesysteem toegepast. Dit is een eenvoudig vulsysteem op basis van drukvereffening. Een pomp is hierbij niet aanwezig en een maximale vulling van de brandstof-tank is door dit systeem niet mogelijk. Bij een tankstation kunnen er meerdere tankzuilen aangebracht worden, bijvoorbeeld voor aflevering op 350 bar of 700 bar, maar een tankzuil kan evengoed ook zijn voorzien van verschillende afleverslangen voor 350 bar en 700 bar. De tankzuil is onder andere voorzien van afleverslangen, start- en stopknoppen en eventueel van doorstroommeters.

## 4. INDICATIEVE TCO

Dit hoofdstuk geeft enkele kerngetallen weer die het mogelijk maken om een TCO-berekening (Total Cost of Ownership) voor een logistieke vloot op waterstof uit te voeren. Basis van deze berekeningen is de ROI-tool ontwikkeld door VIL en WaterstofNet om bedrijven te begeleiden in het maken van hun keuze.

Let wel, onderstaande cijfers betreffen algemene gemiddelden en geven slechts een grove indicatie van het kostenplaatje. Elke mogelijke gebruikssituatie dient apart doorgerekend te worden. (Figuur 9)

Als uitgegaan wordt van 6 € per kg aangeleverde waterstof, dan zijn de brandstofkosten dus 0,9 € per uur. Om een vergelijking te maken met het energieverbruik van batterij-elektrische heftrucks dient gekeken te worden naar de reële elektriciteitsprijs van het moment, maar 0,16 € per EUR/kWh kan gelden als een representatief gemiddelde.

Met voornoemde getallen kan een indicatieve TCO-berekening uitgevoerd worden door het aantal toestellen en de beoogde inzet door te rekenen,



**Figuur 9 - Parameters voor een TCO-berekening**

|       | <b>Brandstofcel heftrucks (2,5 ton)<br/>Tanktijd = 2,5 minuten</b>                                      | <b>Batterij-elektrische (lood-zuur) heftrucks (2,5 ton)<br/>Batterijwissel = 20 minuten</b>               |
|-------|---|---|
| Capex | Fuel cell 2.500 € per kW, d.i. 25.000 € voor 10 kW<br>Toestel: 10.000 €<br>Totaal per toestel: 35.000 € | Batterij: 10.000 € per stuk (2 of 3 nodig)<br>Toestel: 10.000 €<br>Totaal per toestel: 20.000 of 30.000 € |
| Opex  | Brandstofverbruik: 0,15 kg / u<br>Onderhoud toestellen: 0,30 € / u                                      | Energieverbruik: 3,5 kW / u<br>Onderhoud toestellen: 0,67 € / u   |



bijvoorbeeld 100 trucks die gedurende 330 dagen per jaar opereren via twee shiften van zeven uur:

- CAPEX-toestellen: fuel cells & hydrogen 3,5 miljoen € versus batterij-elektrisch 3 miljoen € voor een vloot van 100 toestellen
- OPEX-toestellen op jaarbasis: fuel cells & hydrogen (4.592 operationele uren) 5.511 € versus batterij-elektrisch (4.400 operationele uren) 5.412 € per toestel (x 100 voor de vloot)

Brandstofceltoestellen zijn duurder in aanschaf dan hun batterij-elektrische tegenhanger, maar goedkoper in gebruik. Deze tendens zal zich doorzetten indien de waterstofprijs verder daalt. Daarenboven zijn brandstofceltoestellen frequenter inzetbaar dan batterij-

elektrische heftrucks indien die een batterijwissel behoeven. In bovenstaand scenario is er op jaarbasis een verschil in inzetbaarheid van bijna 200 uur per toestel. Dit zijn uren die gespendeerd worden aan het wisselen van batterijen.

Ook ruimte-inname speelt een belangrijke rol. In bovenstaand voorbeeld van een vloot van 100 toestellen volstaat een tankinfrastructuur met indoor dispensing die niet meer dan 30 m<sup>2</sup> inneemt. Eenzelfde vloot van batterij-elektrische heftrucks heeft ten minste 120 m<sup>2</sup> aan laadinfrastructuur en batterij-wissel stations nodig.

Brandstofceltoestellen hebben tankinfrastructuur nodig om te kunnen

tanken. Wat hierbij komt kijken, wordt beschreven onder hoofdstuk 3.

Figuur 10 biedt een indicatief overzicht van de kostprijs voor 350 bar en 700 bar infrastructuur voor een aantal volumes. Onder extra kosten vallen zaken als graafwerken, leidingwerk, vergunningsprocedure, ... maar eigenlijk maken deze kosten integraal deel uit van de investeringen in tankinfrastructuur en dienen dus samen met de eerste kolom gelezen te worden. De OPEX is op jaarbasis en betreft voornamelijk het onderhoud van de infrastructuur, de benodigde elektriciteitskosten voor o.m. compressie, verzekering, ...

Aangezien brandstofcelheftrucks zo'n 2 kg waterstof per shift verbruiken, is het relatief makkelijk om de capaciteit

**Figuur 10 - Overzicht infrastructuurkosten**

| H <sub>2</sub> tankinfrastructuur 350 bar | CAPEX HRS   | Extra kosten | OPEX HRS              |
|---|-------------|--------------|-----------------------|
| 100 kg per dag                            | 600.000 €   | 300.000 €    | 7 % van CAPEX / jaar  |
| 200 kg per dag                            | 900.000 €   | 350.000 €    | 7 % van CAPEX / jaar  |
| 600 kg per dag                            | 1.600.000 € | 400.000 €    | 7 % van CAPEX / jaar  |
|   |             |              |                       |
| H <sub>2</sub> tankinfrastructuur 700 bar | CAPEX HRS   | Extra kosten | OPEX HRS              |
| 80 kg per dag                             | 470.000 €   | 300.000 €    | 10 % van CAPEX / jaar |
| 212 kg per dag                            | 780.000 €   | 350.000 €    | 10 % van CAPEX / jaar |
| 420 kg per dag                            | 1.200.000 € | 400.000 €    | 10 % van CAPEX / jaar |

**Figuur 11 - TCO van 100 brandstofceltrucks en batterij-elektrische trucks**

| Aannames | Brandstofcel heftrucks<br>Fleet size: 100<br>Inzet per dag: 2 shifts (8 u x 2)<br>Tanktijd: 2,5 minuut per shift           | Batterij heftrucks (lood-zuur)<br>Fleet size: 100<br>Inzet per dag: 2 shifts (8 u x 2)<br>Batterijwissel: 25 minuten per shift |
|----------|--|--|
| CAPEX:   | Toestellen: 35.000 € per stuk  | Toestellen: 20.000 € (2 batterijen) per stuk<br>Derde reservebatterij: 10.000 € per stuk                                       |
|          | Tankinfrastructuur (500 kg): 1.500.000 €<br>= 5.000.000 €  | Laadinfrastructuur: 950.000 €<br>= 3.950.000 €   |
| OPEX:    | Brandstofverbruik per uur: 0,15 kg   | Brandstofverbruik per uur: 3,5 kWh   |
|          | Onderhoud toestellen per uur: 0,30 €   | Onderhoud toestellen per uur: 0,67 €   |
|          | Onderhoud station per jaar: 65.000 €   | Onderhoud laadinfrastructuur per jaar: 35.000 €  |
|          | Voorbeeldscenario<br>2 x 7 u shiften per dag, 330 dagen per jaar<br>bij 6 € per kg H <sub>2</sub> = jaar OPEX +/- 75.500 € | Voorbeeldscenario<br>2 x 7 u shiften per dag, 330 dagen per jaar<br>bij 0,16 € per kWh = jaar OPEX +/- 40.700 €                |

van een tankstation te berekenen. In ons voorbeeldscenario is sprake van een vloot van 100 industrial trucks werkzaam in twee shifts van zeven uur en dit gedurende 330 dagen per jaar. Het station dient aldus een capaciteit te hebben van minstens 400 kg per dag. Verhoog dit cijfer naar 500 kg voor wat extra marge en met de mogelijkheid om nog andere toepassingen op waterstof te laten rijden, dan is hier een prijskaartje van zo'n 1,5 miljoen € aan verbonden. Ter vergelijking: een laainfrastructuur voor een vloot van 100 batterij-elektrische heftrucks wordt geschat op 950.000 €.

Gecumuleerd geeft figuur 11 een idee van de TCO van 100 brandstofcell-trucks en batterij-elektrische trucks.

Gelet op de kostprijs (CAPEX en OPEX) van de tankinfrastructuur, komt een TCO voor batterij-elektrische heftrucks nog steeds voordeliger uit. Het is pas wanneer personeelskosten voor verminderde productiviteit omwille van batterijwissels mee in rekening worden gebracht, dat de balans in evenwicht komt en zelfs licht in het voordeel van waterstof. Dit duidt nogmaals op de noodzakelijke voorwaarde dat waterstof best ingezet wordt in omgevingen die draaien op een zo hoog mogelijke inzet van hun logistieke toestellen. Toekomstscenario's die uitgaan van een daling van de waterstofprijs, doen de balans verder overhellen in het voordeel van waterstof. Bij een verdere daling van de waterstofprijs komen ook scenario's in aanmerking met een meer beperkte schaalgrootte en inzet van de toestellen. (Figuur 12)

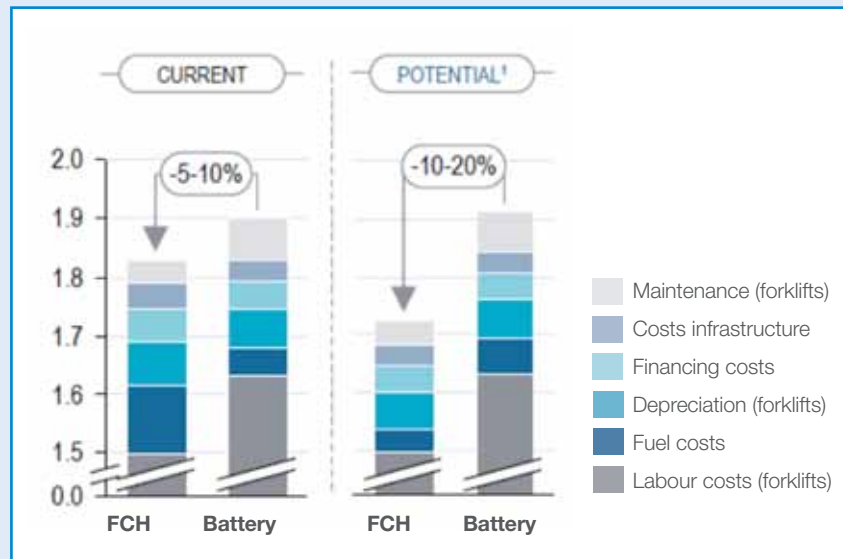
Tot slot is het prijskaartje gekoppeld aan de productie van eigen waterstof via on-site elektrolyse. Zoals gesteld gebeurt dit best door een elektrolyser rechtstreeks aan een windmolen te koppelen zodat het aantal MWh dat de machine rechtstreeks op windenergie kan draaien zo groot mogelijk is ten opzichte van het aantal MWh dat het op netstroom moet werken om aan de vraag te voldoen.

Dit is ook bevorderlijk voor de business case. Stroom die rechtstreeks van de windturbine kan gebruikt worden, kan bepaald worden op ongeveer 40 €/MWh. Stroom die van het net wordt getapt, wordt aan 110 €/MWh gerekend. Samen met de kosten die gepaard gaan in de infrastructuur die de productie van een bepaalde

hoeveelheid H<sub>2</sub> beoogt, is dit bepalend voor de TCO. (Figuur 13)

In het scenario van de vloot van 100 waterstof industrial trucks, zou gedacht kunnen worden om een elektrolyser van 1,25 MW (dagelijkse H<sub>2</sub> productie van 480 kg; CAPEX 1,6 miljoen €) te koppelen aan een 4 MW windmolen die in staat is een significant deel van de waterstof uit windenergie te maken. Deze combinatie produceert op jaarbasis 175.262 kg waterstof. In het geval 86 % van deze waterstof uit 'wind komt', gaat het om 137.723 kg H<sub>2</sub> uit windenergie (40 €/MWh) en 37.542 kg van het net (110 €/MWh). Gecumuleerd geeft dit een jaarlijkse elektriciteitskost van ongeveer 480.000 € en een jaarlijkse waterkost van 13.140 €.

**Figuur 12 - Toekomstscenario met lagere waterstofprijs**



Bron: Roland Berger (2017), "Development of Business Cases for Fuel Cells and Hydrogen Applications for Regions and Cities", p.74

**Figuur 13 - Kostprijs on-site productie via elektrolyse**

| Vermogen                                | Electrolyser |                       | Variabele OPEX  |
|---|--------------|-----------------------|---|
|   | CAPEX        | Vaste OPEX            |   |
| 0,25 MW → 100 kg H <sub>2</sub> per dag | 347.566 €    | 8% van CAPEX per jaar | Waterconsumptie: 15 liter per kg H <sub>2</sub> (+/- 0,005 € per liter)<br>Elektriciteitsverbruik: +/- 60 kWh / kg H <sub>2</sub> |
| 0,5 MW → 200 kg H <sub>2</sub> per dag  | 669.689 €    | 8% van CAPEX per jaar |   |
| 1 MW → 400 kg H <sub>2</sub> per dag    | 1.288.419 €  | 8% van CAPEX per jaar |   |
| 1,5 MW → 600 kg H <sub>2</sub> per dag  | 1 903 433 €  | 8% van CAPEX per jaar |   |





## 5. PROOF OF CONCEPT

### Opzet en scope

Een expliciete doelstelling van het Hydrolog-project was het uittesten van het gebruik van een mobiel waterstof-tankstation door een aantal logistieke bedrijven. Omwille van de samenstelling van de deelnemersgroep werd geopteerd voor een havenomgeving. Het is de allereerste toepassing in Vlaanderen in een havenomgeving die beleverd worden door een mobiel waterstof-tankstation voor logistieke toepassingen.

Concreet werd een proof of concept opgezet bij twee terminal operators in de haven van Antwerpen: Antwerp Euroterminal (AET) en PSA Antwerp (PSAA) gedurende een periode van zes weken (drie weken bij elk). Voor deze periode kon beroep gedaan worden op een waterstof aangedreven terminal tractor van Terberg, de YT203-H2, als demo-voertuig.

Gezien de nog maar zeer beperkte toepassing van waterstof als brandstof in Vlaanderen, bestaat de nood om te laten zien dat de technologie werkt en veilig is. Een havenomgeving geeft hieraan een extra dimensie, gezien de hoge graad van activiteiten met zware werktuigen gelinkt aan de behandeling van containers of andere goederen.

Verder wenste de demonstratie in de praktijk duidelijk te maken hoe waterstofvoertuigen werken en vooral welke voordelen hieraan verbonden zijn. Dat laatste heeft met name betrekking op het werkcomfort (stil, zero-emissie) en de inzetbaarheid in vergelijking met diesel.

Uit de proof of concept zijn ook de nodige data voortgekomen. Dit zowel vanuit het mobiel tankstation (hoeveel tankbeurten, hoe snel tanken, hoeveel kg, ...) als de brandstofcel van het testvoertuig (performance, gemiddeld verbruik, inzetbaarheid in verschillende omstandigheden, ...).

### Vergunningstraject

#### Aanleiding en context

Medio 2021 zijn er in Vlaanderen drie openbare waterstof-tankstations (Halle, Zaventem en Antwerpen) en één niet-openbaar tankstation voor vijf waterstofbussen van De Lijn (Antwerpen) operationeel. Dit jaar wordt de opening voorzien van minstens drie bijkomende, openbare, waterstof-tankstations (Wilrijk, Erpe-Mere en Haasrode).

Dit toont aan dat waterstof-tankstations nog een relatief nieuw gegeven zijn zowel op technologisch als regelgevend vlak. Waterstof als brandstof wordt in Vlaanderen nog maar in beperkte mate toegepast in een vloot van enkele tientallen personenwagens en heftrucks, vijf waterstofbussen, één vaartuig en demonstratieprojecten met een handvol vrachtwagens en vuilniswagens.

Om een vergunning te verkrijgen voor het opzetten en exploiteren van een waterstoftankstation moeten zowel de locatie (stedenbouwkundige handeling) als de milieu-/veiligheidsaspecten van de exploitatie worden behandeld. De concrete voorwaarden waaraan moet worden voldaan, worden geformuleerd in de omgevingsvergunningsprocedure.

### Aanloop en procedure mobiel station

Een mobiel waterstoftankstation is ondergebracht in een behuizing in de vorm van een afgesloten 20' container. Het station is verplaatsbaar en kan op verschillende locaties ingezet worden. In de container zijn een compressor, een opslagvat en een dispenser verwerkt. Aangezien er zowel opslag als dispensing mogelijk is, dient het mobiel station eenzelfde vergunningstraject te volgen als een stationair station, maar enkel voor de periode dat het op een locatie staat.

Om meer waterstof te kunnen doorzetten, wordt het station gekoppeld aan een externe opslag in de vorm van een tube trailer of flessenpakketten. Ook deze 'externe' opslag dient mede vergund te worden. Gezien het relatief hoge verbruik van een terminal tractor, werd gekozen voor de opslag in een tube trailer.

### VLAREM-regels mobiel station

Om een vergunning te bekomen dient zowel een stedenbouwkundige studie uitgevoerd te worden als de behandeling van milieu- en veiligheidsaspecten van de exploitatie. Door de korte duur van de testen is het stedenbouwkundig deel in de vergunningsaanvraag in het geval van een mobiele installatie normaal niet van toepassing, maar deze werden voor de volledigheid toch aangevraagd.

### Vergunning AET

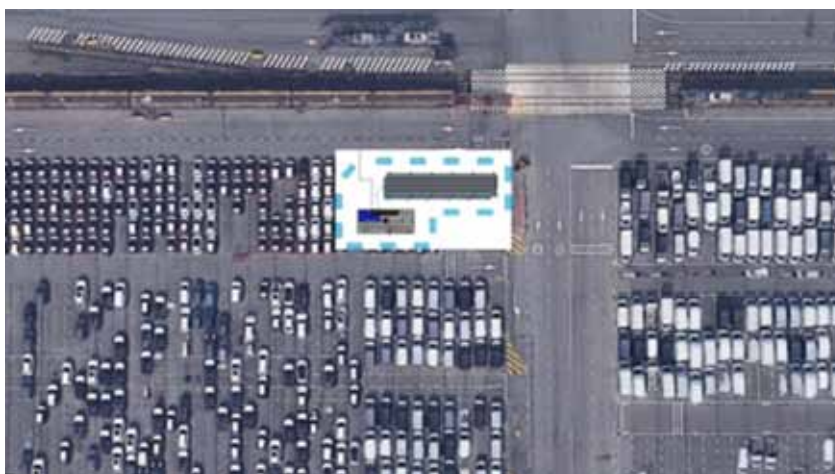
Bij de bepaling van de locatie was het vooral van belang om te voldoen aan de eisen van de risico-afstanden, toegang tot stroomaansluiting binnen de 100 meter en voldoende bewegings-



Het mobiele waterstoftankstation in een 20' voet containerbehuizing (bron: WaterstofNet)



Een luchtbeeld van de terminal van AET, met in geel de beoogde locatie van het mobiele station



Een detailinplanting van het station, de externe opslag en betonnen blokken op de site bij AET

ruimte voor de waterstofbevoorrading met een tube-trailer. Verder moet een bepaalde perimeter afgezet kunnen worden met betonnen "jersey blokken".

Er werd geopteerd om een zone vrij te maken op het terminal gedeelte

waar voertuigen gestockeerd worden voor verdere doorvoer. In deze zone vindt weinig intern verkeer plaats. Op de naburige interne spoorlijn rijden dagelijks 1 à 2 treinen voor intern lossen/laden van cargo zoals wagens en stukgoed. Deze treinen rijden





De risico-contouren zoals bepaald in de veiligheidsstudie bij AET



De locatie bij PSAA op de Lichterkaai

stapvoets. Dit moest gemotiveerd worden in de vergunningsaanvraag aangezien de risico-contouren over de spoorweg komen. Tevens is de terminal van AET een afgesloten terrein en niet toegankelijk voor derden, wat de veiligheid bevordert.

Naast de bepaling van de locatie werd ook de inzet van het toestel zelf nader bekeken. Dit is van belang om te kunnen bepalen hoeveel waterstof er dagelijks gepompt zal worden. Dat heeft dan weer een impact op de benodigde externe opslag en hoe vaak deze gewisseld moet worden tijdens de demonstratieperiode. Dergelijke zaken moeten aangegeven worden in de veiligheidsstudie.

Daarnaast is het voor de geluidsstudie van belang op welke momenten/

dagdelen er getankt zal worden (inzet in shiften). De installatie heeft een gemiddelde capaciteit van 9 kilo per uur. Met deze 9 kilo per uur zal dan ook gerekend worden om tot de bedrijfstijd van de installatie te komen in de dagdelen die voor geluid van toepassing zijn. De installatie zal telkens ongeveer één uur en 40 minuten draaien tijdens een tankbeurt.

Op 15 maart 2021 werd de vergunning definitief toegekend.

### Vergunning PSAA

Voor een mogelijke locatie bij PSAA viel de keuze op de Lichterkaai. Ook de praktische zaken voor het tankstation, zoals elektriciteitsaansluiting en aardingsmogelijkheden, konden hier ingevuld worden. De locatie is tevens afgesloten en niet toegankelijk voor derden.

De veiligheidsstudie kwam tot gelijkwaardige conclusies als bij AET en deed dezelfde aanbevelingen om in lijn te zijn met de wetgeving. Ook de geluidsstudie bij PSAA kwam tot de conclusie dat het geluidsdruk-niveau veroorzaakt door de nieuw aangevraagde mobiele waterstoftank-installatie (ruim) conform de milieukwaliteitsdoelstellingen en de grenswaarden voor een

nieuwe inrichting uit Vlare II zal zijn ter hoogte van alle dichtstbij gelegen woningen en dit voor alle perioden van het etmaal.

Op 4 mei 2021 werd de vergunning definitief toegekend voor een periode van zes maanden.

## Veiligheid

Om de veiligheid te garanderen, moet anders omgegaan worden met waterstof dan met de klassieke fossiele brandstoffen. De bestaande regelgeving rond veiligheid en tankinfrastructuur is momenteel nog onvoldoende afgestemd op een alternatieve brandstof zoals waterstof. Het aspect veiligheid was dan ook van groot belang tijdens de Proof of Concept. In verband met het gebruik van waterstof dienen vrijzettingen (lekken) en ontstekingen te allen tijde vermeden te worden. De exploitant van een waterstoftankstation, de supplier van een waterstofvoertuig en de eindgebruiker moeten alle nodige maatregelen nemen om de veiligheid van mens en milieu te garanderen.

### Mobiel tankstation

Het mobiele station is een installatie gebouwd in 2018 volgens de geldende



Een 3D impressie van het mobiele waterstoftankstation (bron: WaterstofNet)



Detail van de beoogde opstelling met tankstation, externe opslag en afsluiting bij PSAA op de Lichterkaai



De risico-contouren van de mobiele installatie bij PSAA zoals blijkt uit de veiligheidsstudie

BBT (Best Beschikbare Technieken) en in lijn met de Nederlandse PGS 35 (Praktijkrichtlijn voor “Aflerinstallaties van waterstof voor wegvoertuigen”). Het station werd CE-conform opgeleverd. Inherent aan de installatie zijn diverse veiligheidsvoorzieningen aanwezig.

De technische installatie bevindt zich in drie verschillende en van elkaar afgesloten compartimenten binnen een 20' container. De elektriciteitscabine, enkel van buiten af te bereiken, is afgesloten van het compartiment waar de compressor en de opslag zich bevinden. Het compartiment voor de compressor en de opslag cilinder is ATEX uitgevoerd en voorzien van natuurlijke en mechanische ventilatie als ook waterstofdetectie. Ook is er een apart compartiment voorzien voor de luchtcompressor en de koelunit.

De dispenser bevindt zich in een speciaal daarvoor ontworpen nis van de container, die gelijk loopt met de zijwand van de container. De tank slang met speciale en CE gekeurde tank nozzle wordt hierin veilig weg gehangen en is voor de veiligheid tevens voorzien van een break-away koppeling. Ook voorziet deze tank-nozzle in het veilig afblazen van resterende waterstof via een afblaas kanaal.

Een andere belangrijke veiligheidsmaatregel is het aarden van het station. Zo kan statische elektriciteitsontlading direct worden afgevoerd. Tijdens de indienststelling wordt gecontroleerd of de aarding voldoende is en aan de specifieke eisen voldoet. De tankslang voorziet de aarding van het voertuig met de container.

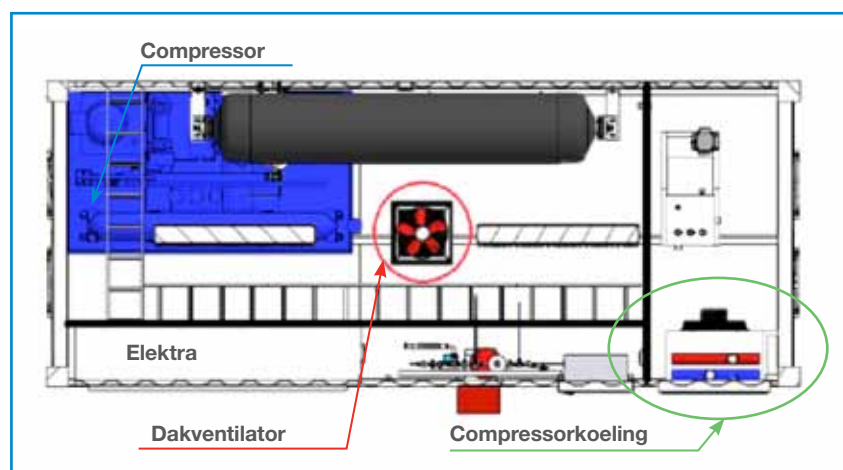
Het tankstation is ook voorzien van een bliksembeveiliging, om in geval van een inslag de energie te doen wegvloeien naar de aarde. Deze wordt aangesloten op de aardpen(nen).

De installatie is uitgerust met een 4G-module voor het op afstand

monitoren, trouble-shooting en inbellen op de installatie. Mochten er storingen of alarmen plaatsvinden, dan wordt dit direct verstuurd naar de beheerder en de service organisatie.

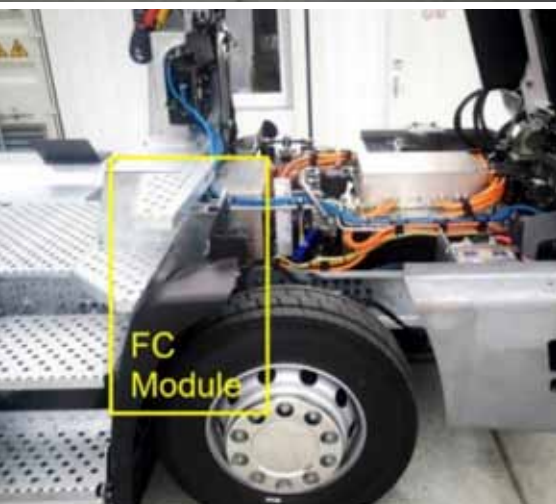
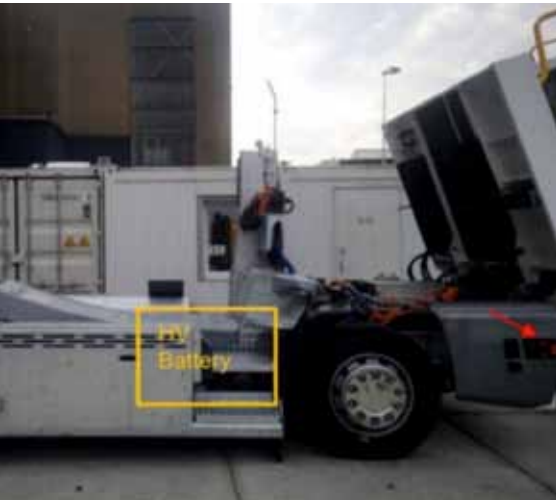
De container is voorzien van een noodstop, die zorgt voor een directe en veilige afschakeling van de installatie. Verder is de installatie uitgerust met o.a. lekdetectie en andere veiligheidsapparatuur, die automatisch de installatie afschakelen en veiligstellen.

Aan de container, in de directe nabijheid van de tankzuil, is een brandblusser bevestigd. Deze kan in geval van een calamiteit gebruikt worden om



De verschillende compartimenten van het mobiele waterstofftankstation (bron: WaterstofNet)





Aanduiding van de batterij en de brandstofcel bij de Terberg YT203-H2



Aanduiding van de waterstoftanks bij de Terberg YT203-H2 (bron: Terberg)

een beginnende kleine brand (géén waterstofbrand) te blussen.

### Voertuig

Het voertuig waarmee getest werd, de Terberg YT203-H2, is uitgerust met diverse veiligheidssystemen. In essentie is de YT203-H2 afgeleid van de elektrische tegenhanger, de YT203-EV, waarbij de batterij kleiner wordt en er waterstofonderdelen worden toegevoegd. De belangrijkste daarvan zijn de opslagtanks en de brandstofcel die zorgt voor de productie van elektriciteit op basis van waterstof.

Er is 14,4 kg waterstof aanwezig in twee druktanks op 350 bar.

Alle aanwezige waterstofonderdelen (leidingen, kleppen, cilinders) zijn ontworpen om lekken tegen te gaan. Het voertuig is daarnaast uitgerust met waterstofdetectie, veiligheidskleppen en lekdetectie. Van zodra er toch waterstof zou ontsnappen, sluiten de waterstoftanks automatisch af om verdere lekkage tegen te gaan. Indien kleine hoeveelheden waterstof vrijkomen, treedt automatische ventilatie op om de waterstof actief te laten oplossen in de atmosfeer.

Uiteraard is het verboden te roken in nabijheid van het voertuig (en de tankinstallatie) maar het kan zonder probleem gestald worden in een binnenomgeving (bv. magazijn).

### Op de site

De eindgebruiker dient zelf ook de nodige maatregelen te nemen voor een goed en correct gebruik van voertuigen en infrastructuur.

### Mechanische afscherming en veiligheidsvoorzieningen

Aanrijdingen dienen ten alle tijden vermeden te worden omdat dit kan leiden tot het ongewenst vrijkomen

van waterstof met een brand en/of explosie tot gevolg. Daarom dienen de tankinfrastructuur én de externe opslag beschermd te worden tegen aanrijdingen.

### Noodplan

Bij het verlenen van een vergunning voor het verplaatsbare waterstoftankstation dient een noodplan opgesteld te worden. Een noodplan is zeer specifiek, zowel installatie als locatie technisch.

Het doel van een noodplan is een eenduidig plan bij calamiteiten, dat een leidraad vormt voor de hulpdiensten en bewaking, de beheerder van het tankstation, en andere aanwezigen op het terrein gedurende de korte proef met het mobiele waterstoftankstation.

Qua locatie is het van belang aan te geven in wat voor setting het station geplaatst wordt (afgesloten terrein, bewaking, toegang voor onbevoegden of niet, ...) en hoe er toegang kan zijn voor de hulpdiensten (aanrijroutes, bluswatervoorziening, ...).

### Interne preventie en veiligheid

Naast alle opgelegde zaken in het kader van de vergunning en algemene normering, kunnen eindgebruikers specifieke eisen opleggen naar interne veiligheid en dit volgens geijkte procedures. Sowieso dient er nauw overleg te zijn in kader van het opstellen van het noodplan en het explosieveiligheidsdocument. Een transparante doorstroming van veiligheidsdocumenten (CE-markering, keuringen, ...) van de gebruikte infrastructuur en toestellen is eveneens aan de orde.

Tot slot dient de eindgebruiker uitgebreid geïnformeerd te worden over het goed gebruik van de tankinfrastructuur en de voertuigen. Dit omvat de nodige informatie "op papier", zoals



een beschrijving van het tanken zelf en wat te doen bij calamiteiten en een gebruiksaanwijzing van de desbetreffende voertuigen.

### Explosieveiligheidsdocument

Één van de vergunningsvoorwaarden is het opstellen van een explosieveiligheidsdocument (EVD). EVD's worden opgesteld door een notified body (aangemelde instantie). Het doel is om aan te geven dat de explosierisico's geïdentificeerd en beoordeeld zijn en dat passende maatregelen worden genomen om de doelstellingen van de ATEX-richtlijn<sup>10</sup> en de codex over het welzijn op het werk te verwezenlijken.

Een onderdeel van het EVD is het zoneringsverslag. Dit is een document dat de gegevens vermeldt waarop de vaststelling van de zones en hun uitgestrektheid gesteund zijn, de besluiten en de verantwoording ervan. De zones worden uitgewerkt in een zoneringsplan. Dit plan geeft de plaatsen aan waar ontploffingsgevaar kan bestaan.

Deze plaatsen zijn in ingedeeld in verschillende zones.

## Demonstraties en resultaten

De Proof of Concept binnen Hydrolog had in eerste instantie tot doel om aan te tonen dat de technologie werkt en veilig kan ingezet worden, zelfs in een omgeving met hoge veiligheidseisen.

De eindgebruikers konden uit eerste lijn ervaring opdoen met de toestellen (prestatie, inzetbaarheid, zero-emissievoordelen, tankhandelingen, ...) en kunnen de vergaarde kennis gebruiken voor eventuele toekomstige waterstofprojecten. Positieve ervaringen kunnen zo leiden tot een verdere uitrol van waterstof binnen havenoperaties.

Uit de Proof of Concept is ook data voortgevloeid, zowel vanuit het mobiele tankstation als de brandstofcel van de

terminal tractor. De data geeft inzichten in de prestaties van het toestel en biedt tevens een 'real life' toetsing van een aantal aannames zoals opgenomen in het TCO-model dat binnen het project ontwikkeld werd.

### Demonstratie AET

Voor de operaties met de terminal tractor bij AET werd geopteerd voor een centrale locatie op de terminal. Op die manier werd het toestel makkelijk ingezet voor het verplaatsen van containers op de terminal of transport tijdens laad- en losoperaties onder de kraan tussen stacks en aangemeerde schepen en vice versa. De uiteindelijke demonstratieperiode liep van 20/04/2021 tot 06/05/2021.

Gedurende de eerste week werd ook een 2,5T waterstof heftruck van Toyota Material Handling ingezet voor ondersteunende logistieke taken zoals het vervoer van kabels. De truck heeft een GenDrive-brandstofcelsysteem van Plug Power.

<sup>10</sup> <https://www.beswic.be/nl/regelgeving/atex-regelgeving#:~:text=De%20richtlijn%201999%2F92%2FEG,elke%20zone%20zouden%20moeten%20worden>



Voor de demonstratie werd gewerkt met een tube trailer van Air Liquide als externe opslag. De waterstof wordt door de compressor in het station verder opgedrukt tot 450 bar om tanken aan 350 bar mogelijk te maken. Er werd tevens gebruik gemaakt van een “vulpoot” als tussenverbinding tussen de tube trailer en de interne opslag van het station.

De demonstratie bij AET verliep over het algemeen vlot, al vonden er zeker ‘kinderziektes’ plaats die een grotere inzet van de Terberg en Toyota bemoeilijkt hebben. Eerst en vooral trad er op het terrein een frequente storing op van het 4G-signaal van de mobiele

tankinstallatie. Dat maakt dat er wel gemonitord kon worden wat er aan het gebeuren was, maar dat ingrijpen vanop afstand mogelijk niet kon. Na de constatacie van het probleem, werd overgegaan tot een bijna dagelijkse manuele reset van de modem.

Ook de opstelling vulpoot – externe opslag verliep niet 100 % vlot. Op de vulpoot zijn stikstofflessen aanwezig om de klep naar de tube trailer open te houden en de leidingen te zuiveren. Er was echter een stikstof lekkage op de vulpoot waardoor de klep naar de trailer dicht bleef. Dit werd uiteindelijk opgelost door een grotere hoeveelheid stikstof in te zetten.

Tot slot was er ook een kortstondige storing van de fuel cell van de terminal tractor, te wijten aan het binnendringen van water in het elektronicasysteem n.a.v. een wasbeurt. Met een eenvoudige reset kon dit verholpen worden. De beschikbaarheid van het demonstratievoertuig lag overigens op 100 % met geen enkele uitval tijdens de operatie.

#### Demonstratie PSAA

Bij PSAA werd de Terberg trekker ingezet voor het verplaatsen van lege containers tussen de voorkaai en het sluizenplateau waar de lege containers gestockeerd staan. Dit zowel in de eerste als in de tweede shift.



*De ‘vulpoot’ van Air Liquide als koppeling tussen de externe opslag en de tankinstallatie*



De demoperiode bij PSAA liep van 11/05/2021 tot 04/06/2021, waarbij effectief op 18 mei gestart werd na oplevering van de explosieveiligheidsstudie.

De opstelling bij PSAA was gelijkaardig aan deze bij AET, waarbij opnieuw gebruik werd gemaakt van een externe opslag in de vorm van een tube trailer en de vulpoot als tussenverbinding naar het mobiele station.

Dezelfde interferentiestoring van het 4G-sigitaal trad ook op tijdens de testperiode bij PSAA. Dit werd opnieuw opgevangen door een frequente manuele reset. Een defect aan een klep heeft gezorgd voor een dag zonder

operaties. Tussen 31/05 en 1/06 trad er datacorruptie op bij het tankstation zodat er geen gegevens over zijn, maar er konden wel operaties plaatsvinden.

Ook vanuit de Brandweerzone Antwerpen was er grote interesse voor de demonstratie. Aan hen werd toelichting verschaft over de opstelling, de aanwezigheid van gevaarlijke stoffen, de aanwezige veiligheidssystemen en de afgesproken noodprocedures.

#### Data AET

Uit de VIL-Proof of Concept, zowel bij AET als PSAA, is de nodige data gevloeid vanuit de tankinstallatie en de brandstofcel van de terminaltractor.

Het mobiele tankstation registreert de datum en uur van tanken, de duurtijd van het tanken, de getankte hoeveelheid waterstof, de omgevingstemperatuur (die het tankproces beïnvloedt) en de start- en einddruk van de tank van het voertuig.

Uit de gegevens van de brandstofcel valt het gebruik van de machine per uur per dag af te lezen. Tevens wordt het aantal gereden kilometers bijgehouden en een onderscheid gemaakt tussen de 'driving time' en de 'operating time'. Driving is de tijd dat de machine sneller dan 8 km/h heeft gereden en operating is de tijd dat de machine aan heeft gestaan.



De Terberg Y203 H2



Het mobiele tankstation bij AET



Een waterstofhefruck van Toyota Material Handling bij AET

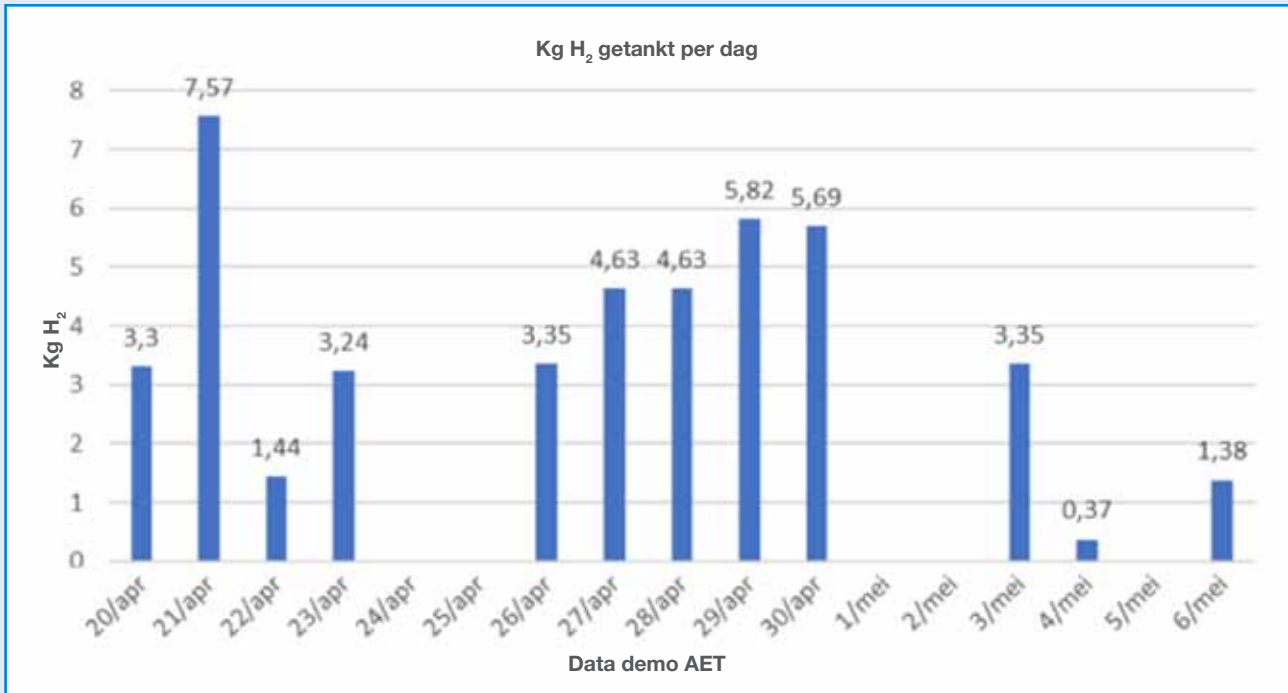


In totaal werd tussen 20 april 2021 en 6 mei 2021 40 kg waterstof getankt in de terminal tractor. De getankte hoeveelheid is telkens tot een volle tank (350 bar). Gemiddeld werd er 3,6 kg waterstof per dag getankt. Merk op dat algemeen gesproken de tank van ongeveer halfleeg tot volledig gevuld werd. (Figuur 14)

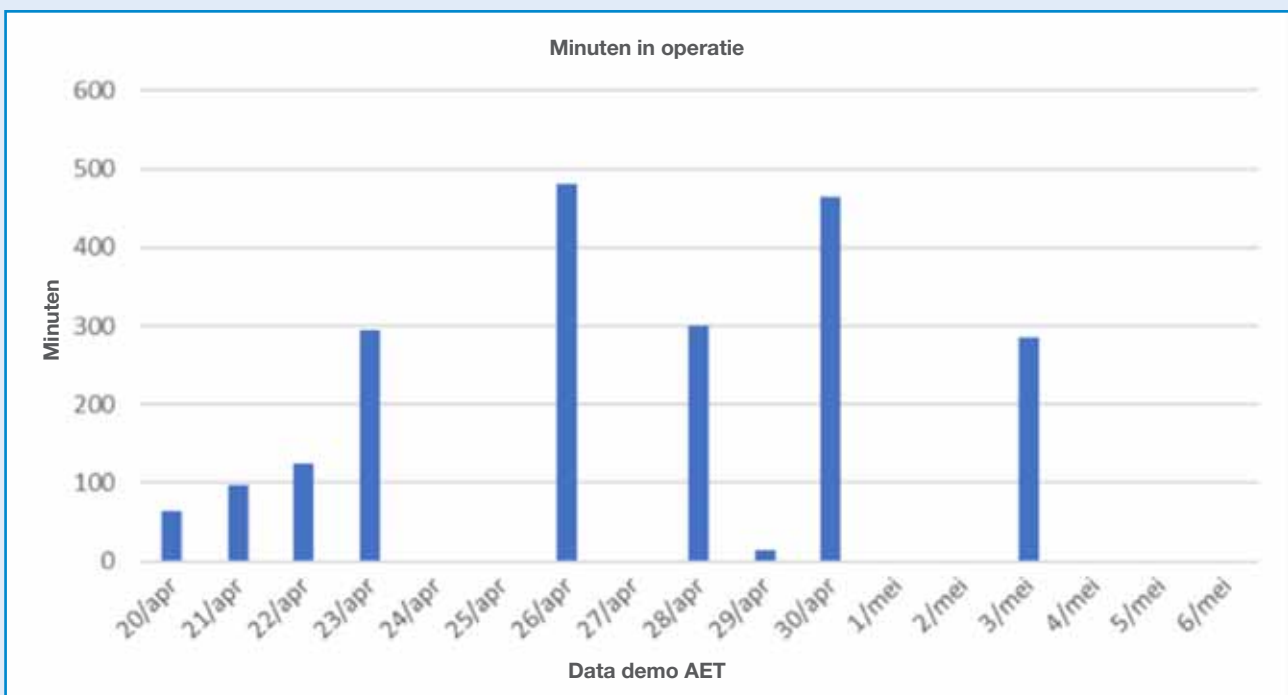
Dit komt ook terug in de gebruiksuren van het toestel. De gemiddelde bedrijfstijd per dag bedraagt 236 minuten of net geen 4 uur (een halve shift). De totale operatietijd bedroeg 35,4 uur en er werd 126,1 km afgelegd op de terminal. (Figuur 15)

Tot slot is er nog de benodigde tanktijd per demodag, hoewel dit geen realistische weergave is van de reële tanktijd omdat de doorzetcapaciteit van het mobiele tankstation (+/- 9 kg/uur) lager ligt dan een stationair station. De terminal tractor heeft in totaal 136,1 minuten al tankend doorgebracht, wat neerkomt op 11,3 minuten per dag. (Figuur 16)

**Figuur 14 - Tankgegevens AET**



**Figuur 15 - Operationele minuten AET**



De technische beschikbaarheid van de Terberg terminal tractor lag tijdens de demonstratieperiode op 100 %. Ook kon het toestel de gevraagde inzet leveren zonder tussentijds bij te moeten tanken. Een gemiddeld verbruik berekenen is moeilijk en biedt weinig meerwaarde, gezien de wisselende inzet zowel in tijd als in

aard van operatie (intensiteit). Na een volledige shift van acht uur bedroeg de einddruk in de tank nog steeds 100 bar komende van 350 bar.

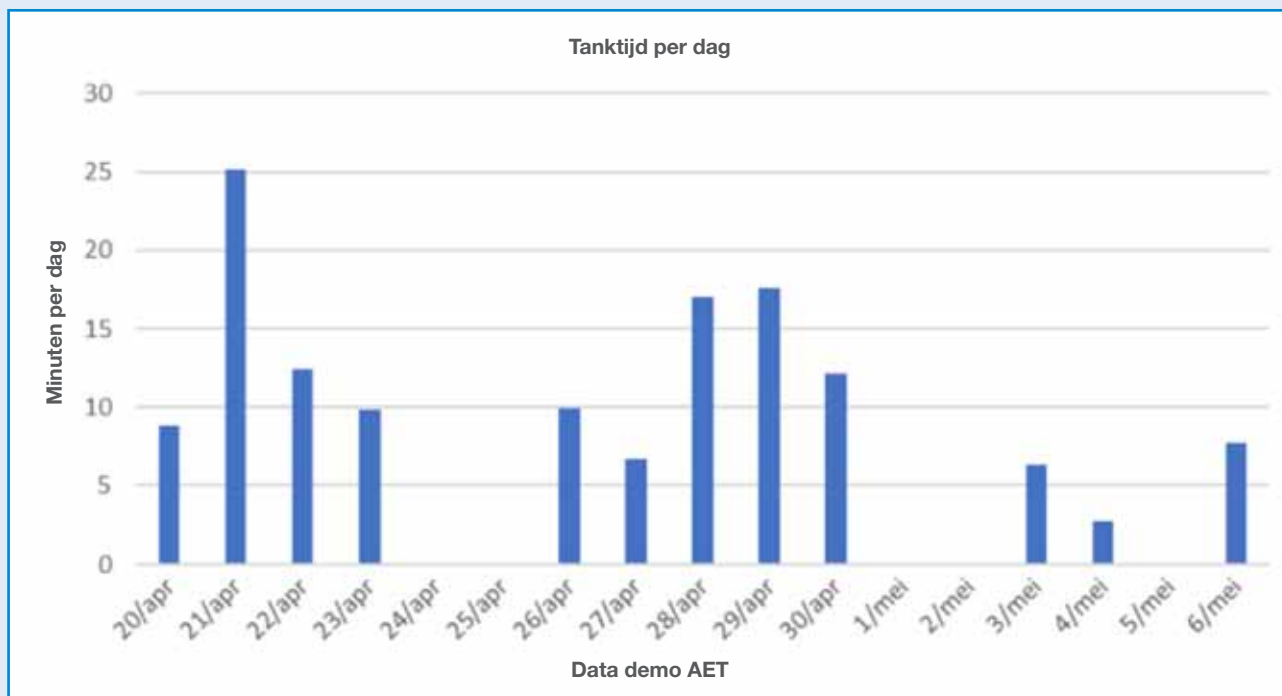
#### Data PSAA

Voor de dagen 31/05 – 01/06 is er geen tankdata beschikbaar, omwille van datacorruptie. Tijdens de demon-

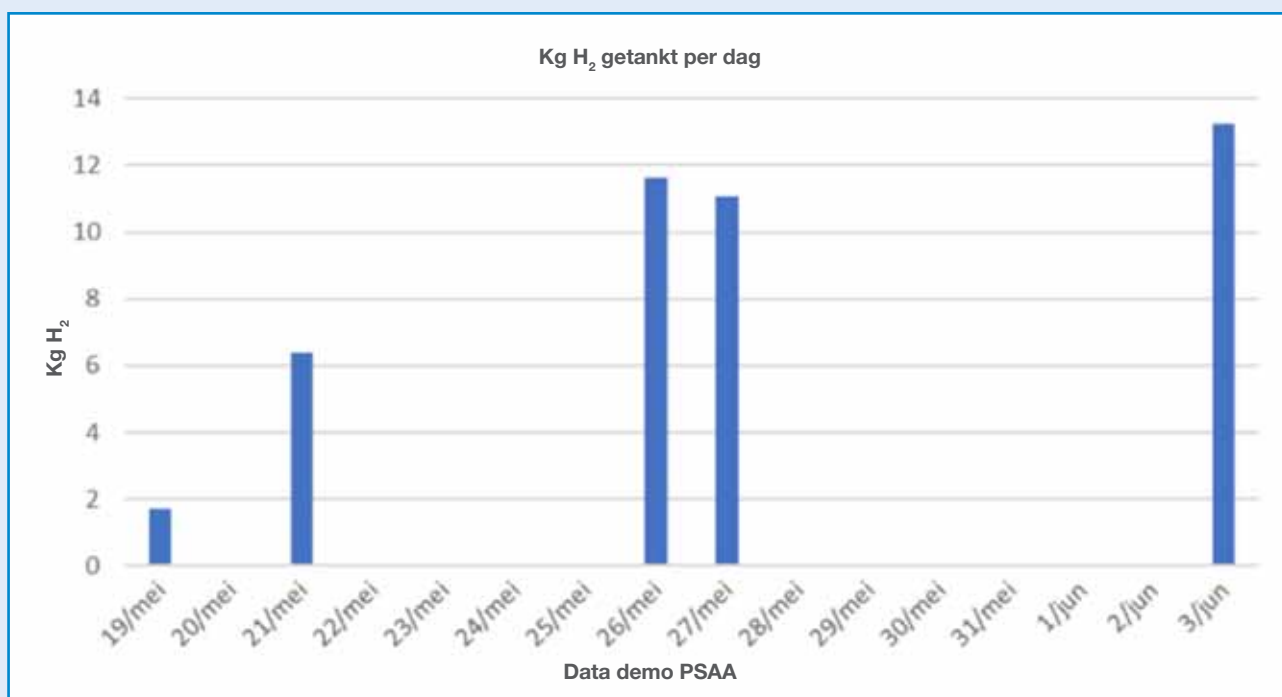
stratie bij PSAA werd minstens 44 kg waterstof getankt. De gemiddelde tankhoeveelheden lagen hoger bij PSAA met 8,8 kg per dag. De tank werd van quasi leeg naar volledig vol gevuld. (Figuur 17)

De minuten in operatie per dag geven een beter beeld van de effectieve inzet

Figuur 16 - Tanktijd AET



Figuur 17 - Tankgegevens PSAA



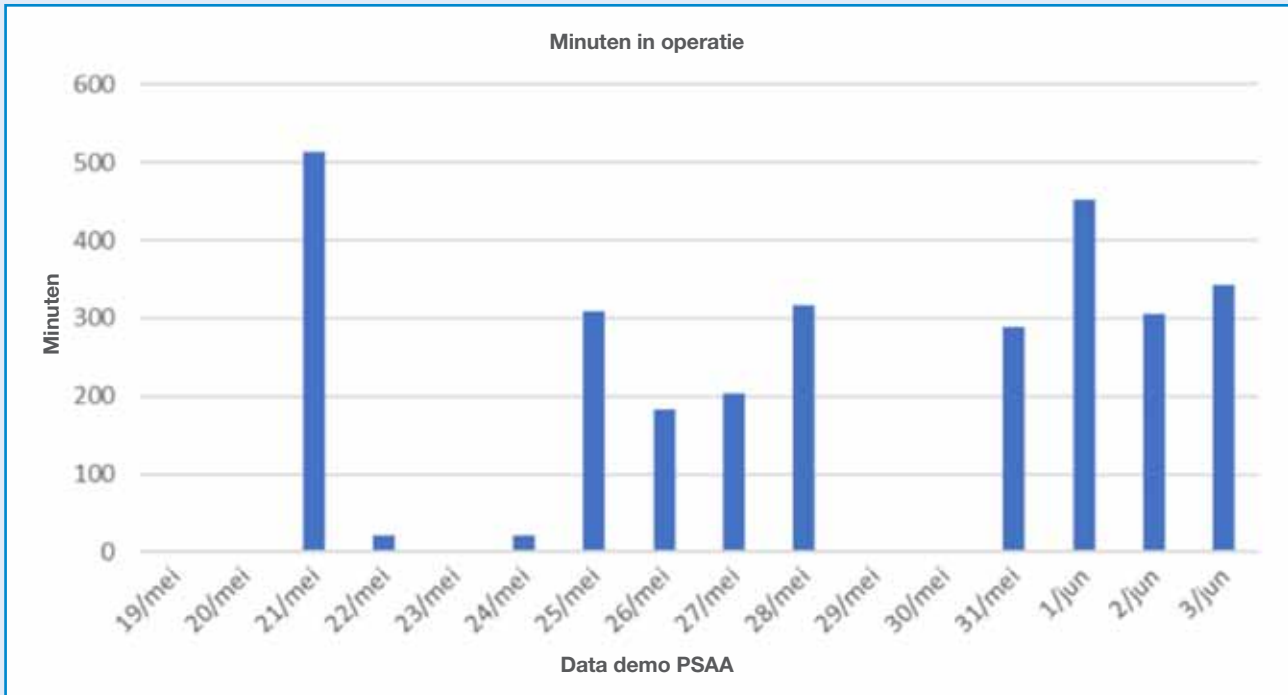
van het toestel. De totale operatietijd bedroeg 2.957 minuten of 49,3 uur; dit is gemiddeld 269 minuten of 4,5 u per dag waarbij het gemiddelde naar beneden wordt getrokken door enkele dagen non-actief omwille van technische storingen. Algemeen gesproken was het de bedoeling om het toestel voor een quasi volledige shift in te zetten, wat in de praktijk effectief mogelijk

bleek. In totaal werden 397 kilometers afgelegd op de terminal. (Figuur 18)

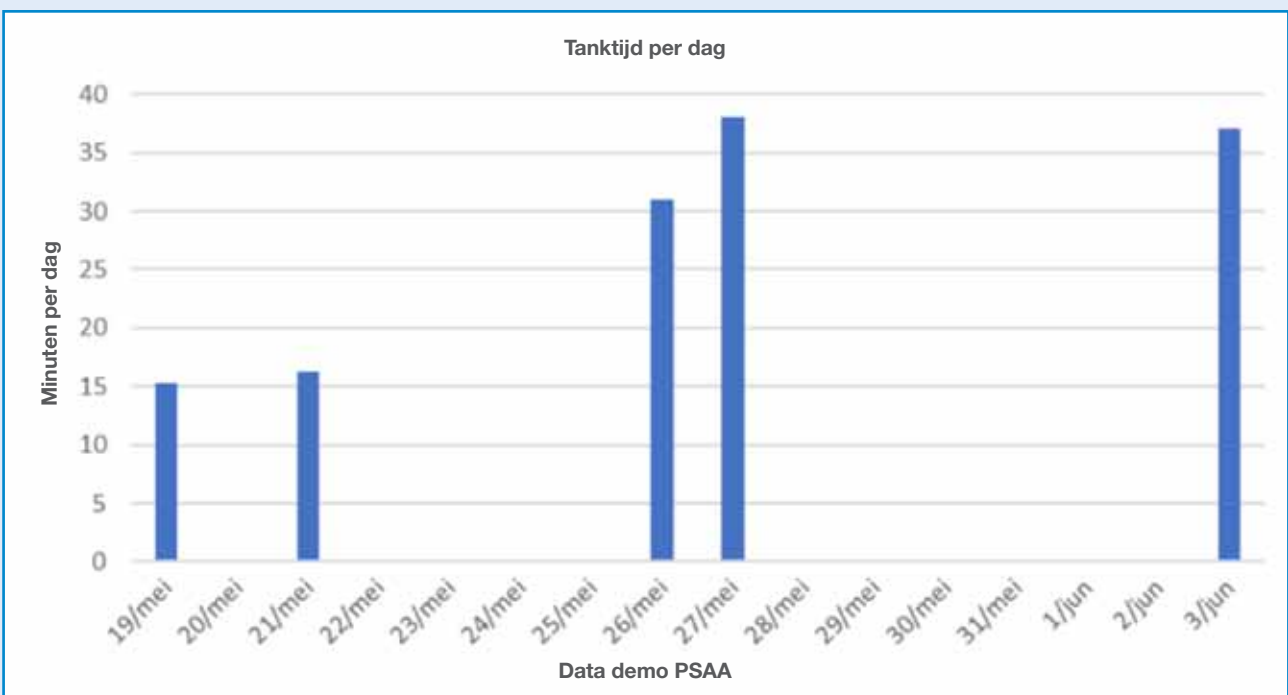
De totale tanktijd bij PSAA bedroeg 137,7 minuten met gemiddeld 27,5 min/dag. De grotere getankte volumes vertalen zich dus ook in een langere tanktijd. Gemiddeld kon 1 kg waterstof op 5 minuten doorgezet worden. (Figuur 19)

Ook bij PSAA lag de technische beschikbaarheid van de Terberg terminal tractor op 100 %. Ook hier kon het toestel de gevraagde inzet leveren zonder bij te tanken. Door een corruptie van de data is het moeilijk om uitspraken te doen naar de mogelijke totale duurtijd van inzet, maar het toestel liet wel een aantal keer een eindruck van ongeveer 160 bar

**Figuur 18 - Operationele minuten PSAA**



**Figuur 19 - Tanktijd PSAA**



optekenen na 5 uur inzet. Samen met de gegevens komende van de demonstratie van AET, doet dit vermoeden dat een inzet van ongeveer 10 uur mogelijk is bij gemiddelde inzet, met een wat lagere uitkomst bij intensieve inzet (nog steeds mogelijk een volledige shift af te ronden) en mogelijk een nog langere inzetbaarheid bij light duty.

## Ervaringen

Na afloop van de demonstraties bij AET en PSAA werd een korte vragenlijst rondgestuurd over de ervaringen van de eindgebruikers en in het

bijzonder de operators van de terminaltractor. Dit gaf volgende resultaten: (Figuur 20)

Algemeen gesproken zijn de resultaten uitgesproken positief. Qua uitzicht en gebruiksgemak scoren de heftruck en terminal trekker op waterstof even goed als de klassieke dieseltuistellen. Belangrijk is dat het geluidsniveau positief beoordeeld wordt. Naast zero-emissie, zijn ook geluidsarme operaties één van de troeven van waterstoffuistellen.

Iets minder positief beoordeeld is het gebruiksgemak en de duurtijd van

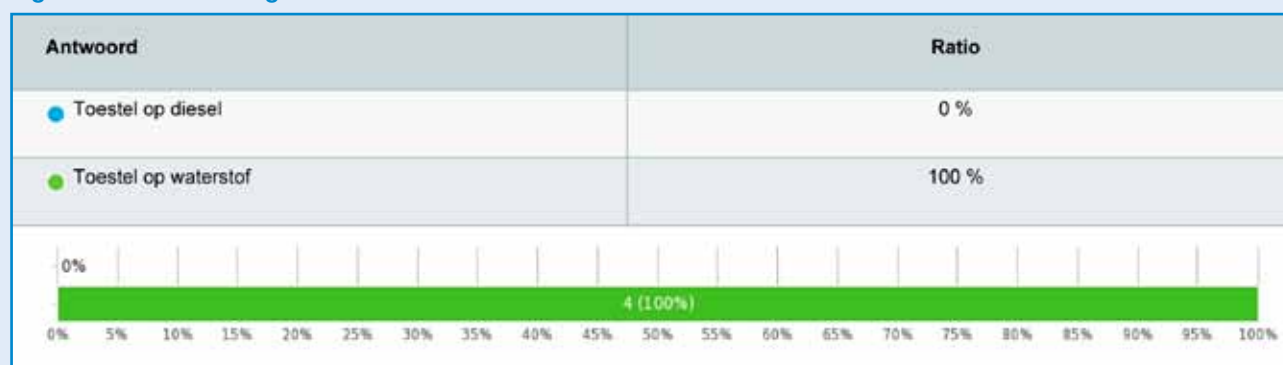
het tanken. Dit heeft veel te maken met de (beperkte) onbeschikbaarheid van het tuistel omwille van stringen aan het tankstation en/of de externe opslag. De tanksnelheid is beperkt in vergelijking met een 'volwaardig' waterstoffuistation. Desalniettemin blijven de tanktijden ver onder de duurtijd die nodig is voor het opladen van een gelijkaardig tuistel op batterijen.

Bij de slotvraag of de keuze voor een toekomstig tuistel naar diesel of waterstof moet gaan, was het antwoord unaniem 'waterstof' zoals de te zien in figuur 21.

**Figuur 20 - Ervaringen eindgebruikers waarbij 1 'slecht' betekent en 5 'uitstekend'**

|  | 1   | 2   | 3   | 4    | 5    | n.v.t. |
|--|-----|-----|-----|------|------|--------|
| Uitzicht van het tuistel   | 0   | 0   | 0   | 25%  | 50%  | 25%    |
| Robuustheid van het tuistel  | 0   | 0   | 0   | 100% | 0    | 0      |
| Toegankelijkheid van de cabine   | 0   | 0   | 0   | 75%  | 25%  | 0      |
| Ruimte in de cabine  | 0   | 0   | 0   | 50%  | 50%  | 0      |
| Comfort van de zetel   | 0   | 0   | 25% | 25%  | 50%  | 0      |
| Instelbaarheid van de zetel  | 0   | 0   | 0   | 50%  | 50%  | 0      |
| Algemene zichtbaarheid   | 0   | 25% | 0   | 50%  | 25%  | 0      |
| Gebruik bedieningsknoppen  | 0   | 0   | 25% | 25%  | 50%  | 0      |
| Bedieningsgemak van het stuur  | 0   | 0   | 0   | 25%  | 75%  | 0      |
| Bedieningsgemak van de pedalen   | 0   | 0   | 0   | 25%  | 75%  | 0      |
| Geluid   | 0   | 0   | 0   | 0    | 100% | 0      |
| Afmetingen van het tuistel   | 0   | 0   | 0   | 50%  | 25%  | 25%    |
| Rijzekerheid   | 0   | 0   | 50% | 50%  | 0    | 0      |
| Stabiliteit  | 0   | 0   | 0   | 75%  | 25%  | 0      |
| Gebruiksgemak tanken   | 50% | 50% | 0   | 0    | 0    | 0      |
| Autonomie waterstoffuistel   | 0   | 25% | 50% | 0    | 25%  | 0      |
| Opstart van het tuistel en de waterstoffuistel   | 0   | 0   | 75% | 25%  | 0    | 0      |
| Afvoeren van het restwater   | 0   | 0   | 0   | 75%  | 25%  | 0      |
| Display vullingsgraad waterstoffuistank  | 0   | 0   | 25% | 25%  | 50%  | 0      |
| Snelheid van tanken (rekening houdend met het feit dat het mobiel tankstation niet de "real life" snelheid kan bieden) | 25% | 50% | 25% | 0    | 0    | 0      |

**Figuur 21 - Keuze eindgebruikers**





## 6. CONCLUSIE

De demonstraties in het project Hydrolog waarbij een waterstof aangedreven terminal tractor gedurende zes weken werd ingezet op twee verschillende terminals in de Antwerpse haven en waarbij geopteerd werd voor beleving via een mobiel waterstoftankstation, tonen aan dat waterstof als zero-emissie brandstof op een veilige en performante wijze kan ingezet worden voor (o.a.) de aandrijving van het zware logistieke equipment.

De vergunningstrajecten die doorlopen werden bij twee verschillende provincies om het mobiele waterstof-tankstation op beide terminals vergund te krijgen, hebben aangetoond dat de opslag en het vertanken van waterstof vergund kan worden zelfs in een omgeving met hoge veiligheidseisen. De wetgeving is echter nog niet ten volle voorbereid op deze nieuwe brandstof, waardoor het traject tijdrovend en kostelijk is, maar op zich is dat geen showstopper.

De impact op het vlak van de bedrijfsorganisatie en de interne veiligheidsprocedures mag niet onderschat worden. Dit gaat van de praktische inrichting van een tank- en opslag site met hekwerk, aanrijdbeveiliging, stroomvoorziening en aarding, ... over interne procedures zoals noodplanning, tot organisatorische aanpassingen om waterstoftoestellen optimaal in te zetten in de bedrijfsvoering.

De VIL pilots hebben aangetoond dat voertuigen op waterstof technisch en



operationeel perfect inzetbaar zijn. De technologie, ondanks relatief recent en op vlak van zware logistieke toestellen zelfs nog in prototype-fase, toont een graad van maturiteit die wel vraagt om verdere implementatie om een aantal kinderziekten uit de wereld te helpen.

Vast staat dat waterstof een zero-emissie en geluidsarm alternatief is voor diesel binnen logistieke operaties waar batterij-elektrische varianten

minder tot hun recht komen. Daar waar vermogensvragen de implementatie van de bestaande batterijtechnologie overstijgen, komt waterstof in aanmerking.

Het prijskaartje vormt vandaag nog een hinderpaal. Gelet op de kostprijs van de tankinfrastructuur komt de TCO voor batterij-elektrische heftrucks voordeliger uit. Maar wanneer de personeelskosten voor verminderde



productiviteit omwille van batterijwissels mee in rekening worden gebracht en de verwachte prijsdaling voor waterstof, dat slaat de balans over in het voordeel van waterstof

Op relatief korte termijn liggen de grootste toepassingsmogelijkheden in havenomgevingen. Daar is vandaag al waterstof aanwezig, bijvoorbeeld als feedstock van de petrochemie, en zal er in de toekomst veel (groene)

waterstof beschikbaar komen gelet op de grootschalige elektrolyseprojecten (“waterstoffabrieken”) die op stapel staan in de Vlaamse havens en toekomstige import van waterstof of afgeleiden. Die waterstof zal (deels) gaan naar heavy duty transport (scheepvaart, trucks, havenlogistiek, treinen, ...) als duurzame brandstof.

Het VIL-project Hydrolog heeft aangetoond dat waterstof geen verre

droom meer is, maar realiteit. Mits een flexibele wetgeving, de juiste overheidsincentives, ondersteuning van stakeholders en ondernemingen die bereid zijn de daad bij het woord te voegen, kan waterstof weldra doorbreken als zero-emissie brandstof.

MET DANK AAN DE  
PROJECTDEELNEMERS



MATERIAL HANDLING



samen voor #sterkgroeien





