



UHASSELT

KNOWLEDGE IN ACTION

Faculteit Bedrijfseconomische Wetenschappen

master in de handelswetenschappen

Masterthesis

Vraag & aanbod: waterstoftankinfrastructuur voor wegtransport in België

Michiel Cruydt

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de handelswetenschappen, afstudeerrichting supply chain management

PROMOTOR :

dr. Maarten JANS

BEGELEIDER :

De heer Toon MOONS



UHASSELT

KNOWLEDGE IN ACTION

www.uhasselt.be

Universiteit Hasselt
Campus Hasselt:
Martelarenlaan 42 | 3500 Hasselt
Campus Diepenbeek:
Agoralaan Gebouw D | 3590 Diepenbeek

2023
2024



Faculteit Bedrijfseconomische Wetenschappen

master in de handelswetenschappen

Masterthesis

Vraag & aanbod: waterstoftankinfrastructuur voor wegtransport in België

Michiel Cruydt

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de handelswetenschappen, afstudeerrichting supply chain management

PROMOTOR :

dr. Maarten JANS

BEGELEIDER :

De heer Toon MOONS

Voorwoord

In het kader van mijn masteropleiding Supply Chain Management aan de Universiteit Hasselt heb ik mijn masterproef gewijd aan de uitbreiding van de waterstoftankinfrastructuur in België. Dit onderwerp sprak mij bijzonder aan omdat ik ben opgegroeid nabij het familiebedrijf, waar mijn oma jarenlang een tankstation uitbaatte. De fascinatie voor brandstoffen en infrastructuur zat er dus al vroeg in, en de kans om een bijdrage te leveren aan de toekomst van duurzame energie in België kon ik niet laten liggen.

Dankzij de begeleiding en ondersteuning van mijn promotor, prof. dr. Theo Jans, en mijn begeleider, dhr. Toon Moons, heb ik dit onderzoek kunnen voltooien. Hun waardevolle inzichten en constante feedback waren onmisbaar tijdens dit proces.

Ook wil ik mijn familie en vrienden bedanken voor hun voortdurende steun. Hun aanmoedigingen hebben me geholpen om gemotiveerd te blijven, zelfs op de momenten dat het moeilijk werd.

Michiel Cruydt

Augustus 2024

Samenvatting

Deze masterproef onderzoekt de obstakels die overwonnen moeten worden om het aantal waterstoftankstations voor vrachtwagens in België uit te breiden van vier naar vijftien tegen 2030, in overeenstemming met de verplichtingen die voortvloeien uit de AFIR-verordening (European Union, 2023; WaterstofNet, 2023, 2024). Het doel is om inzicht te krijgen in de uitdagingen die de uitrol van waterstoftankinfrastructuur belemmeren, en om aanbevelingen te doen die kunnen bijdragen aan een duurzame en robuuste waterstofeconomie in België. Gezien de significante bijdrage van de transportsector aan de broeikasgasemissies in België, is de transitie naar zero-emissie technologieën van cruciaal belang om de Europese klimaatdoelstellingen te halen (EU, 2019/1242; Klimaat.be, 2021). Waterstof biedt een potentieel alternatief voor fossiele brandstoffen, vooral in het zware wegvervoer, vanwege de korte tanktijden en het lange bereik van waterstofvoertuigen (Cunanan et al., 2021).

De onderzoeksvraag van deze masterproef luidt:

"Welke obstakels moeten overwonnen worden om het huidige aantal van 4 waterstoftankstations voor zwaar wegtransport in België uit te breiden naar 15 waterstoftankstations tegen 2030?"

Om de centrale onderzoeksvraag te beantwoorden, is het onderzoek gestructureerd rond vier deelvragen, die elk een specifiek perspectief belichten:

1. de uitdagingen binnen de waterstofketen,
2. de waterstofstrategieën van andere landen, inclusief de ervaring van een Nederlandse waterstoftankstation aanbieder,
3. het Vlaams en Europees beleid,
4. de uitdagingen waarmee huidige en toekomstige aanbieders van waterstoftankstations in België worden geconfronteerd.

Elke deelvraag werd onderzocht met behulp van passende methoden. De eerste deelvraag, over de uitdagingen in de waterstofketen, werd onderzocht via een literatuurstudie, waarbij technische en economische belemmeringen in de productie, opslag en distributie van waterstof centraal stonden. De tweede deelvraag, over de waterstofstrategieën van landen die koploper zijn op vlak van waterstofinfrastructuur, werd onderzocht via een literatuurstudie en een casestudy van een Nederlandse waterstoftankstation aanbieder, om internationale successen te begrijpen. De derde deelvraag, die het Vlaams en Europees beleid betrof, werd onderzocht via een literatuurstudie en een interview met een Vlaamse beleidsmaker, om de beleidskaders en hun impact op de uitbouw van waterstoftankinfrastructuur te analyseren. De vierde deelvraag, over de uitdagingen voor huidige en toekomstige aanbieders van waterstoftankstations in België, werd onderzocht aan de hand van een interview en een casestudy, gericht op de operationele en markttechnische obstakels.

De analyse van de toeleveringsketen van waterstof bracht aan het licht dat de productie, opslag en distributie van waterstof met aanzienlijke technische en economische uitdagingen gepaard gaan. De hoge kosten van elektrolyse, de complexiteit van opslag onder hoge druk, en de eisen die worden gesteld aan de distributie-infrastructuur vormen aanzienlijke hindernissen voor een grootschalige uitrol van waterstofinfrastructuur. Zonder ingrijpende technologische innovaties en kostenverlagingen zullen deze uitdagingen de ontwikkeling van extra waterstoftankstations aanzienlijk bemoeilijken. (Barthelemy et al., 2017; Osman et al., 2022)

Uit de internationale vergelijking blijkt dat succesvolle waterstofinfrastructuur sterk afhankelijk is van duidelijke regelgeving, samenwerking tussen publieke en private sectoren, en technologische innovatie. Landen zoals Zuid-Korea en Nederland tonen aan dat strategische overheidssteun, gecombineerd met samenwerking tussen verschillende belanghebbenden, essentieel is om de obstakels in de ontwikkeling van waterstofinfrastructuur te overwinnen (Murthy Konda et al., 2011; Stangarone, 2021). In Nederland heeft Vissers Energy Group, dankzij ondersteunende subsidies en

een gunstig regelgevingskader, meer vertrouwen in de economische haalbaarheid van hun waterstoftankstation dan hun Belgische tegenhangers (Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, 2024). Deze bevindingen suggereren dat België kan profiteren van een meer holistische en geïntegreerde aanpak om de uitbreiding van waterstoftankstations te versnellen.

Het onderzoek naar het Vlaamse en Europese beleid toonde aan dat hoewel er duidelijke beleidsdoelstellingen zijn, de praktische implementatie ervan nog steeds wordt gehinderd door complexiteiten in regelgeving en een gebrek aan een gestroomlijnd wettelijk kader (Custers, 2020; Van den Broeck, 2020). Het interview met een Vlaamse beleidsmaker, betrokken bij waterstofbeleid, benadrukte vooral het belang van timing bij investeringen in waterstofinfrastructuur. Te vroege investeringen kunnen leiden tot onderbenutte infrastructuur en financiële verliezen, zoals al is gebleken uit eerdere projecten waar tankstations failliet gingen door een gebrek aan vraag. Tegelijkertijd kan te lang wachten met investeringen ertoe leiden dat waterstofprojecten worden ingehaald door alternatieve technologieën zoals elektrische voertuigen, wat de haalbaarheid van de beleidsdoelstellingen in gevaar brengt. De beleidsmaker wees erop dat succesvolle implementatie van waterstoftankinfrastructuur afhankelijk is van een zorgvuldige afstemming van investeringen op marktontwikkelingen en technologische vooruitgang.

In het kader van het onderzoek naar de uitdagingen die huidige en toekomstige aanbieders van waterstoftankstations in België ervaren, werd een interview afgenomen met WaterstofNet, een clusterorganisatie die een cruciale rol speelt in de ontwikkeling van waterstofinfrastructuur in de Benelux. Door hun betrokkenheid bij de realisatie en uitvoering van diverse waterstofprojecten, waaronder tankstations, biedt WaterstofNet belangrijke inzichten in de operationele en marktgerelateerde uitdagingen in België. Uit het interview kwam naar voren dat de lage benuttingsgraad van bestaande tankstations een grote uitdaging vormt, mede door het beperkte aantal waterstofvoertuigen op de markt. Dit maakt het moeilijk om een rendabele business case te ontwikkelen en benadrukt de noodzaak van overheidssteun en beleidsmatige duidelijkheid. Toekomstige aanbieders, zoals Group Bruno, richten zich meer op de onzekerheden en risico's die gepaard gaan met het betreden van een relatief onvolwassen markt. Voor hen spelen ook de logistieke en infrastructurele eisen een grotere rol, gezien hun beperkte ervaring met waterstofinfrastructuur in vergelijking met reeds actieve aanbieders.

Op basis van deze inzichten kan worden geconcludeerd dat de belangrijkste obstakels voor de uitbreiding van waterstoftankstations in België bestaan uit economische uitdagingen, technologische barrières, complexe regelgeving en een beperkte markt voor waterstofvoertuigen. Elk van deze obstakels beïnvloedt de haalbaarheid van de uitbreiding op verschillende manieren, afhankelijk van de betrokken stakeholder. De realisatie van de doelstelling om het aantal waterstoftankstations voor vrachtwagens in België uit te breiden naar vijftien tegen 2030, zoals bepaald in de AFIR-verordening, vereist een gecoördineerde inspanning tussen overheden, de private sector en onderzoeksinstellingen. Een geïntegreerde aanpak, waarin de timing van investeringen strategisch wordt afgestemd op marktontwikkelingen, is cruciaal om zowel de technologische als economische barrières aan te pakken. Beleidsmatige ondersteuning moet gericht zijn op het creëren van een stimulerend investeringsklimaat, door duidelijkere en gestroomlijnde regelgeving, financiële prikkels en subsidies die het risico voor investeerders verminderen. Tegelijkertijd moet technologische innovatie worden bevorderd om de kosten van waterstofproductie, opslag en distributie te verlagen, terwijl er initiatieven worden genomen om de markt voor waterstof vrachtwagens verder te ontwikkelen en te stimuleren. Alleen door deze factoren in samenhang te benaderen, kan België succesvol zijn in de transitie naar een duurzame waterstofeconomie en de gestelde doelstellingen voor de uitbreiding van de waterstoftankinfrastructuur realiseren.

Het onderzoek biedt waardevolle inzichten in de uitdagingen en mogelijkheden van waterstoftankinfrastructuur in België, maar kent ook enkele beperkingen. Ten eerste is het empirische luik van kwalitatieve aard, wat betekent dat de resultaten niet zonder meer gegeneraliseerd kunnen worden naar de gehele sector. De interviews en casestudies bieden diepgaande inzichten, maar de afwezigheid van kwantitatieve data beperkt de mogelijkheid om economische modellen te ontwikkelen of marktprognoses te maken. Daarnaast konden er geen

interviews worden afgenomen met huidige aanbieders van waterstof tankstations in België, wat een beperking vormt in het verkrijgen van een volledig beeld van de operationele uitdagingen.

Desondanks biedt dit onderzoek een belangrijke bijdrage aan de discussie over de ontwikkeling van waterstofinfrastructuur in België. Het benadrukt de noodzaak van een geïntegreerde aanpak, waarin technologische innovatie, economische haalbaarheid en beleidsmatige ondersteuning centraal staan. Het onderzoek wijst op de noodzaak van verdere kwantitatieve studies naar de economische haalbaarheid van waterstof tankstations, evenals onderzoek naar de marktdynamiek en acceptatie van waterstofvoertuigen in België.

Voor toekomstig onderzoek wordt aanbevolen om de economische haalbaarheid van waterstof tankstations verder te kwantificeren met behulp van economische modellen en kosten-batenanalyses. Daarnaast zou vervolgonderzoek zich kunnen richten op innovatieve financieringsmodellen die de investeringsrisico's voor waterstof tankstations kunnen verminderen. Het is ook belangrijk om grootschalige kwantitatieve studies uit te voeren naar de marktacceptatie van waterstofvoertuigen in België, om zo de vraagzijde van de waterstofmarkt beter te begrijpen. Ten slotte is het aan te raden om alternatieve technologieën, zoals batterij-elektrische voertuigen, te blijven monitoren om te bepalen hoe deze zich verhouden tot de verdere uitbouw van waterstofinfrastructuur.

Inhoudsopgave

Voorwoord	1
Samenvatting	3
Inhoudsopgave	6
Lijst van figuren	9
Lijst van tabellen	10
Lijst van afkortingen	11
1 Onderzoeksplan	13
1.1 <i>Probleemstelling</i>	13
1.1.1 Maatschappelijke problemen	13
1.1.2 Waterstofinfrastructuur in België	14
1.1.3 Nieuwe Europese wetgeving	15
1.2 <i>Onderzoeksvraag</i>	16
1.2.1 Centrale onderzoeksvraag	16
1.2.2 Deelvragen	16
1.3 <i>Methodologie</i>	17
2 Uitdagingen in de waterstofketen	19
2.1 <i>Waterstof</i>	19
2.2 <i>Waterstofinfrastructuur</i>	20
2.2.1 Waterstofproductie	20
2.2.2 Waterstofopslag	23
2.2.3 Waterstofdistributie	24
2.3 <i>Waterstoftankstations</i>	25
2.3.1 Wereldwijde spreiding	25
2.3.2 Infrastructuur	26
2.3.3 Kosten	27
2.3.4 Waterstofprijzen aan de pomp	27
2.4 <i>Waterstof vrachtwagens</i>	28
2.4.1 Vergelijking met substituten	28
2.4.2 Voordelen en nadelen	28
2.4.3 Constructeurs	29
2.4.4 Dual fuel-technologie	29
2.5 <i>Conclusie</i>	29
3 Waterstof in het buitenland	31
3.1 <i>Internationale landenvergelijking</i>	31
3.1.1 Verenigde Staten	31
3.1.2 Europese Unie	32

3.1.3	Duitsland	33
3.1.4	Nederland.....	33
3.1.5	Denemarken.....	34
3.1.6	China	35
3.1.7	Japan	36
3.1.8	Zuid-Korea	37
3.1.9	Conclusie	37
3.2	<i>Case study – Vissers Energy Group</i>	38
3.2.1	Huidige situatie en toekomstplannen	39
3.2.2	SWIM-regeling.....	40
3.2.3	Uitdagingen bij de realisatie van het waterstoftankstation	41
3.2.4	Adviezen voor nieuwe aanbieders van waterstoftankstations	43
3.2.5	Successen bij de realisatie van het waterstoftankstation	43
3.2.6	Vergelijking tussen de Nederlandse en Belgische context.....	44
3.2.7	Conclusie	44
4	Vlaams en Europees beleid.....	46
4.1	<i>Belgische situatie</i>	46
4.1.1	Vlaamse waterstofstrategie	46
4.1.2	Vlaamse Waterstofvisie	49
4.1.3	VLAREM-voorwaardenkader	50
4.1.4	AFIR-verordening	51
4.2	<i>Bevindingen van de Europese Rekenkamer</i>	52
4.3	<i>Kabinet van de Vlaams minister van Mobiliteit en Openbare Werken</i>	53
4.3.1	Actieplan Clean Power for Transport 2015	53
4.3.2	Alternatieve oplossingen en modal shift	54
4.3.3	Subsidies voor waterstoftankstations in Vlaanderen	54
4.3.4	Verordening betreffende infrastructuur voor alternatieve brandstoffen	55
4.3.5	Wetgevende kader	56
4.3.6	Belemmeringen ontwikkeling waterstofinfrastructuur.....	57
4.3.7	Realitycheck Europese Rekenkamer	57
4.4	<i>Conclusie</i>	58
5	Uitdagingen aanbieders van waterstoftankstations in België.....	60
5.1	<i>WaterstofNet</i>	60
5.1.1	Economische uitdagingen	60
5.1.2	Waterstofvoertuigen	60
5.1.3	AFIR-verordening	61
5.2	<i>Case study – Group Bruno</i>	61
5.2.1	Huidige aanbod	62
5.2.2	Toekomstige evolutie van het aanbod	62
5.2.3	Leerpunten uit het Hydrogen Society Limburg Project.....	63
5.2.4	Samenwerking met WaterstofNet	63
5.2.5	Perspectieven van transporteurs op de afname van waterstof.....	63
5.2.6	Adoptie van waterstoftrucks versus elektrische trucks	64
5.2.7	De overheid	64
5.2.8	Infrastructuurgerelateerde uitdagingen	65

5.2.9	Mogelijkheden voor de beleving van waterstof aan toekomstige stations	65
5.2.10	Stimulansen voor snellere investeringen in waterstoftankpunten	65
5.3	<i>Conclusie</i>	66
6	Besluit	68
	Referenties	72

Lijst van figuren

Figuur 1: Waterstoftankstations in België (WaterstofNet, 2024)	14
Figuur 2: Waterstoftankstations wereldwijd (Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, 2024)	25
Figuur 3: Waterstoftankstations in Europa (Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, 2024).....	26

Lijst van tabellen

Tabel 1: Waterstoftankstations in België (WaterstofNet, 2024).....	15
Tabel 2: Waterstof kleurenspectrum (National Grid, 2023)	20
Tabel 3: Voordelen, nadelen, kosten (€/kg), efficiëntie per waterstofproductiemethode (Younas et al., 2022)	23

Lijst van afkortingen

AEM - Alkaline Anion Exchange Membrane (Alkalische Anion Uitwisselingsmembraan)

AFIR - Alternative Fuels Infrastructure Regulation (Verordening inzake infrastructuur voor alternatieve brandstoffen)

B2B - Business-to-Business (Handel tussen bedrijven)

B2C - Business-to-Consumer (Handel tussen bedrijven en consumenten)

BBT - Best Beschikbare Technieken

CCS - Carbon Capture and Storage (Koolstofafvang en -opslag)

CNG - Compressed Natural Gas (Aardgas onder hoge druk)

CO₂ - Koolstofdioxide

CSD - Compression, Storage, and Distribution (Compressie, Opslag en Distributie)

CSRD - Corporate Sustainability Reporting Directive (Richtlijn inzake rapportage over duurzaamheidsprestaties van ondernemingen)

DOE - Department of Energy (Ministerie van Energie)

EC - Early Commercial (Vroege Commercieel)

ECA - European Court of Auditors (Europese Rekenkamer)

ETS - Emissions Trading System (Emissiehandelssysteem)

EU - Europese Unie

FCEV - Fuel Cell Electric Vehicle (Brandstofcel Elektrisch Voertuig)

gge - Gallon of Gasoline Equivalent (Gallon Benzine-equivalent)

H₂A - Hydrogen Analysis (Waterstofanalyse)

HFTO - Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office (Kantoor voor Waterstof- en Brandstofceltechnologieën)

HNO - Hydrogen Network Operator (Waterstofnetbeheerder)

HRS - Hydrogen Refueling Station (Waterstoftankstation)

HSCC - Hydrogen Station Cost Calculation (Kostenberekening Waterstoftankstation)

HVO - Hydrotreated Vegetable Oil (Waterstofbehandelde plantaardige olie, een hernieuwbare dieselbrandstof)

ICE - Internal Combustion Engine (Interne Verbrandingsmotor)

KMO - Kleine en Middelgrote Ondernemingen (Small and Medium-sized Enterprises)

LH2 - Liquid Hydrogen (Vloeibare Waterstof)

LNG - Liquefied Natural Gas (Vloeibaar Aardgas)

LS - Larger Stations (Grotere Stations)

MoU - Memorandum of Understanding

MS - More Stations (Meer Stations)

MW - Megawatt

NFPA 2 - National Fire Protection Association 2 (Nationale Vereniging voor Brandbescherming)

PEM - Proton Exchange Membrane (Proton Uitwisselingsmembraan)

POM - Provinciale Ontwikkelingsmaatschappij

R&D - Research and Development (Onderzoek en Ontwikkeling)

REPowerEU - Plan voor energieonafhankelijkheid en transitie naar hernieuwbare energie in de EU

SMR - Steam Methane Reforming (Stoommethaanreforming)

SOTA - State-of-the-Art (Staat van de Kunst)

SWIM - Subsidie Waterstof in Mobiliteit

TCO - Total Cost of Ownership (Totale Eigendomskosten)

TEN-T - Trans-European Transport Network (Trans-Europees Transportnetwerk)

VITO - Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek

VLAIO - Agentschap Innoveren & Ondernemen

VLAREM - Vlaams Reglement betreffende de Milieuvergunning

1 Onderzoeksplan

Het doel van deze masterproef is om inzicht te krijgen in de obstakels die overwonnen moeten worden om het aantal waterstoftankstations voor vrachtwagens in België uit te breiden van vier naar vijftien tegen 2030. Door de identificatie en analyse van deze obstakels, kan een bijdrage geleverd worden aan de ontwikkeling van een robuuste en toekomstbestendige waterstoftankinfrastructuur, die essentieel is voor de transitie naar een duurzamer transportsector. In het aanvangsgedeelte van deze sectie wordt de maatschappelijke relevantie van het onderzoek besproken. Daarna wordt de centrale onderzoeksvraag geïdentificeerd en worden de bijhorende subvragen geformuleerd. Deze subvragen zijn bedoeld om stapsgewijs een goed onderbouwd antwoord te vinden op de hoofdvraag.

1.1 Probleemstelling

Het energieconsumptievraagstuk speelt wereldwijd een centrale rol wanneer het gaat over de opwarming van de aarde als gevolg van een verhoogde concentratie broeikasgassen in de atmosfeer. Klimaatverandering is uitgegroeid tot een van de meest urgente mondiale problemen, met alarmerende stijgingen in de gemiddelde wereldwijde temperatuur en met een verhoogde frequentie van extreme weersomstandigheden. Het is daarom essentieel om een oplossing te vinden voor deze dringende maatschappelijke kwestie door te streven naar de realisatie van een klimaatneutrale energieconsumptie in diverse sectoren. (Rogelj et al., 2023)

1.1.1 Maatschappelijke problemen

In België wordt een significant aandeel van de broeikasgasemissies veroorzaakt door de transportsector. Volgens Klimaat.be, de Belgische federale site voor betrouwbare informatie over klimaatverandering, is het aandeel van de transportsector in de totale broeikasgasemissies van 14,4% in 1990 gestegen naar 21,5% in 2021 (Klimaat.be, 2021). Met name het wegvervoer, dat in 2021 96,0% vertegenwoordigde van de totale uitstoot door de sector, is verantwoordelijk voor die toename. Binnen de Europese Unie draagt het zware wegtransport bij aan 27% van de totale uitstoot van wegverkeer in de EU. Deze evoluties staan in schril contrast met de Belgische en EU-klimaatdoelstellingen. Die beogen, specifiek voor de transportsector, een daling in broeikasgasemissies met minstens 30% tegen 2030 ten opzichte van 2005 (EU, 2019/1242). Recent heeft de Europese Raad echter een akkoord bereikt over nieuwe regels die de CO₂-emissienormen voor zware bedrijfsvoertuigen verder zullen aanscherpen. Dit betekent dat tegen 2030 nieuwe vrachtwagens 45% minder CO₂ moeten uitstoten in vergelijking met 2019 (Zarcone, 2023). Een radicale transitie naar zero-emissie transport dringt zich op.

Een inblik in de officiële gegevens van de Europese Commissie laat zien hoeveel vrachtwagens van elk alternatief brandstoftype geregistreerd zijn in België. In 2022 vormen vrachtwagens van de brandstoftypes LNG en CNG met een aantal van respectievelijk 615 en 604 voertuigen de meerderheid van dat vrachtwagenpark. Met een toename van 20 elektrische vrachtwagens in 2022 komt het totaal aantal elektrische vrachtwagens in België op 42 te staan. Vooralsnog blijft de teller van het aantal vrachtwagens op waterstof op 0 staan (Observatory, 2022). Een vergelijking van de voorgaande aantallen met het totaal aantal voertuigen voor goederenvervoer, dat 973 447 stuks bedroeg in 2023, maakt duidelijk dat de transportsector nog een lange weg te gaan heeft om de beoogde daling in broeikasgasemissies van 30% tegen 2030 ten opzichte van 2005 te bereiken (Statbel, 2023).

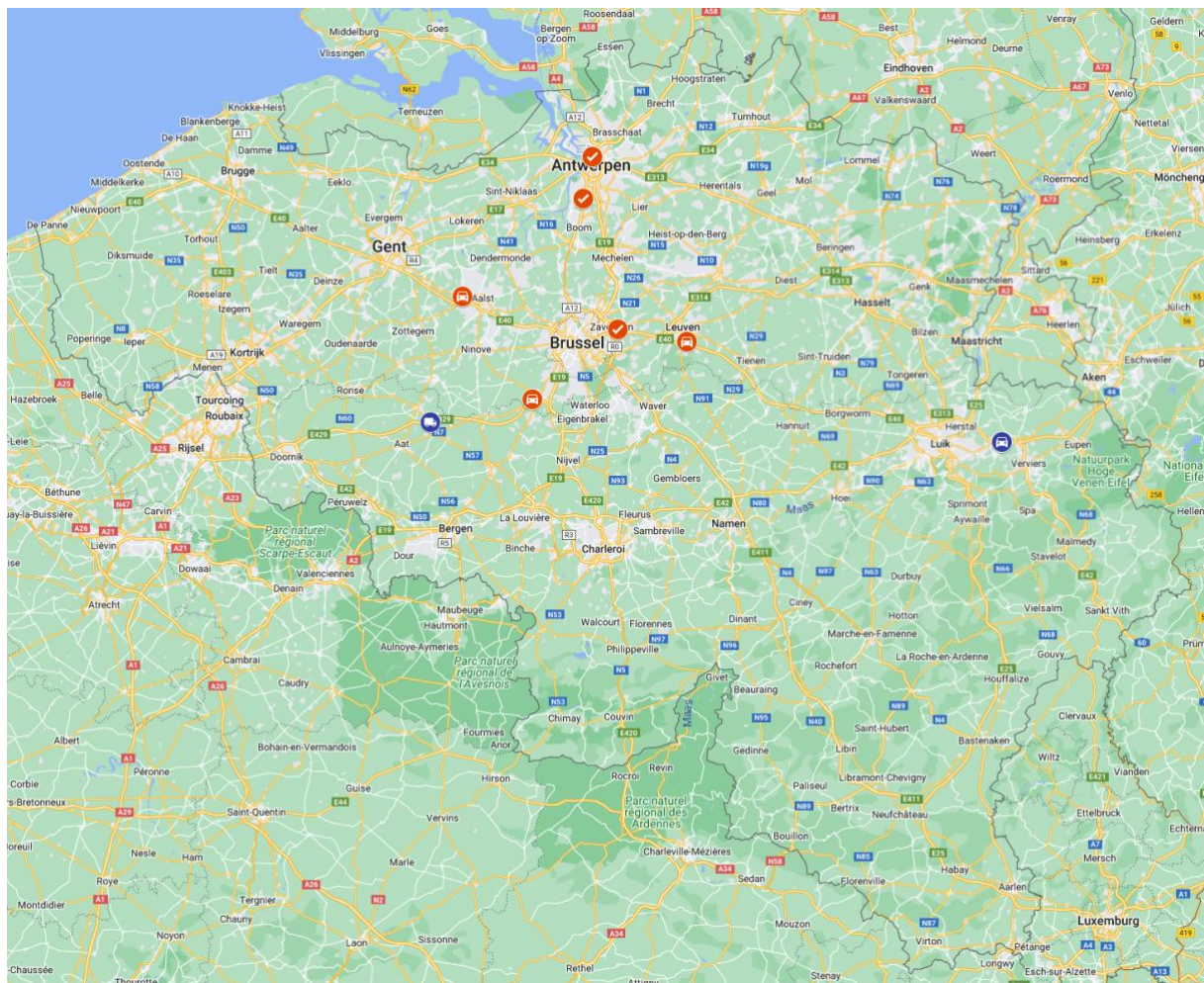
De bestaande zero-emissie technologieën voor zware vrachtwagens omvatten elektrische vrachtwagens met een lithium-ion batterij en brandstofcelvrachtwagens die gebruik maken van waterstof. Cunanan et al. (2021) besprak de voor- en nadelen van beide technologieën. De voornaamste nadelen van elektrische vrachtwagens zijn onder andere de beperkte actieradius van 100 tot 200 kilometer en de lange laadtijden van minstens 1 uur. Brandstofcel vrachtwagens beschikken over een actieradius die kan oplopen tot 1000 kilometer en hebben een tanktijd van 15

minuten. Waterstof als energiebron voor zwaar wegvervoer kan zowel een waardevol alternatief zijn voor traditionele fossiele brandstoffen, alsook een oplossing bieden voor de gewichtproblemen die gepaard gaan met zware elektrische bedrijfsvoertuigen. De duurzaamheid van waterstof als brandstof is sterk afhankelijk van de productiemethode. Waterstof kan zowel door middel van hernieuwbare energiebronnen (groene waterstof) als door middel van fossiele brandstoffen met koolstofafvang en -opslag (blauwe waterstof) worden geproduceerd (Yu et al., 2021).

Omdat waterstof op diverse fronten aanzienlijke voordelen biedt voor zwaar wegtransport in vergelijking met elektrische vrachtwagen, wordt in deze masterproef specifiek gekeken naar waterstoftankinfrastructuur voor vrachtwagens. Deze focus neemt echter niet weg dat waterstofinfrastructuur ook in toenemende mate gebruikt zal worden voor licht wegtransport.

1.1.2 Waterstofinfrastructuur in België

Om waterstof als zero-emissie energiedrager te laten functioneren is de infrastructuur voor het produceren, transporteren, opslaan en distribueren van waterstofgas van cruciaal belang. Het vormt de ruggengraat van de waterstofeconomie, en heeft invloed op de adoptie van waterstoftechnologieën door zowel consumenten als industrieën (Kim et al., 2023). Momenteel is de waterstoftankinfrastructuur in België nog zeer beperkt. In april 2024 waren er slechts 8 openbare waterstofstations operationeel. Vlaanderen had in 2015 de ambitie om tegen 2020 20 waterstoftankstations te installeren (Vlaamse Overheid, 2015). Gezien het huidige aantal van 6 publiek toegankelijke waterstoftankstations in Vlaanderen werd deze doelstelling niet behaald.



Figuur 1: Waterstoftankstations in België (WaterstofNet, 2024)

Plaats	Adres	Gewest	Uitbater	Vuldruk (bar)	Voertuig	Symbool
Zaventem	Leuvensesteenweg 546	Vlaanderen	Air Liquide	350/700	Beiden	✓
Halle	Zinkstraat 1	Vlaanderen	DATS 24	700	Auto's	⚠
Antwerpen	Mexicostraat 11	Vlaanderen	CMB.Tech	350/700	Beiden	✓
Antwerpen	Boomsesteenweg 950	Vlaanderen	DATS 24	350/700	Beiden	✓
Leuven	Geldenaaksebaan 448	Vlaanderen	DATS 24	700	Auto's	⚠
Ollignies	Rue de la Verte Louche 2	Wallonië	DATS 24	350	Vrachtwagens	🚚
Erpe-Mere	Gentsesteenweg 239	Vlaanderen	DATS 24	700	Auto's	⚠
Herve	Outre-Cour 37	Wallonië	DATS 24	700	Auto's	🚚

Tabel 1: Waterstoftankstations in België (WaterstofNet, 2024)

Daarnaast plant België om deels zelf te voorzien in de productie van groene waterstof. In Zeebrugge staat de bouw van de Hyoffwindfabriek gepland, die in eerste fase 25 MW elektriciteit kan omzetten in groene waterstof en in een tweede fase opgeschaald zal worden naar 100MW (Jacobus, 2022). Ook zal in Antwerpen het Amerikaanse bedrijf Plug Power in 2024 beginnen aan de bouw van een waterstoffabriek, waar 12 500 ton vloeibare gasvormige groene waterstof per jaar voor de Europese markt geproduceerd zal worden (Desmet, 2022). Aangezien de geplande binnenlandse productie ontoereikend is om volledig te voorzien in de toekomstige vraag naar groene waterstof werkt België aan de realisatie van waterstof-importroutes uit landen die beschikken over ofwel veel windenergie, ofwel veel zonne-energie. In het kader van de Belgische federale waterstofstrategie wordt via MoU's samengewerkt met Oman en Namibië om drie invoerroutes voor duurzame energiebronnen op te zetten (Straeten, 2022).

Om het vervoer van waterstof via een netwerk van 600 km pijpleidingen te reguleren, gaf de Kamer op 11 juli 2023 haar akkoord voor de eerste Belgische waterstofwet (Meyvis, 2023). Op 26 april 2024 heeft de federale Minister van Energie, Tinne Van der Straeten, Fluxys hydrogen, een dochteronderneming van Fluxys Belgium, aangesteld als netbeheerder voor het vervoer van waterstof. Deze benoeming tot "Hydrogen Network Operator" (HNO) markeert een belangrijke stap in de energietransitie (Fluxys, 2024). Fluxys Hydrogen, opgericht in 2023, zal de ontwikkeling en exploitatie van het waterstofleidingnetwerk op zich nemen, onderdeel van de "European Hydrogen Backbone". Met deze maatregelen streeft België naar een geïntegreerd en goed gereguleerd systeem dat de toekomst van waterstof in de transportsector ondersteunt en de overgang naar zero-emissie transport bevordert.

1.1.3 Nieuwe Europese wetgeving

In juli 2023 werd een belangrijke stap gezet voor de ontwikkeling van waterstoftankinfrastructuur binnen de Europese Unie met de goedkeuring van de Alternative Fuels Infrastructure Regulation (AFIR). Deze verordening, en met name artikel 6, legt lidstaten strikte verplichtingen op om een uitgebreid netwerk van waterstoftankstations te realiseren. Volgens AFIR moeten tegen eind 2030 langs het kernnetwerk van het Trans-Europese Transportnetwerk (TEN-T) om de 200 kilometer gasvormige waterstoftankstations (HRS) beschikbaar zijn. Daarnaast dient elk stedelijk knooppunt te beschikken over minimaal één waterstoftankstation. Deze stations moeten in staat zijn om dagelijks ten minste één ton waterstof te leveren, en wat cruciaal is, ze moeten toegankelijk zijn voor alle vormen van wegvervoer, inclusief personenwagens, bussen en vrachtwagens. Dit zorgt voor een robuuste en inclusieve infrastructuur die bijdraagt aan de transitie naar emissievrij vervoer in de hele EU. (European Union, 2023)

De impact van deze verordening voor België is aanzienlijk. Volgens de vereisten van AFIR zou België tegen 2030 moeten beschikken over ten minste 15 waterstoftankstations. De Belgische regio's, onder meer Vlaanderen, zullen verantwoordelijk zijn voor het opstellen van een uitrolplan tegen 2027 dat

voldoet aan de behoeften van waterstofmobiliteit op de weg. Dit plan moet ervoor zorgen dat België voldoet aan de Europese verplichtingen en tegelijkertijd inspeelt op de nationale en regionale ambities voor duurzame mobiliteit. (WaterstofNet, 2023)

Zoals eerder werd vermeld beschikt België op dit moment over acht operationele waterstoftankstations. Echter, slechts vier van deze stations zijn geschikt voor vrachtwagens, wat benadrukt dat er nog aanzienlijke inspanningen nodig zijn om te voldoen aan de AFIR-verordening. De huidige situatie maakt duidelijk dat er een versnelling nodig is in de uitrol van waterstoftankinfrastructuur, vooral met het oog op het faciliteren van zwaar wegvervoer. Het behalen van de doelstelling van 15 waterstoftankstations tegen 2030 zal niet alleen voldoen aan de Europese eisen, maar ook de basis leggen voor een toekomstbestendig, duurzaam transportnetwerk in België. (WaterstofNet, 2024)

Het is duidelijk dat de huidige waterstofinfrastructuur zich in een vroeg stadium van ontwikkeling bevindt in België. Om de uitbreiding van de bestaande infrastructuur efficiënt te laten verlopen moeten de daarmee gepaard gaande uitdagingen en obstakels nauwgezet bestudeerd worden. Verder onderzoek naar uitdagingen in de Belgische context is dus noodzakelijk om aanbevelingen voor beleidsmakers te formuleren die bijdragen aan een soepele opschaling van de waterstofinfrastructuur.

1.2 Onderzoeksvraag

De probleemstelling benadrukt dat de transportsector in België aanzienlijke stappen moet zetten om de gestelde klimaatdoelstellingen te behalen. Een mogelijke strategie om de CO₂-uitstoot van het vrachtwagenpark te verminderen, is de overgang naar zero-emissie technologieën, met name de adoptie van brandstofcelvrachtwagens op waterstof. Echter, de bestaande waterstofinfrastructuur in België is momenteel zeer beperkt. Dit onderzoek richt zich daarom op de identificatie van obstakels die moeten worden overwonnen om het aantal waterstoftankstations voor zwaar wegtransport in België uit te breiden van vier naar vijftien tegen 2030. Om tot een gedegen antwoord te komen op de centrale onderzoeksvraag, worden verschillende perspectieven onderzocht die gezamenlijk de uitdagingen en mogelijke oplossingen voor de uitbreiding van waterstoftankinfrastructuur in België in kaart brengen.

1.2.1 Centrale onderzoeksvraag

Vanuit de probleemstelling en het onderzoeksdoel kan de centrale onderzoeksvraag worden gedefinieerd:

“Welke obstakels moeten overwonnen worden om het huidige aantal van 4 waterstoftankstations voor zwaar wegtransport in België uit te breiden naar 15 waterstoftankstations tegen 2030?”

1.2.2 Deelvragen

Om een onderbouwd antwoord te kunnen formuleren op de centrale onderzoeksvraag worden vier deelvragen opgesteld. Deze vier deelvragen zijn zodanig opgesteld dat ze elk vanuit een ander perspectief uitdagingen en oplossingen omtrent waterstoftankinfrastructuur trachten te identificeren.

De eerste deelvraag dient als een verkennend onderzoek om uitdagingen in de toeleveringsketen van waterstof vanuit de wetenschappelijke literatuur te identificeren. De geïdentificeerde uitdagingen uit deze literatuurstudie zullen gebruikt worden als basis voor het opstellen van interviewleidraden in functie van het empirisch onderzoek.

“Welke uitdagingen kunnen geïdentificeerd worden in de toeleveringsketen van waterstof?”

De tweede deelvraag zal de strategieën, uitdagingen en ontwikkelingen van waterstofinfrastructuur tussen verschillende landen onderzoeken. Door middel van een literatuurstudie worden strategieën van landen die koploper zijn in de ontwikkelingen van waterstofinfrastructuur vergeleken met elkaar. Vervolgens zal aan de hand van een casestudy met een Nederlandse aanbieder van een waterstoftankstation onderzocht worden welke lessen er voor België uit de ervaringen van deze aanbieder getrokken kunnen worden.

"Hoe verschillen de strategieën, uitdagingen en ontwikkelingen van waterstofinfrastructuur tussen verschillende landen, en welke lessen kunnen hieruit getrokken worden voor België?"

Met de derde deelvraag zal enerzijds via een literatuurstudie verkend worden hoe het Vlaamse en Europese beleid de uitbouw van waterstoftankstations beïnvloedt. Anderzijds zal via een interview met een verantwoordelijke beleidsmaker op Vlaams niveau het Vlaamse beleidskader omtrent waterstoftankstations in Vlaanderen geanalyseerd worden.

"Hoe beïnvloedt het Vlaamse en Europese beleid de uitbouw van waterstoftankstations?"

Ten slotte zal de vierde deelvraag onderzoeken welke uitdagingen huidige en toekomstige aanbieders van waterstoftankstations in België ervaren. Om een onderbouwd antwoord te kunnen formuleren op de laatste deelvraag wordt zowel een interview met een organisatie die betrokken is bij de realisatie van waterstofprojecten in België afgenomen worden als een casestudy uitgevoerd worden met een mogelijk toekomstige aanbieder van waterstoftankstations in België.

"Welke uitdagingen ervaren huidige en toekomstige aanbieders van waterstoftankstations in België?"

1.3 Methodologie

Voor het beantwoorden van de centrale onderzoeksvraag zal een gecombineerde onderzoeksmethode worden gehanteerd die kwalitatieve elementen bevat. Het onderzoek zal starten met een uitgebreide literatuurstudie, waarbij een systematische zoektocht in academische databases, zoals Google Scholar, zal worden uitgevoerd om relevante wetenschappelijke artikelen te selecteren. De literatuur zal gericht zijn op thema's zoals waterstofinfrastructuur, brandstofceltechnologie, energietransitie en transport. Naast wetenschappelijke artikelen zullen ook beleidsdocumenten van de Europese Commissie, de Belgische overheid, de Vlaamse Regering en sectorfederaties geanalyseerd worden. Tevens zullen rapporten van adviesbureaus, denktanks en sectorverenigingen worden bestudeerd, omdat deze waardevolle inzichten kunnen bieden in de huidige stand van zaken en toekomstige ontwikkelingen. Deze literatuurstudie zal dienen als basis voor het opstellen van interviewleidraden en als referentiekader voor de verdere empirische studie.

Vervolgens zullen er interviews worden afgenomen met diverse stakeholders die betrokken zijn bij de ontwikkeling van waterstofinfrastructuur in België. Dit zal onder meer een beleidsmaker op Vlaams niveau omvatten, een organisatie die zich bezighoudt met waterstofprojecten in de Benelux en een mogelijke toekomstige aanbieder van waterstoftankstations in België. De interviews zullen semigestructureerd van aard zijn, waardoor zowel gerichte als open vragen gesteld kunnen worden om diepgaande inzichten te verkrijgen. De resultaten van de interviews met een beleidsmaker en een organisatie die betrokken is bij waterstofprojecten in de Benelux zullen worden uitgewerkt en besproken, waarbij specifieke aandacht zal worden besteed aan de ervaringen en perspectieven van de geïnterviewde partijen. Het interview met een mogelijke toekomstige aanbieder van waterstoftankstations in België zal als gevalstudie verwerkt worden.

Ten slotte zal er ook een gevalstudie worden uitgevoerd met een Nederlandse aanbieder van een waterstoftankstation. Deze gevalstudie zal een gedetailleerde analyse bieden van de strategieën, uitdagingen en successen die in Nederland werden ervaren, en zal het mogelijk maken om lessen te trekken die relevant kunnen zijn voor de Belgische context. De resultaten van de gevalstudie zullen worden vergeleken met de bevindingen uit de interviews en literatuurstudie om een samenhangend

en volledig beeld te schetsen van de haalbaarheid en de obstakels voor de geplande uitbreiding van de waterstoftankinfrastructuur in België.

2 Uitdagingen in de waterstofketen

Dit hoofdstuk kadert binnen de eerste deelvraag van dit onderzoek: *"Welke uitdagingen kunnen geïdentificeerd worden in de toeleveringsketen van waterstof?"* Het doel van dit hoofdstuk is om vanuit een literatuurstudie de belangrijkste elementen van de waterstofketen te verkennen en de bijhorende uitdagingen te identificeren. Deze inzichten vormen deels de basis voor het opstellen van interviewleidraden die zullen worden gebruikt in het empirisch onderzoek.

De opbouw van dit hoofdstuk is als volgt: eerst wordt een algemene toelichting gegeven over waterstof als brandstof, inclusief de verschillende productiemethoden en hun implicaties. Vervolgens wordt elk element van de toeleveringsketen afzonderlijk besproken, te beginnen met de waterstofinfrastructuur, waarin de productie, opslag en distributie van waterstof aan bod komen. Daarna worden de specifieke uitdagingen van waterstoftankstations onderzocht, waaronder de kosten, infrastructuur en wereldwijde spreiding. Tot slot wordt de focus verlegd naar waterstof vrachtwagens, waarbij hun voordelen, nadelen en technologische ontwikkelingen worden geanalyseerd.

2.1 Waterstof

Waterstof als energiebron is een complex veld dat meerdere aspecten omvat. De productie van waterstof gebeurt vaak via elektrolyse, waarbij elektriciteit wordt gebruikt om water te splitsen in waterstof en zuurstof, of via het reformeren van aardgas. Deze processen hebben hun eigen milieueffecten en efficiëntieproblemen. Opslag en transport van waterstof vormen significante uitdagingen vanwege de lage dichtheid en hoge reactiviteit van waterstof, wat speciale en dure infrastructuur vereist. Het gebruik van waterstof strekt zich uit van brandstof voor voertuigen tot het aandrijven van brandstofcellen, die elektriciteit genereren. In deze toepassingen wordt waterstof gewaardeerd om zijn hoge energiedichtheid en het feit dat het enige bijproduct bij verbranding water is. Echter, de algehele duurzaamheid van waterstof als energiebron hangt sterk af van hoe de waterstof wordt geproduceerd. Groene waterstof, geproduceerd uit hernieuwbare energiebronnen, is milieuvriendelijker dan grijze of blauwe waterstof, gemaakt van fossiele brandstoffen. Tabel 1 geeft een overzicht van alle mogelijke typen waterstof afhankelijk van de gebruikte productiemethode. Tot slot zijn de economische en technologische hindernissen voor de implementatie van waterstofenergie aanzienlijk. Ondanks de potentie, vereisen de hoge kosten en technologische uitdagingen aanzienlijke investeringen en innovaties om van waterstof een levensvatbaar alternatief te maken voor bestaande energiebronnen. (Kovač et al., 2021)

Type waterstof	Productiemethode
Groene waterstof	Gebruik van schone elektriciteit uit overtollige hernieuwbare energiebronnen (bijvoorbeeld: zonne- of windenergie) om water te elektrolyseren, waarbij geen CO ₂ vrijkomt.
Blauwe waterstof	Gemaakt van aardgas met behulp van stoomreforming, inclusief koolstofafvang en -opslag (CCS) om koolstof op te vangen en op te slaan.
Grijze waterstof	Gemaakt van aardgas of methaan met behulp van stoom-methaanreforming zonder het afvangen van broeikasgassen.
Zwarte en bruine waterstof	Gemaakt met behulp van zwarte steenkool of bruinkool door vergassing, de meest milieubelastende methode.

Roze waterstof	Gegenereerd door elektrolyse aangedreven door kernenergie. Ook bekend als paarse of rode waterstof.
Turquoise waterstof	Gemaakt met behulp van methaanpyrolyse om waterstof en vast koolstof te produceren. Productie op schaal is nog niet bewezen.
Gele waterstof	Gemaakt door elektrolyse met behulp van zonne-energie.
Witte waterstof	Natuurlijk voorkomende geologische waterstof gevonden in ondergrondse afzettingen, gecreëerd door fracking.

Tabel 2: Waterstof kleurenspectrum (National Grid, 2023)

2.2 Waterstofinfrastructuur

De infrastructuur van waterstof bestrijkt een keten van processen die beginnen bij de productie, waarbij primaire energiebronnen worden omgezet in waterstof door middel van verschillende technologieën. Vervolgens wordt deze waterstof opgeslagen in speciale eenheden en terminals om te zorgen voor een continue aanvoer die inspeelt op veranderingen in de vraag. Het distributienetwerk speelt een sleutelrol, aangezien het de waterstof van de productiesite naar verkooppunten transporteert. Aan het einde van deze keten staan de tankstations, uitgerust met geavanceerde distributietechnologieën, waar gebruikers hun voertuigen kunnen voorzien van waterstof. Deze geïntegreerde aanpak zorgt ervoor dat waterstof op een efficiënte en toegankelijke manier beschikbaar wordt gesteld aan consumenten. (Hugo et al., 2005)

2.2.1 Waterstofproductie

De productie van waterstof speelt een cruciale rol in de transitie naar een duurzame energievoorziening. Er zijn diverse methoden voor het produceren van waterstof, ieder met hun specifieke eigenschappen en uitdagingen (Dawood et al., 2020). Hieronder worden vijf voornaamste productietechnieken uitgelicht: elektrolyse van water, stoomreforming van methaan, pyrolyse van methaan, vergassing van kolen en vergassing van biomassa. Deze methoden zijn van groot belang voor de ontwikkeling van een toekomstige waterstofeconomie en bieden uiteenlopende mogelijkheden om te voldoen aan de huidige en toekomstige behoeften op het gebied van duurzaamheid.

Elektrolyse van water, waarbij water wordt opgesplitst in waterstof en zuurstof, is verantwoordelijk voor een klein deel van de wereldwijde waterstofproductie, minder dan 5%. Deze methode trekt aandacht vanwege de afwezigheid van koolstofemissies en de hoge zuiverheid van het geproduceerde waterstof. Verwacht wordt dat de kosten voor waterstofproductie via elektrolyse aanzienlijk zullen afnemen, hetgeen de adoptie van groene waterstoftechnologieën zal stimuleren. Tegen 2040 is een aanzienlijke groei in de markt voor elektrolyzers te verwachten, voornamelijk in Europa en Duitsland, wat een grote toename van hernieuwbare energieproductie vereist en een investering van meer dan \$11 biljoen. (Nikolaidis & Poullikkas, 2017)

De verwachte kostenafname voor de productie van waterstof via elektrolyse is significant. De huidige kosten voor waterstofproductie via elektrolyse bedragen ongeveer 5,3 euro per kilogram in 2020, maar worden naar verwachting verlaagd naar 4,4 euro per kilogram in 2030 en verder naar 2,7 euro per kilogram in 2050. Deze afname wordt voornamelijk gedreven door technologische vooruitgang, schaalvoordelen en de daling van de kosten van hernieuwbare energiebronnen. Vooral in regio's zoals Azië wordt een aanzienlijke kostenverlaging voorspeld, met geschatte kosten van 1,8 euro per kilogram in 2050. De technologie van alkalische elektrolyse blijkt het meest kosteneffectief te zijn, met gemiddelde kosten van 2,0 euro per kilogram in 2050. Deze trend in kostenreductie weerspiegelt

een positieve vooruitgang die de adoptie van waterstof als een duurzame energiedrager verder zal bevorderen. (Frieden & Leker, 2024)

De uitdagingen voor elektrolyse op lage temperatuur, zoals bij Proton Exchange Membrane (PEM) en Alkaline Anion Exchange Membrane (AEM) technologieën, betreffen met name de kosten en efficiëntie. Het gebruik van zoet water, dat slechts een fractie van de totale kosten vertegenwoordigt, ondervindt problemen door de wereldwijde waterschaarste. Alternatieven zoals zeewater introduceren nieuwe uitdagingen, zoals corrosie, maar innovaties zoals poreus nikkel-schuim en gecoate katalysatoren bieden oplossingen voor deze problemen. (Osman et al., 2022)

Economisch gezien variëren de productiekosten van waterstof aanzienlijk tussen de verschillende technologieën. Zo zijn de kosten voor stoommethaanreforming en kolenvergassing in Australië lager dan die van elektrolysetechnieken. Elektrolyse, hoewel duurder, benadrukt de noodzaak van een gebalanceerde benadering die zowel milieu- als economische factoren in overweging neemt. (Osman et al., 2022)

Stoommethaanreforming (SMR), een veelgebruikte productiemethode, heeft een efficiëntie van ongeveer 76%. Desondanks leidt deze methode tot aanzienlijke CO₂-emissies. Door integratie met carbon capture and storage (CCS) technologieën kunnen deze emissies worden verminderd, hoewel dit de totale energie-efficiëntie verlaagt. (Osman et al., 2022)

Methaanpyrolyse biedt milieuvoordelen door het ontbreken van CO-emissies en vereist mogelijk geen nabehandeling zoals bij SMR. De economische levensvatbaarheid is echter afhankelijk van de aardgas prijzen en de markt voor het vaste koolstofbijproduct. (Osman et al., 2022)

Koolvergassing heeft een lagere efficiëntie dan SMR, maar biedt een grotere capaciteit per installatie. De milieutechnische uitdagingen, vooral met betrekking tot koolstofemissies, kunnen worden aangepakt door integratie met CCS-technologieën. (Osman et al., 2022)

Biomassavergassing wordt beschouwd als een duurzame en mogelijk koolstofneutrale methode, afhankelijk van de beschikbaarheid en betaalbaarheid van biomassa. De efficiëntie wordt beïnvloed door de fysisch-chemische eigenschappen van de biomassa, terwijl logistieke aspecten economische uitdagingen vormen. Integratie met CCS kan leiden tot een negatieve koolstofvoetafdruk, wat de milieuvoordelen van deze methode versterkt. (Osman et al., 2022)

Tabel 2 biedt een overzicht van de voordelen, nadelen, kosten (€ / kg) en efficiëntie van verschillende waterstofproductiemethoden. Hoewel niet elke productiemethode in detail is besproken in de bovenstaande tekst, geeft deze tabel een uitgebreide inschatting van de overige methoden die niet aan bod zijn gekomen. De productie van waterstof via niet-hernieuwbare paden, zoals stoommethaanreforming en vergassing, toont lage kosten en hoge efficiëntie, maar gaat gepaard met aanzienlijke milieuproblemen. Aan de andere kant bieden hernieuwbare methoden zoals elektrolyse en biomassavergassing mogelijkheden voor duurzame productie, ondanks de hogere kosten en technische uitdagingen. Deze tabel benadrukt de noodzaak van een gebalanceerde benadering om te komen tot een kostenefficiënte en milieuvriendelijke waterstofproductie, essentieel voor de toekomstige waterstofeconomie. (Younas et al., 2022)

Productiemethoden	Voordelen	Nadelen	Kosten (€ / kg)	Efficiëntie
SMR	Lage productiekosten Hoge opbrengstefficiëntie	Hogere temperatuureisen Complexe katalytische processen Uitputting van fossiele brandstoffen Potentieel voor opwarming van de aarde	2,9	74–85%

Vergassing	Lage productiekosten Hogere energie- en exergie-efficiëntie Co-vergassing levert meer waterstofproductie, minder koolstofvoetafdrukken	Hogere temperatuureisen Agressieve aard Teerproductie Korte levensduur van vergasser Uitputting van fossiele brandstoffen Potentieel voor opwarming van de aarde	1,91	35%
Pyrolyse	Goedkoper dan SMR Co-pyrolyse produceert meer waterstofopbrengst, minder voetafdrukken Hogere energieopbrengst Houdskool en teerafzetting zijn minder dan bij vergassing	Hoge temperatuureisen houtskoolafzetting op katalysatoroppervlak Nog in beginstadium Hulpapparatuur nodig voor zuivering Hoge behandelingskosten van biomassa Seizoensgebonden beschikbaarheid Uitputting van fossiele brandstoffen voor kolenpyrolyse Potentieel voor opwarming van de aarde	1,6	42.5%
Elektrolyse	Beschouwd als effectieve methode voor waterstofproductie uit hernieuwbare bronnen Produceert 4% van de totale wereldwijd geproduceerde waterstof Geen hulpapparatuur nodig voor scheiding Grondstof is goedkoop en gemakkelijk verkrijgbaar	Energie-intensief proces Hoge hoofd- en onderhoudskosten	10,3	70%
Bio-waterstof	Haalbaar vanuit het perspectief van broeikasgasemissies en netto-energie Goedkope grondstoffen Het zet afval om in waardevol product, gunstig voor milieu duurzaamheid Minder energievereisten dan SMR	Voedsel versus energieproblemen Hoog vochtgehalte Zuiverheidsproblemen Lage waterstofenergieopbrengst Lage substraatconversie	2,83	0.1%
Fotokatalyse	Lage hoofdkosten Fotonic (zonne- gebaseerde katalyse) is de beste optie voor alle milieuprestaties	Ontwikkeling van goedkope halfgeleidermaterialen is moeilijk Katalysatoren zijn duur en regeneratie is moeilijk	9	0.06%

	Vergelijkbaar met biologische, thermische en elektrische waterstoftechnologieën	Hoge energie band gap is een groot probleem Nog in R&D-fase		
Thermochemische cycli	Hergebruik van chemicaliën binnen de cyclus Laagste kosten worden bereikt voor de S-I-cyclus op gelijke voet met PEM-elektrolyse Kosten effectief Energie-efficiëntie is goed	Hoge temperatureis Lage thermische efficiëntie Complex reactorontwerp	2,31	52%
Plasmolyse	Scheiding van waterstof van zuurstof is een probleem Nog in R&D-fase Lage hoofdkosten Lage operationele kosten Eenvoudig reactorontwerp Minder stroomverbruik Hoge energieopbrengst Hoge thermische efficiëntie Hoge energie-efficiëntie	Nog in R&D-fase	6,36	79.2%

Tabel 3: Voordelen, nadelen, kosten (€/kg), efficiëntie per waterstofproductiemethode (Younas et al., 2022)

2.2.2 Waterstofopslag

Opslag van waterstof is een essentiële schakel in het succesvol toepassen van waterstof als duurzame energiedrager. Er bestaan meerdere methoden voor waterstofopslag, elk met hun eigen voordelen, uitdagingen en beperkingen. De keuze voor een bepaalde opslagtechnologie is bepalend voor de doeltreffendheid en efficiëntie van de gehele waterstof supply chain. Dit onderdeel verschaft een gedetailleerde blik op de verschillende opslagmethodes, zoals opslag onder hoge druk, opslag als vloeibare waterstof (LH₂), cryogecomprimeerde waterstofopslag, metaalhydriden, complexe hydriden, en opslag via fysieke adsorptie. Elke methode wordt besproken met betrekking tot haar operationele eigenschappen, efficiëntie en toepassingsmogelijkheden. Dit overzicht is van belang om de sterke en zwakke punten van de diverse opslagopties te begrijpen, wat onmisbaar is voor een grondige beoordeling van waterstofopslag in verschillende toepassingen. (Usman, 2022)

Opslag onder hoge druk is een gangbare methode vanwege de technologische vooruitgang en efficiëntie. Deze benadering is uitmuntend in operationele efficiëntie dankzij hoge vul- en losraten, cruciaal voor veel toepassingen (Jensen et al., 2007; Møller et al., 2017). De energiebehoefte voor het verhogen van de druk is relatief laag in vergelijking met de totale energiewaarde (Tarasov et al., 2007). Desondanks kent deze methode significante nadelen, zoals het energieverbruik voor het comprimeren van waterstof, dat ongeveer 13–18% van de energetische waarde van de waterstof inneemt (Jensen et al., 2007; Møller et al., 2017), en de strenge eisen aan opslagtanks die bestand moeten zijn tegen hoge druk en waterstofdiffusie, wat specifieke eisen stelt aan materialen en constructie (Abdalla et al., 2018; Barthelemy et al., 2017; Moradi & Groth, 2019; Rivard et al., 2019).

De overstap naar opslag in vloeibare vorm (LH₂) introduceert bijzondere eigenschappen en uitdagingen. LH₂ kenmerkt zich door een aanzienlijk hogere dichtheid bij -253 °C, wat resulteert in

een hoge energiedichtheid en compactere opslagtanks, hoewel de netto energiedichtheid lager uitvalt door het gewicht van de isolatie en tank (Abe et al., 2019; Durbin & Malardier-Jugroot, 2013). Deze opslagwijze is niet corrosief, waardoor tanks van roestvrijstaal en aluminiumlegeringen met adequate isolatie gebruikt kunnen worden (Niaz et al., 2015). De voornaamste uitdagingen zijn het energie-intensieve liquefactieproces dat tot 30–40% van de netto energetische waarde van waterstof consumeert (Barthelemy et al., 2017), en het 'boil-off'-effect waarbij waterstof verdampt door energieopname uit de omgeving (Schlapbach & Züttel, 2001; Zhang et al., 2016).

Cryogecomprimeerde waterstofopslag combineert de voordelen van zowel hoge druk als cryogene opslag. Deze benadering levert een hogere dichtheid op, ongeveer 80 g/L, wat aanzienlijk hoger is dan bij vloeibare waterstof, en vermindert de 'boil-off'-verliezen (Barthelemy et al., 2017; Jorgensen, 2011; Moradi & Groth, 2019). Bovendien kunnen tanks voor cryogecomprimeerde waterstof tot 85% van hun capaciteit worden gevuld en waterstof meer dan zeven dagen bewaren zonder verlies (Ahluwalia et al., 2018). Echter, deze methode vereist kostbaardere, dubbelwandige opslagtanks en een hogere energie-input (Abdalla et al., 2018; Barthelemy et al., 2017).

Metaalhydriden vertegenwoordigen een speciale klasse voor waterstofopslag, waarbij waterstof chemisch bindt met metalen en legeringen. Deze techniek biedt hogere opslagcapaciteiten bij matige druk en temperatuur, wat een veiliger opslagalternatief vormt (Abe et al., 2019; Barthelemy et al., 2017; Durbin & Malardier-Jugroot, 2013; Prabhukhot Prachi et al., 2016; Zhang et al., 2016). Het laden en lossen van waterstof kan veelvuldig plaatsvinden (Demirbas, 2002). De nadelen omvatten langzame sorptie- en desorptiesnelheden, hoge temperaturen nodig voor waterstofafgifte, en de productie van ongewenste gassen bij het ontladen (Graetz, 2009; Ren et al., 2017).

Complexe metaalhydriden bieden een geavanceerde opslagmethode. Deze hydriden, bestaande uit lichtere elementen, behalen hogere opslagdichtheden. Natriumaluminiumhydride (NaAlH_4), met een waterstofgehalte van 7,4 wt%, kan in de praktijk ongeveer 5,6 wt% waterstof vrijgeven (Ashby & Kobetz, 1966; Bogdanović et al., 2009; Orimo et al., 2007). Hoewel katalyse de prestaties verbetert, blijven uitdagingen zoals hoge temperaturen voor waterstofvrijgave en trage reactiekinetiek bestaan (Bogdanović et al., 2009; Durbin & Malardier-Jugroot, 2013; Liu et al., 2018).

Fysieke adsorptie, een alternatieve opslagmethode, maakt gebruik van de adsorptie van waterstof aan het oppervlak van vaste stoffen. Dit kenmerkt zich door snelle adsorptie- en desorptiesnelheden en een relatief lage adsorptie-/desorptie-enthalpie (Møller et al., 2017; Prabhukhot Prachi et al., 2016; Rivard et al., 2019; Tarasov et al., 2007). De capaciteit bij kamertemperatuur is echter beperkt en wordt voornamelijk effectief bij cryogene temperaturen of hogere drukken (Langmi et al., 2014).

2.2.3 Waterstofdistributie

Na de bespreking van de waterstof productie- en opslagtechnologieën is het belangrijk om de distributiemethoden van waterstof te begrijpen, aangezien deze een sleutelrol spelen in de effectiviteit van de waterstofeconomie. Distributie van waterstof omvat het transport van deze brandstof van productieplaatsen naar eindgebruikers, zoals tankstations of energiecentrales. De distributie kan worden gecategoriseerd in twee types: transmissie en distributie. Transmissie verwijst naar het vervoeren van waterstof van een centrale productiefaciliteit naar een enkel punt, terwijl distributie het transport van waterstof van een centrale faciliteit naar een netwerk van tankstations binnen een stedelijke of regionale omgeving inhoudt. (Yang & Ogden, 2007)

De distributie van waterstof kan plaatsvinden via drie hoofdmethoden: samengeperste buisaanhangwagens, cryogene vloeistofvrachtwagens en samengeperste gasleidingen. Tijdens de beginfase van de waterstofmarkt kunnen buisaanhangwagens worden gebruikt vanwege de relatief kleine vraag en om het koken van vloeibare waterstof te vermijden. Cryogene tankwagens kunnen later worden ingezet voor het vervoeren van grotere hoeveelheden waterstof, ter ondersteuning van markten in groei. Ten slotte kunnen pijpleidingen strategisch worden aangelegd om waterstof naar gebieden met hoge vraag te transporteren, vooral als de productiecapaciteit toeneemt. (Simbeck & Chang, 2002)

Een bijzonder efficiënte methode voor waterstoftransport is de levering via pijpleidingen. Dit wordt beschouwd als de goedkoopste optie voor het transporteren van waterstof over langere afstanden, met kosten die minder dan 0,1 US\$/kg bedragen over 100 km (Joffe et al., 2007). De pijpleidingkosten omvatten arbeid, materialen, recht-van-overpad kosten en diverse andere kosten zoals planning en management (Hawkins & Joffe, 2006). Bovendien zijn er bestaande voorbeelden van operationele waterstofpijpleidingen, zoals in Duitsland en door bedrijven als Air Liquide in Frankrijk, België en Nederland (Valverde, 2002).

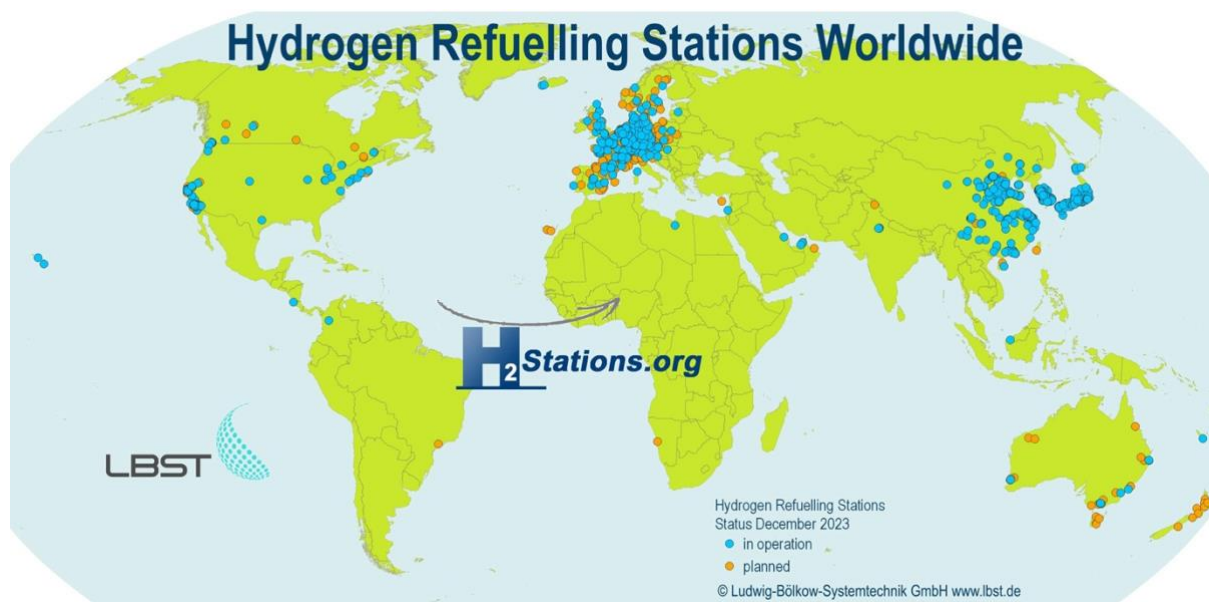
Tot slot is er de levering van waterstof als cryogene vloeistof, waarbij waterstof wordt vloeibaar gemaakt in de conversiefaciliteit en via tankwagens wordt getransporteerd. Deze methode kan tussen 400 en 4000 kg vloeibare waterstof vervoeren, aanzienlijk meer dan buisaanhangwagens. De belangrijkste uitdagingen bij deze methode zijn het energie-intensieve liquefactieproces en het probleem van verdamping ('boil-off'), wat leidt tot een dagelijks verlies van 0,3-0,6% van de opgeslagen waterstof. (Hawkins & Joffe, 2006)

2.3 Waterstoftankstations

2.3.1 Wereldwijde spreiding

In 2023 werden wereldwijd aanzienlijke vorderingen geboekt in de ontwikkeling van waterstoftankstations. Europa zag de opening van 37 nieuwe stations, Japan 12, Zuid-Korea 29 en Noord-Amerika 7. Een groot deel van de nieuwe Europese stations kan ook zware bedrijfsvoertuigen tanken. Tegen het einde van het jaar hadden 40 landen een operationele of in aanbouw zijnde waterstofinfrastructuur. (Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, 2024)

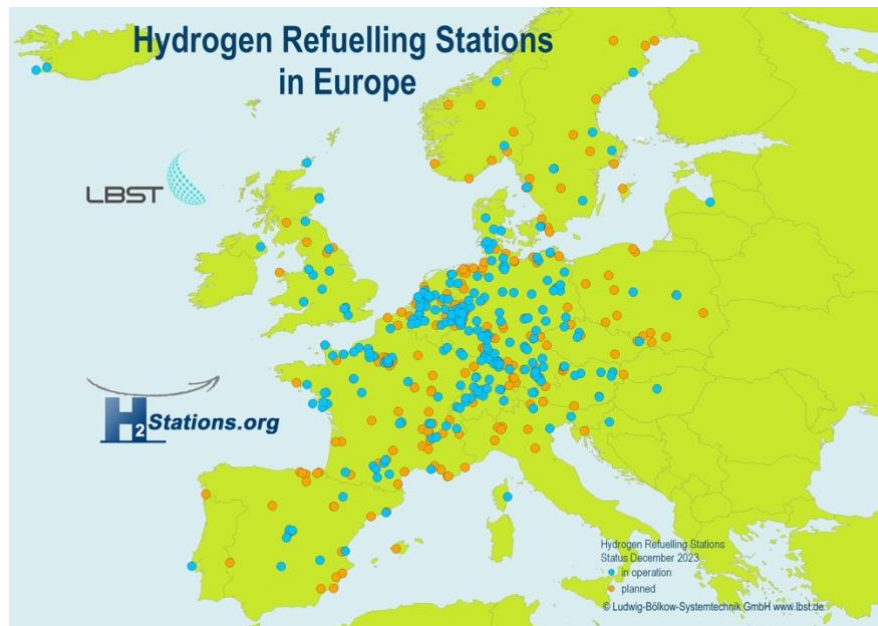
Wereldwijd waren er aan het eind van 2023 in totaal 921 waterstoftankstations operationeel. Deze zijn echter ongelijk verdeeld, met concentraties in Oost-Azië (China, Japan, Zuid-Korea), Centraal-Europa en aan de oost- en westkust van de Verenigde Staten. Buiten deze regio's zijn waterstoftankstations zeldzaam. (Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, 2024)



Figuur 2: Waterstoftankstations wereldwijd (Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, 2024)

In Europa waren er eind 2023 265 waterstoftankstations, waarvan 105 in Duitsland. Frankrijk had er 51, Nederland 22 en Zwitserland 17. De focus is verschoven van personenauto's naar bedrijfsvoertuigen. Waar in 2019 nog 70 procent van de nieuwe stations alleen voor personenauto's was, was dit in 2023 slechts bij uitzondering het geval. Bij het merendeel van de nieuwe stations kunnen nu zowel personenauto's als zware bedrijfsvoertuigen tanken. In Duitsland leidde dit tot veel

bouwactiviteiten: 8 nieuwe stations werden geopend en 28 bestaande locaties werden aangepast voor zware voertuigen. (Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, 2024)



Figuur 3: Waterstoftankstations in Europa (Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, 2024)

Duitsland heeft met 105 stations een achterstand op Oost-Azië, waar Japan er 166 heeft, Zuid-Korea 174 en China vermoedelijk 197. Veel Chinese stations zijn echter nog niet operationeel door het ontbreken van regionale vergunningen. (Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, 2024)

In Noord-Amerika was de groei bescheiden, met 7 nieuwe stations, waardoor het totaal daar op 100 komt (8 in Canada en 92 in de Verenigde Staten). Binnen de VS is waterstof-elektrisch transport vooral in Californië goed ontwikkeld, met 75 van de 92 stations in die staat. (Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, 2024)

2.3.2 Infrastructuur

Waterstoftankstations brengen verschillende uitdagingen met zich mee, zoals beschreven in de literatuur. Ondanks de variaties in hun ontwerpen, vereisen waterstoftankstations doorgaans de volgende hardwarecomponenten (Mayyas & Mann, 2019):

- Allereerst is er de waterstofproductieapparatuur, die nodig is voor stations die waterstof ter plaatse produceren. Een zuiveringssysteem is daarnaast essentieel, vooral in stations met on-site waterstofproductie, om ervoor te zorgen dat de waterstof voldoet aan de zuiverheidsnormen voor brandstofcelvoertuigen (FCEV).
- Een ander cruciaal onderdeel is het opslagsysteem, dat drukvaten voor gasvormige waterstof en cryogene tanks voor vloeibare waterstof omvat. Deze tanks kunnen vloeibare waterstof omzetten naar gasvormige waterstof, die vervolgens in drukvaten wordt opgeslagen.
- Compressoren, boosters en cryogene pompen spelen ook een belangrijke rol. Ze zorgen ervoor dat waterstofgas tot de benodigde druk wordt gecomprimeerd voordat het direct in een FCEV-tank wordt gedistribueerd of in buffertanks voor toekomstig gebruik wordt opgeslagen. Bij stations met vloeibare waterstof vervangt een cryogene pomp de functie van de gascompressor.
- Ook zijn veiligheids- en elektrische apparatuur onmisbaar, waaronder bedieningspanelen, hoogspanningsaansluitingen, meters, drukontlastingskleppen, waterstofleksensoren, infraroodvlamdetectoren en omheiningen. Ten slotte is mechanische apparatuur, zoals buizen, leidingen, fittingen en drukventielen, essentieel voor de werking van een waterstoftankstation.

Deze componenten illustreren de complexiteit en de diverse uitdagingen die gepaard gaan met de implementatie en het beheer van waterstoftankstations.

2.3.3 Kosten

Een kostenanalyse onthult dat Amerikaanse fabrikanten voordelen hebben door meer ervaring, lagere energiekosten en lagere verzendkosten binnen het Amerikaanse vasteland. Hoewel markten zoals Mexico en China lagere kosten voor arbeid, materialen, energie en bouw hebben, missen ze de nodige ervaring in de waterstof- en brandstofcelindustrie, wat de keuze voor nieuwe productielocaties bemoeilijkt. (Mayyas & Mann, 2019)

Bij het onderzoeken van de kosten van de belangrijkste systemen in waterstoftankstations blijkt dat de grootste kostenposten bestaan uit de Balance of System (BOS) in het compressiesysteem en onderdelen van het dispensatiesysteem, gevolgd door arbeidskosten (inclusief assemblage). Voor de opslag van waterstof in stalen tanks zijn de materiaalkosten het meest significant. Deze patronen gelden voor alle onderzochte regio's en landen. (Mayyas & Mann, 2019)

Het opschalen van de productievolumes van essentiële onderdelen en systemen in HRS kan de kapitaalkosten voor veel van deze onderdelen met maximaal 35% verminderen bij een jaarlijkse productie van 100 eenheden of meer, in vergelijking met een lagere productie van minder dan 5 eenheden per jaar. Dit kan resulteren in lagere kosten van waterstofbrandstof aan de pomp. Voorlopige schattingen suggereren dat grootschalige productie van de belangrijkste systemen in HRS-kostenreducties van 5% of meer kan opleveren. (Mayyas & Mann, 2019)

Hoewel de kostenbesparingen in de processen van waterstofcompressie, -opslag en -distributie (CSD) relatief bescheiden zijn, blijft het verbeteren van de efficiëntie van waterstofproductie en -levering cruciaal om de kosten van waterstof naar een commercieel levensvatbaar niveau te brengen. (Mayyas & Mann, 2019)

Bij de ontwikkeling van waterstoftankstations blijkt dat de hoge investeringskosten een aanzienlijke barrière vormen voor de brede acceptatie van waterstof-elektrische voertuigen (FCEV's). Het beter begrijpen van de kosten en financiële risico's is cruciaal om deze barrière te verminderen. De Hydrogen Station Cost Calculation (HSCC) biedt inzicht in kostenramingen van waterstoftankstations door experts en vergelijkt deze met andere schattingen. (Melaina, 2013)

Uit de HSCC-resultaten blijkt dat significante kostenreducties mogelijk zijn naarmate er meer tankstations worden geïnstalleerd en schaalvoordelen worden bereikt. De resultaten worden geclassificeerd op basis van de marktrijpheid, capaciteit en het aantal geproduceerde stations. De vier geïdentificeerde typen zijn State-of-the-Art (SOTA), Early Commercial (EC), More Stations (MS) en Larger Stations (LS). EC-stations, geïntroduceerd tussen 2014 en 2016, hebben een capaciteit van 450 kg/dag en kosten \$2,8 miljoen per station, wat neerkomt op \$6,220 per kg/dag capaciteit, een reductie van 62% vergeleken met SOTA-stations. Deze kosten dalen verder tot \$5,150 per kg/dag voor MS-stations en \$3,370 per kg/dag voor LS-stations. (Melaina, 2013)

De HSCC-resultaten zijn consistent met andere kostenramingen, zoals die van het Hydrogen Analysis (H2A) model en studies van de University of California, Davis. Dit suggereert dat de HSCC-kostenreductietrends een redelijk beeld geven van de kosten voor een zich ontwikkelend netwerk van waterstoftankstations. (Melaina, 2013)

Bij het plannen van waterstofinfrastructuur moeten diverse factoren in overweging worden genomen. Dit omvat het balanceren van geografische dekking met kostenreducties door schaalvoordelen, de effectiviteit van verschillende station- en leveringsconfiguraties, en de waarde van hoge doorvoer tijdens piekuren. Daarnaast kunnen de totale netwerk-kapitaalkosten worden verlaagd door investeringen in infrastructuur te benutten die ook andere markten ondersteunt, zoals waterstofproductie ter plaatse voor hefurks of grondapparatuur op luchthavens. (Melaina, 2013)

2.3.4 Waterstofprijzen aan de pomp

De waterstofprijs in Nederland varieert in het eerste kwartaal van 2024 tussen de €18,95 en €25 per kilogram, afhankelijk van de locatie. Een gemiddelde waterstofauto kan ongeveer 100 kilometer rijden op één kilogram waterstof, wat betekent dat de kosten per kilometer relatief hoog zijn in vergelijking met benzine, diesel en elektrisch rijden. In Amsterdam liggen de prijzen vaak rond de €25 per kilogram, terwijl in steden zoals Amersfoort de kosten dichterbij de €19 per kilogram liggen. (Waterstofgids, 2024)

Het prijsverloop van waterstof is de afgelopen jaren sterk gestegen, van ongeveer €10 per kilogram in 2021 naar de huidige tarieven. Deze prijsstijging is voornamelijk te wijten aan de volatiele productiekosten van waterstof, die doorberekend worden aan de consument. Hoewel waterstof op dit moment een dure optie is, zijn er verwachtingen dat de prijzen in de toekomst kunnen dalen door schaalvoordelen en overheidssteun. (Waterstofgids, 2024)

Bij een vergelijking van de kosten per kilometer voor verschillende brandstoffen blijkt dat waterstof momenteel de duurste optie is. In het eerste kwartaal van 2024 kost waterstof gemiddeld €0,205 per kilometer. Benzine kost gemiddeld €0,14 per kilometer, diesel €0,092 per kilometer, en elektrisch rijden €0,09 per kilometer wanneer thuis opgeladen en €0,12 per kilometer wanneer onderweg opgeladen. Deze cijfers tonen aan dat rijden op waterstof op dit moment financieel minder aantrekkelijk is vergeleken met andere brandstoffen en elektrisch rijden. (Waterstofgids, 2024)

Deze informatie over waterstofprijzen is gebaseerd op gegevens uit Nederland, omdat specifieke gegevens voor België beperkt beschikbaar zijn. Door de marktontwikkelingen en prijsveranderingen in een naburige markt zoals Nederland te analyseren, kan een beter inzicht verkregen worden in de potentiële kostenstructuren en prijstrends voor waterstof in België.

2.4 Waterstof vrachtwagens

Waterstof vrachtwagens opereren middels een combinatie van een waterstoftank, brandstofcel en accu. De waterstof wordt vanuit de tank naar de brandstofcel geleid, waar het reageert met zuurstof uit de buitenlucht. Dit proces genereert elektriciteit, die vervolgens de accu van de vrachtwagen voedt, terwijl water als bijproduct via de uitlaat wordt afgevoerd. Dit mechanisme is vergelijkbaar met elektrische voertuigen die ook een accu nodig hebben om voort te bewegen. (Waterstofgids, 2023)

Een andere technologie die in ontwikkeling is voor vrachtwagens, is de waterstofverbrandingsmotor. Hoewel veelbelovend, vereist deze technologie nog aanzienlijke ontwikkeling voordat het een levensvatbare optie wordt in de transportsector. (Waterstofgids, 2023)

2.4.1 Vergelijking met substituten

De keuze voor waterstof als brandstof voor vrachtwagens is ingegeven door de noodzaak om de CO₂-uitstoot te verminderen die gepaard gaat met conventionele verbrandingsmotoren op benzine en diesel. Elektrische voertuigen bieden een oplossing voor personenauto's en lichte bedrijfswagens, maar voor zware vrachtwagens zijn er beperkingen. Accu's zijn namelijk zwaar en hebben lange oplaadtijden, wat onpraktisch is voor langeafstandsvervoer. Dit maakt waterstof een aantrekkelijk alternatief in een sector waar tijd geld is. (Waterstofgids, 2023)

Hoewel waterstof vrachtwagens aanzienlijke voordelen bieden in termen van tanktijd en bereik, zijn de aanschafkosten hoog. Een waterstof vrachtwagen kost ongeveer 700.000 euro, vergeleken met 100.000 euro voor een dieselvrachtwagen en 250.000 euro voor een elektrische vrachtwagen. Onderhoudskosten daarentegen zijn vergelijkbaar met die van elektrische en dieselvrachtwagens, dankzij het relatief eenvoudige interne mechanisme en het kleinere aantal bewegende delen. (Waterstofgids, 2023)

2.4.2 Voordelen en nadelen

Waterstof vrachtwagens bieden aanzienlijke voordelen, waaronder snelle tanktijden van slechts 15 minuten en een bereik van 800 tot 1000 kilometer, wat essentieel is voor de transportsector. Bovendien stoten waterstof trucks geen CO₂ uit wanneer ze gebruikmaken van groene waterstof, maar alleen waterdamp, wat bijdraagt aan het behalen van klimaatdoelen. Daarnaast produceren ze geen geluidsoverlast of stank, vergelijkbaar met elektrische voertuigen. Testen in België hebben aangetoond dat chauffeurs tevreden zijn met de rij-eigenschappen van waterstof vrachtwagens, wat wijst op een positieve rijervaring. (Waterstofgids, 2023)

Waterstof vrachtwagens kennen ook enkele nadelen, waaronder de hoge aanschafkosten die aanzienlijk hoger liggen dan die van elektrische en dieselvrachtwagens. Daarnaast kan de voortdurende ontwikkeling van lichtere en efficiëntere batterijen voor elektrische vrachtwagens de noodzaak voor waterstof vrachtwagens in de toekomst doen afnemen. (Waterstofgids, 2023)

2.4.3 Constructeurs

Volvo is een voorloper in de ontwikkeling van waterstof vrachtwagens; sinds 2020 test het merk op een testbaan en verwacht het in de tweede helft van dit decennium hun waterstof truck te commercialiseren. Deze vrachtwagens van Volvo hebben een actieradius van 800-1000 kilometer, wat aanzienlijk hoger is dan sommige andere modellen. Hyzon, opgericht in 2019, produceert de meest energie-dichte brandstofcellen en richt zich op kostenefficiëntie. Dankzij deze efficiënte brandstofcellen kunnen de trucks van Hyzon de operationele kosten verlagen, wat een belangrijk voordeel kan zijn voor transportbedrijven. Hyundai heeft momenteel de meest gevorderde waterstof vrachtwagens in productie en heeft beloofd dat er in 2025 ruim 1600 van hun XCIENT trucks met een actieradius van 400 kilometer in Europa zullen rijden. Ondanks de relatief kortere actieradius van Hyundai's XCIENT trucks, is het merk vooruitstrevend in de grootschalige implementatie van waterstof technologie binnen de transportsector. (Waterstofgids, 2023)

2.4.4 Dual fuel-technologie

De dual fuel-technologie biedt een innovatieve oplossing voor de overgang naar een emissievrije transportsector, waarbij gebruik wordt gemaakt van de vertrouwde interne verbrandingsmotortechnologie (ICE). In dit systeem wordt waterstof in de verbrandingskamer geïntroduceerd, wat resulteert in een verminderde noodzaak voor dieselinjectie. Hierdoor worden de uitstootniveaus verlaagd, terwijl het motorvermogen behouden blijft. (CMB.tech, 2022)

Nieuwe dieseltrucks worden in de dual fuel-werkplaats in Antwerpen omgebouwd met de dual fuel-waterstoftechnologie van CMB.tech. Het totale gewicht van de module bedraagt 1200 kg, met zes Type III tanks die gezamenlijk 30 kg waterstof kunnen opslaan bij een druk van 350 bar, gecertificeerd volgens R134. (CMB.tech, 2022)

Deze technologie biedt diverse voordelen, waaronder een significante reductie van CO₂-uitstoot, evenals een vermindering van NO_x- en PM-emissies. Een bijkomend voordeel is de gegarandeerde beschikbaarheid van het voertuig; mocht waterstof niet beschikbaar zijn, dan kan de truck blijven rijden op conventionele brandstof. Dit zorgt voor een actieradius tot 1000 kilometer in dual fuel-modus met diesel-back-up, zonder concessies te doen aan laadvermogen en duurzaamheid. (CMB.tech, 2022)

2.5 Conclusie

Dit hoofdstuk heeft een uitgebreide analyse geboden van de verschillende elementen van de waterstofketen en de daarmee gepaard gaande uitdagingen, die cruciaal zijn om de deelvraag te beantwoorden: *"Welke uitdagingen kunnen geïdentificeerd worden in de toeleveringsketen van waterstof?"*

Waterstof als energiebron biedt aanzienlijke potentie, maar er zijn belangrijke technische en economische uitdagingen verbonden aan de productie, opslag en distributie ervan. De productie van waterstof, met name via elektrolyse, staat voor uitdagingen zoals hoge kosten en energieverbruik, ondanks de vooruitzichten voor kostenreductie door technologische innovaties en schaalvergroting (Frieden & Leker, 2024; Nikolaidis & Poullikkas, 2017; Osman et al., 2022). Het gebruik van alternatieve productiemethoden zoals stoommethaanreforming en methaanpyrolyse brengt ook milieutechnische problemen met zich mee, met name CO₂-emissies, die zelfs met carbon capture and storage (CCS) technieken moeilijk volledig te elimineren zijn (Osman et al., 2022).

Opslag van waterstof blijkt een kritische schakel te zijn in de toeleveringsketen, met methoden zoals opslag onder hoge druk en cryogecomprimeerde waterstof die aanzienlijke technologische barrières hebben. Deze methoden vereisen hoge energie-inputs en gespecialiseerde infrastructuur om waterstof veilig en efficiënt te kunnen opslaan (Abdalla et al., 2018; Barthelemy et al., 2017; Møller et al., 2017). Bovendien vormen het energie-intensieve liquefactieproces en het boil-off-effect bij vloeibare waterstof specifieke uitdagingen voor de schaalbare toepassing ervan (Barthelemy et al., 2017; Schlapbach & Züttel, 2001).

Distributie van waterstof, hoewel essentieel voor het functioneren van de waterstofeconomie, wordt gehinderd door de hoge kosten en complexe infrastructuurvereisten. De aanleg van pijpleidingen is kosteneffectief voor lange afstanden, maar vereist aanzienlijke investeringen en strategische planning, terwijl andere methoden zoals cryogene vloeistofvrachtwagens met aanzienlijke operationele uitdagingen kampen. (Hawkins & Joffe, 2006; Joffe et al., 2007)

Waterstoftankstations, een cruciaal onderdeel van de distributie-infrastructuur, brengen eveneens hoge kosten en technologische complexiteit met zich mee. De belangrijkste kostenposten zijn de Balance of System (BOS) in het compressiesysteem en de componenten van het dispensatiesysteem, wat de investeringen in deze infrastructuur significant maakt (Mayyas & Mann, 2019). De kosten voor waterstof aan de pomp blijven bovendien een uitdaging, aangezien de prijs per kilogram waterstof momenteel hoger ligt dan die van conventionele brandstoffen, wat de economische haalbaarheid van waterstof-elektrisch rijden onder druk zet (Waterstofgids, 2024). Het is belangrijk op te merken dat deze prijzen gebaseerd zijn op de situatie in Nederland, aangezien specifieke gegevens voor België beperkt beschikbaar zijn.

Tenslotte zijn waterstof vrachtwagens weliswaar veelbelovend vanwege hun korte tanktijd en lange bereik, maar de hoge aanschafkosten en de huidige afhankelijkheid van aardgas voor waterstofproductie vormen belangrijke belemmeringen voor brede adoptie (Waterstofgids, 2023).

Samenvattend, de toeleveringsketen van waterstof wordt gekenmerkt door een reeks uitdagingen die samenhangen met productie, opslag, distributie en eindgebruik, zoals geïllustreerd in dit hoofdstuk. Deze uitdagingen moeten worden overwonnen om waterstof effectief te kunnen inzetten als een duurzame energiebron voor transport, waarbij innovatie, kostenreductie en schaalvergroting centraal staan in de verdere ontwikkeling van de waterstofeconomie.

3 Waterstof in het buitenland

Het derde hoofdstuk van dit onderzoek richt zich op de internationale vergelijking van strategieën, uitdagingen en ontwikkelingen van waterstofinfrastructuur, met het doel om lessen te identificeren die relevant kunnen zijn voor de verdere ontwikkeling van de waterstofinfrastructuur in België. Deze focus is nauw verbonden met de tweede deelvraag van het onderzoek, die erop gericht is te begrijpen hoe verschillende landen omgaan met de ontwikkeling van waterstofinfrastructuur en wat België hieruit kan leren.

In dit hoofdstuk wordt eerst door middel van een literatuurstudie een grondige analyse uitgevoerd van de strategieën van landen die koplopers zijn in de ontwikkeling van waterstofinfrastructuur. Hierbij worden niet alleen technologische en economische factoren onder de loep genomen, maar ook de beleidsmaatregelen en milieu-impact. Het doel van deze vergelijking is om gemeenschappelijke succesfactoren en uitdagingen te identificeren die als leidraad kunnen dienen voor de Belgische context.

Na de literatuurstudie volgt een casestudy met een Nederlandse aanbieder van een waterstoftankstation, Vissers Energy Group. Deze casestudy biedt een gedetailleerd inzicht in de praktische uitdagingen en kansen bij de realisatie van waterstoftankstations in Nederland, en welke lessen hieruit getrokken kunnen worden voor de Belgische situatie. De casestudy onderzoekt aspecten zoals vergunningverlening, economische rendabiliteit, samenwerking met lokale overheden en de beschikbaarheid van waterstofvoertuigen.

De structuur van dit hoofdstuk begint dus met een brede internationale analyse, gevolgd door een diepgaande casestudy. Deze opbouw maakt het mogelijk om zowel algemene lessen te trekken uit succesvolle internationale voorbeelden als specifieke inzichten te verkrijgen uit de ervaringen van een praktische implementatie in Nederland, die waardevolle aanbevelingen kan opleveren voor de verdere ontwikkeling van waterstofinfrastructuur in België.

3.1 Internationale landenvergelijking

In dit gedeelte wordt de aandacht gericht op een reeks internationale voorbeelden die licht werpt op de praktische toepassingen en uitdagingen van waterstofinfrastructuur in verschillende landelijke contexten. Deze voorbeelden bieden waardevolle inzichten in de diverse strategieën, beleidsinitiatieven, technologische innovaties, economische overwegingen, en milieu-impact die kenmerkend zijn voor de ontwikkeling van waterstofinfrastructuur wereldwijd. Door het analyseren van specifieke voorbeelden uit verschillende landen, zoals de Verenigde Staten, Duitsland, Nederland, Denemarken, waarbij de Europese Unie een overkoepelende regelgevende rol vervult, China, Japan en Zuid-Korea, kunnen gemeenschappelijke succesfactoren en uitdagingen geïdentificeerd worden. Deze analyse zal niet alleen helpen om de huidige stand van zaken beter te begrijpen, maar zal ook belangrijke lessen opleveren die relevant kunnen zijn voor de ontwikkeling van waterstofinfrastructuur in België.

3.1.1 Verenigde Staten

De waterstofinfrastructuur in de Verenigde Staten ondergaat een significante transformatie, gestuwd door zowel federale als statelijke initiatieven. Op staatsniveau leidt Californië de vooruitgang, dankzij de implementatie van baanbrekende milieubeleidsprogramma's zoals de California Fuel Cell Partnership en Zero Emission Vehicle-mandaten. Deze programma's zijn ontworpen om de adoptie van waterstofvoertuigen te versnellen en de ontwikkeling van de benodigde infrastructuur te bevorderen, wat resulteert in een toename van waterstoftankstations en -voertuigen in de staat. (Kurtz et al., 2019)

Op federaal niveau speelt het Department of Energy (DOE) een cruciale rol door middel van de Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office (HFTO). Dit bureau biedt strategische financiering en

programma's ter ondersteuning van onderzoek, ontwikkeling en demonstratie van waterstofproductie, infrastructuur, opslag en brandstofcellen. Deze inspanningen zijn essentieel gebleken voor het overbruggen van de kloof tussen onderzoek en commerciële implementatie, waardoor de Verenigde Staten een koploper is op het gebied van waterstoftechnologie. (Reddi et al., 2016)

Bij de ontwikkeling van een waterstofinfrastructuur in de Verenigde Staten stuiten beleidsmakers en ingenieurs op substantiële financiële en veiligheidstechnische uitdagingen. De investeringskosten voor nieuwe waterstoftankstations zijn aanzienlijk, met initiële investeringen in vulstations die variëren van \$910.000 tot \$4,6 miljoen. De huidige waterstofverkoopprijs aan de pomp schommelt tussen \$10 en \$16 per gallon gelijkwaardige energie (gge), veel hoger dan de \$3 tot \$5 gge nodig om competitief te zijn met conventionele brandstoffen. (Kurtz et al., 2019)

Daarnaast speelt veiligheid een cruciale rol, met een dringende behoefte aan gestandaardiseerde veiligheidsprotocollen en regelgeving. De naleving van specifieke veiligheidscodes, zoals de NFPA 2 voor waterstoftechnologieën, is onontbeerlijk voor het waarborgen van veilige operationele praktijken. Een diepgaande risicoanalyse wordt als essentieel beschouwd voor het verkrijgen van vergunningen en het aantonen van compliance met de gestelde vereisten. (Kurtz et al., 2019)

Deze uitdagingen versterken de oproep voor een strategische en gecoördineerde aanpak van zowel publieke als private entiteiten om een efficiënte, betaalbare en veilige waterstofinfrastructuur tot stand te brengen. De implicaties voor beleidsontwikkeling, financiële stimuleringsmaatregelen en technologische innovatie zijn van cruciaal belang in deze context.

3.1.2 Europese Unie

De Europese Unie heeft een uitgebreide strategie ontwikkeld om klimaatneutraliteit te bereiken tegen 2050, waarbij waterstofenergie een sleutelrol speelt. Centraal in deze strategie staat de vermindering van broeikasgasemissies en de bevordering van duurzame energie, met speciale nadruk op het gebruik van waterstof in sectoren zoals transport, industrie en energieopslag. Dit is in lijn met de bredere doelstellingen van de EU Green Deal, een ambitieus plan dat zich richt op het aanpakken van klimaatverandering en het realiseren van een duurzame, groene toekomst, met acties op het gebied van energie, industrie, transport en milieu. (Vivanco-Martín & Iranzo, 2023)

Een belangrijk aspect van het EU-beleid is het stimuleren van investeringen in waterstoftechnologieën. De Europese Commissie heeft aanzienlijke fondsen toegewezen voor onderzoek, ontwikkeling en infrastructuur, met een focus op groene waterstof, geproduceerd uit hernieuwbare energiebronnen. Dit past binnen het streven naar een duurzame en klimaatvriendelijke energievoorziening. De EU streeft naar een verhoogd aandeel van hernieuwbare energiebronnen in de waterstofproductie tegen 2030, met een verwachte verbetering in de kostenefficiëntie van waterstofproductie, wat de economische haalbaarheid van waterstof als energiebron ten goede komt. (Vivanco-Martín & Iranzo, 2023; Wietschel et al., 2006)

Daarnaast werkt de EU aan het creëren van een interne markt voor waterstof. Dit omvat de ontwikkeling van een netwerk van waterstofcorridors voor transport en het realiseren van een uniforme markt met consistente regelgeving, om de beschikbaarheid en toegankelijkheid van waterstof in alle lidstaten te vergroten. Grensoverschrijdende samenwerking tussen lidstaten is hierbij cruciaal. Verder erkent de EU het belang van de Duurzame Ontwikkelingsdoelen van de VN in de context van waterstoftechnologie, door deze te integreren in strategieën voor schone energie en klimaatactie. (Vivanco-Martín & Iranzo, 2023)

Het REPowerEU-plan, geïntroduceerd als reactie op de huidige energie-uitdagingen en afhankelijkheid van fossiele brandstoffen, benadrukt het belang van energieonafhankelijkheid en de transitie naar hernieuwbare energiebronnen. Dit plan richt zich op de diversificatie van energiebronnen en het versterken van de energiezekerheid. De Clean Hydrogen Alliance, opgericht door de EU, speelt een vitale rol in het versnellen van de ontwikkeling en implementatie van schone

waterstoftechnologieën. Als samenwerkingsplatform bevordert het innovatie en investeringen in de waterstofsector. De European Electrolyser Summit onderstreept eveneens het belang van het verhogen van de productiecapaciteit van elektrolyzers in Europa, essentieel voor de productie van groene waterstof en een sleutelcomponent in de EU-strategie voor een duurzame energietoekomst. (Vivanco-Martín & Iranzo, 2023)

3.1.3 Duitsland

Duitsland zet aanzienlijk in op de ontwikkeling van waterstof als een duurzame energiebron. Er is een groeiende behoefte aan een geoptimaliseerde waterstofvoorzieningsketen, vooral voor transportbrandstof. Dit is het gevolg van het streven van Duitsland om de uitstoot van broeikasgassen te verminderen en over te schakelen van fossiele brandstoffen naar hernieuwbare energiebronnen. Hernieuwbare energiebronnen zoals wind- en zonne-energie zijn van groot potentieel belang voor de elektrolyse van water, wat essentieel is voor de productie van 'groene' waterstof. Er wordt verwacht dat tegen 2050 de bijdrage van windenergie aan de totale energieproductie aanzienlijk zal toenemen. (Reuß et al., 2019)

Een ander belangrijk aspect van de Duitse aanpak voor waterstofproductie is de integratie van grootschalige productiefaciliteiten. De schaal van productie speelt een cruciale rol in zowel de efficiëntie als de kosten. Grootschalige productiefaciliteiten kunnen, ondanks hogere initiële investeringen, op lange termijn economisch voordeliger zijn door lagere operationele kosten en verhoogde efficiëntie. Dit is vooral van belang in de context van de Duitse energietransitie, die zich richt op duurzaamheid en kostenefficiëntie. Naar verwachting zal in 2050 de bijdrage van windenergie in Duitsland 225 TWh bedragen, wat 39% van de totale energieproductie vertegenwoordigt, terwijl zonne-energie naar schatting 17% van de totale energieproductie zal uitmaken, met 100 TWh per jaar. Deze toename in hernieuwbare energiebronnen is cruciaal voor het ondersteunen van duurzame waterstofproductietechnologieën, zoals elektrolyse, die afhankelijk zijn van groene energie. (Ochoa Bique & Zondervan, 2018)

De benadering van Duitsland ten aanzien van waterstofenergie wordt ook beïnvloed door brede Europese initiatieven en regelgeving. Als lid van de Europese Unie speelt Duitsland een actieve rol in het realiseren van EU-strategieën voor waterstof, die gericht zijn op het vergroten van de productie en het gebruik van hernieuwbare waterstof. Deze strategieën benadrukken het belang van samenwerking tussen de lidstaten voor de ontwikkeling van een geïntegreerde waterstofmarkt en het behoud van het technologische leiderschap van Europa. Tegen 2030 streeft de EU naar een aanzienlijke toename van het gebruik van hernieuwbare waterstof in sectoren zoals transport en industrie, wat directe gevolgen heeft voor de nationale doelstellingen van Duitsland op dit gebied. (Wietschel et al., 2006)

Een ander essentieel aspect is de nadruk op innovatie en onderzoek binnen de waterstofsector. Duitsland wordt gezien als een sleutelspeler in het stimuleren van onderzoek en ontwikkeling op het gebied van waterstoftechnologieën. Dit is fundamenteel voor het verlagen van de kosten van waterstofproductie en het verhogen van de efficiëntie. Het ondersteunt het lange termijn doel van Duitsland om een duurzame en kosteneffectieve waterstofeconomie te realiseren, in overeenstemming met EU-richtlijnen en doelstellingen. (Vivanco-Martín & Iranzo, 2023)

3.1.4 Nederland

In Nederland krijgt waterstof een steeds prominentere rol. Het land heeft diverse waterstoftankstations (HRSs) in bedrijf, waaronder complexe systemen in steden zoals Helmond, Rhon, Amsterdam, Arnhem, Delft, Apeldoorn en Hoogezand. Deze stations zijn uitgerust met geavanceerde technologieën zoals waterstofgeneratoren ter plaatse, compressoren en pre-koelsystemen, die bijdragen aan een efficiënte waterstoflevering aan voertuigen. Zo gebruikt het station in Helmond een geautomatiseerde cascade-tankstrategie met elektrolyse voor lokale productie, terwijl het station in Rhon een booster-ondersteunde strategie hanteert om waterstof via leidingen te leveren. (Honselaar et al., 2018)

In 2017 kondigde Nederland plannen aan voor de uitbreiding van haar waterstofvulinfrastructuur, met nieuwe HRSs gepland in steden als Den Haag, Arnhem en Breda. Een vergunning werd verleend voor een HRS in Oude-Tonge als onderdeel van een multifuelstation, en er werden andere locaties overwogen. (Honselaar et al., 2018)

De uitbreiding van de waterstofinfrastructuur in Nederland kent echter uitdagingen. Het vergunningsproces, waarbij HRSs aan strenge regelgeving moeten voldoen om risico's te minimaliseren, is hierin een belangrijk aspect. Normen zoals NPR 8099:2010 en PGS35:2015 zijn essentieel voor het vergunningsproces en vereisen een uitgebreide kwantitatieve risicobeoordeling (QRA) (Honselaar et al., 2018). Daarnaast zijn de operationele kosten, vooral voor eenvoudigere HRS-configuraties, aanzienlijk door hoge kosten voor waterstof, transport en installatiehuur. Deze kosten vormen een barrière voor verdere ontwikkeling van de waterstofinfrastructuur (Honselaar et al., 2018).

Niettemin biedt Nederland vanwege zijn geografische ligging en bestaande infrastructuur goede vooruitzichten voor de ontwikkeling van een waterstofeconomie. Rotterdam wordt gezien als een regionaal centrum dat een sleutelrol kan spelen in de waterstofsector, vooral tijdens de transitie naar een waterstofeconomie. Met productiefaciliteiten die dagelijks ongeveer 2500 ton waterstof produceren, waarvan het grootste deel intern wordt gebruikt, heeft Nederland aanzienlijke productiecapaciteit. Overschotten van waterstof, variërend van 60 tot 300 ton per dag, worden voornamelijk geproduceerd als bijproduct of door overtollige capaciteit. De faciliteiten in Rotterdam, Groningen en Limburg worden als meest geschikt beschouwd om in het toekomstige waterstofnetwerk geïntegreerd te worden. (Murthy Konda et al., 2011)

Potentiële nieuwe productielocaties in steden als Rotterdam, Amsterdam, Groningen, Limburg en Arnhem worden overwogen voor verdere spreiding van de productiecapaciteit in Nederland. In de regio Rotterdam kunnen indien nodig nieuwe installaties voor vloeibare waterstof (LH2) worden opgezet, gezien de hogere dichtheid van LH2 en de relatief kleine oppervlakte van Nederland. (Murthy Konda et al., 2011)

3.1.5 Denemarken

Recentelijk heeft Denemarken zich nadrukkelijk op de kaart gezet als een toonaangevende speler in de transitie naar duurzame energie, vooral door zich te richten op windenergie. Dit wordt ondersteund door een krachtig overheidsbeleid en investeringen in hernieuwbare energieproductie. In 2018 leverden windturbines in Denemarken een aanzienlijke bijdrage, verantwoordelijk voor ongeveer 40% van het totale elektriciteitsverbruik van het land. Dit benadrukt de sleutelrol van Denemarken in de wereldwijde verschuiving naar duurzame energie. Niettemin zijn er uitdagingen bij het economisch integreren van deze energiebronnen, vooral vanwege de onvoorspelbaarheid van windenergie en beperkingen in de huidige infrastructuur en marktstructuren. (Peter Andreasen & Sovacool, 2014)

Parallel hieraan is Denemarken bezig met de evaluatie van het gebruik van water-elektrolysesystemen om overschotten aan windenergie om te zetten in waterstof. Hoewel dit potentieel heeft om de variabiliteit van hernieuwbare energiebronnen op te vangen en de netwerkstabiliteit te verbeteren, stuit het op aanzienlijke economische uitdagingen. Deze omvatten hoge productiekosten voor waterstof en een beperkte marktvraag, wat blijkt uit de relatief kleine vloot van 84 brandstofcelvoertuigen (FCEVs) in Denemarken in 2019. Desondanks biedt de integratie van waterstoftechnologieën kansen voor verdere innovatie. (Berg et al., 2021)

Met slechts 9 waterstoftankstations in 2019, wordt de uitbreiding van de Deense waterstofinfrastructuur gehinderd. Deze beperkte geografische verspreiding maakt effectieve distributie van waterstof moeilijk. Bovendien zorgt de "kip-en-ei"-situatie ervoor dat consumenten terughoudend zijn om waterstofvoertuigen aan te schaffen bij gebrek aan een solide infrastructuur, en zijn investeerders huiverig om te investeren zonder zekerheid van klanten. (Peter Andreasen & Sovacool, 2014)

In 2023 kondigde Everfuel, een Deense aanbieder van waterstofinfrastructuur, aan dat het zijn onrendabele oude waterstoftankstations voor auto's zou sluiten. Dit besluit werd genomen om de productie van milieuvriendelijke 'groene' waterstof te prioriteren en de investeringen in het tanknetwerk te verminderen door het waterstoftankstationportfolio op te waarderen. "We bieden onze excuses aan voor het ongemak dat dit veroorzaakt voor klanten en medewerkers, maar we kunnen niet doorgaan met het subsidiëren van openbare waterstofbevoorrading," aldus CEO Jacob Krogsgaard. Het bedrijf zal echter doorgaan met het bouwen van tankstations voor zware vrachtwagens en grote wagenparken onder de EU-regelgeving voor alternatieve brandstofinfrastructuur (AFIR). "Daarom zullen we ons stationnetwerk herstructureren, waaronder het beëindigen van onrendabele tankstations voor auto's en het aanpassen van onze downstreamorganisatie naar een lager activiteitsniveau," voegde Krogsgaard toe. (Randall, 2023)

3.1.6 China

In recente jaren heeft China aanzienlijke vooruitgang geboekt in de ontwikkeling van zijn waterstofenergiesector, een belangrijke stap richting een meer duurzame energievoorziening. Sinds 2016 heeft deze sector een indrukwekkende groei gezien, met ondersteuning van lokale overheden en bedrijven, zoals uiteengezet in het "Medium- en Langetermijnplan voor de Ontwikkeling van de Waterstofenergie-industrie (2021–2035)". (Li et al., 2023)

Economisch gezien variëren de geschatte dagelijkse kosten voor waterstofproductie tussen \$18,44, \$10,56 en \$5,98 per kilogram H₂ voor de jaren 2025, 2030 en 2035. Deze schattingen zijn essentieel voor het begrijpen van de economische haalbaarheid en CO₂-emissies van waterstofproductie in China, en benadrukken het belang van het verminderen van de CO₂-voetafdruk. (Li et al., 2023)

De grootschaligheid van China draagt bij aan de complexiteit van het ontwikkelen van een efficiënte waterstof distributie, waarbij stedelijke ontwikkeling en een stijgende energievraag extra druk leggen op de infrastructuur. Een strategische benadering is noodzakelijk voor een duurzame waterstofeconomie in het land. (Li et al., 2023)

Dalian, een oostelijke kuststad in China, speelt een sleutelrol in waterstofenergieonderzoek en -ontwikkeling. Dankzij het recente waterstofontwikkelingsplan is er een toename in de adoptie van waterstof als schone brandstof en uitbreiding van de waterstofbevoorradingsketen. Dalian toont significant potentieel voor waterstofproductie, met name via hernieuwbare bronnen, en overweegt diverse productiemethoden. (Li et al., 2023)

In Dalian worden verschillende technieken voor waterstofproductie onderzocht, met ondersteuning van stoommethaanreforming door het LNG-project, en een bijdrage van de chemische industrie aan waterstofbronnen. (Li et al., 2023)

De toename van waterstofbrandstofcelvoertuigen zal resulteren in een complexer netwerk van productie- en opslagfaciliteiten in China, met nadruk op economische kosten en CO₂-reductie. De diversiteit in de omvang van productie-installaties toont het aanpassingsvermogen aan van de industrie aan lokale behoeften. (Li et al., 2023)

Echter, de uitbreiding van de huidige waterstofinfrastructuur in China kent uitdagingen zoals, geografische verspreiding, beperkte transportmogelijkheden, diverse regionale strategieën en een gebrek aan duidelijke regelgeving. Met slechts 400 kilometer aan waterstofpijpleidingen is de infrastructuur onvoldoende om productiegebieden en vraagcentra efficiënt te verbinden. Initiatieven voor verbetering, zoals de bouw van korte pijpleidingen, vulstations en opslagfaciliteiten voor vloeibare waterstof, zijn voornamelijk geconcentreerd in vier industriële clusters. Deze clusters zijn mogelijk niet toereikend om hernieuwbare waterstofvoorraden en vraagcentra te verbinden, wat een aanzienlijke uitdaging vormt voor verdere ontwikkeling. (Lou, 2023)

Er zijn echter kansen voor geografische uitbreiding van de waterstofinfrastructuur, met nadruk op regionale strategieën gebaseerd op lokale voordelen en bestaande vraag. De concentratie van waterstofproductie in regio's als de Autonome Regio Binnen-Mongolië en Shandong, rijk aan

natuurlijke hulpbronnen zoals zonne- en windenergie, is cruciaal. Andere regio's, zoals Sichuan met waterkrachtpotentieel en Shanxi met koolstofbronnen, passen hun strategieën aan om deze voordelen te benutten. (Lou, 2023)

Deze regionale verschillen tonen ook de diversiteit in waterstofvraag. Gebieden met bestaande vraag, zoals Binnen-Mongolië met industrieën als staalproductie en olieraffinage, bieden een solide basis voor infrastructuurontwikkeling. Het benutten van bestaande vraag is effectief voor sectorgroei en aantrekken van investeringen. (Lou, 2023)

De geografische ligging ten opzichte van exportmarkten is ook een belangrijke overweging. Regio's met havens of grensovergangen kunnen goed gepositioneerd zijn voor waterstofexport, wat nieuwe kansen biedt voor economische groei en internationale samenwerking. (Lou, 2023)

Samengevat vereist de uitbreiding van de waterstofinfrastructuur in China een zorgvuldige coördinatie van regionale strategieën, gericht op lokale voordelen en vraagpatronen. Door gebruik te maken van natuurlijke hulpbronnen, bestaande industrieën en geografische locaties kan China zijn positie in waterstoftechnologie versterken en bijdragen aan een duurzamere energietoekomst. (Lou, 2023)

Concluderend tonen de plannen en uitdagingen rond de waterstofinfrastructuur in China de serieuze inzet van het land voor duurzame energieontwikkeling, ondanks de aanwezige obstakels. (Lou, 2023)

3.1.7 Japan

Japan staat wereldwijd aan de spits van waterstoftechnologie. Dit blijkt uit hun leiderschap in verschillende domeinen, waaronder huishoudelijke brandstofceltoepassingen, de ontwikkeling van een waterstofinfrastructuur en hun betrokkenheid bij internationale samenwerkingsverbanden. Deze benadering weerspiegelt Japans toewijding aan innovatie en duurzaam energiebeheer, gericht op het aanpakken van klimaatverandering en het waarborgen van een betrouwbare energievoorziening. (Gielen et al., 2019)

Een duidelijk voorbeeld van Japans voortrekkersrol in waterstoftechnologie is de integratie ervan in huishoudelijke toepassingen. Tot eind 2018 installeerde Japan maar liefst 98% van de wereldwijd geïnstalleerde 225.000 eenheden. Deze toepassingen maken gebruik van waterstof voor zowel efficiënte verwarming als stroomopwekking, wat de praktische haalbaarheid van waterstof in het dagelijks leven illustreert. (Gielen et al., 2019)

Japan speelt tevens een cruciale rol in het HESC-project in Victoria, Australië. Dit project, gesteund door zowel de Japanse als Australische overheden, heeft tot doel bruinkool om te zetten in waterstof voor export naar Japan. De beoogde jaarlijkse productie van 5.000 ton waterstof en 18.000 ton ammoniak onderstreept de betrokkenheid van Japan bij internationale waterstofinitiatieven. (Gielen et al., 2019)

Wat betreft de ontwikkeling van een waterstofinfrastructuur voor transport, heeft Japan aanzienlijke vooruitgang geboekt. Met meer dan 380 tankstations in 2018 ondersteunt Japan een groeiend aantal FCEV's (Fuel Cell Electric Vehicles). Hun ambitie om tegen 2025 maar liefst 3.000 operationele tankstations te hebben, weerspiegelt de plannen voor een uitgebreide waterstof aangedreven transportsector. (Gielen et al., 2019)

Innovatieve projecten zoals die in Fukushima, waar waterstof wordt geproduceerd uit hernieuwbare bronnen, en in de Yamanashi Fuel Cell Valley, waar geavanceerde elektrolysetechnologie wordt gebruikt, tonen Japans inzet voor duurzame waterstofproductie. Japan richt zich op het gebruik van waterstof voor het verminderen van de CO₂-uitstoot in diverse industrieën en benadrukt daarbij de veelzijdigheid van waterstof als energiebron, met een sterke nadruk op groene waterstof uit hernieuwbare bronnen. Toch zijn er nog uitdagingen, zoals de kosten en efficiëntie van waterstofproductie en -distributie, evenals de ontwikkeling van de benodigde infrastructuur. (Gielen et al., 2019)

Japan erkent tevens het potentieel van internationale handel in waterstof en afgeleide producten. Het land onderzoekt actief de mogelijkheden voor de export van waterstof en de productie van energie-intensieve grondstoffen zoals ammoniak en e-brandstoffen. Dit kan leiden tot een versnelde adoptie van hernieuwbare energie wereldwijd en biedt economische voordelen. (Gielen et al., 2019)

Samengevat zet Japan zich krachtig in voor de ontwikkeling en integratie van waterstoftechnologie, zowel nationaal als internationaal. Met hun focus op innovatieve toepassingen in huishoudens, de opbouw van transportinfrastructuur en internationale samenwerking, speelt Japan een cruciale rol in de mondiale verschuiving naar een duurzamere energietoekomst. (Gielen et al., 2019)

3.1.8 Zuid-Korea

In 2023 heeft Zuid-Korea het aantal waterstoftankstations verhoogd naar 174, wat een aanzienlijke toename is ten opzichte van de 34 stations in 2020 (Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, 2024). De waterstofinfrastructuur van Zuid-Korea staat er momenteel uitgebreid en toekomstgericht voor. Het land was van plan om het aantal waterstoftankstations uit te breiden naar 310 in 2022 en verder naar 1.200 tegen 2040, ondersteund door overheidssubsidies en een versoepeling van regelgeving. Deze groei wordt aangevuld met een ambitieuze doelstelling voor energieproductie uit brandstofcellen, die tegen 2040 moet toenemen tot 15 GW, waarvan 8 GW voor binnenlands gebruik en 7 GW voor export (Stangarone, 2021).

Het toekomstige waterstofverbruik in Zuid-Korea wordt geschat op 5,36 miljoen ton per jaar in 2040, een enorme stijging vanaf 130.000 ton in 2019. Terwijl aanvankelijk waterstof voornamelijk uit LNG zal worden geproduceerd, zijn er plannen om over te schakelen naar groene waterstofproductie. Bovendien plant de Korea Gas Corporation (KOGAS) de bouw van 25 waterstofproductiefaciliteiten en 700 km aan nieuwe pijpleidingen tegen 2030. (Stangarone, 2021)

Ondanks deze ambitieuze plannen zijn er nog enkele uitdagingen die moeten worden aangepakt. Zo kampt Zuid-Korea met een gebrek aan voldoende tankstations, wat de toegankelijkheid voor consumenten beperkt en de adoptie van waterstofvoertuigen in de weg staat. Daarnaast zijn de hoge kosten van productie en distributie momenteel een obstakel, wat de prijs van waterstofvoertuigen verhoogt en zowel consumenten als bedrijven afschrikt. KOGAS streeft ernaar de binnenlandse prijs van een kilogram waterstof te verlagen van de huidige 6.500-7.500 won naar 3.000 won tegen 2040. (Stangarone, 2021)

Een andere uitdaging is de afhankelijkheid van geïmporteerde technologie, wat leidt tot hogere kosten en minder controle over de technologische ontwikkeling. Daarnaast vereist de verdere ontwikkeling van de waterstofinfrastructuur aanpassingen in beleid en regelgeving, terwijl ook de publieke perceptie en acceptatie van waterstoftechnologie moeten worden bevorderd. (Stangarone, 2021)

Ondanks deze uitdagingen heeft Zuid-Korea een actieve en unieke rol in de wereldwijde waterstofeconomie. Het land wordt gezien als een van de leiders in waterstoftechnologie, vooral in de automotive sector, en heeft ambitieuze doelstellingen gesteld voor de productie en het gebruik van waterstofvoertuigen. Het onderscheidt zich ook door zijn sterke overheidsbeleid en financiële ondersteuning voor de ontwikkeling van waterstoftechnologie. (Lee & Lee, 2022)

Met aanzienlijke investeringen en subsidies, zoals die onder de "Korean New Deal" en subsidies voor waterstofvoertuigen, toont de Zuid-Koreaanse regering haar sterke betrokkenheid bij het bevorderen van de ontwikkeling en adoptie van waterstofenergie. Deze initiatieven, samen met voortdurende investeringen in onderzoek en ontwikkeling en internationale samenwerking, zullen naar verwachting de positie van Zuid-Korea in de wereldwijde waterstofmarkt versterken en bijdragen aan een duurzamere toekomst. (Lee & Lee, 2022)

3.1.9 Conclusie

De literatuurstudie van de internationale landenvergelijking in dit hoofdstuk heeft waardevolle inzichten opgeleverd over de verschillende strategieën, uitdagingen en ontwikkelingen met betrekking tot waterstofinfrastructuur in diverse landen. Door de aanpak van koplopers zoals de Verenigde Staten, de Europese Unie, Duitsland, Nederland, Denemarken, China, Japan en Zuid-Korea te analyseren, zijn er belangrijke elementen geïdentificeerd die kunnen bijdragen aan de ontwikkeling van een succesvolle waterstofinfrastructuur in België.

Allereerst blijkt uit de studie dat duidelijke en ondersteunende regelgeving cruciaal is voor de succesvolle implementatie van waterstofinfrastructuur. In de Verenigde Staten bijvoorbeeld, worden federale en statelijke initiatieven zoals de California Fuel Cell Partnership en het Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office genoemd als sleutelcomponenten in het bevorderen van de ontwikkeling van waterstoftechnologie (Kurtz et al., 2019; Reddi et al., 2016). In de Europese Unie speelt de integratie van waterstofstrategieën in bredere beleidsplannen zoals de EU Green Deal een vergelijkbare rol, waarbij aanzienlijke fondsen worden toegewezen voor onderzoek en infrastructuur, met een focus op groene waterstof (Vivanco-Martín & Iranzo, 2023; Wietschel et al., 2006).

Een tweede belangrijk element is de noodzaak van sterke samenwerking tussen overheden en de private sector. De casussen van Duitsland en Nederland illustreren hoe nationale strategieën en regionale samenwerkingen kunnen bijdragen aan de ontwikkeling van een geïntegreerde waterstofmarkt, waarbij productie- en distributie-infrastructuren worden geoptimaliseerd (Murthy Konda et al., 2011; Reuß et al., 2019). Dit benadrukt het belang van een holistische benadering, waarbij alle betrokken actoren samenwerken om technologische en economische barrières te overwinnen.

Daarnaast speelt de economische haalbaarheid van waterstofinfrastructuur een doorslaggevende rol. Landen zoals China en Japan hebben aanzienlijke investeringen gedaan in de productie en distributie van waterstof, waarbij ze strategische plannen ontwikkelen om de kosten te verlagen en de technologie op schaal te implementeren (Gielen et al., 2019; Li et al., 2023). Deze inspanningen worden ondersteund door het opbouwen van robuuste markten voor waterstofvoertuigen, wat essentieel is om de vraag te stimuleren en de infrastructuur rendabel te maken.

Tot slot wijst de studie op het belang van technologische innovatie en diversificatie van waterstofproductiemethoden. De Duitse en Zuid-Koreaanse benaderingen benadrukken de integratie van hernieuwbare energiebronnen zoals wind- en zonne-energie voor de productie van groene waterstof, wat essentieel is voor de lange termijn doelstellingen van duurzaamheid en energieonafhankelijkheid (Ochoa Bique & Zondervan, 2018; Stangarone, 2021).

Samenvattend kan worden gesteld dat de strategieën, uitdagingen en ontwikkelingen van waterstofinfrastructuur in de bestudeerde landen een aantal belangrijke lessen bieden voor België. Duidelijke regelgeving, samenwerking tussen publieke en private actoren, economische haalbaarheid en technologische innovatie zijn de pijlers waarop een succesvolle waterstofinfrastructuur moet worden gebouwd. Deze elementen vormen de kern van de aanbevelingen voor de verdere ontwikkeling van waterstofinfrastructuur in België en bieden concrete handvatten voor het aanpakken van de uitdagingen die in dit proces naar voren kunnen komen.

3.2 Case study – Vissers Energy Group

De Vissers Energy Group, een familiebedrijf dat sinds 1917 actief is en geleid wordt door de vierde generatie onder leiding van Gerbert Vissers, is gevestigd in Nederland. Oorspronkelijk begon het bedrijf als oliehandelaar en leverde het brandstoffen en smeermiddelen aan transportbedrijven en de agrarische sector. Sinds 1999 heeft Vissers Energy Group zich echter steeds meer gericht op tankstations, met inmiddels 60 vestigingen verspreid over Zuid-Nederland.

Met het oog op de energietransitie heeft Vissers Energy Group strategisch gekozen voor duurzame alternatieven. In 2019 verkochten ze hun groothandelsactiviteiten om zich volledig te richten op tankstations en begonnen ze met de uitrol van alternatieve brandstoffen zoals HVO (plantaardige

afvalolie), CNG (aardgas) en laadinfrastructuur voor elektrische voertuigen. Sinds 2022 exploiteert het bedrijf ook zijn eerste waterstoftankstation, waarmee ze willen vooroplopen in de transitie naar duurzame energievoorziening.

Guido Coppes, die al bijna 20 jaar bij Vissers Energy Group werkt, is eindverantwoordelijk voor de B2B-verkoop, laadinfrastructuur en waterstofverkoop aan eindklanten. Daarnaast beheert hij de dealertankstations van het bedrijf. Het waterstoftankstation, een openbaar toegankelijk slow-fill station, is strategisch geplaatst bij het hoofdkantoor om de interne bedrijfsprocessen en marktdynamiek beter te begrijpen. Dit station biedt zowel 700 bar vulinstallaties voor personenauto's als 350 bar voor vrachtwagens en maakt uitsluitend gebruik van groene waterstof.

Het doel van deze casestudy is om de uitdagingen en ervaringen van Vissers Energy Group bij de ontwikkeling van waterstoftankstations in Nederland te analyseren en deze te vergelijken met de situatie in België. Door de verschillen tussen beide landen te identificeren, kunnen waardevolle aanbevelingen worden geformuleerd voor belanghebbenden in België. Deze vergelijking zal inzicht bieden in vergunningen, logistiek, marktontwikkeling en duurzaamheid van de waterstofvoorziening, en zo bijdragen aan de verdere ontwikkeling van de waterstofinfrastructuur in België.

3.2.1 Huidige situatie en toekomstplannen

De huidige waterstofinfrastructuur van Vissers Energy Group is nog in een vroeg ontwikkelingsstadium. Het eerste waterstoftankstation werd in 2022 operationeel en is gevestigd bij het hoofdkantoor. Dit station is bewust ontworpen om zowel personenauto's als vrachtwagens te kunnen bedienen, met 700 bar vulinstallaties voor personenauto's en 350 bar voor vrachtwagens. Dit biedt het bedrijf de mogelijkheid om ervaring op te doen met verschillende typen voertuigen en de logistieke uitdagingen rondom de aanvoer van waterstof te beheersen.

Een belangrijk aspect van het waterstoftankstation van Vissers Energy Group is dat het uitsluitend groene waterstof levert, geproduceerd met behulp van zonne-energie. Dit komt van een elektrolyser die is aangesloten op een zonnepark van 2 megawatt. Het streven naar het gebruik van groene waterstof is een bewuste keuze om discussies over de duurzaamheid van waterstof te vermijden, hoewel dit ook logistieke uitdagingen met zich meebrengt vanwege de beperkte beschikbaarheid van groene waterstof.

De huidige afzet van waterstof is nog relatief beperkt. Er zijn nog weinig vrachtwagens die op waterstof rijden, afgezien van enkele omgebouwde vuilnisauto's. Daarom wordt de waterstof voornamelijk gebruikt door de vier eigen waterstofpersonenauto's van Vissers Energy Group en door een aantal regionale klanten met waterstofpersonenauto's. De aanvoer van waterstof naar het tankstation gebeurt met behulp van een zelf aangeschafte tubetrailer, die als voorraad dient. Deze trailer wordt gevuld en aangesloten op het tankstation, terwijl een buffervoorraad met twee buffer racks wordt gebruikt om de continuïteit van de levering te waarborgen.

3.2.1.1 Toekomstplannen

Voor de toekomst heeft Vissers Energy Group ambitieuze plannen voor de uitbreiding van hun waterstofinfrastructuur. In 2025 staat de opening gepland van het eerste grote fastfill station in de regio Venlo. De plannen voor dit station zijn vergevorderd, met goedgekeurde vergunningen en uitgewerkte tekeningen. Momenteel is het bedrijf bezig met de bouwaanvraag en het verkrijgen van middelen vanuit de SWIM-regeling (Subsidie Waterstof in Mobiliteit). Deze regeling is essentieel voor de financiering van het project, omdat het consortium, bestaande uit een tankstation en transportondernemers, in aanmerking komt voor aanzienlijke subsidies.

Het fastfill station in Venlo is een belangrijke stap voor de waterstofeconomie, vooral voor zwaar transport. Vissers Energy Group verwacht dat de bouw zal doorgaan, mede door hun gunstige positie in de subsidieaanvraag en de beperkte eigen bijdrage. De werkelijke uitdaging ligt echter in het ontwikkelen van de markt voor waterstofvoertuigen. Als de markt zich in de komende 2 à 3 jaar

ontwikkelt, heeft Visser's Energy Group plannen om meer waterstof-tankstations op andere locaties te openen.

Door deze stappen en plannen hoopt Visser's Energy Group een leidende rol te spelen in de energietransitie en de ontwikkeling van de waterstofinfrastructuur in de regio te bevorderen.

3.2.1.2 Drijfveren voor uitbreiding

De belangrijkste drijfveren voor Visser's Energy Group om het aanbod van waterstof-tankstations uit te breiden zijn tweeledig. Enerzijds heeft duurzaamheid een prominente plaats in de visie van de directeur, Gerbert Visser's. Het bedrijf ziet de noodzaak in van een transitie van fossiele brandstoffen naar duurzamere alternatieven. Door vroeg in te stappen in de waterstofmarkt, kan Visser's Energy Group kansen benutten die ontstaan in een vroeg stadium van deze energietransitie.

Anderzijds speelt onzekerheid over de toekomst van fossiele brandstoffen een grote rol. Als het bedrijf niet overstapt op alternatieve energiebronnen, wordt de businesscase op lange termijn steeds moeilijker. Elektriciteit als alternatief heeft beperkingen vanwege de infrastructuur en de laadinfrastructuur is voornamelijk geschikt voor thuis- of bedrijfsgebruik, wat betekent dat slechts een klein deel van de mobiliteitsenergie door tankstations wordt geleverd. Waterstof biedt hier een alternatief dat beter past bij de huidige businessmodellen van tankstations. Bovendien kan waterstof een belangrijke rol spelen bij het behalen van klimaatdoelstellingen, mede door de problemen met netcongestie en de beschikbaarheid van elektriciteit.

3.2.2 SWIM-regeling

De SWIM-regeling (Subsidie Waterstof in Mobiliteit) is een cruciale factor in de uitbreidingsplannen van Visser's Energy Group voor hun toekomstig waterstof-tankstation in Venlo. Deze subsidieregeling ondersteunt bedrijven die in een samenwerkingsverband investeren in waterstofmobiliteit. Een consortium dat aanspraak wil maken op de SWIM-subsidie moet ten minste bestaan uit een exploitant van een waterstof-tankstation en een bedrijf dat actief is als vervoerder.

De SWIM-regeling biedt aanzienlijke financiële ondersteuning. Bedrijven kunnen tot maximaal € 6 miljoen ontvangen. Voor de bouw, uitbreiding of upgrade van een waterstof-tankstation voor zwaar wegvervoer bedraagt de subsidie maximaal 40% van de kosten, met een plafond van € 2 miljoen per aanvraag. Bij de aanschaf van waterstofvoertuigen of retrofitting wordt 80% van de kosten vergoed, met een maximum van € 4 miljoen per aanvraag. Voor nieuwe voertuigen wordt de subsidie berekend op basis van het verschil tussen de aanschafprijs van een fossiel voertuig en een waterstofvoertuig. Bij retrofitting worden de ombouwkosten gesubsidieerd. (Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, 2024)

3.2.2.1 Uitdagingen

Een van de grootste uitdagingen bij het verkrijgen van de SWIM-subsidie is de complexiteit en de vereisten van de regeling. Guido Coppes legt uit: "Er zit één kleine 'maar' aan en dat is of we voldoende middelen binnenhalen vanuit de SWIM-regeling." De subsidie is zodanig opgebouwd dat het consortium moet inschrijven met een bepaald aantal voertuigen, waarbij wordt vastgesteld hoeveel kilo waterstof per dag elk type voertuig nodig heeft. "Hoe minder subsidie je aanvraagt per kilo, hoe gunstiger de uitkomst," aldus Coppes. Dit betekent dat een efficiënt en economisch voorstel cruciaal is voor het succes van de subsidieaanvraag.

Het verkrijgen van medewerking van transportbedrijven om waterstofvoertuigen aan te schaffen is een andere uitdaging. Coppes merkt op: "Het is niet makkelijk. En de grootste reden daarvan is de onduidelijkheid. Er zijn nog gewoon te weinig concrete vrachtauto's beschikbaar die kunnen doen wat de transporteur nodig heeft." De beschikbaarheid van omgebouwde voertuigen voldoet vaak niet aan de behoeften van transportbedrijven, die liever nieuwe, kant-en-klare voertuigen aanschaffen.

3.2.2.2 Voordelen

Ondanks de uitdagingen biedt de SWIM-regeling aanzienlijke voordelen. Het grootste voordeel is de financiële ondersteuning die het biedt voor zowel infrastructuur als voertuigen, waardoor de drempel voor investeringen in waterstofmobiliteit aanzienlijk wordt verlaagd. Voor Vissers Energy Group, die al Europese subsidies heeft ontvangen voor hun tankstation, betekent dit dat ze een groot deel van hun resterende investeringen kunnen dekken met de SWIM-subsidie.

De SWIM-regeling stimuleert ook samenwerking binnen de sector. Door het opzetten van een consortium kunnen exploitanten van tankstations en transportbedrijven gezamenlijk profiteren van de subsidie en de transitie naar waterstofmobiliteit versnellen. Coppes: "De subsidie is zo opgebouwd dat je inschrijft met een aantal auto's, vrachtauto's en bestelauto's. Daarmee kunnen wij de benodigde hoeveelheid waterstof per dag inzetten, en zo maken wij kans op een gunstige uitkomst."

3.2.3 Uitdagingen bij de realisatie van het waterstoftankstation

3.2.3.1 Vergunningsverlening

Een van de grootste uitdagingen voor Vissers Energy Group bij de realisatie van hun waterstoftankstation was het verkrijgen van de benodigde vergunningen. Guido Coppes legt uit: "In de beginfase waren de vergunningsprocedures de grootste hindernis. Waar moesten we aan voldoen? In Nederland is het bevoegd gezag vaak terughoudend en onzeker over hoe ze waterstoftankstations moeten beoordelen." Voor conventionele tankstations zijn de regels duidelijk omschreven, maar voor waterstoftankstations ontbraken zulke duidelijke richtlijnen, wat leidde tot aarzeling en onzekerheid bij de autoriteiten.

Coppes vervolgt: "Bij waterstof was er geen duidelijke regelgeving. Als er al waterstoftankstations waren, dan waren die gebaseerd op lokale interpretaties en inschattingen van ambtenaren." Dit gebrek aan duidelijke regels maakte het lastig om het project binnen de bestaande kaders te realiseren. Gelukkig kon Vissers Energy Group rekenen op de ondersteuning van de veiligheidsregio, waaronder de brandweer, die advies gaf over brandveiligheid. Dit hielp om de autoriteiten te overtuigen van de veiligheid van het project.

3.2.3.2 Beschikbaarheid van voertuigen

Een andere grote uitdaging is de beperkte beschikbaarheid van waterstofvoertuigen. Coppes stelt: "Ik denk dat de grootste uitdaging ligt in het feit dat er te weinig beschikbare voertuigen zijn voor waterstof." De economische businesscase voor een waterstoftankstation is momenteel nog niet rendabel vanwege het beperkte aantal voertuigen dat op waterstof rijdt. Dit probleem wordt verder versterkt door het feit dat veel transportbedrijven terughoudend zijn om te investeren in waterstofvoertuigen vanwege de onzekerheid rondom de technologie en regelgeving.

Coppes merkt op dat Vissers Energy Group de focus heeft verlegd van personenauto's naar de transportsector, maar dat er ook daar nog veel uitdagingen zijn: "Wij verwachten wel dat we het vooral echt moeten hebben van de transportsector, dus daar moeten er voertuigen voor op de markt gebracht worden en daar zit dus de grootste uitdaging." De beschikbaarheid van waterstofvoertuigen voor de transportsector blijft een belangrijke factor voor het succes van de waterstofinfrastructuur.

3.2.3.3 Regelgeving en lange termijn afspraken

Naast de beschikbaarheid van voertuigen vormt ook de regelgeving rondom waterstoftechnologie een uitdaging. Coppes legt uit: "Regelgeving speelt een grote rol. Als een waterstofverbrandingsmotor als zero-emission blijft gelden, heeft het potentieel. Maar als dat niet zo is, krijgen we te maken met NOx-uitstoot, hoe minimaal die ook is." Voor de lange termijn planning

en investeringen in waterstofinfrastructuur is duidelijke en stabiele regelgeving essentieel. Zonder deze zekerheid is het lastig om de technologie op grote schaal te implementeren.

3.2.3.4 Economische rendabiliteit en groene waterstof

De economische rendabiliteit van het waterstoftankstation is een belangrijke uitdaging. Coppes stelt: "Hoe gaan we zorgen dat we dat waterstofstation rendabel krijgen? De beschikbaarheid van groene waterstof tegen een prijs die past binnen de transportsector is eigenlijk de grootste uitdaging." De huidige productiekosten van waterstof zijn nog te hoog om concurrerend te zijn met andere brandstoffen, wat een aanzienlijke hindernis vormt voor de grootschalige adoptie van waterstof in de transportsector.

Daarnaast blijven de hoge kosten van waterstof een uitdaging voor de economische haalbaarheid. Coppes legt uit: "De prijs van waterstof is cruciaal. Die beïnvloedt de Total Cost of Ownership (TCO) en die moet uiteindelijk concurreren met elektrische voertuigen." Hoewel de initiële investeringskosten met subsidies beheersbaar zijn, blijft de operationele kostprijs van waterstof een bepalende factor voor het succes.

Coppes benadrukt dat de prijs van groene waterstof een cruciale factor is: "Op dit moment is waterstof veel te duur om te produceren." Om de waterstofeconomie te laten slagen, moeten de productiekosten van groene waterstof omlaag, zodat deze betaalbaar wordt voor de transportsector. Dit vraagt om innovaties in de productietechnologie en schaalvergroting om de kosten te drukken.

3.2.3.5 Uitdagingen voor transportbedrijven

Een van de grootste obstakels bij het overtuigen van transportbedrijven om over te stappen op waterstofvoertuigen is de onduidelijkheid en beperkte beschikbaarheid van geschikte vrachtwagens. Coppes legt uit: "Er zijn nog gewoon te weinig concrete vrachtauto's beschikbaar die kunnen doen wat de transporteur nodig heeft. En er zijn best wel wat ombouwprojecten. Maar je ziet dat een gemiddelde transporteur zegt van: ja maar ik hoef geen ombouw." Hoewel er enkele vooruitgangen zijn, zoals de aankondiging van MAN en binnenkort Volvo, blijft dit een groot probleem. Transporteurs hebben drie jaar de tijd om de voertuigen aan te schaffen nadat ze zich hebben ingeschreven voor de SWIM-regeling, wat enige ruimte biedt, maar de beschikbaarheid van voertuigen blijft cruciaal.

3.2.3.6 Rol van opdrachtgevers van transportbedrijven

Een andere belangrijke factor is de rol van grote opdrachtgevers. Coppes benadrukt: "Een transportbedrijf doet dat pas vanaf het moment dat hun opdrachtgever daarin meehelpt." Grote bedrijven zoals Nike en Spa zijn bereid om te helpen bij de financiering van waterstofvrachtwagens als onderdeel van hun duurzaamheidsdoelstellingen, gestimuleerd door de nieuwe Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD) van de Europese Unie. Deze richtlijn verplicht bedrijven om te rapporteren over hun duurzaamheidsprestaties, wat hen helpt te identificeren waar ze kunnen verbeteren.

3.2.3.7 Kennisdeling en samenwerking met andere aanbieders

Samenwerking en kennisdeling met andere aanbieders van waterstoftankstations is ook beperkt. "We hebben natuurlijk wel wat contacten met vergelijkbare bedrijven die op andere plekken waterstofstations bouwen en daar is wel degelijk onderling overleg," aldus Coppes. Hoewel grote spelers zoals Shell, BP of Esso niet direct bij de samenwerking betrokken zijn, haalt Vissers Energy Group veel kennis uit hun contacten met tankstationbouwers en externe experts.

Een voorbeeld van samenwerking binnen de sector is Group Bruno, een Belgisch bedrijf dat soortgelijke ambities heeft. Hoewel Group Bruno plannen had om eind 2023 een waterstoftankstation te realiseren, is dit nog niet gebeurd vanwege de onzekerheden in de markt. Coppes merkt op: "De

reden is de onzekerheid in de markt. Gaat waterstof een succes worden of haalt de batterijtechniek ons in?" Deze onzekerheid leidt ertoe dat veel bedrijven hun projecten on hold zetten.

3.2.4 Adviezen voor nieuwe aanbieders van waterstoftankstations

Coppes geeft enkele belangrijke adviezen voor potentiële aanbieders van waterstoftankstations in België:

1. Samenwerking met de overheid: "Ga de samenwerking aan met overheid, zorg dat je samen kijkt naar de mogelijkheden." Samenwerking met de overheid is essentieel om de juiste regelgeving en ondersteuning te krijgen.
2. Vroege klantenbinding: "Zorg dat je in de voorfase al weet wie jouw mogelijke klanten zijn." In tegenstelling tot traditionele tankstations, moeten aanbieders van waterstof actief op zoek naar en binden van klanten voordat het station operationeel is.
3. Afzetgarantie: "Als je nu niet zorgt voor afzet, dan kun je een stations bouwen en dan is het eigenlijk gedoemd om te mislukken." Het is cruciaal om te zorgen voor een stabiele afzetmarkt voor waterstof.
4. Branchebrede samenwerking: "Uiteindelijk moeten we dit als branche voor mekaar zien te krijgen. Dus eigenlijk die samenwerking tussen de verschillende bedrijven om te zorgen dat we ook op de juiste plekken gaan bouwen." Samenwerking binnen de sector is noodzakelijk om de waterstofinfrastructuur efficiënt en succesvol uit te rollen.

De ervaringen van Vissers Energy Group benadrukken het belang van samenwerking, duidelijkheid in regelgeving, en de economische haalbaarheid voor de succesvolle implementatie van waterstoftankstations.

3.2.5 Successen bij de realisatie van het waterstoftankstation

3.2.5.1 Regelgevingsontwikkelingen

Een belangrijk aspect van de voortgang bij de realisatie van waterstoftankstations in Nederland is de ontwikkeling van regelgevingskaders. Guido Coppes geeft aan: "Je ziet dus ook dat vanuit de overheid subsidies gegeven worden, zie je ook dat de overheid bezig is met kaders te stellen van waar een waterstoftankstation aan moet voldoen, aan welke veiligheidseisen." Deze nieuwe regelgevingskaders zijn ofwel al gereed of bevinden zich in de laatste fasen van voltooiing. Dit maakt het eenvoudiger om de stappen te volgen die nodig zijn voor de bouw van een waterstoftankstation, hoewel er nog steeds aanzienlijke eisen zijn op het gebied van veiligheid en locatie. De duidelijke richtlijnen helpen echter bij het plannen en selecteren van geschikte locaties voor nieuwe stations.

3.2.5.2 Succesvolle vergunningen en lokale samenwerking

Een van de belangrijkste succesfactoren voor Vissers Energy Group bij de realisatie van hun waterstoftankstation was de effectieve samenwerking met lokale overheden. "Ik denk dat dat wel het grootste punt is geweest dat wij de juiste ingangen met de juiste ambtenaren aan tafel hadden waardoor we dat proces van die onzekerheid van die vergunningen wel goed doorlopen is," aldus Coppes. Deze samenwerking werd vergemakkelijkt door de lange geschiedenis van het bedrijf in de regio, wat resulteerde in korte communicatielijnen en een constructieve dialoog met de lokale autoriteiten.

Het feit dat Vissers Energy Group al meer dan 100 jaar een gevestigde naam is in een relatief kleine gemeente, speelde hierbij een cruciale rol. De bestaande relaties en het vertrouwen dat was opgebouwd, maakten het mogelijk om sneller en effectiever door de vergunningsprocedures te navigeren. Dit toont het belang aan van sterke lokale relaties en goede communicatie met regelgevende instanties.

3.2.5.3 Economisch en marketingsucces

Hoewel het waterstoftankstation van Vissers Energy Group nog niet economisch rendabel is, was dit ook niet het primaire doel van het project. Coppes benadrukt: "Wij willen vooral laten zien wat er wel en niet mogelijk is en voor onszelf te bekijken." Het waterstoftankstation heeft echter wel aanzienlijke marketingsuccessen opgeleverd. Het bedrijf wordt nu serieus genomen als een pionier in de waterstofsector.

"Het grootste succes is voor ons geweest, het marketingsucces wat er achterzit. We worden door dit station direct serieus genomen in de markt als zijnde een partij die doorontwikkeld, die doorgaat," zegt Coppes. Dit heeft de positie van Vissers Energy Group versterkt binnen de sector en bij regelgevende instanties. Het feit dat zij in staat waren om binnen een jaar een operationeel waterstoftankstation te realiseren, in tegenstelling tot andere bedrijven die na jaren nog steeds geen station hebben gebouwd, heeft hun reputatie en geloofwaardigheid aanzienlijk verbeterd.

3.2.6 Vergelijking tussen de Nederlandse en Belgische context

3.2.6.1 Uitbreiding van waterstoftankstations

Bij het vergelijken van de ontwikkelingen in Nederland en België op het gebied van waterstoftankstations, komen enkele duidelijke verschillen naar voren. Hoewel de informatie uit de Belgische context beperkt is, bieden de ervaringen van Vissers Energy Group in Nederland en hun contacten enige inzichten.

3.2.6.2 Nederlandse context

In Nederland is er een gestage vooruitgang in de ontwikkeling van waterstoftankstations, ondersteund door duidelijke regelgevingskaders en subsidies van de overheid. Zoals Guido Coppes aangeeft: "Je ziet dus ook dat vanuit de overheid subsidies gegeven worden, zie je ook dat de overheid bezig is met kaders te stellen van waar een waterstoftankstation aan moet voldoen, aan welke veiligheidseisen." Deze regelgevingskaders zijn essentieel voor het plannen en bouwen van nieuwe stations, waardoor het proces voor bedrijven duidelijker en voorspelbaarder wordt.

Daarnaast heeft Vissers Energy Group kunnen profiteren van sterke lokale samenwerkingen en bestaande relaties met regelgevende instanties, wat de vergunningsprocessen heeft vergemakkelijkt. De steun van de veiligheidsregio en de korte communicatielijnen met lokale overheden hebben bijgedragen aan de succesvolle realisatie van hun waterstoftankstation.

3.2.6.3 Belgische context

In België lijkt de markt voor waterstoftankstations minder ontwikkeld te zijn. Coppes merkt op dat er in België weinig activiteit is op deze markt: "In België is inderdaad maar weinig reuring op die markt." Dit wordt bevestigd door een klant van Vissers Energy Group, een transportbedrijf met vestigingen in Nederland, België en Duitsland, dat bewust kiest voor Vissers Energy Group vanwege het gebrek aan opties in België.

Hoewel er plannen en ambities zijn in België, zoals de plannen van Group Bruno om een waterstoftankstation te realiseren, blijven deze vaak ongerealiseerd vanwege markt- en technologische onzekerheden. "Zij hadden de ambitie om tegen eind 2023 een waterstofstation te realiseren. Dat is niet gebeurd," vertelt Coppes. Deze onzekerheid over de toekomst van waterstof en de concurrentie met batterijtechnologie draagt bij aan de traagheid van de ontwikkelingen in België.

3.2.7 Conclusie

Uit de casestudy van Vissers Energy Group kunnen enkele belangrijke lessen worden getrokken die relevant zijn voor de beantwoording van de deelvraag: *"Welke lessen kunnen worden getrokken uit internationale voorbeelden van succesvolle waterstofinfrastructuurontwikkeling in de wegtransportsector?"*

Ten eerste benadrukt de ervaring van Vissers het cruciale belang van duidelijke en ondersteunende regelgeving. In Nederland heeft de overheid door middel van subsidies en het opstellen van regelgevingskaders een stimulerende rol gespeeld bij de realisatie van waterstoftankstations. De SWIM-regeling, die aanzienlijke financiële ondersteuning biedt voor de ontwikkeling van waterstofinfrastructuur en voertuigen, is een goed voorbeeld van hoe de overheid de economische haalbaarheid van dergelijke projecten faciliteert. Dit soort overheidsinterventies vermindert de financiële risico's voor bedrijven en versnelt de ontwikkeling van de waterstofmarkt. Dit contrasteert met de Belgische situatie, waar de regelgeving en marktondersteuning minder ontwikkeld lijken, wat de noodzaak onderstreept voor de Belgische overheid om een meer proactieve rol te spelen om de marktontwikkeling te versnellen.

Ten tweede toont de casestudy het belang aan van samenwerking tussen lokale overheden en bedrijven. Vissers Energy Group slaagde erin hun waterstoftankstation te realiseren dankzij sterke lokale samenwerkingen en effectieve communicatie met regelgevende instanties. Dit soort relaties, gecombineerd met een gevestigde positie in de regio, kan bijdragen aan het overwinnen van bureaucratische en technische hindernissen. In België kan een vergelijkbare benadering waardevol zijn, waarbij lokale bedrijven en overheden gezamenlijk optrekken om de ontwikkeling van waterstofinfrastructuur te faciliteren.

Ten derde wijst de ervaring van Vissers Energy Group op het belang van economische haalbaarheid en de beschikbaarheid van waterstofvoertuigen. De beperkte beschikbaarheid van voertuigen en de hoge kosten van groene waterstof zijn aanzienlijke obstakels voor de verdere ontwikkeling van de waterstofmarkt. Dit geldt ook voor België, waar een gebrek aan concrete voertuigen de adoptie van waterstof kan vertragen. Belgische bedrijven moeten daarom niet alleen focussen op infrastructuur, maar ook op het stimuleren van de vraag naar waterstofvoertuigen en het vinden van kostenefficiënte oplossingen.

Samenvattend laten de lessen uit de Nederlandse casestudy zien dat voor een succesvolle waterstofinfrastructuur in België, duidelijke regelgeving, sterke samenwerkingen en economische haalbaarheid essentieel zijn. Het Belgisch beleid zou kunnen profiteren van een meer holistische benadering, waarin infrastructuurontwikkeling hand in hand gaat met marktstimulering en samenwerking tussen publieke en private actoren. De implementatie van een regeling zoals de SWIM-subsidie in België zou een belangrijke stap kunnen zijn in het ondersteunen van de economische haalbaarheid en het bevorderen van de ontwikkeling van de waterstofmarkt.

4 Vlaams en Europees beleid

Dit hoofdstuk richt zich op de derde deelvraag van dit onderzoek: *"Hoe beïnvloedt het Vlaamse en Europese beleid de uitbouw van waterstoftankstations?"* Het doel van dit hoofdstuk is om een diepgaand inzicht te verschaffen in de manier waarop beleidskaders op zowel Vlaams als Europees niveau de ontwikkeling van waterstoftankstations in Vlaanderen sturen en ondersteunen. Dit inzicht wordt verkregen door enerzijds een literatuurstudie te verrichten waarin relevante Vlaamse en Europese beleidsdocumenten en rapporten worden geanalyseerd, en anderzijds door de bevindingen uit een interview met een verantwoordelijke beleidsmaker op Vlaams niveau te bespreken.

De opbouw van dit hoofdstuk is als volgt: Allereerst wordt, aan de hand van een literatuurstudie, een overzicht gegeven van de belangrijkste Vlaamse en Europese beleidsdocumenten die betrekking hebben op waterstofinfrastructuur. Hierbij worden de relevante beleidskaders en hun impact op de uitbouw van waterstoftankstations in detail toegelicht. Vervolgens worden de resultaten van een interview met een verantwoordelijke beleidsmaker op Vlaams niveau besproken, waarbij specifieke aandacht wordt besteed aan de huidige stand van zaken, beleidmatige knelpunten en toekomstige vooruitzichten voor waterstoftankstations in Vlaanderen. Door deze twee perspectieven samen te brengen, wordt in dit hoofdstuk een onderbouwd antwoord geformuleerd op de deelvraag van dit onderzoek.

4.1 Belgische situatie

Dit deel van de literatuurstudie behandelt de huidige situatie met betrekking tot waterstofontwikkeling in België, met een specifieke focus op de Vlaamse waterstofstrategie opgemaakt door WaterstofNet. De keuze voor het benadrukken van de Vlaamse strategie boven de federale strategie wordt uitgelegd, gezien de specifieke bevoegdheden en verantwoordelijkheden van de Vlaamse overheid op het gebied van mobiliteit, energie en innovatie.

Daarnaast wordt aandacht besteed aan de betrokken stakeholders in de transportsector en de specifieke doelstellingen die WaterstofNet in de Vlaamse waterstofstrategie formuleerde voor Vlaanderen. Een SWOT-analyse uit de Vlaamse waterstofstrategie wordt toegelicht, gevolgd door een beschrijving van de bredere Vlaamse waterstofvisie.

Aan de hand van de Vlaamse waterstofvisie worden de concrete plannen en projecten van de Vlaamse overheid besproken, gericht op het stimuleren van de waterstofeconomie in de regio. Diverse aspecten komen aan bod, zoals de ontwikkeling van waterstofinfrastructuur, de inzet van waterstof in verschillende mobiliteitssectoren, en de rol van belangrijke industriële netwerken en havens.

Verder worden de VLAREM-voorwaarden voor waterstoftankstations en de uitdagingen en aanbevelingen die hieruit voortvloeien behandeld. Tot slot wordt de impact van de Europese AFIR-verordening op de Belgische waterstofinfrastructuur besproken, evenals de verplichtingen die deze verordening met zich meebrengt voor EU-lidstaten.

Met deze bespreking wordt een duidelijk en gedetailleerd beeld geschetst van de huidige ambities en toekomstige ontwikkelingen op het gebied van waterstof in Vlaanderen en België als geheel.

4.1.1 Vlaamse waterstofstrategie

De keuze om de Vlaamse waterstofstrategie te bespreken in plaats van de federale strategie bij het onderwerp van waterstofontwikkeling op het gebied van mobiliteit heeft te maken met de specifieke bevoegdheden en rollen van de Vlaamse overheid in dit domein. Vlaanderen heeft aanzienlijke autonomie en verantwoordelijkheid voor beleidsontwikkeling en implementatie binnen zijn eigen grenzen, met name op het gebied van mobiliteit, energie en innovatie.

WaterstofNet heeft een duidelijke en gedetailleerde waterstofstrategie ontwikkeld die gericht is op het stimuleren van de waterstofeconomie binnen de Vlaamse regio. Dit omvat concrete plannen en projecten om waterstofinfrastructuur te ontwikkelen, zoals tankstations voor waterstofvoertuigen, en het bevorderen van het gebruik van waterstof in verschillende mobiliteitssectoren, waaronder vrachtvervoer, bussen en zelfs scheepvaart. Deze focus en initiatieven passen binnen de bredere Vlaamse doelstellingen voor duurzaamheid, energietransitie en economische ontwikkeling.

Bovendien beschikt Vlaanderen over een sterk industrieel netwerk en infrastructuur, waaronder belangrijke havens en industriële clusters, die cruciaal zijn voor de ontwikkeling en toepassing van waterstoftechnologieën. De regio heeft ook een actief samenwerkingsverband met verschillende private en publieke partners, wat de implementatie van waterstofprojecten bevordert.

Hoewel het federale niveau een ondersteunende en coördinerende rol speelt, met verantwoordelijkheden zoals de regelgeving omtrent de import en export van energie en de ontwikkeling van een nationale infrastructuur voor energie, ligt de daadwerkelijke uitvoering en ontwikkeling van mobiliteitsprojecten vaak op regionaal niveau. De federale overheid ondersteunt grote projecten met nationale of internationale impact en werkt samen met de regio's om de Europese doelstellingen te halen, maar de praktische uitvoering en toepassing van waterstof in de mobiliteitssector vallen grotendeels onder de bevoegdheid van de Vlaamse overheid.

Daarom wordt de Vlaamse waterstofstrategie besproken wanneer het gaat om waterstofontwikkeling op het gebied van mobiliteit, aangezien deze strategie specifiek is afgestemd op de regionale behoeften, infrastructuur en beleidsdoelstellingen van Vlaanderen. Dit maakt het mogelijk om gerichte en effectieve maatregelen te nemen die direct bijdragen aan de transitie naar duurzame mobiliteit binnen de regio.

De volgende secties zijn gebaseerd op Van den Broeck (2020).

4.1.1.1 Stakeholders transportsector

Bij de ontwikkeling van waterstof binnen de mobiliteit en transportsector moeten verschillende stakeholders betrokken worden om een succesvolle en geïntegreerde strategie te realiseren. Zowel de regionale (Vlaamse) als de federale overheid spelen een cruciale rol bij het ontwikkelen en implementeren van beleid, wetgeving en subsidies die waterstofprojecten ondersteunen. Beleidsmakers moeten zorgen voor een gunstig regelgevend kader en stimuleringsmaatregelen om investeringen aan te moedigen.

Bedrijven actief in de productie, distributie en toepassing van waterstof, zoals Air Liquide, Colruyt Group (DATS 24), en DEME, zijn essentiële partners. Zij investeren in infrastructuur zoals tankstations, waterstofproductie-installaties en voertuigen op waterstof. Samenwerking met autofabrikanten en transportbedrijven is eveneens cruciaal voor de ontwikkeling en inzet van waterstofvoertuigen. Universiteiten, onderzoekscentra en technologieontwikkelaars spelen een belangrijke rol bij het ontwikkelen van nieuwe waterstoftechnologieën en -toepassingen. Innovatie en onderzoek zijn nodig om de efficiëntie te verbeteren en de kosten te verlagen.

Bedrijven die zich bezighouden met vrachtvervoer, openbaar vervoer, en scheepvaart, zoals De Lijn en VDL, moeten betrokken worden bij de overgang naar waterstof. Zij kunnen waterstofvoertuigen in hun vloot integreren en bijdragen aan de ontwikkeling van nieuwe toepassingen. Beheerders van transportinfrastructuur, zoals havenautoriteiten (bijvoorbeeld Haven van Antwerpen), en bedrijven die pijpleidingen en distributienetwerken beheren (bijvoorbeeld Fluxys), zijn cruciaal voor de ontwikkeling van een robuuste waterstofinfrastructuur.

Banken, investeringsmaatschappijen en andere financiële instellingen moeten betrokken worden om de nodige financiële middelen te verschaffen voor de grootschalige uitrol van waterstofprojecten. Investeringsfondsen en subsidies kunnen de economische haalbaarheid van waterstofinitiatieven verbeteren. Organisaties die zich inzetten voor duurzaamheid en milieu, zoals Bond Beter Leefmilieu, kunnen een belangrijke rol spelen bij het bevorderen van waterstof als groene energiebron. Zij

kunnen ook bijdragen aan het vergroten van het maatschappelijk draagvlak en het informeren van het publiek.

Uiteindelijk moeten ook de eindgebruikers, zoals bedrijven en particulieren die waterstofvoertuigen gaan gebruiken, betrokken worden. Hun acceptatie en adoptie van waterstoftechnologieën zijn essentieel voor het succes op lange termijn. Door al deze stakeholders te betrekken en hun belangen en expertise te combineren, kan een geïntegreerde en effectieve waterstofstrategie voor de mobiliteit en transportsector worden ontwikkeld en geïmplementeerd.

4.1.1.2 Doelstellingen transportsector

In de Vlaamse waterstofstrategie worden specifieke doelstellingen geformuleerd voor de transportsector om de rol van waterstof in mobiliteit te versterken. Voor 2025 en 2030 zijn deze doelstellingen als volgt:

4.1.1.2.1 Doelstellingen voor 2025

- Waterstoftankstations: Tegen 2025 moeten er meer dan 20 waterstoftankstations (HRS, Hydrogen Refueling Stations) operationeel zijn in Vlaanderen. Deze tankstations moeten zowel 350 bar als 700 bar tankmogelijkheden bieden.
- Zware voertuigen: Er wordt gestreefd naar de inzet van meer dan 300 trucks en bestelwagens op waterstof. Dit aantal moet de overgang naar schoner zwaar transport stimuleren.
- Bussen: Tegen 2025 moeten er meer dan 50 waterstofbussen in gebruik zijn, ondersteund door drie specifieke waterstoftankstations voor bussen.
- Vuilniswagens: Het doel is om meer dan 25 vuilniswagens op waterstof te laten rijden.
- Binnenvaartschepen: De eerste binnenvaartschepen die op waterstof of afgeleide brandstoffen varen, moeten tegen deze tijd in gebruik zijn.
- Multifuel hubs: Twee multifuel hubs moeten operationeel zijn, waar waterstof en andere alternatieve brandstoffen beschikbaar zijn.

4.1.1.2.1 Doelstellingen voor 2030

- Waterstoftankstations: Het aantal waterstoftankstations moet tegen 2030 toenemen tot meer dan 100, verspreid over Vlaanderen en voorzien van zowel 350 bar als 700 bar tankmogelijkheden.
- Zware voertuigen: Tegen 2030 moeten er meer dan 2.500 trucks en bestelwagens op waterstof rijden, wat een substantiële bijdrage zal leveren aan de decarbonisatie van het zwaar transport.
- Bussen: Het aantal waterstofbussen moet groeien tot meer dan 250, ondersteund door tien specifieke waterstoftankstations voor bussen.
- Vuilniswagens: Er moeten tegen deze tijd meer dan 200 vuilniswagens op waterstof operationeel zijn.
- Binnenvaartschepen: Meer dan 25 binnenvaartschepen moeten op waterstof of afgeleide brandstoffen varen.
- Multifuel hubs: Zeven multifuel hubs moeten operationeel zijn, om de diversiteit en beschikbaarheid van alternatieve brandstoffen te waarborgen.
- Treintrajecten: De mogelijkheden voor waterstoffreinen moeten verkend worden, met als doel de eerste trajecten op waterstof te realiseren.

4.1.1.3 SWOT-analyse

De SWOT-analyse in de Vlaamse Waterstofstrategie 2025-2030 biedt een gedetailleerd overzicht van de huidige situatie en toekomstperspectieven voor de waterstofontwikkeling in Vlaanderen. De regio heeft aanzienlijke sterktes, zoals een groot aantal bedrijven met expertise in waterstoftechnologie, verenigd in de Waterstof Industrie Cluster, en goede interconnectiviteit met buurlanden voor de import van groene stroom en gas. Daarnaast bieden belangrijke havens zoals die van Antwerpen

uitstekende connectiviteit met offshore wind en importmogelijkheden voor waterstof. Ook zijn er talrijke potentiële gebruikers, waaronder de binnenvaart en de logistieke sector, en heeft Vlaanderen een sterke petrochemische sector die van waterstof kan profiteren.

Tegelijkertijd kent Vlaanderen enkele zwaktes. Hoewel er een overheidsvisie is, ontbreken concrete doelstellingen en acties, en de binnenlandse markt voor waterstoftechnologieën is nog niet volledig ontwikkeld. Bovendien heeft Vlaanderen weinig eigen hernieuwbare energiebronnen en zijn de elektriciteitskosten hoog. Het onderzoek naar waterstof is verspreid over verschillende instellingen zonder voldoende coördinatie, en de regelgeving is ingewikkeld en verdeeld over verschillende niveaus. Er zijn ook nog weinig actuele toepassingen van waterstof als energiedrager, en er is beperkte financiële ondersteuning voor grootschalige pilootprojecten.

De Vlaamse waterstofstrategie biedt echter ook veel kansen. Vlaanderen kan profiteren van Europese waterstofstrategieën, IPCEI's en de Green Deal. Een open overheidsvisie biedt bedrijven de mogelijkheid om bottom-up visies te formuleren en in te spelen op de overheidsvisie. Samenwerking met Nederland en andere Noordzeelanden biedt verdere kansen, en de industriële clusters in havens bieden mogelijkheden voor een geïntegreerde aanpak van waterstofprojecten. De bestaande gasinfrastructuur kan mogelijk worden omgebouwd voor waterstoftransport, en bedrijven met hoofdzetels buiten Vlaanderen willen investeren waar het klimaat voor waterstofinvesteringen gunstig is.

Er zijn echter ook bedreigingen. Buurlanden hebben grotere budgetten voor waterstofprojecten en ambitieuze doelstellingen, wat concurrentie kan vormen voor Vlaanderen. De budgettaire ruimte na de coronapandemie is beperkt, wat nieuwe investeringen kan bemoeilijken. Bovendien zijn er nog veel onduidelijkheden in de regelgeving op Vlaams, federaal en Europees niveau. Deze SWOT-analyse toont aan dat door het benutten van sterktes, aanpakken van zwaktes, grijpen van kansen en mitigeren van bedreigingen, Vlaanderen een leidende rol kan spelen in de waterstofeconomie van Europa.

4.1.2 Vlaamse Waterstofvisie

Deze sectie is gebaseerd op Mededeling aan de Vlaamse Regering (2020).

Vlaanderen positioneert zich als een Europese koploper op het gebied van waterstoftechnologie door een uitgebreide strategie die gericht is op onderzoek, innovatie en duurzame economische groei. De Vlaamse waterstofvisie benadrukt het belang van het versterken van de onderzoeksbasis binnen het domein van waterstoftechnologie. Door samen te werken met universiteiten, kennisinstellingen en industriële partners, wordt er een onderzoeksagenda ontwikkeld die technologische doorbraken moet versnellen. Dit is essentieel voor de industriële transitie naar een koolstofarme economie.

Daarnaast richt Vlaanderen zich op het versterken van het industrieel ecosysteem door technologieaanbieders en productiebedrijven te ondersteunen in de productie, transport, opslag en het gebruik van waterstof. Het doel is om een competitief industrieel ecosysteem te creëren dat kan profiteren van de groeiende wereldwijde markt voor waterstoftechnologie. Dit omvat ook de stimulering van de adoptie en toepassing van waterstof in verschillende sectoren, zoals de staal- en chemische industrie, zwaar transport en de gebouwde omgeving. Piloot- en demonstratieprojecten spelen hierbij een cruciale rol, omdat zij de opschaling van de technologie ondersteunen en zo bijdragen aan de klimaatdoelstellingen van Vlaanderen.

Om voldoende schaalvergroting te realiseren, zet Vlaanderen in op samenwerking met buurlanden zoals Nederland en Duitsland. Door grensoverschrijdende ecosystemen en strategische partnerships te ontwikkelen, wil Vlaanderen de import en distributie van waterstof bevorderen. Dit internationale aspect is een integraal onderdeel van de Vlaamse strategie en biedt mogelijkheden om de positie van Vlaamse havens als draaischijf in de economie te versterken.

De Vlaamse regering zet zich in voor een stimulerend beleid dat de uitrol van waterstoftechnologie bevordert. Dit omvat fiscale maatregelen, investeringen in infrastructuur en het faciliteren van

samenwerking tussen publieke en private stakeholders. Specifieke aandacht gaat uit naar de ontwikkeling van waterstof(tank)infrastructuur in de Vlaamse havens en de ondersteuning van competentieontwikkeling op de arbeidsmarkt. De combinatie van deze strategieën maakt het mogelijk voor Vlaanderen om zijn ambitie waar te maken en een Europese koploper te worden in de waterstoftechnologie.

Een cruciaal onderdeel van de Vlaamse waterstofvisie is de ontwikkeling van waterstof(tank)infrastructuur voor zwaar wegtransport. Vlaanderen beschikt over Europese topspelers in zwaar vervoer op waterstof, waaronder bussen, vuilniswagens en scheepvaart. De focus ligt op het creëren van een industrieel waardeketen voor waterstof als brandstof voor zwaar industrieel vervoer. Dit omvat de uitbouw van een ecosysteem voor hernieuwbare waterstofproductie, distributie, polyvalente tankstations en de uitrol van waterstoftankstations voor vrachtwagens langs belangrijke logistieke corridors. Deze infrastructuur is essentieel voor de ondersteuning van zwaar wegtransport en draagt bij aan de reductie van non-ETS-uitstoot (Non-Emissions Trading System).

De Vlaamse waterstofvisie vermeldt specifieke initiatieven zoals het Hyoffwind-project in de haven van Zeebrugge, dat hernieuwbare energie gebruikt om groene waterstof te genereren voor mobiliteit, industrie en voor injectie in het aardgasnetwerk. Eveneens wordt in de haven van Oostende een project opgezet voor de bouw van een grootschalige fabriek voor groene vloeibare waterstof, die een belangrijke bijdrage wil leveren aan het koolstofarm maken van de transportcluster in de EU. Deze projecten illustreren de brede inzet van Vlaanderen op waterstofinfrastructuur voor zwaar wegtransport en de duurzame transitie van de economie.

In totaal wordt meer dan 100 miljoen euro vrijgemaakt voor het ondersteunen van waterstofinfrastructuur. Dit bedrag is bedoeld om diverse waterstofprojecten te financieren, waaronder piloot- en demonstratieprojecten die verder gaan dan de gangbare staatssteunregels. Door deze financiële ondersteuning wil de Vlaamse regering de ontwikkeling en opschaling van waterstofinfrastructuur in Vlaanderen stimuleren en bijdragen aan de duurzame transitie van de economie.

4.1.3 VLAREM-voorwaardenkader

Deze secties zijn gebaseerd op Custers (2020).

Waterstoftankstations in Vlaanderen worden gereguleerd onder een specifiek kader dat vastgelegd is in de VLAREM-regelgeving (Vlaams Reglement betreffende de Milieuvergunning). Dit kader omvat zowel algemene als specifieke voorwaarden voor waterstoftankstations en is bedoeld om de veiligheid, milieu-impact en operationele aspecten van deze infrastructuur te waarborgen.

Waterstoftankstations in Vlaanderen vallen onder de VLAREM II-regelgeving, waarin de milieu-gerelateerde bepalingen worden beschreven. Deze regelgeving bevat algemene voorwaarden die van toepassing zijn op alle klassen van tankstations en specifieke sectorale voorwaarden voor waterstoftankstations. De sectorale voorwaarden voor waterstoftankstations zijn echter nog beperkt, wat in het verleden heeft geleid tot het gebruik van vergelijkbare kaders zoals de Nederlandse PGS-35 richtlijnen voor waterstoftankstations en kaders voor LPG- en CNG-stations.

In 2020 heeft de Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO) een BBT-studie (Beste Beschikbare Technieken) uitgevoerd. Deze studie biedt een gedetailleerd overzicht van de beste beschikbare technieken voor de sector van waterstoftankstations en bevat aanbevelingen voor de opmaak van sectorale voorwaarden binnen VLAREM II. Hoofdstuk 6 van de BBT-studie is met name relevant voor de aanbevelingen en bevat specifieke criteria zoals minimale technische eisen, risicoafstandsregels en bouw- en constructievoorschriften.

Voor de bouw en exploitatie van een waterstoftankstation moet een exploitant een omgevingsvergunning aanvragen. Gezien waterstoftankstations als inrichtingen van klasse 1 worden beschouwd, dient de omgevingsvergunning bij de (deputatie van de) provincie te worden ingediend. De vergunningverlenende overheid beoordeelt de mogelijke hinder voor mens en milieu en kan

aanvullende bijzondere voorwaarden opleggen, waaronder een toetsing van het projectvoorstel aan de BBT-studie.

Gedurende de exploitatie van het waterstoftankstation worden regelmatige keuringen en inspecties uitgevoerd door de milieu-inspectie, waarbij gebruik wordt gemaakt van de keuringsschema's uit de BBT-studie.

Hoewel de aanbevelingen uit de BBT-studie nog niet volledig zijn geïntegreerd in de VLAREM-regelgeving, worden ze wel al in de praktijk toegepast. De sector staat echter voor uitdagingen, zoals de beperkte locatiemogelijkheden door interne en externe veiligheidsafstanden, en de hoge investerings- en onderhoudskosten. Er is ook behoefte aan standaardisatie van ontwerpen en technieken, wat de groei en innovatie in de sector zou kunnen bevorderen.

Tot slot, wordt de huidige regulering als een noodzakelijke stap gezien om een veilige en milieuvriendelijke uitrol van waterstoftankstations in Vlaanderen te waarborgen. De implementatie van de BBT-studie in de sectorale voorwaarden van VLAREM zal hierbij een cruciale rol spelen.

4.1.4 AFIR-verordening

Deze secties zijn gebaseerd op European Union (2023).

De Alternative Fuels Infrastructure Regulation (AFIR) is een verordening van de Europese Unie die gericht is op de ontwikkeling van infrastructuur voor alternatieve brandstoffen, zoals waterstof. Deze verordening heeft als doel een uitgebreid netwerk van tankstations te realiseren om de transitie naar duurzame mobiliteit te bevorderen. De AFIR maakt deel uit van de bredere Europese Green Deal en streeft naar een vermindering van de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen en de uitstoot van broeikasgassen.

Voor België betekent de implementatie van de AFIR dat er aanzienlijke inspanningen nodig zijn om te voldoen aan de eisen van de verordening. Dit houdt in dat België een netwerk van waterstoftankstations moet opzetten dat zowel stedelijke gebieden als belangrijke transportcorridors omvat. Hierdoor wordt de beschikbaarheid en toegankelijkheid van waterstof als brandstof gewaarborgd, wat cruciaal is voor de ondersteuning van duurzame mobiliteit in het land.

4.1.4.1 Verplichtingen voor EU-lidstaten

Artikel 6 van de AFIR leggen specifieke verplichtingen op aan de EU-lidstaten met betrekking tot de realisatie van een netwerk van waterstoftankstations voor wegvoertuigen. Deze verplichtingen zijn bedoeld om een geharmoniseerde aanpak te waarborgen en de ontwikkeling van waterstofinfrastructuur te versnellen.

4.1.4.2 Artikel 6

1. Minimale uitrol tegen 2030: Lidstaten moeten ervoor zorgen dat er uiterlijk op 31 december 2030 een minimumaantal openbaar toegankelijke waterstoftankstations is uitgerold. Het TEN-T-kernnetwerk moet dan zijn uitgerust met tankstations die een minimale cumulatieve capaciteit van 1 ton per dag hebben en een dispenser van ten minste 700 bar. De maximale afstand tussen deze tankstations mag niet meer dan 200 km bedragen. Bovendien moet in elk stedelijk knooppunt ten minste één openbaar toegankelijk waterstoftankstation beschikbaar zijn tegen dezelfde datum.
2. Analyse voor beste locaties: Lidstaten moeten een analyse maken om de beste locaties voor deze tankstations te bepalen, waarbij ook de uitrol in multimodale knooppunten wordt onderzocht.
3. Nationale beleidskaders en trajecten: In hun nationale beleidskaders moeten lidstaten een duidelijk lineair traject vastleggen richting de verwezenlijking van de doelstellingen voor

2030. Dit omvat ook een indicatief streefcijfer voor 2027 om voldoende dekking van het TEN-T-kernnetwerk te waarborgen.

4. Samenwerking naburige lidstaten: Naburige lidstaten moeten ervoor zorgen dat de maximale afstand op grensoverschrijdende tracés van het TEN-T-kernnetwerk niet wordt overschreden.
5. Capaciteitsvermindering bij lage verkeersdichtheid: Onder bepaalde voorwaarden kunnen lidstaten de vereiste capaciteit van een openbaar toegankelijk waterstoftankstation met maximaal 50% verminderen langs wegen met een lage verkeersdichtheid, mits aan de afstands- en drukvereisten wordt voldaan. Lidstaten moeten dergelijke gevallen melden en evalueren.
6. Uitzonderingen voor specifieke gebieden: Lidstaten kunnen ervoor kiezen om de vereisten van artikel 6 niet van toepassing te laten zijn op ultraperifere gebieden en bepaalde eilanden, mits zij deze beslissingen onderbouwen en rapporteren aan de Commissie.

Door deze verplichtingen na te leven, dragen EU-lidstaten, waaronder België, bij aan de ontwikkeling van een robuuste waterstofinfrastructuur die essentieel is voor de transitie naar duurzame mobiliteit.

4.2 Bevindingen van de Europese Rekenkamer

De volgende secties zijn gebaseerd op European Court of Auditors (2024).

De Europese Rekenkamer (ECA) heeft een gedetailleerd onderzoek uitgevoerd naar de ontwikkeling van de waterstofmarkt in de Europese Unie, met specifieke aandacht voor de productiecapaciteit, regelgeving, en infrastructuur, waaronder waterstoftankstations. Dit onderzoek is van belang voor België, dat zich inzet om een vooraanstaande rol te spelen in de ontwikkeling van hernieuwbare waterstof.

De ECA concludeerde dat de Europese Commissie gedeeltelijk succesvol was in het scheppen van de noodzakelijke voorwaarden voor de ontwikkeling van de waterstofmarkt. Hoewel er aanzienlijke vooruitgang is geboekt, bestaan er nog steeds belangrijke uitdagingen in de gehele waterstofwaardeketen. De Commissie heeft ambitieuze streefcijfers vastgesteld voor de productie en invoer van hernieuwbare waterstof, maar deze doelen zijn eerder gebaseerd op politieke wil dan op gedegen analyses. Dit leidt ertoe dat het onwaarschijnlijk is dat de EU haar streefcijfers voor 2030 zal halen. Bovendien is er gebleken dat de lidstaten, waaronder België, hun eigen nationale plannen en streefcijfers niet altijd hebben afgestemd op de niet-bindende EU-doelen, wat resulteert in een gebrek aan coherentie en consistentie in de Europese waterstofstrategie.

België is een van de lidstaten die al aanzienlijke stappen heeft gezet in de ontwikkeling van een waterstofstrategie. Volgens de ECA heeft België echter geen specifieke streefcijfers vastgesteld voor de productie van hernieuwbare waterstof, wat een uitdaging kan vormen voor de verdere ontwikkeling van waterstoftankstations. Hoewel België erkent dat infrastructuur essentieel is voor de waterstofeconomie, bevat de nationale waterstofstrategie weinig gedetailleerde plannen of maatregelen om deze infrastructuur, waaronder tankstations, te realiseren. Dit gebrek aan concrete planning en de financiering ervan kan de uitrol van waterstoftankstations vertragen en de haalbaarheid van de Belgische doelstellingen ondermijnen.

In de analyse van de Europese Rekenkamer wordt duidelijk dat België tot op heden geen specifieke capaciteit voor elektrolyse-installaties heeft vastgesteld, in tegenstelling tot sommige andere lidstaten. Waar Nederland en Duitsland ambitieuze plannen hebben aangekondigd met respectievelijk 4,5 miljard EUR voor een nationaal waterstofnetwerk en 19,8 miljard EUR voor een kernnetwerk van 9.700 km, blijft België achter met het ontbreken van een duidelijk financieel engagement voor dergelijke infrastructuur. Dit kan problematisch zijn, aangezien het ontbreken van dergelijke investeringen het moeilijker maakt om de waterstofinfrastructuur, zoals tankstations, tijdig uit te rollen en operationeel te maken tegen 2030.

De ECA heeft een aantal belangrijke conclusies en aanbevelingen geformuleerd. Ze benadrukken dat er dringend behoefte is aan betere coördinatie tussen de EU en de lidstaten, inclusief België, om de

gestelde doelen te bereiken. België wordt aangeraden om zijn nationale strategie te verfijnen en streefcijfers vast te leggen die in lijn zijn met de bredere EU-doelstellingen. Verder moet er meer aandacht worden besteed aan de ontwikkeling van infrastructuur, zoals waterstof tankstations, waarbij specifieke plannen en financieringsmechanismen worden opgenomen in nationale energie- en klimaatplannen.

De ECA concludeert dat hoewel er veel potentieel is voor de waterstofmarkt in België, de succesvolle uitrol van waterstof tankstations en andere essentiële infrastructuur afhankelijk is van verbeterde nationale planning, heldere doelstellingen, en een gecoördineerde aanpak op zowel nationaal als EU-niveau.

4.3 Kabinet van de Vlaams minister van Mobiliteit en Openbare Werken

Voor dit interview werd gesproken met Soetkin Jhaes, die als raadgever specifiek verantwoordelijk is voor het waterstofbeleid binnen het kabinet van de Vlaams minister van Mobiliteit en Openbare Werken. Het doel van dit interview was om een diepgaand inzicht te verkrijgen in het Vlaamse beleidskader met betrekking tot waterstof, en om de huidige stand van zaken, de beleidsmatige knelpunten, en de toekomstige vooruitzichten voor de ontwikkeling van waterstof tankstations in de regio beter te begrijpen. Haar inzichten bieden een waardevol perspectief op deze kwesties.

4.3.1 Actieplan Clean Power for Transport 2015

In het actieplan Clean Power for Transport, dat in 2015 werd gelanceerd, stelde de Vlaamse regering het ambitieuze doel om tegen 2020 twintig waterstof tankstations te installeren. Anno 2024 zijn er echter slechts zeven publiek toegankelijke waterstof tankstations operationeel in Vlaanderen. Dit roept de vraag op waarom deze doelstelling niet is gerealiseerd en of deze doelstelling mogelijk te ambitieus was.

Volgens Jhaes is een van de belangrijkste redenen hiervoor dat de sector van schone energie voor transport zich in een snel ontwikkelende en evoluerende fase bevindt. De verwachtingen en aannames die in 2015 werden gemaakt, zijn sindsdien veranderd. Destijds werd gedacht dat waterstof de eerste zero-emissie technologie zou zijn die op grote schaal zou doorbreken, vooral omdat de technologie voor elektrische voertuigen nog in de kinderschoenen stond. Voor zwaar vervoer, zoals vrachtwagens, werd aangenomen dat waterstof de voorkeur zou krijgen boven elektriciteit.

Echter, de realiteit in 2024 is anders. Elektrische voertuigen, inclusief zware vrachtwagens, hebben aanzienlijke vooruitgang geboekt, vooral voor korte afstanden. Dit heeft geleid tot een verschuiving in de markt, waarbij veel bedrijven de voorkeur geven aan elektrificatie boven waterstof, voornamelijk vanwege de hoge kosten van waterstof. Dit kostenaspect is een vicieuze cirkel gebleken: zolang er geen grote vraag is naar waterstofvoertuigen, blijft waterstof duur, en zolang het duur is, zullen consumenten en bedrijven niet snel overschakelen naar waterstofvoertuigen.

Bovendien zijn enkele waterstof tankstations die in de afgelopen jaren werden opgericht, failliet gegaan door een gebrek aan klanten. Dit toont aan hoe moeilijk het is om in een nieuwe sector met een nog onzekere markt te opereren. Het beleid kan proberen te anticiperen op toekomstige ontwikkelingen, maar het is onmogelijk om met zekerheid te voorspellen hoe de markt zal reageren.

Desalniettemin blijft het belangrijk om ambitieuze doelen te stellen. Europa heeft bijvoorbeeld doelstellingen gezet om tegen 2030 over een bepaald aantal waterstof tankstations te beschikken. België, hoewel een klein land met beperkte middelen, probeert zijn steentje bij te dragen aan deze doelstellingen. Echter, er is ook een oproep aan Europa om meer financiële ondersteuning te bieden om te zorgen voor een gelijk speelveld tussen de lidstaten. Landen met meer middelen, zoals

Duitsland, kunnen hun sectoren beter ondersteunen, wat leidt tot een scheve concurrentie binnen de Europese Unie.

4.3.2 Alternatieve oplossingen en modal shift

Een belangrijk aspect van het vergroenen van mobiliteit in Vlaanderen betreft het realiseren van een modal shift naar duurzamere vormen van transport. De raadgever inzake Europees en internationaal beleid, Klimaat en Clean Power for Transport, benadrukt dat er verschillende strategieën zijn om mobiliteit te verduurzamen. Naast het verminderen van voertuigkilometers, wat vooral haalbaar is bij personenvervoer door bijvoorbeeld telewerken te bevorderen, is het verschuiven van transportmodaliteiten een cruciale stap.

Bij goederenvervoer is het verminderen van voertuigkilometers minder eenvoudig. Daarom ligt de focus op het verschuiven van transport naar milieuvriendelijkere opties zoals trein- en binnenvaarttransport. Vlaanderen heeft aanzienlijke investeringen gedaan om dit te faciliteren, zoals het verhogen van bruggen boven het Albertkanaal om schepen met vier containers hoog doorgang te verlenen. Dit maakt binnenvaart aantrekkelijker en toegankelijker, aangezien 80% van de Vlaamse bedrijven binnen een straal van 10 kilometer van een bevaarbare waterweg ligt.

Daarnaast is er ook geïnvesteerd in de uitbreiding en elektrificatie van het spoorwegennet, wat heeft geleid tot de opening van nieuwe spoorcorridors zoals die van Genk tot Zeebrugge. Dit vermindert de noodzaak voor vrachtvervoer over de weg, wat niet alleen de CO₂-uitstoot en stikstofuitstoot vermindert, maar ook de verkeersveiligheid ten goede komt door de druk op de wegen te verlagen.

Hoewel deze modal shift veel voordelen biedt, is het niet voor alle bedrijven rendabel of realistisch. Daarom blijft het noodzakelijk om de resterende voertuigkilometers te verschonen. Vlaanderen ondersteunt daarom ook zero-emissie vrachtwagens, zowel elektrische als waterstofmodellen, door regels aan te passen die deze voertuigen aantrekkelijker maken. Bijvoorbeeld, zero-emissie vrachtwagens mogen zwaarder en langer zijn om de extra ruimte en gewicht van batterijen of waterstofcellen te accommoderen. Dit zorgt ervoor dat bedrijven minder lading hoeven te missen en maakt de overstap naar zero-emissie modellen aantrekkelijker.

Door deze gecombineerde aanpak van modal shift en het verschonen van overblijvende voertuigkilometers, streeft Vlaanderen naar een duurzame en efficiënte mobiliteit die bijdraagt aan het verminderen van de uitstoot en het verbeteren van de verkeersveiligheid. Het beleid is erop gericht om zowel op korte als lange termijn een significante impact te hebben op de verduurzaming van de transportsector in Vlaanderen.

4.3.3 Subsidies voor waterstoftankstations in Vlaanderen

Het subsidielandschap voor waterstoftankstations in Vlaanderen is zeer complex en versnipperd, wat het lastig maakt om een exact bedrag te bepalen dat wordt uitgegeven aan deze infrastructuur. Deze complexiteit komt voort uit het feit dat subsidies op verschillende manieren en via verschillende kanalen bij ondernemingen terechtkomen, en afhankelijk zijn van diverse factoren zoals fiscale voordelen, directe subsidies en de prestaties van het bedrijf.

Fiscale voordelen, zoals de verhoogde investeringsaftrek, spelen een belangrijke rol in de ondersteuning van waterstof- en elektrische vrachtwagens. Deze aftrek bedraagt 35% voor zero-emissie vrachtwagens, maar de daadwerkelijke impact hiervan varieert sterk afhankelijk van hoe goed of slecht een bedrijf presteert. Dit maakt het moeilijk om een algemeen beeld te schetsen van de financiële steun die bedrijven ontvangen via fiscale maatregelen.

Voor waterstoftankstations zelf worden subsidies vaak ad hoc verstrekt en beheerd door het Agentschap Innovatie en Ondernemen (VLAIO). Dit komt omdat waterstoftankstations en de bijbehorende technologieën nog steeds onder de noemer 'innovatie' vallen en niet direct onder de bevoegdheid van de afdeling Mobiliteit. Dit geldt ook voor subsidies voor waterstofvrachtwagens,

waarbij KMO's 22,5% subsidie kunnen krijgen en grote ondernemingen 18%. Voor elektrische vrachtwagens liggen deze percentages hoger, namelijk 32% voor KMO's en 24% voor grote bedrijven.

Een recent voorbeeld van een dergelijke ad hoc subsidie is de toekenning van 30 miljoen euro voor de bouw van een nieuw waterstoftankstation. Dit project wordt uitgevoerd in samenwerking met bedrijven zoals Colruyt, dat zelf waterstofvrachtwagens zal aanschaffen. Colruyt werkt hierbij samen met DATS24, een dochteronderneming, om de rendabiliteit van het waterstoftankstation vanaf de opstart te garanderen. Deze samenwerking toont aan hoe belangrijk het is dat projecten sterk genoeg zijn om in aanmerking te komen voor overheidssteun.

Daarnaast zijn er andere grote waterstofprojecten, zoals die van ArcelorMittal, die zich richten op de staalproductie via waterstof. Ook voor dit soort proefprojecten worden miljoenen euro's aan subsidies uitgetrokken. De toewijzing van deze middelen hangt echter af van verschillende factoren, waaronder de beschikbaarheid van budgetten bij VLAIO en de timing van de aanvraag binnen het begrotingsjaar. Dit betekent dat bedrijven die vroeg in het jaar een aanvraag indienen, mogelijk meer steun kunnen ontvangen dan bedrijven die later in het jaar een aanvraag indienen, wanneer de budgetten al grotendeels zijn uitgeput.

De versnippering en de afhankelijkheid van verschillende factoren maken het onmogelijk om een exact getal te plakken op het totaal aan subsidies dat beschikbaar is voor waterstoftankstations in Vlaanderen. Bovendien valt de financiering van deze stations niet direct onder de bevoegdheid van de afdeling Mobiliteit, wat de beschikbaarheid van gedetailleerde cijfers verder bemoeilijkt. Indien er echter specifieke vragen zijn over de subsidies, kan er altijd contact worden opgenomen met een collega van VLAIO, die meer inzicht kan bieden in de beschikbare gegevens en de toewijzingsprocessen.

4.3.3.1 Vergelijking met buitenlandse subsidies

In het buitenland, zoals in Nederland, wordt de rendabiliteit van waterstoftankstations vaak gewaarborgd door samenwerkingen tussen waterstofaanbieders en afnemers. Dit zorgt ervoor dat er vanaf de opstart al een zekere mate van afname gegarandeerd is, wat het kip-of-ei-probleem helpt te overwinnen.

Jehaes benadrukt dat de overheid een belangrijke rol speelt in het creëren van de juiste voorwaarden voor marktacceptatie. Een voorbeeld hiervan is de succesvolle uitrol van laadinfrastructuur voor elektrische voertuigen in Vlaanderen, wat heeft bijgedragen aan een toename van het aantal elektrische voertuigen. Een vergelijkbare aanpak zou kunnen worden toegepast voor waterstofinfrastructuur, waarbij de overheid investeert in tankstations zodra er meer duidelijkheid is over de marktbehoefte en de beschikbaarheid van waterstofvoertuigen.

4.3.3.2 Timing

Voor de toekomst is het belangrijk om het juiste moment te kiezen voor verdere investeringen in waterstofinfrastructuur. Dit betekent dat de overheid nauw moet samenwerken met de industrie om te bepalen wanneer er voldoende vraag is naar waterstofvoertuigen om extra tankstations rendabel te maken. Hierdoor wordt voorkomen dat er te veel tankstations komen die niet worden gebruikt, wat kan leiden tot faillissementen.

4.3.4 Verordening betreffende infrastructuur voor alternatieve brandstoffen

De AFIR-verordening van de Europese Unie stelt dat België tegen 2030 over 15 waterstoftankstations moet beschikken. Dit is een belangrijke mijlpaal in de inspanningen om de infrastructuur voor alternatieve brandstoffen uit te breiden en de mobiliteitssector te verduurzamen. Volgens Soetkin

Jehaes is Vlaanderen een groot voorstander van deze verordening, die van een richtlijn naar een verordening is omgevormd om directe werking in alle lidstaten te garanderen zonder noodzaak voor nationale omzetting.

Vlaanderen heeft al aanzienlijke vooruitgang geboekt met betrekking tot laadinfrastructuur, zoals het realiseren van ultrasnellaadinfrastructuur om de 25 kilometer langs belangrijke verkeersassen, terwijl de Europese doelstelling 60 kilometer is. Deze proactieve aanpak laat zien dat Vlaanderen vaak ambitieuzer is dan de Europese richtlijnen, wat ook geldt voor waterstoftankstations.

De haalbaarheid van de doelstelling om 15 waterstoftankstations tegen 2030 te realiseren, wordt als realistisch beschouwd, maar vereist aanzienlijke inspanningen. Innovatieve oplossingen zoals mobiele waterstoftankstations kunnen een interessante mogelijkheid bieden om locaties te testen en de infrastructuur flexibeler uit te breiden.

De AFIR-verordening biedt een kader voor de uitrol van infrastructuur voor alternatieve brandstoffen in Europa, met specifieke doelstellingen voor waterstoftankstations. Vlaanderen heeft zich proactief opgesteld door ambitieuzere doelen te stellen dan de Europese richtlijnen en door innovatieve oplossingen te verkennen. Hoewel de realisatie van deze doelen uitdagend is, is de inzet en samenwerking tussen overheid en industrie essentieel om deze doelstellingen te behalen en de mobiliteit in Vlaanderen te verduurzamen. Zoals Jehaes aangeeft: "Ik denk dat het realistisch is wat betreft waterstof, maar er gaat wel hard gewerkt aan moeten worden".

4.3.5 Wetgevende kader

Voor zowel LNG-stations als waterstofstations ontbreekt momenteel een specifiek voorwaardenkader in VLAREM II. Wel worden er regelmatig bijzondere voorwaarden opgenomen in de omgevingsvergunningen, en zijn de Best Beschikbare Technieken (BBT) wel vastgelegd. Dit roept de vraag op waarom een dergelijk kader ontbreekt in VLAREM II en wat de mogelijke implicaties zijn voor huidige verdelers van waterstof in Vlaanderen, vooral met betrekking tot rechtszekerheid.

De raadgever inzake Europees en internationaal beleid, Klimaat en Clean Power for Transport van de Vlaams minister van Mobiliteit en Openbare Werken, legt uit dat VLAREM II niet onder haar bevoegdheid valt, maar dat dergelijke beslissingen vaak beleidsmatige keuzes zijn. Ze zegt: "Soms zijn dat beleidsmatige keuzes die er worden gemaakt, van kijk we gaan dat niet doen om die en die reden. Wat vaak ook een oorzaak is waarom bepaalde zaken niet in regelgeving terechtkomen, is gewoon omdat er binnen de Vlaamse Regering geen akkoord over gevonden kan worden". Dit impliceert dat er soms tegenstrijdige visies binnen de regering zijn die tot een impasse leiden.

Hoewel een vastgelegde regelgeving bij decreet de rechtszekerheid zou vergroten, benadrukt Jehaes dat de huidige praktijk van het opnemen van specifieke voorwaarden in omgevingsvergunningen ook effectief werkt. Ze vergelijkt dit met de benadering die is toegepast voor de elektrische laadinfrastructuur. Hoewel er geen wettelijke verplichting is om laadinfrastructuur op te nemen in nieuwe aanbestedingen, heeft het kabinet van de minister afspraken gemaakt met het Agentschap Wegen en Verkeer (AWV) om ervoor te zorgen dat elke nieuwe aanbesteding voor een dienstzone standaard laadinfrastructuur bevat. Waar dit enkele jaren geleden alleen betrekking had op gewone laadinfrastructuur, worden nu ook voorzieningen voor vrachtwagens opgenomen.

De implicaties voor huidige verdelers van waterstof zijn divers. Het ontbreken van een formeel voorwaardenkader kan leiden tot onzekerheid, maar de praktijk van het opnemen van voorwaarden in omgevingsvergunningen biedt toch enige mate van zekerheid. Jehaes benadrukt dat de sector zich heeft aangepast aan deze werkwijze en dat ze vaak op de hoogte zijn van de verwachte vereisten: "Die sector, die kent de klappen van de zweep intussen ook. En ik denk wel dat die weet van oké goed, als dit bij de vereisten of de voorwaarden hoort, dan zal het waarschijnlijk vanaf nu wel altijd zo zijn".

Desondanks erkent Jehaes dat formele regelgeving altijd de voorkeur geniet voor rechtszekerheid. Ze zegt: "Natuurlijk is het altijd wel gemakkelijk en zeker qua rechtszekerheid veiliger voor iedereen

wanneer dat dat ergens in bepaalde regelgeving kan worden vastgelegd". Dit benadrukt de noodzaak voor een duidelijk en vastgelegd kader om de groei en stabiliteit van de waterstofinfrastructuur in Vlaanderen te waarborgen.

In conclusie, hoewel het ontbreken van een specifiek voorwaardenkader in VLAREM II voor waterstofstations een uitdaging vormt, zorgen de huidige praktijken en bijzondere voorwaarden in omgevingsvergunningen voor een zekere mate van continuïteit en voorspelbaarheid voor verdelers. Het blijft echter wenselijk dat er in de toekomst een formeel kader wordt vastgesteld om de rechtszekerheid verder te versterken.

4.3.6 Belemmeringen ontwikkeling waterstofinfrastructuur

In het huidige beleid zijn er verschillende tekortkomingen die de ontwikkeling van een netwerk van waterstofstations in Vlaanderen belemmeren. Een van de grootste uitdagingen is het aanzienlijke energieverlies dat optreedt bij het gebruik van waterstof in voertuigen. Dit verlies kan oplopen tot wel 80 procent, wat een groot nadeel is binnen de waterstofsector. Dit energieverlies is onvermijdelijk en vormt een fundamenteel probleem voor de efficiëntie van waterstof als brandstof.

Daarnaast is de geografische spreiding van de waterstofproductie een andere uitdaging. Hoewel het ideaal zou zijn om de maakindustrie in Vlaanderen te hebben, is dit niet altijd mogelijk. Projecten waarbij waterstof in andere landen wordt geproduceerd en vervolgens naar België wordt getransporteerd, brengen veel energieverlies met zich mee, wat inefficiënt is.

In het vrachtvervoer zijn er bovendien operationele problemen, zoals beperkingen in gewicht, lengte en hoogte van vrachtwagens, wat hen een concurrentieel nadeel oplevert ten opzichte van conventionele voertuigen. Om deze problemen aan te pakken, is het initiatief ViaVia opgericht, waarbij stakeholders zoals WaterstofNet betrokken zijn. ViaVia bestaat uit vijf werkgroepen die zich richten op verschillende transportmodi en werken aan het identificeren en oplossen van knelpunten in de vergroening van het vrachtvervoer.

Jehaes stelt dat een soortgelijke taskforce specifiek voor de waterstoftransitie zou kunnen helpen om knelpunten in zowel de mobiliteit als de industriële toepassingen van waterstof aan te pakken. Daarnaast is er volgens haar meer financiële ondersteuning en regulering op Europees niveau nodig om de gigantische investeringen die hiervoor nodig zijn, mogelijk te maken en een gelijk speelveld te creëren voor alle betrokken partijen.

4.3.7 Realitycheck Europese Rekenkamer

De European Court of Auditors (ECA) heeft onlangs aangegeven dat de doelstellingen die Europa heeft gesteld op het gebied van waterstof mogelijk onrealistisch zijn. Dit roept vragen op over de haalbaarheid van deze doelstellingen voor zowel België als Vlaanderen. Soetkin Jehaes reageert op deze zorgen door te wijzen op eerdere ervaringen met de uitrol van laadinfrastructuur voor elektrische voertuigen in Vlaanderen.

Jehaes benadrukt dat er vaak inschattingen worden gemaakt door verschillende instanties, overheden of private initiatieven die stellen dat bepaalde doelen niet haalbaar zijn. Ze illustreert dit met het voorbeeld van de laadinfrastructuur in Vlaanderen. "In 2021 waren er 4.000 laadpalen, en daar hebben ze van 2014 tot 2021 hard aan gewerkt. Maar het moment dat we de aanpak wijzigden en kozen voor een driedelig beleid, waarbij we specifiek laadpalen voorzagen voor mensen die niet thuis konden opladen, op werkplekken en bij tankstations, en ultrasnelladers langs grote verkeersassen, in combinatie met subsidies en een publieke-private samenwerking, veranderde alles. Vanaf dat moment kwamen er steeds meer laadpalen bij, en vandaag, in 2024, staan er al 45.000."

Ze onderstreept dat technologische ontwikkelingen vaak sneller gaan dan mensen verwachten, en dat een overheid die in dergelijke projecten gelooft en deze actief ondersteunt, een cruciale rol speelt in het succes ervan. Volgens Jehaes is het belangrijk dat Europa ook met financiële instrumenten

komt om te laten zien dat ze deze transitie steunen. Dit zorgt ervoor dat zowel burgers als bedrijven vertrouwen krijgen en bereid zijn om mee te investeren.

Jehaes onderstreept dat, ondanks de sceptische rapporten, het belangrijk is dat de overheid blijft geloven in de haalbaarheid van de waterstofdoelstellingen. Ze stelt: "Iedereen verklaarde ons voor gek toen we de doelstellingen voor de laadpalen stelden, maar we hebben bewezen dat het kan. Ik denk echt niet dat het onhaalbaar is om dit ook voor waterstof te doen, zolang iedereen zijn schouders eronder zet."

Ze waarschuwt dat sceptische rapporten en uitspraken van instanties juist demotiverend kunnen werken en de bereidheid om te investeren kunnen ondermijnen. "Het is de taak van de overheid om in zulke grote transitie te geloven en die actief te ondersteunen. Als instanties twijfelen aan de haalbaarheid en dat uitdragen, dan schiet je jezelf in de voet."

Tot slot merkt Jehaes op dat ze niet precies weet op welke cijfers de ECA haar inschatting baseert, maar ze blijft overtuigd dat de doelen haalbaar zijn zolang er voldoende steun en geloof is vanuit zowel de overheid als de samenleving.

4.4 Conclusie

Op basis van de resultaten uit zowel de literatuurstudie als het interview met de Vlaamse beleidsmaker, kan een onderbouwd antwoord worden geformuleerd op de deelvraag van dit hoofdstuk: *"Hoe beïnvloedt het Vlaamse en Europese beleid de uitbouw van waterstof-tankstations?"*

Uit de literatuurstudie blijkt dat het Vlaamse beleid een cruciale rol speelt in de ontwikkeling van waterstof-tankstations, met duidelijke doelstellingen en strategieën die gericht zijn op het stimuleren van waterstof als duurzame brandstof binnen de mobiliteitssector. De Vlaamse waterstofstrategie streeft naar de realisatie van meer dan 100 waterstof-tankstations tegen 2030, maar de SWOT-analyse wijst op aanzienlijke uitdagingen zoals hoge investeringskosten en complexe regelgeving, die de uitrol kunnen vertragen (Van den Broeck, 2020). Dit beleid wordt verder ondersteund door de Europese AFIR-verordening, die verplichtingen oplegt om tegen 2030 een netwerk van waterstof-tankstations op te zetten langs belangrijke transportcorridors en in stedelijke gebieden (European Union, 2023). Deze Europese eisen fungeren als belangrijke drijfveren voor de verdere ontwikkeling van waterstofinfrastructuur in Vlaanderen.

Het interview met de Vlaamse beleidsmaker biedt aanvullend inzicht in de praktische uitdagingen bij de implementatie van deze plannen. Een van de belangrijkste factoren die tijdens het interview naar voren kwam, is het belang van timing bij het investeren in waterstof-tankstations. De beleidsmaker benadrukt dat een te vroege investering kan leiden tot onderbenutte infrastructuur en financiële verliezen, zoals blijkt uit eerdere gevallen waarbij waterstof-tankstations failliet gingen door een gebrek aan vraag. De markt voor waterstof bevindt zich nog in een vroeg stadium, en het succes van nieuwe infrastructuur is sterk afhankelijk van het juiste moment van investeren, dat aansluit bij de marktbehoeften en technologische vooruitgang. Te late investeringen daarentegen kunnen ertoe leiden dat waterstofprojecten worden ingehaald door alternatieve technologieën zoals elektrische voertuigen, wat de haalbaarheid van de beleidsdoelstellingen in gevaar zou brengen.

Daarnaast toont de discrepantie tussen de ambitieuze doelstellingen van het Vlaamse actieplan Clean Power for Transport 2015 en de huidige realiteit, waarbij slechts zes van de geplande twintig waterstof-tankstations operationeel zijn in Vlaanderen, de complexe uitdagingen waarmee het beleid wordt geconfronteerd (Vlaamse Overheid, 2015; WaterstofNet, 2024). Deze situatie illustreert hoe snel veranderende technologische ontwikkelingen en fluctuaties in marktvoorkeuren de vraag naar waterstof voor transport beïnvloeden. Bovendien wordt de ontwikkeling van waterstofinfrastructuur gehinderd door een versnipperd subsidiebeleid en het ontbreken van een specifiek wettelijk kader in VLAREM II, wat leidt tot onzekerheid voor investeerders en exploitanten.

Samenvattend kan worden geconcludeerd dat het Vlaamse en Europese beleid een essentiële, maar complexe rol speelt in de uitbouw van waterstoftankstations. Hoewel het beleidskader duidelijke richtlijnen en ondersteuning biedt, hangt het succes van deze infrastructuur sterk af van een strategisch afgestemde aanpak waarin timing, marktontwikkelingen, technologische vooruitgang, en financiële steun centraal staan. Een goed getimede en gecoördineerde uitvoering van deze plannen is van cruciaal belang om de doelstellingen voor duurzame mobiliteit in Vlaanderen te realiseren en te voorkomen dat waterstofprojecten worden ingehaald door andere technologieën.

5 Uitdagingen aanbieders van waterstoftankstations in België

Dit hoofdstuk richt zich op de vierde deelvraag van deze masterthesis, die onderzoekt welke uitdagingen huidige en toekomstige aanbieders van waterstoftankstations in België ervaren. Het doel van dit hoofdstuk is om inzicht te krijgen in de verschillende obstakels waarmee deze aanbieders geconfronteerd worden bij de ontwikkeling en exploitatie van waterstoftankstations. Door middel van een interview met WaterstofNet en een casestudy van Group Bruno worden de belangrijkste economische, infrastructurele en marktgerelateerde uitdagingen in kaart gebracht.

De opbouw van dit hoofdstuk is als volgt: eerst worden de bevindingen uit het interview met WaterstofNet besproken, waarbij de nadruk ligt op de economische haalbaarheid, de beschikbaarheid van waterstofvoertuigen en de impact van Europese regelgeving. Vervolgens wordt in de casestudy van Group Bruno een diepgaand overzicht gegeven van de specifieke uitdagingen waarmee een potentiële aanbieder van waterstoftankstations wordt geconfronteerd, waaronder investeringsrisico's, infrastructuurvereisten en de rol van overheidsbeleid. Ten slotte worden de belangrijkste leerpunten uit deze analyses samengevat en worden aanbevelingen gedaan voor het aanpakken van de geïdentificeerde uitdagingen.

5.1 WaterstofNet

In het kader van het onderzoek naar de uitdagingen die huidige en toekomstige aanbieders van waterstoftankstations in België ervaren, werd een interview afgenomen met een vertegenwoordiger van WaterstofNet. WaterstofNet is een clusterorganisatie die een belangrijke rol speelt in de ontwikkeling van de waterstofinfrastructuur in de Benelux. De organisatie heeft uitgebreide ervaring met het initiëren en uitvoeren van demonstratieprojecten, waaronder de realisatie van waterstoftankstations. Gezien hun betrokkenheid bij zowel de ontwikkeling als de implementatie van waterstofprojecten, biedt WaterstofNet waardevolle inzichten die essentieel zijn voor het beantwoorden van de deelvraag van het vierde hoofdstuk van deze masterthesis: "Welke uitdagingen ervaren huidige en toekomstige aanbieders van waterstoftankstations in België?".

Uit het interview zijn verschillende uitdagingen naar voren gekomen die van cruciaal belang zijn voor de aanbieders van waterstoftankstations in België.

5.1.1 Economische uitdagingen

Een van de meest prominente uitdagingen is de economische haalbaarheid van waterstoftankstations. Hoewel België relatief goedkope waterstof aanbiedt in vergelijking met andere Europese landen, blijft het moeilijk voor exploitanten om een rendabele business case te creëren. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door de lage utilisatiegraad van de bestaande tankstations. Veel van deze tankstations worden momenteel onderbenut, wat betekent dat er vaak meer aanbod is dan vraag. Het gebrek aan een voldoende grote afnemersbasis, met name in de zware transportsector, maakt het moeilijk om deze tankstations winstgevend te exploiteren. Dit vormt een belangrijke barrière voor verdere investeringen en uitbreiding van het netwerk van waterstoftankstations in België.

5.1.2 Waterstofvoertuigen

Een tweede uitdaging die werd besproken, betreft de beperkte beschikbaarheid van waterstofvoertuigen, vooral in de zware transportsector. Hoewel er enkele initiatieven zijn waarbij vrachtwagens worden omgebouwd naar waterstofvoertuigen en nieuwe modellen worden getest, blijft de markt voor deze voertuigen klein en verspreid. Een belangrijk aspect dat hierbij naar voren kwam, is dat veel van deze waterstofvrachtwagens momenteel nog voornamelijk rondrijden als

onderdeel van demonstratieprojecten. Deze projecten zijn bedoeld om het gebruik van waterstofvrachtwagens in de praktijk te onderzoeken en de prestaties en haalbaarheid van deze voertuigen onder reële omstandigheden te testen. Dit impliceert dat de marktontwikkeling van waterstofvrachtwagens zich voorlopig in een verkennend stadium bevindt.

De focus op demonstratieprojecten onderstreept dat de markt voor waterstofvrachtwagens nog niet volwassen is. Dit betekent dat er op korte termijn geen grootschalige commerciële uitrol van deze voertuigen te verwachten valt, wat een directe invloed heeft op de vraag naar waterstof en de economische levensvatbaarheid van tankstations. Zonder een significante toename in het aantal commercieel beschikbare waterstofvrachtwagens, zal het moeilijk zijn om de vraag naar waterstof op een niveau te brengen dat de exploitatie van tankstations rendabel maakt.

5.1.3 AFIR-verordening

De AFIR-verordening (Alternative Fuels Infrastructure Regulation) van de Europese Unie stelt duidelijke doelen voor de uitrol van waterstoftankstations, met de ambitie om een netwerk van waterstoftankstations te realiseren dat zowel binnen als tussen landen in Europa functioneert. Voor België betekent dit concreet dat er tegen 2030 ongeveer 13 waterstoftankstations moeten worden gerealiseerd. Dit aantal ligt significant hoger dan het huidige aantal tankstations in België, wat een verdubbeling impliceert. Deze verordening creëert echter niet alleen kansen, maar roept ook bedenkingen op met betrekking tot de realistische haalbaarheid van deze doelstellingen.

De verordening stelt ambitieuze targets, maar er moet rekening gehouden worden met de huidige marktsituatie en de beperkte vraag naar waterstofvoertuigen, vooral in de zware transportsector. Het plaatsen van extra waterstoftankstations zonder een overeenkomstige groei in het aantal voertuigen dat daadwerkelijk van deze infrastructuur gebruikmaakt, kan leiden tot een verdere verlaging van de utilisatiegraad van tankstations. Dit zou het probleem van de economische haalbaarheid alleen maar verergeren.

Daarnaast is het belangrijk om te beseffen dat doelstellingen, zoals die in de AFIR-verordening, vaak zijn gebaseerd op optimistische aannames over marktontwikkelingen. Hoewel deze doelen richting geven aan beleidsvorming, moet er flexibiliteit zijn om deze doelstellingen aan te passen aan de realiteit van de markt. Het simpelweg vastleggen van een aantal tankstations en voertuigen tegen een bepaalde datum kan misleidend zijn als de onderliggende marktdynamiek niet in voldoende mate wordt ondersteund door vraag en gebruik. Het is daarom essentieel dat deze doelstellingen gepaard gaan met maatregelen die zowel de vraag naar waterstofvoertuigen stimuleren als de economische haalbaarheid van waterstoftankstations verbeteren.

5.2 Case study – Group Bruno

Deze casestudy onderzoekt de uitdagingen waarmee potentiële aanbieders van waterstoftankstations in België geconfronteerd worden. Het doel van deze studie is om inzicht te krijgen in de verschillende obstakels en mogelijkheden die bedrijven ervaren bij het opzetten en exploiteren van waterstoftankstations. Dit omvat onder andere de huidige en toekomstige aanbodstrategieën, samenwerkingen binnen de sector, en de invloed van overheidsreguleringen en subsidies.

Voor deze casestudy is een interview afgenomen met Noë Bruno, een sleutelfiguur binnen Group Bruno. Group Bruno is een diverse organisatie met meerdere merken en activiteiten, voornamelijk gevestigd in Limburg. Het bedrijf is actief in diverse sectoren zoals voedselverkoop, tankstations, brandstofopslag en -distributie, autoverhuur, hersteldiensten, en zelfs vastgoed en horeca.

Noë Bruno is verantwoordelijk voor alles wat met brandstoffen te maken heeft binnen het bedrijf. Dit omvat zowel de B2B- als de B2C-leveringen van mazout, prijszetting van brandstoffen, klantenbeheer, en afspraken met andere tankkaartleveranciers. Daarnaast houdt hij zich bezig met nieuwe energiebronnen zoals waterstof, LNG en synthetische brandstoffen. Ook de ICT-gerelateerde taken binnen Group Bruno vallen onder zijn verantwoordelijkheid.

De volgende onderdelen van deze casestudy zullen dieper ingaan op het huidige aanbod van Group Bruno's servicestations, toekomstige plannen, investeringen in waterstoftankstations, samenwerkingen binnen het Hydrogen Society Limburg Project, en de uitdagingen op het gebied van transporteurs, constructeurs, overheidsreguleringen en infrastructuur.

5.2.1 Huidige aanbod

Bij de Bruno Service Stations bestaat het huidige aanbod aan brandstoffen en laadinfrastructuur uit verschillende componenten. Standaard bieden zij vier brandstofproducten aan: diesel, euro95, superplus en LPG, waarbij diesel ook wordt ondersteund door AdBlue. Recentelijk hebben zij op twee locaties HVO (Hydrotreated Vegetable Oil), een hernieuwbare diesel gemaakt van plantaardige afvalolieën, geïntroduceerd. Daarnaast verkopen zij op twee locaties CNG (Compressed Natural Gas), namelijk in Genk Noord en Tessenderlo. In Tessenderlo wordt ook LNG (Liquefied Natural Gas) aangeboden voor vrachtwagens, via een recht van opstal.

Wat betreft laadinfrastructuur beschikt Group Bruno momenteel over vier locaties met laadpalen: Genk Noord, Maasmechelen, Tessenderlo en Kortesseem. In Kortesseem zijn twee laadpalen aanwezig, terwijl de andere locaties er één hebben. Deze laadpalen zijn uitgerust met 50 kilowattuur chargers, wat niet de snelste laders zijn, maar eerder een tussenvorm. Het bedrijf is echter bezig met een uitgebreide uitrol van superchargers van 100 kilowattuur op al hun locaties. Alle aanvragen voor deze uitbreiding zijn al ingediend bij Fluvius, en het project wordt momenteel gefinaliseerd met leveranciers. De bedoeling is om dit project tegen begin 2025 te voltooien.

5.2.2 Toekomstige evolutie van het aanbod

Op korte termijn verwacht Group Bruno een aanzienlijke toename in laadinfrastructuur. Waterstof is momenteel nog niet aanwezig, maar er is een groeiende vraag naar hernieuwbare brandstoffen zoals HVO. Vooral voor vrachtverkeer en voertuigen die nog niet elektrisch zijn, wordt verwacht dat HVO en andere synthetische brandstoffen een belangrijke rol zullen spelen. Waterstof bevindt zich nog in een zeer vroeg stadium, en de verdere ontwikkelingen hiervan hangen sterk af van de acties van voertuigconstructeurs zoals Volvo, MAN en IVECO. Volvo heeft aangegeven tegen 2026 de eerste tests met waterstoftrucks te willen uitvoeren en tegen 2030 de eerste voertuigen op de weg te hebben. Echter, deze lange termijn planning maakt het moeilijk om concrete voorspellingen te doen over de toekomst van waterstof in de brandstofmix. Het is waarschijnlijk dat er een verscheidenheid aan brandstoffen zal blijven bestaan, waaronder synthetische brandstoffen, hernieuwbare brandstoffen en elektrificatie, waarbij waterstof mogelijk een rol zal spelen afhankelijk van de marktontwikkelingen en technologische vooruitgang.

5.2.2.1 Plannen om te investeren in een waterstoftankstation

Group Bruno had plannen om te investeren in een waterstoftankstation, in samenwerking met POM Limburg, Esso, H.Essers, De Lijn, LDM en vijf andere partijen. Deze plannen werden echter niet gerealiseerd vanwege onvoldoende vraag vanuit deze partijen. Noë Bruno legt uit: "Er is te weinig vraag uit die partijen voor waterstof, waardoor het niet rendabel was en omdat het nog iets te vroeg is om groene waterstof echt betaalbaar te maken, zitten we nog iets te vroeg in de fase." Dit benadrukt de huidige marktbeperkingen en de economische uitdagingen van waterstofinfrastructuur.

Ondanks deze tegenslagen blijft Group Bruno geïnteresseerd in de ontwikkeling van waterstoftankstations. Bruno geeft aan: "Wij willen zeker meedenken en we zijn zeker vragende partij, maar er moet natuurlijk wel een zekere afzet zijn om onze waterstof aan te verkopen." Het bedrijf onderkent de afhankelijkheid van transporteurs en voertuigconstructeurs in dit proces. Hij benadrukt: "Het begint allemaal bij de constructeurs die erin moeten geloven. Die vrachtwagens moeten gaan maken. Dan kunnen de transporteurs die vrachtwagens kopen. Als daar een plan voor is dan zullen wij een waterstofstation zetten."

Een significante uitdaging is dat de constructeurs momenteel nog geen massale productie van waterstoftrucks hebben gepland. "Zolang de constructeurs niet beslissen om effectief, doelbewust vrachtwagens te gaan produceren die rijden op waterstof, ja dan gaat het moeilijk worden," aldus Bruno. Dit probleem illustreert de kip-en-ei-situatie waarin de ontwikkeling van waterstofinfrastructuur zich bevindt.

Toch ziet Group Bruno enige hoop in bedrijven zoals Toyota, die al investeren in waterstoftechnologie. Bruno merkt op: "In Japan geloven ze wel in de toekomst van waterstof. Zij hebben al enkele wagens op waterstof en zij zijn vragende partij voor een waterstofstation." Deze interesse vanuit Toyota kan mogelijk een stimulans zijn voor verdere ontwikkelingen in de waterstofinfrastructuur.

5.2.3 Leerpunten uit het Hydrogen Society Limburg Project

Het Hydrogen Society Limburg Project, waar Group Bruno samen met POM Limburg, De Lijn, H.Essers en andere partners aan deelnam, is recentelijk stilgevallen. Noë Bruno reflecteert op de leerpunten uit dit project en benadrukt enkele cruciale uitdagingen. Hij stelt: "We zijn echt afhankelijk van de auto's, van de constructeurs die de vrachtwagens maken, die heel veel bepalen.

Een ander leerpunt uit het project is de complexiteit van het realiseren van betaalbare groene waterstof. Bruno legt uit: "Je moet een hele lange weg afleggen waardoor er al heel veel gedegradeerd wordt en enorm veel energie nodig is om groene waterstof te maken." Daarnaast bezocht hij CMB.tech in Antwerpen, waar hij verschillende opstellingen voor waterstofinfrastructuur zag. "Er zijn verschillende manieren om een tankstation op te zetten, maar we hebben geen zekerheid of we de juiste opstelling en manier zouden toepassen om waterstof te gaan verkopen."

5.2.4 Samenwerking met WaterstofNet

WaterstofNet speelt een actieve rol in het bevorderen van samenwerkingen tussen private en publieke bedrijven binnen de waterstofsector in België. Bruno beschrijft de dynamiek binnen het Hydrogen Society Limburg Project, waarin ook WaterstofNet participeerde: "Het probleem is dat iedereen naar elkaar kijkt. De transporteurs kijken naar ons en naar de overheid. Wij kijken naar de transporteurs en vragen ons af wat zij gaan doen en wij kijken ook naar de overheid. Dus iedereen kijkt een beetje naar elkaar en niemand neemt het initiatief."

Hij benadrukt de noodzaak van een duidelijker perspectief vanuit de overheid: "De overheid zegt te weinig van dat moet er komen en we gaan zorgen dat dat er komt en we kiezen een partij. Dat wordt te weinig gestuurd." Deze situatie illustreert de complexe interactie tussen verschillende stakeholders en de behoefte aan meer proactieve beleidsvoering om de ontwikkeling van waterstofinfrastructuur in België te stimuleren.

5.2.5 Perspectieven van transporteurs op de afname van waterstof

In België staan grote transporteurs voor aanzienlijke uitdagingen bij de aanschaf van waterstof vrachtwagens, voornamelijk vanwege de hoge kosten en beperkte subsidies. Noë Bruno legt uit: "Een tweetal jaar geleden kostte een waterstoftruck een vijfvoud van een gewone truck. Alleen al de truck op zich en dan nog eens het verbruik en de prijs van waterstof, ja dat is momenteel veel te duur." Hij wijst erop dat sommige leveranciers, zoals Vissers, hun waterstof zelfs met een negatieve marge verkopen om competitief te blijven.

Een mogelijke oplossing wordt aangeboden door CMB.tech in Antwerpen, waar reguliere trucks worden omgebouwd tot hybride voertuigen die zowel op diesel als op waterstof kunnen rijden. Bruno zegt hierover: "Die ombouw was toen een jaar geleden 125.000 euro. De truck kost zelf ook 125.000 euro. Dus dan kom je eigenlijk op een 250.000 euro en dan heb je een hybride truck die op waterstof kan rijden of op diesel." Echter, de beperkte beschikbaarheid van waterstof in België blijft een probleem, met slechts enkele tankstations in Antwerpen en Brussel.

5.2.6 Adoptie van waterstoftrucks versus elektrische trucks

De keuze tussen waterstoftrucks en elektrische trucks brengt het bekende kip-en-ei-verhaal naar voren. Bruno ziet toekomst in beide technologieën, maar benadrukt de uitdagingen: "Het is goedkoper voor ons om te investeren in laadpalen. Voor ons is dat de minste investering en de gemakkelijkste ten opzichte van waterstof. Maar ik denk dat waterstof op termijn wel duurzamer is dan de laadpalen, vooral voor het vrachtverkeer." Hij merkt op dat waterstof gemakkelijker op een tankstation kan worden geïmplementeerd, terwijl elektrische trucks mogelijk beter geschikt zijn voor laadfaciliteiten bij bedrijven.

5.2.6.1 Voordelen van waterstoftrucks

Waterstoftrucks bieden specifieke voordelen ten opzichte van elektrische trucks, vooral met betrekking tot laadtijden en actieradius. Een belangrijk punt dat wordt benadrukt is dat de manier van werken, zowel voor de chauffeur als voor de planner en de organisatie van het bedrijf, aanzienlijk moet worden aangepast bij het gebruik van elektrische trucks. Dit komt doordat elektrische trucks regelmatig moeten worden opgeladen, wat een grote impact heeft op de rij- en rusttijden van chauffeurs en de operationele planning.

In tegenstelling hiermee hebben waterstoftrucks veel minder invloed op de bestaande werkprocessen. Het rijden op waterstof heeft een minimale impact op de rij- en rusttijden en het traject dat wordt afgelegd. Dit maakt waterstoftrucks aantrekkelijker voor langeafstandsvervoer, waar de noodzaak om frequent op te laden en de beperkte actieradius van elektrische trucks grote uitdagingen kunnen vormen. Hierdoor kunnen waterstoftrucks een meer logistiek efficiënte oplossing bieden, vooral voor transporteurs die lange afstanden moeten afleggen zonder dat de bedrijfsvoering ingrijpend hoeft te veranderen.

5.2.7 De overheid

De huidige overheidsreguleringen en subsidies hebben een aanzienlijke invloed op de plannen van Group Bruno om te investeren in waterstofinfrastructuur. Noë Bruno wijst op de tekortkomingen in de huidige subsidieregelingen: "Er zijn momenteel niet genoeg subsidies. Om het van de grond te krijgen gaat er zeker veel meer gesubsidieerd moeten worden. In Nederland is dat meer dan in België. Dus op deze manier, hoe het nu loopt gaat het heel moeilijk worden."

De vergelijking met Nederland benadrukt de behoefte aan meer financiële steun vanuit zowel Europa als Vlaanderen om de waterstofmarkt in België te stimuleren. De huidige subsidieregelingen in België zijn ontoereikend om de noodzakelijke investeringen aantrekkelijk te maken voor bedrijven zoals Group Bruno.

Wat betreft de omgevingsvergunningen, geeft Bruno aan dat het proces complex is, maar hij kan geen specifieke details geven omdat het bedrijf nog geen vergunning heeft aangevraagd. Hij stelt: "Qua omgevingsvergunning is het niet gemakkelijk, maar dan moet ik eerlijk zijn ik weet niet hoe moeilijk dat is, omdat we het ook nog niet hebben aangevraagd."

5.2.7.1 Veiligheidsvoorschriften voor waterstofinfrastructuur

Naast de financiële en administratieve uitdagingen, zijn er ook strenge veiligheidsvoorschriften verbonden aan de installatie van waterstofinfrastructuur. Bruno merkt op: "Ik weet dat dat voor waterstof in een betonnen inkuiping, een betonnen bunker moet. Dus qua veiligheid is het nog strenger dan de huidige veiligheidsnormen." Deze strenge veiligheidsvereisten maken de implementatie van waterstoftankstations complexer en duurder in vergelijking met traditionele brandstofstations.

5.2.7.2 Conclusie

De huidige situatie met betrekking tot overheidsreguleringen en subsidies vormt een significante belemmering voor de ontwikkeling van waterstofinfrastructuur in België. Hoewel er initiatieven zijn, blijft de financiële steun ontoereikend en de regelgeving complex. Strengere veiligheidsvoorschriften verhogen bovendien de kosten en complexiteit van waterstofprojecten. Om de adoptie van waterstof als duurzame brandstofoptie te bevorderen, is een intensievere ondersteuning vanuit de overheid noodzakelijk, zowel op Europees als Vlaams niveau.

5.2.8 Infrastructuurgerelateerde uitdagingen

De realisatie van een waterstofstation brengt verschillende infrastructuurgerelateerde uitdagingen met zich mee. Noë Bruno geeft aan dat Group Bruno nog niet ver gevorderd is met de plannen, maar hij benadrukt wel enkele belangrijke overwegingen. Zo was het plan om een waterstofstation te realiseren in Genk Noord, dicht bij H.Essers, maar dit vereist aanzienlijke ruimte: "Je hebt heel veel ruimte nodig om dat te doen. Dat neemt wel wat plaats in."

Daarnaast moeten de logistieke aspecten goed doordacht worden. Bruno legt uit: "Uw vrachtwagens moeten daar kunnen oprijden, uw vrachtwagens moeten daar aan kunnen. Dus het is niet zo evident." Dit betekent dat een waterstofstation niet zomaar overal geplaatst kan worden; er moet voldoende ruimte zijn voor de vrachtwagens om veilig en efficiënt te kunnen manoeuvreren en tanken.

5.2.9 Mogelijkheden voor de beleving van waterstof aan toekomstige stations

Group Bruno heeft reeds stappen ondernomen om de mogelijkheden voor de beleving van waterstof aan toekomstige stations te verkennen. Noë Bruno licht toe dat er binnenkort gesprekken zullen plaatsvinden met een partij die waterstof produceert en op zoek is naar een afzetmarkt: "Dat gaat nu opstarten met een partij die waterstof gaat produceren en een afzetmarkt zoekt. En daar gaan nu de eerste gesprekken van weldra opstarten."

Het plan is dat deze producent de waterstof zal produceren, waarbij afnemers, zoals Group Bruno, de waterstof per vrachtwagen bij de producent zullen ophalen. Echter, Bruno benadrukt de uitdaging van het rendabel maken van deze leveringsketen zonder de aanwezigheid van pijpleidingen: "Totdat er pijpleidingen komen, denk ik dat het heel moeilijk wordt om het rendabel te krijgen." Hij onderstreept dat pijpleidingen essentieel zijn voor de economische haalbaarheid van waterstoflevering op de lange termijn: "Die pijpleiding is er nodig om het rendabeler te krijgen."

5.2.10 Stimulansen voor snellere investeringen in waterstoftankpunten

Voor Group Bruno zijn er verschillende factoren die hen zouden kunnen stimuleren om sneller te investeren in waterstoftankpunten. Een cruciale stimulans zou de zekerheid zijn van een afzetmarkt, bevestigd door transporteurs die waterstoftrucks aanschaffen. Noë Bruno legt uit: "Ergens een bevestiging van een of twee transporteurs, dat zij trucks kopen en dat er de zekerheid is van een afzetmarkt. Dan willen wij daar zeker in meegaan om te investeren."

De zekerheid van een afzetmarkt is essentieel voor Group Bruno om de stap naar waterstofinvesteringen te zetten. Ze begrijpen dat de markt nog moet groeien, maar willen wel een minimale basis van zekerheid: "We willen niet alles nu doen zonder een zekerheid te hebben dat er tenminste een kleine afzetmarkt is."

5.2.10.1 *Invloed van subsidies op investeringen*

Subsidies kunnen ook een belangrijke rol spelen bij het stimuleren van investeringen in waterstof-tankpunten. Bruno bevestigt dat een subsidieregeling zoals die in Nederland, waar zowel transporteurs die voertuigen aanschaffen als stationuitbaters subsidies ontvangen, zeer behulpzaam zou zijn: "Dat zou zeker helpen, ja." Deze gecombineerde subsidieregelingen kunnen de financiële drempel verlagen en de investeringsbereidheid verhogen.

5.2.10.2 *Marktonzekerheid*

Een van de grootste uitdagingen voor Group Bruno bij het investeren in waterstof is de onzekerheid over de toekomst. Bruno benadrukt de onduidelijkheid over waar de markt voor waterstof over vijf tot tien jaar zal staan: "Het is heel onduidelijk. Dus voor ons is het heel moeilijk om te zeggen: waar bevinden we ons op vlak van waterstof over 5 jaar."

Deze onzekerheid maakt het moeilijk voor het bedrijf om langetermijninvesteringen te plannen. Ondanks hun lange geschiedenis van 36 jaar waarin ze de drie basisproducten hebben verkocht, is de toekomst van waterstof veel minder voorspelbaar: "Wat gaat dat geven voor de toekomst? Waar staan we over 5 à 10 jaar. Dus het is voor ons heel moeilijk om te investeren op lange en middellange termijn, omdat we echt niet weten welke kant het uitgaat."

5.2.10.3 *Vergelijking met laadinfrastructuur*

Hoewel Group Bruno ook investeert in laadinfrastructuur, blijkt dat subsidies hiervoor eveneens beperkt zijn. Bruno merkt op: "Die zijn ook bijna op. Op dit moment zit dat er ook niet in bij de laadpalen." Dit benadrukt dat zelfs voor relatief meer gevestigde technologieën zoals laadinfrastructuur, financiële ondersteuning cruciaal is maar niet altijd beschikbaar.

5.3 Conclusie

In dit hoofdstuk zijn de uitdagingen die huidige en toekomstige aanbieders van waterstof-tankstations in België ervaren, uitvoerig onderzocht, met de bedoeling een antwoord te bieden op de vierde deelvraag van deze masterthesis: "*Welke uitdagingen ervaren huidige en toekomstige aanbieders van waterstof-tankstations in België?*" Door de inzichten te combineren uit een interview met WaterstofNet en een casestudy van Group Bruno, zijn zowel overeenkomsten als verschillen in de ervaren uitdagingen naar voren gekomen.

Uit het interview met WaterstofNet is gebleken dat de huidige aanbieders van waterstof-tankstations in België vooral te maken hebben met economische uitdagingen. Een van de grootste obstakels is de lage utilisatiegraad van de tankstations, veroorzaakt door een beperkt aantal waterstofvoertuigen, met name in de zware transportsector. Dit leidt tot een problematische economische haalbaarheid, waarbij het voor exploitanten moeilijk is om een rendabele business case te ontwikkelen. Daarnaast werd benadrukt dat de markt voor waterstofvoertuigen nog niet volwassen is, wat de vraag naar waterstof en de operationele levensvatbaarheid van tankstations verder beperkt. Ook de ambitieuze doelstellingen van de AFIR-verordening brengen uitdagingen met zich mee, vooral omdat deze doelen vaak gebaseerd zijn op optimistische marktverwachtingen die niet altijd overeenkomen met de huidige realiteit.

De casestudy van Group Bruno, een potentiële aanbieder van waterstof-tankstations, bevestigt veel van de uitdagingen die door WaterstofNet werden genoemd, maar brengt ook aanvullende aspecten aan het licht. Group Bruno ondervindt aanzienlijke obstakels bij het overwegen van investeringen in waterstof-tankstations, zoals de hoge kosten van waterstofvoertuigen en het gebrek aan een duidelijke afzetmarkt. De onzekerheid over de toekomst van waterstoftrucks en de beperkte beschikbaarheid van groene waterstof vormen hierbij cruciale belemmeringen. Bovendien spelen infrastructuurgerelateerde uitdagingen een belangrijke rol, waaronder de noodzaak van voldoende

ruimte en geschikte locaties voor waterstoftankstations, evenals de complexe logistieke vereisten voor het vervoer en de opslag van waterstof. Ten slotte blijkt uit de casestudy dat de huidige subsidieregelingen en overheidsreguleringen in België ontoereikend zijn om significante investeringen in waterstofinfrastructuur te ondersteunen, wat een belangrijke stimulans voor toekomstige aanbieders ondermijnt.

De overeenkomsten tussen de bevindingen uit het interview met WaterstofNet en de casestudy van Group Bruno wijzen op enkele fundamentele uitdagingen die zowel huidige als toekomstige aanbieders van waterstoftankstations in België tegenkomen. Beide partijen benadrukken de economische moeilijkheden als gevolg van een beperkte markt voor waterstofvoertuigen en de onzekerheden rond de marktontwikkeling op lange termijn. Daarnaast komt in beide gevallen de complexiteit van de infrastructuur en de noodzaak van een sterke overheidssteun naar voren als cruciale factoren voor succes.

Toch zijn er ook verschillen in de uitdagingen die worden ervaren. Terwijl WaterstofNet vooral de huidige operationele moeilijkheden van bestaande tankstations benadrukt, richt Group Bruno zich meer op de onzekerheden en risico's die gepaard gaan met het betreden van een relatief onvolwassen markt. Voor Group Bruno spelen de logistieke en infrastructurele eisen een grotere rol, gezien hun beperkte ervaring met waterstofinfrastructuur in vergelijking met de reeds actieve aanbieders.

In samenvatting toont deze analyse aan dat zowel huidige als toekomstige aanbieders van waterstoftankstations in België te maken hebben met aanzienlijke uitdagingen die grotendeels voortkomen uit de economische haalbaarheid, de beschikbaarheid van voertuigen en de marktdynamiek. Hoewel de aard van deze uitdagingen enigszins varieert tussen gevestigde en potentiële spelers, blijft de behoefte aan sterke beleidsmatige ondersteuning en marktstimulering een constante factor voor het succes van waterstofinfrastructuur in België.

6 Besluit

De centrale onderzoeksvraag van deze thesis luidt: “Welke obstakels moeten overwonnen worden om het huidige aantal van 4 waterstoftankstations voor zwaar wegtransport in België uit te breiden naar 15 waterstoftankstations tegen 2030?” Om een antwoord te formuleren op deze vraag, werd het onderzoek benaderd vanuit vier verschillende perspectieven: de toeleveringsketen van waterstof, internationale vergelijkingen, het beleid in Vlaanderen en Europa, en de ervaringen van huidige en toekomstige aanbieders van waterstoftankstations in België.

De analyse van de toeleveringsketen van waterstof bracht aan het licht dat de productie, opslag en distributie van waterstof met aanzienlijke technische en economische uitdagingen gepaard gaan. Deze uitdagingen vormen de basis voor de complexe ontwikkeling van waterstofinfrastructuur, wat betekent dat zonder aanzienlijke technologische innovaties en kostenreducties, de realisatie van extra waterstoftankstations moeilijk haalbaar zal zijn. (Barthelemy et al., 2017; Osman et al., 2022)

Uit de internationale vergelijking blijkt dat succesvolle waterstofinfrastructuur sterk afhankelijk is van duidelijke regelgeving, samenwerking tussen publieke en private sectoren, economische haalbaarheid, en technologische innovatie. Landen zoals Zuid-Korea en Nederland illustreren dat strategische overheidssteun en samenwerking tussen verschillende actoren cruciaal zijn voor het overwinnen van de hindernissen in de ontwikkeling van waterstofinfrastructuur (Murthy Konda et al., 2011; Stangarone, 2021). Dit biedt waardevolle lessen voor België, waar vergelijkbare strategieën kunnen worden ingezet om de uitbreiding van waterstoftankstations te stimuleren.

Het onderzoek naar het Vlaamse en Europese beleid heeft aangetoond dat hoewel er duidelijke beleidsdoelstellingen zijn, de praktische implementatie ervan nog steeds wordt gehinderd door complexiteiten in regelgeving en een gebrek aan een gestroomlijnd wettelijk kader. De timing van investeringen speelt hierbij een cruciale rol, aangezien zowel te vroege als te late investeringen risico's met zich meebrengen.

Ten slotte heeft het onderzoek naar de ervaringen van huidige en toekomstige aanbieders van waterstoftankstations in België belangrijke inzichten opgeleverd. De economische haalbaarheid blijft een grote zorg, met uitdagingen zoals een beperkte markt voor waterstofvoertuigen, hoge investeringskosten en onzekerheden over de toekomst van waterstoftechnologie. Voor zowel huidige als toekomstige aanbieders is sterke overheidssteun en duidelijk beleid essentieel om de infrastructuur op te bouwen en te onderhouden (WaterstofNet, 2024).

Op basis van de bovenstaande inzichten kan geconcludeerd worden dat de belangrijkste obstakels voor de uitbreiding van waterstoftankstations in België vierledig zijn: economische uitdagingen, technologische barrières, complexe regelgeving en een beperkte markt voor waterstofvoertuigen. Elk van deze obstakels speelt een cruciale rol en beïnvloedt de haalbaarheid van het uitbreiden van de waterstoftankinfrastructuur op verschillende manieren.

De economische haalbaarheid vormt een van de grootste obstakels voor de uitbreiding van waterstoftankstations. Uit het onderzoek blijkt dat de lage utilisatiegraad van bestaande waterstoftankstations in België, als gevolg van het beperkte aantal waterstofvoertuigen, de winstgevendheid van deze infrastructuren onder druk zet. Dit leidt tot onzekerheden bij investeerders, die aarzelen om in een markt te stappen waar de vraag nog onvoldoende is ontwikkeld. De casestudy van Group Bruno toont daarnaast aan dat de hoge kosten van waterstofvoertuigen en de productie van groene waterstof aanzienlijke financiële barrières vormen, wat het moeilijk maakt om een levensvatbare business case te ontwikkelen. De economische uitdagingen worden verder versterkt door de beperkte schaalvoordelen die momenteel behaald kunnen worden, aangezien de markt voor waterstofvoertuigen nog in de kinderschoenen staat. Uit het empirisch onderzoek bleek dat overheidssubsidies cruciaal zijn en, zoals in Nederland, idealiter gekoppeld zouden moeten worden aan sectoroverschrijdende samenwerkingen om de marktontwikkeling doorheen de volledige waterstofketen optimaal te faciliteren.

Naast de economische uitdagingen zijn er aanzienlijke technologische barrières die moeten worden overwonnen. De productie, opslag en distributie van waterstof gaan gepaard met hoge kosten en complexiteit. Bijvoorbeeld, de productie van waterstof via elektrolyse vereist aanzienlijke hoeveelheden energie, en hoewel technologische innovaties en schaalvergroting op termijn tot kostenreducties kunnen leiden, blijft het een kostbare technologie in vergelijking met conventionele brandstoffen. Bovendien is de opslag van waterstof, of het nu onder hoge druk of cryogeen is, technologisch uitdagend en energie-intensief. Dit beperkt de schaalbaarheid van de huidige infrastructuur, en creëert onzekerheden over de betrouwbaarheid en veiligheid van grootschalige waterstofdistributie. (Barthelemy et al., 2017; Osman et al., 2022)

Een derde belangrijke obstakel is de complexe en vaak fragmentarische regelgeving die de uitrol van waterstoftankstations in België bemoeilijkt. Hoewel er duidelijke beleidsdoelstellingen zijn, zowel op Vlaams als Europees niveau, blijkt de praktische uitvoering vaak tegengehouden te worden door een versnipperd regelgevingskader. De SWOT-analyse van het Vlaamse beleid laat zien dat ondanks de ambities om meer dan 100 waterstoftankstations te realiseren tegen 2030, er nog steeds aanzienlijke onzekerheden bestaan over vergunningen en de integratie van waterstofinfrastructuur binnen bestaande stedelijke plannen (Van den Broeck, 2020). Daarnaast ontbreekt het in VLAREM II aan een specifiek wettelijk kader voor waterstoftankstations, wat leidt tot onzekerheid en terughoudendheid bij potentiële investeerders.

Ten slotte speelt de beperkte markt voor waterstofvoertuigen een centrale rol in het succes van waterstoftankstations. Zowel huidige als toekomstige aanbieders wijzen erop dat de vraag naar waterstof voor zwaar transport nog niet voldoende ontwikkeld is om grootschalige investeringen te rechtvaardigen. De beperkte beschikbaarheid van voertuigen en de hoge kosten van waterstof in vergelijking met conventionele brandstoffen vormen aanzienlijke hindernissen voor bredere adoptie. Deze marktdynamiek leidt tot een vicieuze cirkel waarin het gebrek aan infrastructuur de acceptatie van waterstofvoertuigen vertraagt, terwijl de beperkte adoptie van voertuigen op zijn beurt de economische haalbaarheid van nieuwe infrastructuur ondermijnt.

De realisatie van de doelstelling om het aantal waterstoftankstations in België uit te breiden naar 15 tegen 2030 hangt sterk af van het vermogen om deze obstakels te overwinnen. Dit vereist een gecoördineerde inspanning tussen overheden, de private sector en onderzoeksinstellingen. Een geïntegreerde aanpak, waarin de timing van investeringen strategisch wordt afgestemd op marktontwikkelingen, is cruciaal om zowel de technologische als economische barrières aan te pakken. Beleidsmatige ondersteuning moet gericht zijn op het creëren van een stimulerend investeringsklimaat, door duidelijkere en meer gestroomlijnde regelgeving, financiële prikkels en subsidies die het risico voor investeerders verminderen. Tegelijkertijd moet technologische innovatie worden bevorderd om de kosten van waterstofproductie, opslag en distributie te verlagen, terwijl er initiatieven worden genomen om de markt voor waterstofvoertuigen verder te ontwikkelen en te stimuleren. Alleen door deze factoren in samenhang te benaderen, kan België succesvol zijn in de transitie naar een duurzame waterstofeconomie en de gestelde doelstellingen voor de uitbreiding van de waterstoftankinfrastructuur realiseren.

Dit onderzoek kent enkele beperkingen. Ten eerste is het empirische luik van kwalitatieve aard, gebaseerd op interviews en casestudies, wat betekent dat de resultaten niet zonder meer gegeneraliseerd kunnen worden naar de gehele sector. Bovendien konden er geen interviews worden afgenomen met huidige aanbieders van waterstoftankstations in België, wat een beperking vormt in het verkrijgen van een volledig beeld van de huidige operationele uitdagingen. De inzichten zijn voornamelijk gebaseerd op secundaire bronnen en interviews met betrokkenen die niet direct in de operationele fase van waterstoftankstations zitten.

De meerwaarde van dit onderzoek ligt in de integrale benadering van de uitdagingen rond waterstofinfrastructuur in België. Door verschillende perspectieven te combineren, biedt dit onderzoek een omvattend inzicht in de obstakels die overwonnen moeten worden om de doelstellingen te realiseren. Het levert waardevolle aanbevelingen op voor zowel beleidsmakers als

bedrijven die actief zijn in de waterstofsector, en draagt bij aan de discussie over de toekomst van duurzame mobiliteit in België.

Voor vervolgonderzoek wordt aanbevolen om de economische haalbaarheid van waterstoftankstations verder te kwantificeren met behulp van economische modellen en kosten-batenanalyses. Daarnaast zou vervolgonderzoek zich kunnen richten op de ontwikkeling van innovatieve financieringsmodellen die de investeringsrisico's voor waterstoftankstations kunnen verminderen. Het uitvoeren van grootschaligere kwantitatieve studies naar de marktacceptatie van waterstofvoertuigen in België zou ook waardevolle inzichten kunnen bieden om de vraagzijde van de waterstofmarkt beter te begrijpen. Ten slotte wordt aanbevolen om ook de mogelijkheden en uitdagingen van alternatieve technologieën, zoals batterij-elektrische voertuigen, te blijven monitoren om te bepalen hoe deze zich verhouden tot de verdere uitbouw van waterstofinfrastructuur.

Referenties

- 2019/1242, (2019/1242). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32019R1242>
- Abdalla, A. M., Hossain, S., Nisfindy, O. B., Azad, A. T., Dawood, M., & Azad, A. K. (2018). Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: A review [Review]. *Energy Conversion and Management*, 165, 602-627. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.088>
- Abe, J. O., Popoola, A. P. I., Ajenifuja, E., & Popoola, O. M. (2019). Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation [Review]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(29), 15072-15086. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.068>
- Ahluwalia, R., Peng, J., Roh, H., Hua, T., Houchins, C., & James, B. (2018). Supercritical cryo-compressed hydrogen storage for fuel cell electric buses. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(22), 10215-10231.
- Ashby, E., & Kobetz, P. (1966). The direct synthesis of Na₃AlH₆. *Inorganic Chemistry*, 5(9), 1615-1617.
- 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>
- Berg, T. L., Apostolou, D., & Enevoldsen, P. (2021). Analysis of the wind energy market in Denmark and future interactions with an emerging hydrogen market. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(1), 146-156. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.09.166>
- Bogdanović, B., Felderhoff, M., & Streukens, G. (2009). Hydrogen storage in complex metal hydrides. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 74(2), 183-196.
- CMB.tech. (2022). *Dual fuel waterstof-vrachtwagen*. Retrieved 08/08/2024 from <https://cmb.tech/nl/h2-industry/vrachtwagens>
- Cunanan, C., Tran, M.-K., Lee, Y., Kwok, S., Leung, V., & Fowler, M. (2021). A Review of Heavy-Duty Vehicle Powertrain Technologies: Diesel Engine Vehicles, Battery Electric Vehicles, and Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles. *Clean Technologies*, 3(2), 474-489. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol3020028>
- Custers, K. M., Philip, Huybrechts, Diane. (2020). *Beste Beschikbare Technieken (BBT) voor Waterstoftankstations*. emis Retrieved from <https://emis.vito.be/nl/bbt/publicaties/bbtbref-en-andere-publicaties/waterstoftankstations>
- Dawood, F., Anda, M., & Shafiullah, G. M. (2020). Hydrogen production for energy: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(7), 3847-3869. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.059>
- Demirbas, A. (2002). Fuel properties of hydrogen, liquefied petroleum gas (LPG), and compressed natural gas (CNG) for transportation. *Energy Sources*, 24(7), 601-610.
- Desmet, J. (2022, 8/06/2022). Groenewaterstoffabriek in NextGen stap naar haven als dé groene hub. *Flows*. <https://www.flows.be/havens/2022/06/groenewaterstoffabriek-nextgen-stap-naar-haven-als-de-groene-hub/>
- Durbin, D. J., & Malardier-Jugroot, C. (2013). Review of hydrogen storage techniques for on board vehicle applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(34), 14595-14617. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.07.058>
- 2019/1242, (2019/1242). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32019R1242>
- European Court of Auditors. (2024). *Het industriebeleid van de EU inzake hernieuwbare waterstof: Rechtskader grotendeels aangenomen - tijd voor een realitycheck*. Luxembourg: European Court of Auditors Retrieved from <https://www.eca.europa.eu/en/publications/SR-2024-11>
- European Union. (2023). *Regulation (EU) 2023/AFIR of the European Parliament and of the Council of 22 September 2023 on the deployment of alternative fuels infrastructure*. Brussels: Official Journal of the European Union Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/NL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1804>
- Fluxys. (2024, 26/04/2024). *Fluxys hydrogen benoemd als "waterstofvervoersnetbeheerder" in België* <https://www.fluxys.com/nl/press-releases/fluxys-belgium/2024/240426-press-fluxys-hydrogen-appointed-hydrogen-network-operator-belgium>
- Frieden, F., & Leker, J. (2024). Future Costs of Hydrogen: A Quantitative Review. *Sustainable Energy & Fuels*, 8. <https://doi.org/10.1039/D4SE00137K>
- Gielen, D., Taibi, E., & Miranda, R. (2019). *Hydrogen: A renewable energy perspective*.
- Graetz, J. (2009). New approaches to hydrogen storage. *Chemical Society Reviews*, 38(1), 73-82.
- Hawkins, S., & Joffe, D. (2006). Technological characterisation of hydrogen storage and distribution technologies. *Policy Studies Institute: London, UK*.

- Honselaar, M., Pasaoglu, G., & Martens, A. (2018). Hydrogen refuelling stations in the Netherlands: An intercomparison of quantitative risk assessments used for permitting. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(27), 12278-12294. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.04.111>
- Hugo, A., Rutter, P., Pistikopoulos, S., Amorelli, A., & Zoia, G. (2005). Hydrogen infrastructure strategic planning using multi-objective optimization. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30(15), 1523-1534. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.04.017>
- Jacobus, R. (2022, 16/02/2022). Bouw waterstoffabriek Hyoffwind Zeebrugge alweer stap dicht. *Flows*. <https://www.flows.be/havens/2022/02/bouw-waterstoffabriek-hyoffwind-zeebrugge-alweer-stap-dichter/>
- Jensen, J. O., Vestbø, A. P., Li, Q., & Bjerrum, N. J. (2007). The energy efficiency of onboard hydrogen storage. *Journal of Alloys and Compounds*, 446-447, 723-728. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.04.051>
- Joffe, D., Strachan, N., & Ozkan, N. (2007). Representation of Hydrogen in the UK, US and Netherlands Markal Energy System Model.
- Jorgensen, S. W. (2011). Hydrogen storage tanks for vehicles: Recent progress and current status. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 15(2), 39-43.
- Kim, C., Cho, S. H., Cho, S. M., Na, Y., Kim, S., & Kim, D. K. (2023). Review of hydrogen infrastructure: The current status and roll-out strategy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(5), 1701-1716. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.053>
- Klimaat.be. (2021). *De uitstoot in de belangrijkste sectoren*. klimaat.be. Retrieved 5 november from <https://klimaat.be/in-belgie/klimaat-en-uitstoot/uitstoot-van-broeikasgassen/uitstoot-per-sector>
- Kovač, A., Paranos, M., & Marciuš, D. (2021). Hydrogen in energy transition: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(16), 10016-10035. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.256>
- Kurtz, J., Sprik, S., & Bradley, T. H. (2019). Review of transportation hydrogen infrastructure performance and reliability. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(23), 12010-12023. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.027>
- Langmi, H. W., Ren, J., North, B., Mathe, M., & Bessarabov, D. (2014). Hydrogen storage in metal-organic frameworks: a review. *Electrochimica Acta*, 128, 368-392.
- Lee, H., & Lee, S. (2022). Economic Analysis on Hydrogen Pipeline Infrastructure Establishment Scenarios: Case Study of South Korea. *Energies*, 15(18).
- Li, M., Ming, P., Huo, R., Mu, H., & Zhang, C. (2023). Optimizing design and performance assessment of a sustainability hydrogen supply chain network: A multi-period model for China. *Sustainable Cities and Society*, 92, 104444. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104444>
- Liu, Y., Ren, Z., Zhang, X., Jian, N., Yang, Y., Gao, M., & Pan, H. (2018). Development of catalyst-enhanced sodium alanate as an advanced hydrogen-storage material for mobile applications. *Energy Technology*, 6(3), 487-500.
- Lou, Y. C., An-Sophie. (2023). China's Hydrogen Strategy: National vs. Regional Plans. *Center on Global Energy Policy at Calumbia SIPA*, 33. <https://www.energypolicy.columbia.edu/publications/chinas-hydrogen-strategy-national-vs-regional-plans/>
- Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH. (2024, 01/02/2024). *Europe is increasingly adapting its growing hydrogen refuelling infrastructure to include heavy-duty vehicle refuelling* <https://www.h2stations.org/press-release-2024-europe-is-increasingly-adapting-its-growing-hydrogen-refuelling-infrastructure-to-include-heavy-duty-vehicle-refuelling/>
- Mayyas, A., & Mann, M. (2019). Manufacturing competitiveness analysis for hydrogen refueling stations. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(18), 9121-9142. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.02.135>
- Mededeling aan de Vlaamse Regering. (2020). *Vlaamse Waterstofvisie "Europese koploper via duurzame innovatie"*. Beslissingen Vlaamse Regering Retrieved from <https://beslissingenvlaamse-regering.vlaanderen.be/document-view/5FAD539C20B6670008000274>
- Melaina, M. (2013). *Hydrogen Station Cost Estimates: Comparing Hydrogen Station Cost Calculator Results with other Recent Estimates*.
- Meyvis, B. (2023, 7/07/2023). België eerste land met waterstofwet: havens belangrijke spelers. *Flows*. <https://www.flows.be/havens/2023/07/belgie-eerste-land-met-waterstofwet-havens-belangrijke-spelers/>

- Møller, K. T., Jensen, T. R., Akiba, E., & Li, H.-w. (2017). Hydrogen - A sustainable energy carrier. *Progress in Natural Science: Materials International*, 27(1), 34-40. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2016.12.014>
- Moradi, R., & Groth, K. M. (2019). Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis [Review]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(23), 12254-12269. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.041>
- Murthy Konda, N. V. S. N., Shah, N., & Brandon, N. P. (2011). Optimal transition towards a large-scale hydrogen infrastructure for the transport sector: The case for the Netherlands. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(8), 4619-4635. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.01.104>
- National Grid. (2023). *Hydrogen Colour Spectrum*. Retrieved 11/08/2024 from <https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/hydrogen-colour-spectrum>
- Niaz, S., Manzoor, T., & Pandith, A. H. (2015). Hydrogen storage: Materials, methods and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 457-469. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.011>
- Nikolaidis, P., & Poullikkas, A. (2017). A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 597-611. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.044>
- Observatory, E. A. F. (2022). *Vehicles and fleet*. Retrieved 5/11/2023 from <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/transport-mode/road/belgium/vehicles-and-fleet>
- Ochoa Bique, A., & Zondervan, E. (2018). An outlook towards hydrogen supply chain networks in 2050 — Design of novel fuel infrastructures in Germany. *Chemical Engineering Research and Design*, 134, 90-103. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.03.037>
- Orimo, S.-i., Nakamori, Y., Eliseo, J. R., Züttel, A., & Jensen, C. M. (2007). Complex hydrides for hydrogen storage. *Chemical reviews*, 107(10), 4111-4132.
- Osman, A. I., Mehta, N., Elgarahy, A. M., Hefny, M., Al-Hinai, A., Al-Muhtaseb, A. A. H., & Rooney, D. W. (2022). Hydrogen production, storage, utilisation and environmental impacts: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(1), 153-188. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01322-8>
- Peter Andreasen, K., & Sovacool, B. K. (2014). Energy sustainability, stakeholder conflicts, and the future of hydrogen in Denmark. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 891-897. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.158>
- Prabhukhot Prachi, R., Wagh Mahesh, M., & Gangal Aneesh, C. (2016). A review on solid state hydrogen storage material. *Adv. Energy Power*, 4(11), 11-22.
- Randall, C. (2023, 16/06/2023). *Everfuel to shut down outdated hydrogen filling stations in Denmark*. Retrieved 6/08/2024 from <https://www.electrive.com/2023/09/16/everfuel-to-upgrade-hydrogen-network-in-denmark/>
- Reddi, K., Mintz, M., Elgowainy, A., & Sutherland, E. (2016). 13 - Building a hydrogen infrastructure in the United States. In M. Ball, A. Basile, & T. N. Veziroğlu (Eds.), *Compendium of Hydrogen Energy* (pp. 293-319). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-364-5.00013-0>
- Ren, J., Musyoka, N. M., Langmi, H. W., Mathe, M., & Liao, S. (2017). Current research trends and perspectives on materials-based hydrogen storage solutions: a critical review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(1), 289-311.
- Reuß, M., Grube, T., Robinus, M., & Stolten, D. (2019). A hydrogen supply chain with spatial resolution: Comparative analysis of infrastructure technologies in Germany. *Applied Energy*, 247, 438-453. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.064>
- Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. (2024). *Subsidieregeling Waterstof in mobiliteit (SWIM)*. Retrieved 13/08/2024 from <https://www.rvo.nl/subsidies-financiering/waterstof-mobiliteit>
- Rivard, E., Trudeau, M., & Zaghib, K. (2019). Hydrogen Storage for Mobility: A Review. *Materials*, 12(12).
- Rogelj, J., den Elzen, M., & Portugal-Pereira, J. (2023). *Emissions Gap Report 2023: Broken Record, Chapter 4: The emissions gap in 2030 and beyond*. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/43922/EGR2023.pdf?sequence=3&isAllowed=y&qclid=Cj0KCQiA6vaqBhCbARIsACF9M6nljT7axc-rT4poGWq68KQE1gk_6pqQH3z2fkYeBZOBFsuJ3gdqkfYaAtY7EALw_wcB
- Schlapbach, L., & Züttel, A. (2001). Hydrogen-storage materials for mobile applications. *Nature*, 414(6861), 353-358. <https://doi.org/10.1038/35104634>
- Simbeck, D., & Chang, E. (2002). Hydrogen supply: cost estimate for hydrogen pathways—scoping analysis. *National Renewable Energy Laboratory*, 71.
- Stangarone, T. (2021). South Korean efforts to transition to a hydrogen economy. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 23(2), 509-516. <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01936-6>
- Statbel. (2023, 13/09/2023). *Voertuigenpark*. Retrieved 5/11/2023 from <https://statbel.fgov.be/nl/themas/mobiliteit/verkeer/voertuigenpark>

- Straeten, T. V. d. (2022). *Visie en strategie Waterstof Update oktober 2022*. economie.fgov.be Retrieved from <https://economie.fgov.be/nl/themas/energie/energietransitie/belgische-federale>
- Tarasov, B. P., Lototskii, M. V., & Yartys', V. A. (2007). Problem of hydrogen storage and prospective uses of hydrides for hydrogen accumulation. *Russian Journal of General Chemistry*, 77(4), 694-711. <https://doi.org/10.1134/s1070363207040329>
- Usman, M. R. (2022). Hydrogen storage methods: Review and current status. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, 112743. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112743>
- Valverde, S. M. F. (2002). Hydrogen as energy source to avoid environmental pollution. *Geofísica Internacional*, 41(3), 223-228.
- Van den Broeck, Y. F., Isabel; Martens, Adwin. (2020). *Een Vlaamse waterstofstrategie 2025 - 2030*. <https://www.waterstofnet.eu/nl/kenniscentrum/roadmaps/een-vlaamse-waterstrategie-2025-2030>
- Vivanco-Martín, B., & Iranzo, A. (2023). Analysis of the European Strategy for Hydrogen: A Comprehensive Review. *Energies*, 16(9).
- Vlaamse Overheid. (2015). *Actieplan 'Clean power for transport'*. Retrieved from https://assets.vlaanderen.be/image/upload/v1626704083/Actieplan_Clean_power_for_transport_itnxfz.pdf
- Waterstofguide. (2023, 31/10/2023). *Waterstof Vrachtwagens: Kosten, Merken + Voor & Nadelen* (2024). Retrieved 08/08/2024 from <https://waterstofguide.nl/waterstof-vrachtwagens>
- Waterstofguide. (2024, 02/02/2024). *Wat Kost Waterstof Tanken in Nederland? Actuele Prijs (Augustus 2024)*. Retrieved 08/08/2024 from <https://waterstofguide.nl/waterstof-tanken/kosten>
- WaterstofNet. (2023). *Statusrapport waterstof in Vlaanderen Situatie 2023*. WaterstofNet. https://www.waterstofnet.eu/asset/public/WIC/Statusrapport_Waterstof_2023_Finaal.pdf
- WaterstofNet. (2024, 22/04/2024). *Overzicht waterstof tankstations Benelux*. Retrieved 07/08/2024 from <https://www.waterstofnet.eu/nl/overzicht-waterstof tankstations-benelux>
- Wietschel, M., Hasenauer, U., & de Groot, A. (2006). Development of European hydrogen infrastructure scenarios—CO2 reduction potential and infrastructure investment. *Energy Policy*, 34(11), 1284-1298. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.12.019>
- Yang, C., & Ogden, J. (2007). Determining the lowest-cost hydrogen delivery mode. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(2), 268-286.
- Younas, M., Shafique, S., Hafeez, A., Javed, F., & Rehman, F. (2022). An Overview of Hydrogen Production: Current Status, Potential, and Challenges. *Fuel*, 316, 123317. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123317>
- Yu, M., Wang, K., & Vredenburg, H. (2021). Insights into low-carbon hydrogen production methods: Green, blue and aqua hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(41), 21261-21273. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.016>
- Zarcone, C. (2023, 18/10/2023). *Raad akkoord over aanscherping CO2-emissienormen voor zware bedrijfsvoertuigen* <https://www.consilium.europa.eu/nl/press/press-releases/2023/10/16/council-agrees-on-new-rules-to-strengthen-co2-emission-standards-for-heavy-duty-vehicles/>
- Zhang, F., Zhao, P., Niu, M., & Maddy, J. (2016). The survey of key technologies in hydrogen energy storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(33), 14535-14552. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.293>