



**UHASSELT**

KNOWLEDGE IN ACTION

## Faculteit Bedrijfseconomische Wetenschappen

master handelsingenieur

### **Masterthesis**

***Economische en milieueffecten van zware vrachtwagens op waterstofcellen in vergelijking met zware dieselvrachtwagens in Europa***

#### **Anke Maes**

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master handelsingenieur, afstudeerrichting technologie in business

#### **PROMOTOR :**

Prof. dr. Robert MALINA

#### **BEGELEIDER :**

De heer Nattapol SRETTIWAT



**UHASSELT**

KNOWLEDGE IN ACTION

[www.uhasselt.be](http://www.uhasselt.be)

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

**2022**  
**2023**



# Faculteit Bedrijfseconomische Wetenschappen

master handelsingenieur

## ***Masterthesis***

***Economische en milieueffecten van zware vrachtwagens op waterstofcellen in vergelijking met zware dieselvrachtwagens in Europa***

### **Anke Maes**

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master handelsingenieur, afstudeerrichting technologie in business

### **PROMOTOR :**

Prof. dr. Robert MALINA

### **BEGELEIDER :**

De heer Nattapol SRETTIWAT



## Woord vooraf

In deze masterthesis worden de mogelijkheden van waterstof als brandstof voor zware vrachtwagens in Europa bestudeerd. Dit gebeurt deels door vergelijkingen te maken met zware dieselvrachtwagens.

Naast een kwalitatieve kadering rond het onderwerp worden er specifieke economische en ecologische kenmerken onderzocht. Hierdoor vormt het dan ook een mooie afsluiter van mijn studie Handelsingenieur - Technologie in Business aan de Universiteit Hasselt.

Ik wil graag mijn promotor, prof. dr. Robert Malina, en mijn begeleider, Nattapol Srettiwat, bedanken voor het interessante onderwerp, de goede begeleiding en hun feedback op mijn teksten.

Verder wil ik ook dr. Gonca Seber Olcay en Zifeng Lu bedanken om op enkele vragen omtrent GREET te antwoorden.

Ten slotte dank ik ook mijn familie en vrienden die mij gedurende de vijf jaar lange studie hebben gesupporterd, geholpen en gesteund. In het bijzonder denk ik hierbij aan mijn vriend Robin, mijn ouders, mijn broer Brent en mijn Bomma.

Anke Maes

Lummen, 4 mei 2023



# Samenvatting

## **Probleemstelling**

In 2019 waren zware vrachtwagens verantwoordelijk voor 23 procent van de totale uitstoot van het wegtransport in Europa, terwijl ze slechts twee procent van alle voertuigen op de weg representeerden (TRAFIGURA & H2 energy, 2021). Er zijn dus drastische koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>)-reductiemaatregelen nodig om dit eerste aandeel te doen dalen.

Deze thesis onderzoekt een mogelijke oplossing op basis van de volgende onderzoeksvraag: "Wat zijn de milieu- en economische effecten van zware vrachtwagens op waterstofcellen in vergelijking met zware dieselvrachtwagens in Europa?". Deze onderzoeksvraag is opdeelbaar in de volgende deelvragen: "Wat zijn de economische effecten van zware vrachtwagens op waterstofcellen in vergelijking met zware dieselvrachtwagens in Europa?", "Wat zijn de milieueffecten van zware vrachtwagens op waterstofcellen in vergelijking met zware dieselvrachtwagens in Europa?" en "Hoeveel bedraagt de *total cost of carbon abatement* (TCA) van een zware vrachtwagen op waterstofcellen in vergelijking met een zware dieselvrachtwagen in Europa?".

## **Methodologie**

De deelvragen worden onder de loep genomen met TCO-, WTW- en TCA-analyses, waarbij TCO en WTW staan voor respectievelijk *total cost of ownership* en *well-to-wheels*. De berekeningen van de TCOs baseren zich hoofdzakelijk op Basma, Zhou en Rodríguez (2022) en van de WTW-analyses betreffende broeikasgasemissies op de software GREET.

Deze analyses worden uitgevoerd in het perspectief waarbij een vlooteigenaar uit Europa de aankoper is van een nieuwe zware vrachtwagen in het jaar 2022, deze voor vijf jaar gebruikt en daarna er een restwaarde aan overhoudt. Voor de analyses met waterstof wordt er enkel gefocust op gasvormig groene waterstof.

De TCA combineert de resultaten van de TCO-analyses en WTW-analyses betreffende broeikasgasemissies en staat voor de kost voor het verminderen van de CO<sub>2</sub>-uitstoot met één kilogram CO<sub>2</sub>-equivalent door het gebruik van een zware vrachtwagen op groene waterstof in plaats van een zware vrachtwagen op diesel (Gunawan en Monaghan, 2022).

## **Resultaten**

De TCO-analyses omvatten de jaarlijkse betalingen betreffende de aanschafkosten, registratiebelastingen, eigendomsbelastingen, vaste vignetten, onderhoudskosten, tolheffingen, tankkosten, verzekeringskosten en restwaarden en resulteren in waarden van 589,508.11 euro en 974,194.78 euro voor respectievelijk een zware vrachtwagen op diesel en op groene waterstof. De WTW-analyses betreffende broeikasgasemissies leveren dan weer resultaten van respectievelijk 1.074817 kilogram CO<sub>2</sub>-equivalent per kilometer en benaderend nul kilogram CO<sub>2</sub>-equivalent per kilometer.

De bevonden TCO-waarden werden achteraf naar 'per kilometer'-waarden (respectievelijk 0.75 euro per kilogram en 1.23 euro per kilogram) omgezet om zo overeen te komen met hun WTW-eenheden. Op die manier konden de TCO- en WTW-waarden dan ook worden opgenomen in de formule in respectievelijk de teller en de noemer om de TCA te berekenen. Deze TCA draait zo uit op 0.45 euro per kilogram CO<sub>2</sub>-equivalent gereduceerd. Deze waarde duidt dat het 0.45 euro kost per kilogram CO<sub>2</sub>-equivalent dat gereduceerd wordt gaande van het gebruik van een zware vrachtwagen op diesel naar het gebruik van een zware vrachtwagen op groene waterstof. Op jaarbasis spreekt men dan van een kost van 76,419.49 euro om een totaal van 169,821.086 kilogram CO<sub>2</sub>-equivalent te reduceren, rekening houdend met alle gemaakte assumpties uit het onderzoek.

De positieve effecten op het milieu van een zware vrachtwagen op waterstof gaan samen met de bevindingen over de kenmerken et cetera uit de literatuurstudie. Wel hangt er momenteel nog een behoorlijke kostprijs aan vast, ten opzichte van een zware vrachtwagen op diesel. Deze kostprijs, tezamen met de waterstofkost zouden kunnen dalen door onder andere een verbeterde capaciteit en uitbreiding van energiegeneratoren en 'elektrolyzers', en verdere technologische vooruitgang in de toekomst.

De TCA werd ook onderworpen aan twee sensitiviteitsanalyses, één op basis van literatuurbevindingen en één op basis van procentuele veranderingen. Uit de eerste analyse kan opgemerkt worden dat de wijziging van de elektriciteitsherkomst voor de elektrolyse van water van hernieuwbare energie naar elektriciteit afkomstig van het Europese net geen milieuvoordeel blijkt teweeg te brengen. Dit, aangezien een zware vrachtwagen op diesel als referentie of standaard gerepresenteerd wordt in de TCA-formule en de WTW-emissies betreffende broeikasgasemissies nu hoger zouden liggen voor een zware vrachtwagen op waterstof (1.755434 kilogram CO<sub>2</sub>-equivalent per kilometer) dan voor een zware vrachtwagen op diesel.

De tweede analyse komt tot stand door de gehanteerde waarden van de elementen 'waterstofkost', 'dieselkost' en 'jaarlijks afgelegde afstand' te verlagen en te verhogen met tien procent. Hieruit komt voort dat de waterstofkost de hoogste verandering in TCA-waarde teweegbrengt. De tien procent daling van de gehanteerde 9.40 euro per kilogram zorgt voor een vermindering van 0.06 euro per kilogram CO<sub>2</sub>-equivalent gereduceerd en de tien procent stijging voor een vermeerdering van 0.05 euro per kilogram CO<sub>2</sub>-equivalent gereduceerd. Daarna volgt de dieselkost met een vermeerdering van 0.03 euro per kilogram CO<sub>2</sub>-equivalent gereduceerd bij een tien procent daling van de gehanteerde 1.54 euro per liter en een vermindering van 0.03 euro per kilogram CO<sub>2</sub>-equivalent gereduceerd bij een tien procent stijging. De jaarlijks afgelegde afstand heeft de minste invloed op de TCA-waarde van de drie. De tien procent daling van de gehanteerde 258,000 kilometer zorgt voor een vermeerdering van 0.03 euro per kilogram CO<sub>2</sub>-equivalent gereduceerd en de tien procent stijging voor een vermindering van 0.01 euro per kilogram CO<sub>2</sub>-equivalent gereduceerd.

## **Discussie**

De GREET-software beperkt het onderzoek door geen rekening te houden met de rol- en luchtweerstand bij de gebruikte functionele eenheid van 'per honderd kilometer' (Z. Lu, persoonlijke communicatie, 3 & 6 april 2023). Het gebrek aan professionele kennis van de software zorgt er dan

ook weer voor dat het model voor de WTW-analyse betreffende broeikasgasemissies voor een zware vrachtwagen op waterstof compressie berekent voor 350 bar in plaats van de beoogde 700 bar én *low-sulfur* diesel als brandstof wordt behouden in plaats van ULSD in het model voor de WTW-analyse betreffende broeikasgasemissies voor een zware vrachtwagen op diesel.

Daarnaast wordt de groene waterstofprijs uit Basma, Zhou en Rodríguez (2022) ook gebruikt voor de TCA-sensitiviteitsberekening op basis van literatuurbevindingen voor een zware vrachtwagen op waterstof, bekomen door elektrolyse door middel van elektriciteit van het Europese net.

Verder onderzoek zou ook de eventueel missende gegevens kunnen opsporen in de TCO-analyses alsook lonen van de vrachtwagenchauffeurs opnemen om een totaler inzicht te creëren. De WTW-analyses betreffende broeikasgasemissies kunnen ook uitgebreid worden door de CO<sub>2</sub>-equivalenten van de broeikasgasemissies van de behandlingsprocesstappen voor water te includeren in het geval van een zware vrachtwagen op waterstof.

Over het algemeen zijn toekomstige onderzoeken naar waterstof als brandstof voor zware vrachtwagens bevorderlijk wil de doorbraak of transitie er echt komen, met het oog op het analyseren van mogelijkheden voor beleidsplannen.





# Inhoud

<b>Woord vooraf</b> .....	<b>1</b>
<b>Samenvatting</b> .....	<b>3</b>
<b>Inhoud</b> .....	<b>7</b>
<b>I. Afkortingen</b> .....	<b>9</b>
<b>II. Inleiding</b> .....	<b>11</b>
<b>III. Literatuurstudie</b> .....	<b>13</b>
a. Aanpak literatuurstudie .....	13
b. Definiëring van zware vrachtwagens .....	13
c. Diesel .....	14
i. Algemene kenmerken .....	14
ii. Categorieën en soorten .....	14
iii. Import .....	14
d. Waterstof .....	15
i. Algemene kenmerken en soorten .....	15
ii. Waterstofproductie .....	17
iii. Opslag en transport .....	21
iv. Toepassing in zware vrachtwagens voor Europa .....	23
v. Europese beleidsplannen en regelgevingen .....	24
vi. Visie op hernieuwbare elektriciteitsvraag en -aanbod .....	26
e. Vergelijking van zware vrachtwagens op waterstof met zware dieselvrachtwagens .....	27
i. Technische eigenschappen .....	27
ii. Emissies .....	28
iii. Kosten en prijzen .....	29
<b>IV. Methode</b> .....	<b>31</b>
a. Aanpak methode .....	31
b. ' <i>Total cost of ownership</i> '-analyses .....	32
c. ' <i>Well-to-wheels</i> '-analyses betreffende broeikasgasemissies .....	33
i. Over GREET .....	33
ii. Algemene opstelling in GREET .....	34
iii. Specifieke opstelling in GREET voor een zware vrachtwagen op diesel .....	35
iv. Specifieke opstelling in GREET voor een zware vrachtwagen op groene waterstof .....	36
v. Samenvattende voorstelling van de ' <i>well-to-wheels</i> '-analyses betreffende broeikasgasemissies .....	38
d. ' <i>Total cost of carbon abatement</i> '-analyse .....	38
e. Sensitiviteitsanalyses .....	39
i. Sensitiviteitsanalyse op de <i>total cost of carbon abatement</i> op basis van literatuurbevindingen .....	39
ii. Sensitiviteitsanalyse op de <i>total cost of carbon abatement</i> op basis van procentuele veranderingen .....	40
<b>V. Resultaten</b> .....	<b>41</b>

a.	'Total cost of ownership'-analyses .....	41
i.	Algemene kosten van een zware vrachtwagen op diesel of groene waterstof .....	41
ii.	Specifieke kosten van een zware vrachtwagen op diesel .....	41
iii.	Specifieke kosten van een zware vrachtwagen op groene waterstof.....	42
iv.	<i>Total costs of ownership</i> van een zware vrachtwagen op diesel en groene waterstof.....	43
b.	'Well-to-wheels'-analyses betreffende broeikasgasemissies .....	44
i.	'Well-to-wheels'-analyse betreffende broeikasgasemissies voor een zware vrachtwagen op diesel .....	44
ii.	'Well-to-wheels'-analyse betreffende broeikasgasemissies voor een zware vrachtwagen op groene waterstof.....	44
c.	'Total cost of carbon abatement'-analyse .....	44
d.	Sensitiviteitsanalyses.....	45
i.	Sensitiviteitsanalyse op de <i>total cost of carbon abatement</i> op basis van literatuurbevindingen .....	45
ii.	Sensitiviteitsanalyse op de <i>total cost of carbon abatement</i> op basis van procentuele veranderingen .....	47
<b>VI.</b>	<b>Conclusie.....</b>	<b>49</b>
<b>VII.</b>	<b>Discussie .....</b>	<b>51</b>
a.	Beperkingen van het onderzoek .....	51
b.	Aanbevelingen voor verder onderzoek .....	51
<b>VIII.</b>	<b>Bibliografie.....</b>	<b>53</b>
<b>IX.</b>	<b>Bijlagen.....</b>	<b>65</b>
a.	Tabellen.....	65
b.	Figuren .....	67

# I. Afkortingen

Onderstaande tabel, tabel 1, biedt een alfabetisch overzicht van de afkortingen, samen met hun betekenissen en eventuele eenheden, die in deze thesis opgenomen worden.

*Tabel 1: afkortingen met hun betekenissen (en eenheden)*

€	Euro
°C	Graden Celsius
a	Zware vrachtwagen met een bepaalde aandrijftechnologie
AC	<i>Alternating current</i> (wisselstroom)
BC	<i>Black carbon</i>
btw	Belasting (over de) toegevoegde waarde
C2G	<i>Cradle-to-grave</i>
CAPEX	<i>Capital expenditures</i> (kapitaaluitgaven)
CCUS	<i>Carbon capture, utilisation and storage</i>
CH <sub>4</sub>	Methaan
CIDI	<i>Compression-ignition direct-injection</i>
CO	Koolstofmonoxide
CO <sub>2</sub>	Koolstofdioxide
CRF	<i>Capital recovery factor</i>
DC	<i>Direct current</i> (gelijkstroom)
DOE	<i>Department of Energy</i>
EERE	<i>Energy Efficiency and Renewable Energy</i>
ENNOH	<i>European Network of Network Operators for Hydrogen</i>
eq.	Equivalent
EU	Europese Unie
FC	<i>Fuel cost</i> (tankkost), €
FCET	<i>Hydrogen fuel cell electric heavy-duty truck</i>
FCEV	<i>Fuel cell electric vehicle</i>
FCV	<i>Fuel cell vehicle</i>
FV	<i>Fixed vignettes</i> (vaste vignetten), €
g	Gram
G.H2	Gasvormig waterstof
GHG	<i>Greenhouse gases</i> (broeikasgassen)
GO	<i>Guarantee of Origin</i>
GREET	<i>Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Technologies</i>
GVW	<i>Gross vehicle weight</i>
GW	Gigawatt
GWP	<i>Global warming potential</i> (aardopwarmingsvermogen)
H <sub>2</sub>	Waterstof
HDV	<i>Heavy-duty vehicle</i>
i	Interestvoet, %
I	<i>Investment cost</i> (aanschafkost), €
IC	<i>Insurance cost</i> (verzekeringskost), €
ICET	<i>Diesel internal combustion engine heavy-duty truck</i>

IPCEI	<i>Important Projects of Common European Interest</i>
kg	Kilogram
km	Kilometer
km <sup>3</sup>	Kubieke kilometer
kWh	Kilowattuur
LCA	Levenscyclusanalyse
LH	<i>Long-haul</i>
LS	<i>Low-sulfur</i>
MC	<i>Maintenance cost</i> (onderhoudskost), €
MJ	Megajoule
MTM	Maximale toegelaten massa
NECP	<i>National Energy and Climate Plans</i>
NO <sub>x</sub>	Stikstofoxiden
NPV	<i>Net present value</i> (netto contante waarde), €
OPEX	<i>Operational expenditures</i> (operationele uitgaven)
OT	<i>Ownership tax</i> (eigendomsbelasting), €
PEM	Polymeerelektrolytmembraan/protonuitwisselingsmembraan
PM	<i>Particulate matter</i>
POC	<i>Particulate organic carbon</i>
PPA	<i>Power purchase agreement</i> (stroomafnameovereenkomst)
ppm	<i>Parts per million</i>
PTW	<i>Pump-to-wheels</i>
PV	<i>Photovoltaic</i> (fotovoltaïsch)
r	Discontovoet, %
RED	<i>Renewable Energy Directive</i>
RT	<i>Registration tax</i> (registratiebelasting), €
SMR	<i>Steam methane reforming</i>
SO	<i>Solid oxide</i>
SO <sub>x</sub>	Zwaveloxiden
SV	<i>Salvage value</i> (restwaarde), €
t	Specifiek jaarcijfer van T
T	Gebruiksduur van de eerste aankoper, jaar
TC	<i>Toll cost</i> (tolheffing), €
TCA	<i>Total cost of carbon abatement</i> , €/kgCO <sub>2</sub> eq. gereduceerd
TCO	<i>Total cost of ownership</i> , €
TWh	Terawattuur
ULSD	<i>Ultra-low sulfur diesel</i>
UNECE	<i>United Nations Economic Commission for Europe</i>
USDOT	<i>U.S. Department of Transportation</i>
VECTO	<i>Vehicle Energy Consumption Calculation Tool</i>
VK	Verenigd Koninkrijk
VOC	<i>Volatile organic compound</i>
VS	Verenigde Staten
WTP	<i>Well-to-pump</i>
WTW	<i>Well-to-wheels</i>

## II. Inleiding

Al decennia lang doelen steeds meer en meer landen, samen met hun bedrijven op globalisering (Basma, Zhou, & Rodríguez, 2022). Het begrip kan gedefinieerd worden als de verspreiding van de stroom van financiële producten, goederen, technologie, informatie en banen over nationale grenzen en culturen heen (Fernando, 2022). Specifiek gekeken naar de verplaatsing van goederen via wegvervoer in de Europese Unie (EU), groeide dit aandeel jaarlijks gemiddeld met 1.8 procent tussen 1995 en 2018 en wordt er voorspeld dat dit voortdurend blijft groeien tot 2050 (Basma, Zhou, & Rodríguez, 2022). Niet alleen is dit een gevolg van globalisering; ook economische groei, bevolkingsgroei, snelle leveringsverwachtingen van consumenten et cetera dragen bij aan het steeds meerder wordende goederentransport (Lajevardi, Axsen, & Crawford, 2019).

In 2019 waren zware vrachtwagens verantwoordelijk voor 23 procent van de totale uitstoot van het wegtransport in Europa, terwijl ze slechts twee procent van alle voertuigen op de weg representeerden (TRAFIGURA & H2 energy, 2021). Ondanks het feit dat de EU vanaf 14 augustus 2019 koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>)-normen heeft opgesteld om een gemiddelde CO<sub>2</sub>-reductie van nieuwe zware vrachtwagens van vijftien procent te kunnen behalen in 2025 en van dertig procent in 2030, ten opzichte van de referentieperiode van juli 2019 tot juni 2020, wordt er door het groeiend aandeel een netto emissiegroei van acht procent verwacht tegen 2050 (Basma, Zhou, & Rodríguez, 2022; Erbach, 2019; Gunawan & Monaghan, 2022; TRAFIGURA & H2 energy, 2021).

Daarenboven heeft de Europese Commissie recentelijk op 13 februari 2023 een herziening op de CO<sub>2</sub>-standaarden voor zware vrachtwagens voorgesteld die CO<sub>2</sub>-reducties van 45 procent, 65 procent en 90 procent oplegt voor respectievelijk 2030, 2035 en 2040. Deze herziening dient nog wel door het Europees Parlement en de Raad van de EU overwogen te worden (European Commission, 2023b; Hydrogen Europe, 2023; The icct, 2023). Men doelt hierbij op een transitie naar een koolstofarme en uiteindelijk koolstofvrije economie (Basma, Zhou, & Rodríguez, 2022; Longden, J. Beck, Jotzo, Andrews, & Prasad, 2022).

Er zijn dus drastische CO<sub>2</sub>-reductiemaatregelen nodig om bovenstaande doelstellingen te behalen alsook klimaatneutraliteit in de EU tegen het midden van deze eeuw (Basma, Zhou, & Rodríguez, 2022; TRAFIGURA & H2 energy, 2021).

In deze thesis wordt een mogelijke oplossing onderzocht om de klimaatdoelstellingen te bereiken. Er wordt namelijk een vergelijkende studie opgezet van twee zware vrachtwagens die verschillen in aandrijftechnologieën; brandstofcellen en verbrandingsmotoren. Specifiek luidt de onderzoeksvraag: "Wat zijn de milieu- en economische effecten van zware vrachtwagens op waterstofcellen in vergelijking met zware dieselvrachtwagens in Europa?".

Deze onderzoeksvraag kan verder opgedeeld worden in de volgende deelvragen: "Wat zijn de economische effecten van zware vrachtwagens op waterstofcellen in vergelijking met zware dieselvrachtwagens in Europa?", "Wat zijn de milieueffecten van zware vrachtwagens op waterstofcellen in vergelijking met zware dieselvrachtwagens in Europa?" en "Hoeveel bedraagt de

*total cost of carbon abatement* (TCA) van een zware vrachtwagen op waterstofcellen in vergelijking met een zware dieselvrachtwagen in Europa?”.

### III. Literatuurstudie

#### a. Aanpak literatuurstudie

Vooraleer de onderzoeksvragen onder de loep worden genomen door eigen onderzoek te verrichten, worden het onderwerp en de context daarrond verder gekaderd op basis van kwalitatief onderzoek in deze literatuurstudie. Het is dan ook met deze literatuurstudie dat er een overzicht wordt gegeven van de huidige kennis in verband met de economische levensvatbaarheid van zware vrachtwagens op waterstof (Energy.gov, z.d.-a). Meer bepaald worden zware vrachtwagens eerst gedefinieerd. Vervolgens wordt diesel geïntroduceerd en wordt er een uitgebreid overzicht gegeven van waterstof en zijn link met zware vrachtwagens. Tot slot worden zware vrachtwagens op waterstof ook nog vergeleken met zware vrachtwagens op diesel met behulp van bevindingen van andere studies rond dit thema.

Om relevante informatie uit zowel wetenschappelijke artikels als andere bronnen te verkrijgen, werden verschillende databases geraadpleegd: UHasselt Discovery, Web Of Science, Google Scholar en Google. Hierbij werd telkens gezocht naar Nederlandstalige en Engelstalige literatuur waarbij de publicatiedatum tussen het jaar 2013 en 2022 valt. Ondanks dat het idee van waterstof als mogelijke brandstof al meerdere decennia bestaat, werd er voor deze periode gekozen aangezien in 2013 de eerste in massa geproduceerde Hyundai auto op waterstofbrandstofcellen (Hyundai ix35 *fuel cell electric vehicle* (FCEV)) op de markt kwam (Jonas, 2009; Koebler, 2013; Mohideen et al., 2023). Dit wil echter niet zeggen dat oudere relevante en betrouwbare literatuur uitgesloten werd. Het kan namelijk zijn dat deze vermeld werden in de referentielijsten van andere, recentere literatuur.

De zoektermen die werden ingegeven om de wetenschappelijke literatuur te bekomen, zijn: *hydrogen AND heavy-duty truck, hydrogen AND heavy-duty truck AND diesel, heavy-duty truck AND total cost of ownership, hydrogen AND heavy-duty truck AND cost of carbon, hydrogen AND heavy-duty truck AND total cost of abatement, hydrogen AND diesel AND heavy-duty truck AND total cost of carbon abatement, hydrogen AND diesel AND heavy-duty truck AND emissions* et cetera.

#### b. Definiëring van zware vrachtwagens

In Europa worden de zware vrachtwagens die in deze thesis beoogd worden, ondergebracht in de categorie 'N3', conform de UNECE-normen (i.e. de *United Nations Economic Commission for Europe*-normen) (European Commission, z.d.-a; Eurostat, 2013). Deze categorie betreft namelijk voertuigen gebruikt voor het vervoer van goederen en met een maximale massa van meer dan twaalf ton (European Commission, z.d.-a). Deze maximale massa wordt de maximale toegelaten massa (MTM) genoemd en is een veiligheidsnorm om overlading te vermijden (Belgium.be, z.d.; Soard, 2017). Het limiteert het maximum gewicht van een voertuig inclusief brandstof, inzittenden en de vracht zelf (Soard, 2017).



## c. Diesel

In deze sectie worden eerst enkele algemene kenmerken van diesel besproken. Hierna wordt er dieper ingegaan op zijn categorieën en soorten en als laatste op waar het Europese diesel vandaan komt.

### i. Algemene kenmerken

Doorgaans wordt diesel gedestilleerd van ruwe aardolie en daarna gezuiverd in een raffinaderij opdat het gebruikt wordt als fossiele brandstof voor dieselmotoren, oftewel interne verbrandingsmotoren (Military.com, z.d.). Specifiek wordt de brandstof vooral gebruikt bij auto's, vrachtwagens, bussen, treinen, schepen, boten, tractoren en mobiele machines zoals bouwmachines (Urbancic et al., 2017).

### ii. Categorieën en soorten

Vanaf 2009 is *ultra-low sulfur diesel* (ULSD) de standaard aan de pomp in de EU met maximum tien *parts per million* (ppm) zwavel en minstens een cetaangetal (i.e. een getal dat de bereidheid tot zelfontbranding van een (diesel)brandstof aanduidt onder druk en aanwezigheid van zuurstof) van 51 (DieselNet, z.d.; Hot Shot's Secret, 2020; Woorden.org, z.d.). Deze dieselcategorie wordt bekomen door extra raffinage van de vroegere hoogzwavelige petroleumdieselolie (Military.com, z.d.). In de Verenigde Staten (VS) werd deze categorie pas verplicht vanaf 2011, echter onder andere vereisten: maximum vijftien ppm zwavel en een cetaangetal van minimum veertig (Hot Shot's Secret, 2020).

Specifiek zijn er in Europa verschillende diesersoorten aan de pomp. Hierbij is 'B7' de soort die geschikt is voor elke dieselauto. De '7' in de naam verwijst naar het percentage biobrandstof dat erin aanwezig is (ANWB, z.d.). Maar, zelfs al worden er extra zuiveringsprocessen en toevoegingen gedaan aan het productieproces, diesel blijft bijdragen aan het vervuilen van water, de biodegradatie, gezondheidsproblemen en de milieuvervuiling (Maes, z.d.). Dit brengt dus negatieve effecten met zich mee voor de gehele levende natuur (i.e. plant, dier en mens) (Malaise, z.d.).

### iii. Import

Vóór de Russische invasie in Oekraïne in 2022, was veertig procent van de geïmporteerde diesel afkomstig uit Rusland (McWilliams, Tagliapietra, & Zachmann, 2023). Zoals in sectie III. d. ii nog verder aan bod zal komen, heeft de EU sinds de invasie echter limieten gelegd op de invoer van Russische grondstoffen en brandstoffen, zoals diesel. Echter kwamen deze limieten er pas enkele maanden na de Russische invasie in Oekraïne, aangezien de EU eerst naar alternatieven moest zoeken. Zo levert de VS sinds kort meer ruwe aardolie en diesel aan Europa. In september 2022 steeg bijvoorbeeld de import van diesel in de EU door de VS tot 73,000 vaten per dag, het hoogste aantal in meer dan een jaar terug. Verder blijft de EU ook veel ruwe aardolie en diesel halen uit Saoedi-Arabië en Indië en in mindere maten uit onder meer de Verenigde Arabische Emiraten en het

Verenigd Koninkrijk (VK) (Eurostat, z.d.-a; Eurostat, z.d.-b; McWilliams, Tagliapietra, & Zachmann, 2023).

Bijgevolg kwam de import van diesel uit Rusland in oktober 2022 neer op 546,000 vaten per dag, wat meer is dan in september 2022 (510,000 vaten per dag), maar wel een heel stuk minder dan in juli 2022 (700,000 vaten per dag) (l'Anson, 2022). Deze neerwaartse trend bleef zich ook verderzetten; in de eerste helft van januari 2023 kelderde dit aantal tot gemiddeld 448,000 vaten per dag (Perkins & Staden-Coats, 2023). Ook de import van Russische ruwe aardolie is fel gedaald; van gemiddeld 1.55 miljoen vaten per dag in 2021 naar gemiddeld 1 miljoen vaten per dag tussen maart en november 2022 (l'Anson, 2022). Sinds 5 februari 2023 werd er dan een totaalverbod opgelegd op de invoer van geraffineerde producten uit Rusland voor de EU (McWilliams, Tagliapietra, & Zachmann, 2023; Perkins & Staden-Coats, 2023).

Ruwe aardolie en diesel worden doorgaans vervoerd via schepen (tankers), pijpleidingen, spoorwegen en vrachtwagens (Library of Congress, z.d.).

## d. Waterstof

In dit gedeelte worden er eerst enkele algemene kenmerken van waterstof opgesomd. Daarna wordt er dieper ingegaan op zijn toeleveringsketen met het oog op de toepassing van waterstof bij zware vrachtwagens. Specifiek betreft dit de volgende zaken: zijn verschillende soorten, het gebruik van water bij de productie, de verscheidene productiefaciliteiten, de herkomst van de gebruikte elektriciteit en overeenkomsten die hierbij aan bod kunnen komen, zijn functie tot het opslaan van elektriciteit, de manieren van opslag, zijn transportopties, zijn toepassing in zware vrachtwagens, enkele fabrikanten van zware vrachtwagens op waterstof voor Europa, de gerelateerde Europese beleidsplannen en regelgevingen en tot slot een visie op de hernieuwbare elektriciteitsvraag -en het aanbod.

### i. Algemene kenmerken en soorten

Waterstof is het meest voorkomende element in het universum; het representeert ongeveer 75 procent van alle materie (Boretti, 2021). Echter bestaat het doorgaans niet op zichzelf in de natuur, waardoor het dient geproduceerd te worden uit verbindingen die waterstof bevatten, bijvoorbeeld methaan en water (Pandev et al., 2017; Solar Edition, 2020; U.S. Department of Energy, z.d.).

In onze economie kan waterstof in verschillende toepassingen worden gebruikt als vervanger van fossiele brandstoffen. Als brandstof wordt het gebruikt in de transportsector (vrachtwagens, schepen, vliegtuigen et cetera), al dan niet bij overbelasting van elektriciteitscentrales. Het levert ook warmte in verschillende industrieën, zoals staal, cement, papier, voeding, aluminium, en residentiële en commerciële gebouwen. Tot slot is het ook een grondstof voor chemicaliën (meststoffen, brandstofraffinage en kunststoffen) en producten (metallurgie, voeding, staal en glas) (Bhandari & Rakesh Shah, 2021; Enkvist, Westerdahl, & Elmqvist, 2020; TRAFIGURA & H2 energy, 2021).

Verder is waterstof op zich niet explosief. Enkel als het met de juiste verhoudingen zuurstof gemengd wordt en daarna wordt aangestoken, is waterstof brandbaar. Dit maakt wel dat er extra veiligheidsmaatregelen genomen moeten worden bij transportmiddelen zoals zware vrachtwagens om te zorgen dat er bij een aanrijding geen vlam bij de waterstof kan komen (Oponeo, 2020).

Op basis van productiemethode kunnen verschillende soorten waterstof gedefinieerd worden. Hier wordt er enkel verder ingegaan op de soorten die momenteel zeer competitief op de markt zijn, namelijk grijze waterstof, blauwe waterstof en groene waterstof (Mohideen et al., 2023; Solar Edition, 2020; TRAFIGURA & H2 energy, 2021).

Bij grijze waterstof wordt waterstof geproduceerd uit fossiele brandstoffen, zoals aardgas, door *steam methane reforming* (SMR) (Longden, J. Beck, Jotzo, Andrews, & Prasad, 2022; Solar Edition, 2020; TRAFIGURA & H2 energy, 2021). Deze methode splitst methaan (CH<sub>4</sub>) in CO<sub>2</sub>, dat in de atmosfeer terecht komt, en in waterstof (H<sub>2</sub>) (Jones et al., 2021; TRAFIGURA & H2 energy, 2021).

Echter gebeurt dit door middel van twee chemische reacties, namelijk  $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$  en  $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$  (Ishaq, Dincer, & Crawford, 2022; Mohideen et al., 2023). Bij de eerste wordt stoom van rond de zeventienhonderd tot duizend graden Celsius (°C) gemengd met aardgas in de hervormingsreactor, waarbij dit syngas (H<sub>2</sub> en koolstofmonoxide (CO)) produceert. Hierna komt het syngas in de '*water-gas-shift*'-reactor, die gewoonlijk water (stoom) met een metalen katalysator bevat. Hieruit komt dan de CO<sub>2</sub> en meer H<sub>2</sub>. De CO<sub>2</sub> wordt dan gescheiden en de H<sub>2</sub> gezuiverd tot wel 99.99 procent (Bhandari & Rakesh Shah, 2021; Liu et al., 2020; Mohideen et al., 2023). In het algemeen wordt er uit elke kilogram (kg) waterstof dat er geproduceerd wordt ongeveer negen kilogram CO<sub>2</sub> uitgestoten (Jones et al., 2021; Liu, L. Mauzerall, Zhao, & Hao, 2021; Mohideen et al., 2023). Echter beweert Mohideen et al. (2023) dat er hierbovenop nog 1.9 tot 5.2 kilogram CO<sub>2</sub> per kilogram waterstof indirect wordt uitgestoten door vluchtige methaanemissies. Grijze waterstof is dan ook duidelijk nefast voor het milieu (TRAFIGURA & H2 energy, 2021).

Daarnaast is blauwe waterstof de waterstof die bekomen wordt door de splitsing van methaan (van fossiele brandstoffen), waarbij de CO<sub>2</sub> die vrijkomt onmiddellijk opgevangen wordt door CCUS (TRAFIGURA & H2 energy, 2021). CCUS staat voor *carbon capture, utilization and storage*. Dit is het proces waarbij de uitstoot van koolstofdioxide wordt opgevangen en ofwel wordt gebruikt in chemische processen om dingen te maken (gebruik), zoals bouwmaterialen, of om ze permanent duizenden meters onder het oppervlak op te slaan (opslag) (CCUSNetwork, z.d.; chevron, 2022; Jones et al., 2021). Door dit extra proces te koppelen aan de splitsing van methaan, verminderen de CO<sub>2</sub>-emissies met zeventig tot negentig procent volgens Jones et al. (2021) of met 85 tot 95 procent volgens Kakoulaki et al. (2021) en Mohideen et al. (2023). Daardoor wordt er per kilogram geproduceerd waterstof 'slechts' drie tot zes kilogram CO<sub>2</sub> uitgestoten (Jones et al., 2021; Liu, L. Mauzerall, Zhao, & Hao, 2021). Als CCUS toegevoegd wordt aan bestaande installaties voor grijze waterstof, vereist dit dan ook slechts een beperkte kost (Mohideen et al., 2023). Echter wordt er amper een paar procent van de globale waterstofmarkt hierdoor geproduceerd volgens Jones et al. (2021) en amper 0.7 procent volgens Mohideen et al. (2023). In totaal is de wereldproductie van waterstof door middel van fossiele brandstoffen (met of zonder CCUS) wel ongeveer 95 procent (Ishaq, Dincer, & Crawford, 2022; Mohideen et al., 2023).

De laatste soort die besproken wordt, is groene waterstof. Deze soort waterstof wordt (doorgaans) gegenereerd uit water in een 'elektrolyser' (Hydrogen Europe, z.d.; Solar Edition, 2020; TRAFIGURA & H2 energy, 2021). Zo wordt de benaming ook in het vervolg van de thesis in deze context aanschouwd. Voor deze soort is het belangrijk dat het elektrolyseproces wordt aangedreven door hernieuwbare energie. Meestal worden hiervoor zon (op basis van fotovoltaïsche technologieën) en wind als hernieuwbare energiebronnen genomen (Lee, Elgowainy, Kotz, Vijayagopal, & Marcinkoski, 2018; Pandev et al., 2017; Solar Edition, 2020). Specifiek wordt bij dit elektrochemisch proces water gesplitst in waterstof en het bijproduct zuurstof (Mohideen et al., 2023; Solar Edition, 2020; TRAFIGURA & H2 energy, 2021).

Dit elektrolyseproces kan aan de hand van verschillende technologieën gebeuren. De meest voorkomende zijn polymeerelektrolytmembraan/protonuitwisselingsmembraan (PEM)- en alkaline-elektrolyse (Elgowainy et al., 2022; Mohideen et al., 2023; Wulf & Kaltschmitt, 2018). Beide werken bij temperaturen van vijftig tot tachtig graden Celsius, maar verschillen op vlak van elektrolytoplossing en elektrodesamenstelling (Bhandari & Rakesk Shah, 2021; Helgeson & Peter, 2020). De eerste is voorlopig ook iets duurder, gevoeliger aan onzuiverheden en minder matuur, maar wel onderhoudsvriendelijker, energie-efficiënter en compacter, waardoor deze ideaal is voor voertuigtoepassingen (Bhandari & Rakesk Shah, 2021; Elgowainy et al., 2022; Interplex, z.d.; Ishaq, Dincer, & Crawford, 2022; Mohideen et al., 2023). Ook heeft de PEM-elektrolyse een hogere productiesnelheid en zorgt het voor uiterst puur waterstof (Bhandari & Rakesk Shah, 2021; Ishaq, Dincer, & Crawford, 2022).

Daarnaast is de '*solid oxide*' (SO)-technologie de efficiëntste technologie van de drie en de meest opkomende, maar het vereist wel temperaturen van rond de zevenhonderd en negenhonderd graden Celsius waardoor het elektrolytische celmateriaal sneller degradeert (Bhandari & Rakesk Shah, 2021; Elgowainy et al., 2022; Ishaq, Dincer, & Crawford, 2022). Aangezien het productieproces geen gebruik maakt van fossiele brandstoffen, wordt er gezegd dat dit dan ook geen CO<sub>2</sub> uitstoot (Bhandari & Rakesk Shah, 2021; Birol, 2019; Jones et al., 2021; Mohideen et al., 2023).

Een overzicht van alle soorten waterstof, zoals gedefinieerd door Hydrogen Europe (z.d.), wordt voor de volledigheid nog in tabel A in de bijlagen gegeven. Hierbij is het belangrijk te vermelden dat hoewel kernenergie koolstofvrij is, de waterstof die hiermee gegenereerd wordt niet aanschouwd wordt als groene waterstof, maar wel als roze waterstof. Dit, voornamelijk omdat het uranium dat nodig is om hiermee elektriciteit op te wekken een uitputbare bron is. Daarnaast is het een onveilige technologie waarbij na het proces radioactief afval overblijft. Dit heeft in het verleden dan ook al ernstige ongevallen veroorzaakt, zoals in Fukushima in 2011 (Milieu Centraal, z.d.; Salt, 2022).

Groene waterstof was eerder een niche industrie, maar krijgt meer en meer aandacht, beginnende bij de sectoren waarbij de CO<sub>2</sub>-uitstoot moeilijk te verminderen valt (Jones et al., 2021).

## ii. Waterstofproductie

Elk productieproces van waterstof vereist een andere hoeveelheid water. Om grijze waterstof te produceren, is het stoichiometrische gedemineraliseerd waterverbruik 4.5 liter per kilogram

geproduceerd waterstof. Daarnaast moeten ook stoomverliezen en verliezen door verdampingskoeling worden meegerekend. Hierdoor bedraagt het werkelijke waterverbruik vijftien tot veertig liter water per kilogram geproduceerd waterstof. Voor blauwe waterstof is hier bovenop nog een behoefte aan stoom en koeling voor koolstofafvang en -compressie, wat resulteert in een watervraag van 18 tot 44 liter water per kilogram geproduceerd waterstof (Coertzen, Potts, Brannock, & Dagg, z.d.).

Voor groene waterstof is er echter zeer zuiver water nodig (Bhandari & Rakesh Shah, 2021; Mohideen et al., 2023; Taekker Madsen, 2022). De waterbehoefte voor groene waterstof is stoichiometrisch negen liter ultrapuur water per kilogram geproduceerd waterstof (Coertzen, Potts, Brannock, & Dagg, z.d.; Mohideen et al., 2023; Taekker Madsen, 2022). Echter dienen hier nog een paar factoren bij opgeteld te worden:

- Ten eerste vereist koeling voor 'elektrolyzers' door middel van verdampingsgekoelde systemen dertig tot veertig kilogram water per kilogram waterstof. Na verloop van tijd neemt de 'fuel cell stack'-efficiëntie van de 'elektrolyser' ook af, wat de koelbelasting dan nog eens doet stijgen gedurende de levensduur van de *stack* (doorgaans acht tot tien jaar) met veertig tot zeventig procent (Coertzen, Potts, Brannock, & Dagg, z.d.);
- Daarnaast zijn er nog andere koelbelastingen nodig zoals de 'multi-stage'-compressoren met interkoeling om de geproduceerde waterstof te comprimeren tot een geschikte druk voor opslag of gebruik (Coertzen, Potts, Brannock, & Dagg, z.d.);
- Vervolgens dient het toegevoerde, onbehandelde water behandeld te worden, afhankelijk van zijn kwaliteit, om te voldoen aan de zuiverheidsvereiste van 'elektrolyzers', waardoor ongeveer twintig tot veertig procent van het water tijdens het behandelingsproces wordt afgevoerd (Coertzen, Potts, Brannock, & Dagg, z.d.). Deze kwaliteit hangt af van het gebruikte type water. De verschillende types zijn grondwater, behandeld afvalwater/oppervlaktewater, zeewater en gechlloreerd stadswater. Echter wordt deze laatste wel niet door grotere waterstoffaciliteiten gebruikt (Taekker Madsen, 2022). Volgens Taekker Madsen (2022) is er twaalf liter grondwater, dertien liter behandeld afvalwater of dertig liter zeewater nodig om één kilogram waterstof te kunnen maken. De reden hiervoor ligt in de verschillende behandelingsprocesstappen die de verschillende types moeten ondergaan (Taekker Madsen, 2022). Deze worden weergegeven in figuur A in de bijlagen;
- Tot slot kan het afvalstroomwater vanwege de verhoogde concentratie aan onzuiverheden vaak niet in het milieu worden geloosd en moet het worden aangesloten op een afvalverwerkingsinstallatie of ter plaatse worden behandeld of afgevoerd (Coertzen, Potts, Brannock, & Dagg, z.d.).

Al deze extra belastingen kunnen leiden tot een hoeveelheid van 60 tot 95 kilogram water per geproduceerde kilogram groene waterstof (Coertzen, Potts, Brannock, & Dagg, z.d.).

Deze hoeveelheden lijken misschien veel, maar het dient relatief bekeken te worden. Zoals nog verder aan bod zal komen in deelsectie III. d. v heeft de EU als doel om tegen 2030 10 miljoen ton waterstof te produceren (Hydrogen Europe, 2020). Als we ervan uitgaan dat alle waterstof uit zeewater wordt geproduceerd, dan is hiervoor 600 tot 950 miljard liter zeewater voor nodig. Aangezien de aarde uit ongeveer 1.4 miljard kubieke kilometer (km<sup>3</sup>) zeewater bestaat, is dit hier slechts 0.000429 tot 0.000679 procent van (R. Beswick, M. Oliveira, & Yan, 2021).

Verder kan waterstof geproduceerd worden in twee verschillende faciliteiten: centrale (gecentraliseerde/*off-site*) of gedecentraliseerde (verdeelde/*on-site*) (Basma, Zhou, & Rodríguez, 2022; Ishaq, Dincer, & Crawford, 2022; Khzouz et al., 2020; U.S. Department of Energy, z.d.). Aan beide zijn voor- en nadelen verbonden. Het produceren van waterstof in grote centrales verlaagt productiekosten door schaalvoordelen, maar verhoogt distributiekosten. Voor het produceren van waterstof aan een afnamepunt voor eindgebruikers, zoals een tankstation, is het principe dan weer tegengesteld; waterstof dient hierbij niet meer vervoerd te worden, maar het vergt kosten om ter plaatse productiemogelijkheden te bouwen (Basma, Zhou, & Rodríguez, 2022; Khzouz et al., 2020; U.S. Department of Energy, z.d.).

Daarnaast valt er nog een onderscheid te maken op basis van het elektriciteitssysteem dat wordt toegepast in het geval waterstof via elektrolyse wordt gegenereerd. Zo bestaan er netgekoppelde (*'on-grid'*-) en onafhankelijke (*'off-grid'*-) elektriciteitssystemen (Gunawan & Monaghan, 2022; Lundblad, Taljegard, & Johnsson, 2023). Bij het eerste systeem kan de productiefaciliteit zelf in zijn energie voorzien en/of elektriciteit gebruiken van het net. Bij het tweede systeem is elektriciteitsvoorziening door het net niet mogelijk en dient er dus zelf energie voorzien te worden. Dit tweede wordt onder andere gebruikt door afgelegen of geïsoleerde locaties waar netgebruik niet mogelijk of te duur is (Gunawan & Monaghan, 2022).

Voorgaande vier productieonderscheidingen kunnen dan ook worden samengebracht in de volgende termen: centrale, netgekoppelde systemen; centrale, onafhankelijke systemen; gedecentraliseerde, netgekoppelde systemen en gedecentraliseerde, onafhankelijke systemen.

Verdergaand op het geval dat waterstof geproduceerd wordt met behulp van elektriciteit, afkomstig van het elektriciteitsnet, kan worden opgemerkt dat het Europese net elektriciteit bevat van verschillende bronnen. In 2022 bestond de elektriciteitsmix van de EU voor 21.9 procent uit nucleaire energie. Het tweede grootste aandeel werd ingenomen door gas met 19.9 procent. Verder bestond 16 procent uit kool, 15 procent uit wind, 10.1 procent uit water (hydro), 7.3 procent uit zonne-energie, 6 procent uit bio-energie en tot slot 3.6 procent uit andere fossiele bronnen (Jones, 2023). Hierbij kende het aandeel van zonne- en windenergie een stijging ten opzichte van 2021 met iets minder dan twintig procent. Het jaar 2022 was dan ook het eerste jaar waarbij wind en zon een grotere rol speelden in de mix dan gas (George, 2023). Dit kan worden verklaard door Europa haar versnelde elektriciteitstransitie vanaf de Russische invasie in Oekraïne sinds 2022. Zo streeft Europa ernaar om nog zo weinig mogelijk gas te moeten gebruiken (European Commission, 2023a; Jones, 2023; l'Anson, 2022). Ook is ze op hetzelfde moment bezig met het uitfaseren van kool. Europa werkt dus momenteel aan een grote opschaling van schone energie (Jones, 2023; l'Anson, 2022).

Als waterstofproducenten ervoor kiezen om elektriciteit van het net te halen, wil dit niet altijd zeggen dat hun waterstof niet als groene waterstof beschouwd kan worden. Zo wordt waterstof ook als groen beschouwd als er sprake is van een *off-site* stroomafnameovereenkomst (PPA). Zo een overeenkomst kan voornamelijk aantrekkelijk zijn als beide partijen, de hernieuwbare elektriciteitsproducent en de waterstofproducent, zich ver van elkaar situeren, maar waarbij de waterstofproducent toch in staat wil zijn om zijn CO<sub>2</sub>-uitstoot bij zijn productieproces te verminderen. Het houdt in dat hernieuwbare elektriciteitsproducenten dezelfde hoeveelheid elektriciteit, gegenereerd uit hernieuwbare bronnen, aan het net leveren als waterstofproducenten afnemen van het net voor hun productie. In de praktijk worden de elektronen die de waterstofproducent ontvangt voor zijn productie dus wel niet perse door duurzame opwekking geproduceerd (i.e. geen fysieke hernieuwbare elektriciteitslevering). Het spreekt voor zich dat deze PPA dan ook een contractuele overeenkomst is, waarbij in het bijzonder hernieuwbare elektriciteitsproducenten zich aan duidelijke afspraken dienen te houden en moeten kunnen aantonen dat hun elektriciteit afkomstig is van een hernieuwbare of schone bron. De waterstofproducenten betalen hun hiervoor (Baker Botts, 2021; Next Kraftwerke, z.d.; Pinsent Masons, 2021). Ook leidt het afhaken van het net tot hogere capaciteitsfactoren van 'elektrolyzers' en lagere kosten (Salt, 2022).

Als daarnaast waterstof wordt gegenereerd door onafhankelijke energieopwekkingssystemen, is dit vaak door wind- en/of zonne-energie. In windturbines wordt kinetische energie omgezet in mechanische energie en deze wordt dan weer omgezet in elektrische energie in AC-vorm, oftewel wisselstroom. Aangezien een 'elektrolyser' DC (i.e. gelijkstroom) vereist, moet een AC/DC-omzetter worden ingezet. Over het algemeen bestaan er twee klassen windturbines: *onshore* en *offshore*. De eerste situeren zich op het land, de tweede op het water. De bronnen van zonne-energie daarentegen kunnen worden geclassificeerd in thermisch, fotonvoltaïsch (PV) en foto-elektrochemisch (Broekhuijzen, z.d.; Energy Saver, z.d.; Gunawan & Monaghan, 2022; Ishaq, Dincer, & Crawford, 2022; VITO, 2010).

Als de combinatie van zowel wind- als zonne-energie wordt gebruikt, spreekt men van een hybride elektriciteitssysteem. Dit hybridesysteem heeft ook voordelen ten opzichte van een enkel systeem. Zo kan het in de winter voornamelijk voordeel halen uit de wind en in de zomer uit de zon zodat het heel het jaar door in staat is om waterstof te genereren en de capaciteitsfactor dus hoog ligt (Energy Saver, z.d.; Gunawan & Monaghan, 2022; Mohideen et al., 2023). Bijgevolg kan de waterstof aan een lagere prijs verkocht worden dan als de capaciteitsfactor lager lag door bijvoorbeeld gebruik te maken van een enkel systeem (Salt, 2022). Echter is het niet zeker of zelfs dit hybridesysteem in staat is om op termijn aan de hogere vraag van waterstof te voldoen. In dat geval is het interessant om de capaciteiten van de energiegeneratoren te verhogen en/of die van de 'elektrolyzers' (Gunawan & Monaghan, 2022).

Bovendien kunnen waterstofproducenten er ook voor kiezen om een *on-site* PPA aan te gaan. Hierbij levert een leverancier rechtstreeks hernieuwbare energie uit een portfolio van verschillende opwekkingsinstallaties en technologieën, die ook een zekere mate van geografische diversiteit kunnen omvatten (Baker Botts, 2021; Next Kraftwerke, z.d.). Naast de *off-site* PPA en de *on-site* PPA bestaan er nog PPAs waarbij tussenpersonen een belangrijke rol spelen (Next Kraftwerke, z.d.).

Over het algemeen zijn PPAs gebaseerd op de betaling van een vaste prijs, gekoppeld aan de output over een vaste periode. Hierdoor hebben de elektriciteitsproducenten voldoende zekerheid betreffende hun inkomsten over een periode die lang genoeg is om de financiële levensvatbaarheid van hun project veilig te stellen. Echter dienen zij hiervoor rekening te houden met de kredietrisico's van hun kopers (Next Kraftwerke, z.d., Pinsent Masons, 2021). Er is dan ook bezorgdheid of deze overeenkomst er niet voor zorgt dat alleen grote waterstofbedrijven met voldoende financiële steun zo een overeenkomst zouden kunnen sluiten (Pinsent Masons, 2021).

Enkele voorbeelden van Europese waterstofproducenten zijn het Amerikaans-Duits bedrijf Linde plc, met hoofdzetels in het VK en in Dublin en het Franse bedrijf Air Liquide International SA. Daarnaast is waterstofproductie ook een hoofdzaak van het Franse bedrijf McPhy. Het Duitse bedrijf Messer Group GmbH, dat gespecialiseerd is in industriële gassen, focust zich ook op de productie van waterstof (Fortune Business Insights, 2022).

Bedrijven zoals hierboven vermeld, kunnen CertifHy-certificaten *Guarantees of Origin* (GO) aanvragen voor hun koolstofarme en groene waterstofproducties. Deze certificaten vergemakkelijken de totstandkoming van een efficiënte en geharmoniseerde waterstofmarkt, aangezien ze een betrouwbaar hulpmiddel zijn voor consumenten om de oorsprong en milieueffecten van de waterstof in kwestie te kunnen achterhalen ("CertifHy", z.d.; Jones et al., 2021; Velazquez Abad & Dodds, 2020). Zo wordt het certificaat van groene waterstof momenteel uitgedeeld als de waterstof afkomstig is uit hernieuwbare bronnen, zoals gedefinieerd in artikel twee van de *Renewable Energy Directive* (RED) II, met *well-to-pump* (WTP) broeikasgasemissies die minstens zestig procent lager liggen dan de productie van waterstof door SMR van aardgas die 91 gCO<sub>2</sub>eq./MJ (waarbij g staat voor gram, eq. voor equivalent en MJ voor megajoule) uitstoot. Het certificaat van blauwe waterstof wordt dan weer toegediend als de waterstof afkomstig is van niet-hernieuwbare oorsprong; kern- of fossiele energie, die gebruikmaakt van CCUS met dezelfde WTP broeikasgasvereisten als bij groene waterstof ("CertifHy", z.d.; Velazquez Abad & Dodds, 2020).

### iii. Opslag en transport

Terwijl we evolueren naar een groenere en CO<sub>2</sub>-armere samenleving, maken we gebruik van meer en meer hernieuwbare elektriciteit in plaats van fossiele brandstoffen en bovendien blijft de hoeveelheid elektriciteitsconsumptie ook stijgen door de toename in het elektrisch rijden, het gebruik van warmtepompen et cetera (Baker Botts, 2021; Enkvist, Westerdahl, & Elmqvist, 2020; Pandev et al., 2017; VREG, z.d.). Dit geeft als gevolg dat het net bedreigd wordt met overbelasting (Baker Botts, 2021; Enkvist, Westerdahl, & Elmqvist, 2020; VREG, z.d.). Om dit probleem te helpen oplossen, kunnen er bijvoorbeeld onafhankelijke stroomproducties opgebouwd worden (Baker Botts, 2021).

Een andere oplossing is het gebruiken van de overtollige groene stroom om er groene waterstof van te maken (Baker Botts, 2021; Bhandari & Rakesh Shah, 2021; Energy.gov, z.d.-a; Gunawan & Monaghan, 2022; Solar Edition, 2020; Stamatakis et al., 2022). In dat geval bestaan er dus gelijktijdig groene waterstofprojecten die waterstof produceren wanneer hernieuwbare stroom



beschikbaar en goedkoop is en groene waterstofprojecten die een consistente stroomvoorziening nodig hebben om een stabiele en consistente productie te ondersteunen. Echter dienen de waterstofproducenten wel de afweging te maken of de (extra) opbrengsten wel of niet en in welke mate de (extra) infrastructuurkosten en dienstkosten overstijgen, aangezien volledige capaciteit niet altijd te garanderen valt in dit geval (Baker Botts, 2021).

Hiernaast kan de overtollige energie ook opgeslagen worden in batterijen, naarmate de batterijtechnologie zich verder ontwikkelt en de prijzen lager worden (Baker Botts, 2021; TRAFIGURA & H2 energy, 2021). Echter beschikken hedendaagse batterijen reeds over een hoge efficiëntie en een lage zelfontlading (Bhandari & Rakesh Shah, 2021). Het gebruikmaken van batterijen geeft als voordeel dat een adequaat elektriciteitsniveau kan behouden worden voor de werking van waterstofinstallaties (Baker Botts, 2021).

Eenmaal waterstof geproduceerd is, kan ook dit worden opgeslagen (Energy.gov, z.d.-b; Mohideen et al., 2023; TRAFIGURA & H2 energy, 2021). Echter resulteert de lage dichtheid bij omgevingstemperatuur in een lage energie per volume-eenheid (Energy.gov, z.d.-b; TRAFIGURA & H2 energy, 2021). Daardoor zijn er verscheidende opslagmethoden ontwikkeld die een hogere energiedichtheid voor waterstof veroorzaken (CNBC, 2020; Energy.gov, z.d.-b).

Als men waterstof als gas wil opslaan, dient het eerst gecompriëerd te worden (Engie, z.d.; Solar Edition, 2020). De compressie zorgt ervoor dat de benodigde ruimte van opslag beperkt blijft. Echter gaat hierdoor wel tussen de tien en vijftien procent aan energie verloren, afhankelijk van de gewenste druk (Engie, z.d.). Na de compressie wordt de waterstof opgeslagen in hogedrukvaten (meestal in buisvorm) met doorgaans een druk van 350 tot 700 bar (Energy.gov, z.d.-b; Engie, z.d.; Lundblad, Taljegard, & Johnsson, 2023; Solar Edition, 2020). Een druk van 350 bar komt meer voor bij vrachtwagens die bedoeld zijn om kortere afstanden af te leggen ten opzichte van een druk van 700 bar (Basma & Rodríguez, 2022; Lee, Elgowainy, Kotz, Vijayagopal, & Marcinkoski, 2018; Ruf, Baum, Zorn, Menzel, & Rehberger, 2020). Bij de druk van 700 bar is voorkoeling nodig tot temperaturen van min twintig tot min veertig om oververhitting van de brandstofslang of tank te vermijden (Gökçek & Kale, 2018; Lee, Elgowainy, Kotz, Vijayagopal, & Marcinkoski, 2018; Liu et al., 2020; Lundblad, Taljegard, & Johnsson, 2023; Mayyas & Mann, 2019; Wulf & Kaltschmitt, 2018). De energie die nodig is voor deze compressie en voorkoeling ligt rond de drie tot vijf kilowattuur (kWh) per kilogram waterstof (Basma & Rodríguez, 2022; Liu et al., 2020).

Daarnaast kan het ook opgeslagen worden als vloeistof. Deze vorm is momenteel voornamelijk minder gebruikelijk in wegtransport (Basma, Zhou, & Rodríguez, 2022; Engie, z.d.; Ruf, Baum, Zorn, Menzel, & Rehberger, 2020). Dit komt omdat het temperaturen vereist van onder de -252°C en er dus veel energie verloren gaat aan het koelingsproces (Energy.gov, z.d.-b; Engie, z.d.). Echter beschikt het over een hoge volumetrische energiedichtheid (Ruf, Baum, Zorn, Menzel, & Rehberger, 2020).

Verder is het ook mogelijk om waterstof op te slaan in materiaal, lege gasvelden, zoutgrotten of uitgeputte olievelden (Engie, z.d.).

Over het algemeen wordt gezegd dat waterstof jarenlang opgeslagen kan worden (Bhandari & Rakesh Shah, 2021).

Als waterstof geproduceerd wordt in een centrale faciliteit, dient het achteraf vervoerd te worden naar de gebruikers. Dit kan op verschillende manieren gebeuren, wat ook flexibiliteit biedt aan de markt en de regio of het land waarin deze zich situeert (Ishaq, Dincer, & Crawford, 2022).

Zo kan waterstof bijvoorbeeld vervoerd worden door middel van pijpleidingen. Een voorwaarde hiervoor is wel dat de waterstof eerst wordt gecompriëerd. Gebieden kunnen dus een netwerk van pijpleidingen aanleggen, maar natuurlijk brengt deze constructie een kost met zich mee. Daarnaast beschikken sommige gebieden al over een pijpleidingennetwerk dat eerst gebruikt werd voor het transporteren van aardgas. Zij kunnen deze pijpleidingen dan zoveel mogelijk gaan hergebruiken om het in te zetten voor het transport van waterstof (Enkvist, Westerdahl, & Elmqvist, 2020; Ishaq, Dincer, & Crawford, 2022; TRAFIGURA & H2 energy, 2021). België is hier een voorbeeld van (Moradzadeh, Zwaenepoel, Boel, & Vandeveld, 2013; van Lier, 2023).

Daarnaast kan waterstof ook via een vrachtwagen of treinverkeer vervoerd worden na compressie of het vloeibaar maken van de waterstof. Nog andere mogelijkheden zijn het vervoeren van vloeibaar waterstof door marinetankers, waterstof in de vorm van ammoniak of waterstof in de vorm van stabiele chemicaliën (zoals methanol) door chemische tankschepen (Ishaq, Dincer, & Crawford, 2022).

#### iv. Toepassing in zware vrachtwagens voor Europa

Bij het tanken van een vrachtwagen komt de waterstof in een waterstoftank terecht. Deze tank wordt gemaakt van sterke materialen zoals carbon of metaal om de grote druk aan te kunnen (Oponeo, 2020). Opdat de vrachtwagen gaat bewegen, kan de waterstof met behulp van een chemische reactie met aanwezigheid van zuurstof in brandstofcellen gebruikt worden om energie op te wekken. De omzettingen van elektriciteit naar waterstof en in de vrachtwagen van waterstof naar elektriciteit zorgen er wel voor dat de energie-efficiëntie lager aanschouwd wordt (CNBC, 2020; Gunawan & Monaghan, 2022; Oponeo, 2020). Daarnaast wordt er bij deze laatste reactie ook water en warmte geproduceerd als bijproducten (Pandev et al., 2017; Solar Edition, 2020). Hierbij is het belangrijk te vermelden dat waterstof geen energiebron is, maar wel een energiedrager (Engie, z.d.).

Momenteel rijden er al enkele vrachtwagens op waterstof rond in Europa. Zo maakten de eerste vrachtwagens op waterstof hun eerste kilometers in Nederland en Zwitserland in 2020, die gefabriceerd werden door de bedrijven Hyundai en Hyzon (Fitzgerald, 2020; FuelCellsWorks, 2020). Ook Nikola legt naast zijn markt in de VS, ook de focus op het produceren van vrachtwagens voor Europa (WaterstofNet, z.d.).

Daarnaast werken onder het, door de EU gesponsorde, 'H2Haul'-project twee van de grootste vrachtwagenfabrikanten van Europa, IVECO en VDL, momenteel samen om zestien zware vrachtwagens op waterstof te bouwen die zullen worden ingezet in België, Frankrijk, Duitsland en

Zwitserland. Hiernaast wordt er ook een netwerk van zes waterstoftankstations ontworpen en geïnstalleerd, die groene waterstof zullen aanbieden (CORDIS, 2023; H2Haul, z.d.).

#### v. Europese beleidsplannen en regelgevingen

De Europese Commissie heeft het potentieel van groene waterstof erkend in haar recente beleidsplannen. De Europese *Green Deal* identificeert waterstof als sleutel tot een schone en circulaire economie. Verder heeft de EU in 2020 een specifieke waterstofstrategie uitgevaardigd, waarin maatregelen worden gebundeld om een snelle en gerichte ontwikkeling van productiecapaciteit voor groene waterstof te bevorderen. Niettemin vereist een succesvolle implementatie voldoende initiatief op nationaal niveau. Maar ook daar zien we dat bijna alle EU-landen groene waterstof vermelden in hun *National Energy and Climate Plans* (NECP) voor 2030 (Wolf & Zander, 2021).

De waterstofstrategie bestaat uit drie fasen. De eerste fase loopt van 2020 tot 2024. Hierbij belooft de Europese Commissie dat het de installaties van minstens zes gigawatt aan hernieuwbare 'waterstofelektrolyzers' in de EU gaat ondersteunen en de productie van maximaal 1 miljoen ton groene waterstof. De tweede fase gaat in vanaf 2025 en eindigt in 2030. Hierbij streven ze ernaar dat waterstof een intrinsiek onderdeel wordt van ons energiesysteem, met minstens veertig gigawatt aan hernieuwbare 'waterstofelektrolyzers', die in staat zijn om tot wel 10 miljoen ton hernieuwbaar waterstof te produceren in de EU (Enkvist, Westerdahl, & Elmqvist, 2020; TRAFIGURA & H2 energy, 2021). Vanaf 2030 zal groene waterstof op grote schaal ingezet worden bij alle sectoren die moeilijk te decarboniseren zijn (TRAFIGURA & H2 energy, 2021).

De EU was het erover eens dat zware vrachtwagens een optimale sector vormen voor het introduceren van koolstofarme (denkend aan blauwe) en koolstofvrije (denkend aan groene) waterstof, aangezien het de laagste marginale kost van CO<sub>2</sub>-vermindering met zich meebracht van alle sectoren waarbij moeilijk de CO<sub>2</sub>-uitstoot te verminderen valt door technische, operationele en economische obstakels (Longden, J. Beck, Jotzo, Andrews, & Prasad, 2022; TRAFIGURA & H2 energy, 2021). Deze vrachtwagens moeten namelijk in staat zijn om lange afstanden af te leggen, zware ladingen met zich mee te dragen en snel te kunnen tanken en hebben daarnaast ook kleine winstmarges. Eenmaal schaalvoordelen bereikt zullen worden bij het vrachtvervoer, wordt deze waterstof ook bij andere sectoren meer toepasselijk (TRAFIGURA & H2 energy, 2021).

Verdere maatregelen zijn opgenomen in het 'Fit for 55'-pakket van beleidsvoorstellen van de EU. Het pakket bevat plannen om de uitbouw van infrastructuur voor alternatieve brandstoffen te versnellen, inclusief een doelstelling om minstens elke 150 kilometer (km) een waterstoftankstation voor zware en lichte voertuigen te voorzien langs de Europese snelwegen (TRAFIGURA & H2 energy, 2021). Het is dus belangrijk dat er tegelijkertijd ingezet wordt op zowel tankinfrastructuur als op de zware vrachtwagens op waterstof zelf, aangezien deze hand in hand gaan (Mohideen et al., 2023; TRAFIGURA & H2 energy, 2021). Ook steunt de Europese Commissie de verdere ontwikkeling van waterstof via *Important Projects of Common European Interest* (IPCEI). De 'IPCEI Hy2Tech'

bijvoorbeeld, goedgekeurd in juli 2022, includeert 41 projecten die zich richten op de ontwikkeling van innovatieve technologieën voor de waterstofwaardeketen (European Commission, 2023a).

Met deze plannen voorspelt de EU dat het aandeel van waterstof in de Europese energiemix zal groeien van twee procent in 2020 tot tussen de dertien en veertien procent in 2050. De verwachte investeringen die hiermee gepaard gaan voor groene waterstof in Europa zullen daarmee tussen de 180 en 470 miljard euro (€) liggen tegen 2050, en voor blauwe waterstof tot wel 320 miljard euro bedragen. Als deze investeringen kunnen ingezet worden met een economisch en regelgevend ecosysteem, dat alle belanghebbenden en stappen in de waterstofwaardeketen (zoals de fabrikanten van onderdelen, de opslag, het transport en de brandstof- en infrastructuraanbieders) ondersteunt, kan het echter vooruitgang boeken (Ruf, Baum, Zorn, Menzel, & Rehberger, 2020; TRAFIGURA & H2 energy, 2021). Hier is Zwitserland het voorbeeld van; H2 Energy heeft hier een ecosysteem gecreëerd om groene waterstof te produceren en te leveren aan concurrerende kosten aan de Zwitserse vrachtwagenindustrie (TRAFIGURA & H2 energy, 2021).

In Vlaanderen, België kunnen vlooteigenaars die de stap wagen naar een vrachtwagen op waterstof verder ook op een ecologiepremie rekenen van 90,000 euro (WaterstofNet, 2022). Ook in onder andere Duitsland, Frankrijk, Italië, Spanje, Polen, Nederland en het VK kunnen vlooteigenaars rekenen op aanschafsubsidies (Basma, Zhou, & Rodríguez; 2022). Echter blijken deze vaak niet gemakkelijk verkrijgbaar te zijn vanwege de administratieve lasten die deze met zich meebrengen en bieden ze geen stabiele omgeving voor planning, aangezien ze gewoonlijk jaarlijks worden herzien. Ook bieden ze geen duurzame oplossing, omdat ze voor grote overheidsinvesteringen zorgen. Hierdoor zijn er al enkele alternatieven voor het traditionele model van eigendom van vrachtwagens ontstaan, die terug te vinden zijn in tabel B in de bijlagen (The icct & European Clean Trucking Alliance, 2022). Basma, Zhou en Rodríguez (2022) geven bijkomstig aan dat in de transitiefase subsidies op waterstof zelf wel zeker nodig zijn (Noll, del Val, S. Schmidt, & Steffen, 2022; TRAFIGURA & H2 energy, 2021).

Daarnaast zorgt de nieuwe Eurovignetwet ervoor dat EU-landen op koolstof gebaseerde tolheffingen toepassen en een tolvrijstelling van vijftig procent implementeren voor emissievrije vrachtwagens vanaf april 2023 (The icct & European Clean Trucking Alliance, 2022; Transport & Environment, 2020).

Op 13 februari 2023 werden er door de Europese Commissie regels, standaarden en andere kaderingen gemaakt om te definiëren wat hernieuwbare waterstof in de EU is, door middel van twee *Delegated Acts* (European Commission, 2023a). Dit werd tijd, aangezien verschillende oudere bronnen aanhaalden dat rond dit onderwerp te weinig regelgeving bestond (Enkvist, Westerdahl, & Elmqvist, 2020; Velazquez Abad & Dodds, 2020). Echter dienen het Europees Parlement en de Raad deze *Acts* nog eerst te aanvaarden en blijven er nog veel zaken onduidelijk en onbepaald, zoals de *European Network of Network Operators for Hydrogen* (ENNOH) (European Commission, 2023a; Europees Parlement, 2023).

In de eerste *Delegated Act* wordt bepaald onder welke voorwaarden waterstof, brandstoffen op basis van waterstof of andere energiedragers kunnen worden beschouwd als hernieuwbare brandstoffen

van niet-biologische oorsprong. De wet verduidelijkt het principe van additionaliteit voor waterstof; het feit dat 'elektrolyzers' waterstof dienen te produceren op basis van nieuwe hernieuwbare elektriciteitsproducties. Dit principe heeft tot doel ervoor te zorgen dat de opwekking van hernieuwbare waterstof een stimulans vormt voor een toename van het volume hernieuwbare energie dat beschikbaar is. Op deze manier ondersteunt de waterstofproductie de decarbonisatie (European Commission, 2023a).

De vereisten voor de productie van hernieuwbare waterstof zullen gelden voor zowel binnenlandse producenten als producenten uit derde landen die hernieuwbare waterstof naar de EU willen exporteren en zo bijdragen aan de EU-doelstellingen voor hernieuwbare energie. Een certificeringsregeling die berust op vrijwillige regelingen zal ervoor zorgen dat de producenten op een eenvoudige en gemakkelijke manier kunnen aantonen dat zij voldoen aan het EU-kader en hernieuwbare waterstof kunnen verhandelen binnen de interne markt (European Commission, 2023a).

De tweede *Delegated Act* voorziet in een methode voor het berekenen van broeikasgasemissies gedurende de levenscyclus van hernieuwbare brandstoffen van niet-biologische oorsprong. De methodologie houdt rekening met de uitstoot van broeikasgassen gedurende de volledige levenscyclus van de brandstoffen (European Commission, 2023a).

De EU verwacht daarenboven dat elke 1 miljard euro die in groene waterstof wordt geïnvesteerd, 10,570 nieuwe banen zal creëren (TRAFIGURA & H2 energy, 2021).

#### vi. Visie op hernieuwbare elektriciteitsvraag en -aanbod

Aangezien er nu slechts een klein percentage groene waterstof wordt geproduceerd, zoals reeds besproken in deelsectie III. d. i, is de huidige elektriciteitsvraag voor deze waterstof dan ook verwaarloosbaar klein. Maar, met de steeds meerdere implementaties van 'elektrolyzers' tegen 2030 verwacht de Europese Commissie dat er rond de 500 terawattuur (TWh) aan hernieuwbare elektriciteit nodig zal zijn om 10 miljoen ton hernieuwbare waterstof zelf te produceren, wat vooropgesteld wordt door REPowerEU. Daarnaast opteren ze om dan ook 10 miljoen hernieuwbare waterstof te laten importeren (European Commission, 2023a). Enkvist, Westerdahl en Elmqvist (2020) gaan hierin verder en stellen dat als de vraag 540 TWh zou zijn, er ongeveer 120 gigawatt (GW) extra hernieuwbare energie nodig zou zijn in Europa. Echter gaan zij wel uit van zeventig procent productie uit de EU. Deze hoeveelheden overkoepelen echter de hele afzetmarkt van waterstof, waarvan circa 52 procent olieraffinaderijen (Kakoulaki et al., 2021).

Volgens Kakoulaki et al. (2021) blijkt dan weer dat in 2019 ongeveer 77 procent van de waterstofproducerende regio's in Europa meer dan vijftig procent wind- en zonne-energie op overschot had.

## e. Vergelijking van zware vrachtwagens op waterstof met zware dieselvrachtwagens

In dit gedeelte wordt er een vergelijking van zware vrachtwagens op waterstof met zware vrachtwagens op diesel gemaakt aan de hand van enkele bevindingen uit de literatuur. Hierbij worden eerst enkele technische eigenschappen overlopen. Hierna volgen enkele bevindingen rond emissies, en kosten en prijzen. Echter is het hierbij belangrijk te vermelden dat de geraadpleegde studies en rapporten over het algemeen verschillen in geografisch gebied, tijdsperiode en methodologische benaderingen en assumpties.

Ook werden in vorige gedeeltes al verschillende aspecten aangehaald. Deze komen in dit gedeelte dan ook niet meer aan bod.

### i. Technische eigenschappen

De grootte van de batterij in de FCEV is beperkt, waardoor het laadvermogen overeenkomt met die van een dieselvrachtwagen en de eventuele bijlaadtijd aan een laadpaal ook weinig is (Mohideen et al., 2023; TRAFIGURA & H2 energy, 2021; van den Brink, 2022). Bovendien heeft de batterij een goede laad-ontlaad efficiëntie en kan het de energie bij het remmen terug opvangen (Basma, Zhou, & Rodríguez, 2022; de las Nieves Camacho, Jurburg, & Tanco, 2022). Om extra vermogen te kunnen leveren, maakt de vrachtwagen gebruik van de energie uit deze batterij. In de praktijk gebeurt dit vaak bij het in gang zetten van de vrachtwagen, het versnellen en het transporteren van een zwaardere lading in heuvel- of bergachtig gebied (Lee, Elgowainy, Kotz, Vijayagopal, & Marcinkoski, 2018; Szalek, Pielecha, & Cieslik, 2021; van den Brink, 2022).

Door enerzijds te kunnen rekenen op de batterij (met een efficiëntie van minstens 85 procent) voor zware inspanningen en anderzijds op de hogere energie-efficiëntie van waterstofcellen (50 tot 60 procent in vergelijking met 20 tot 35 procent voor verbrandingsmotoren, aangezien hierbij minder hitte verloren gaat), is de afstand die deze zware vrachtwagen kan afleggen overeenkomstig met die van een dieselvrachtwagen (Gunawan & Monaghan, 2022; Mohideen et al., 2023; Ruf, Baum, Zorn, Menzel, & Rehberger, 2020; TRAFIGURA & H2 energy, 2021).

Ook heeft waterstofgas een energiedichtheid van circa 34.72 kWh bij een druk van 700 bar, wat de bruikbare energie per kilogram waterstofgas representeert (MVW Autotechniek, z.d.; TRAFIGURA & H2 energy, 2021). Dit betekent dat één kilogram waterstofgas, gebruikt in een brandstofcel om een elektromotor aan te drijven ongeveer dezelfde energie produceert als circa 3.79 liter diesel ("Berekenen.nl", z.d.; TRAFIGURA & H2 energy, 2021). Waterstofgas heeft dan ook de hoogste energie per massa van alle brandstoffen, namelijk 120 megajoule per kilogram waterstof (EUR-Lex, 2022; TRAFIGURA & H2 energy, 2021). Met één kilogram waterstof kan twaalf tot veertien kilometer gereden worden (TRAFIGURA & H2 energy, 2021).

Daarnaast ligt de tijd om zo een FCEV vol te tanken doorgaans rond de tien en vijftien minuten, wat overeenstemt met die van een dieselvrachtwagen (Lee, Elgowainy, Kotz, Vijayagopal, & Marcinkoski,

2018; Mohideen et al., 2023; Ruf, Baum, Zorn, Menzel, & Rehberger, 2020). De waterstofpompen kunnen ook gewoon toegevoegd worden bij de huidige tankstations (TRAFIGURA & H2 energy, 2021).

## ii. Emissies

Als vrachtwagens op waterstof tien procent van de vrachtwagenvloot in de EU zouden vervangen (wat zou overeenkomen met het jaarlijkse investeringspercentage in vrachtwagens), dan zou dit jaarlijks 42 miljoen ton CO<sub>2</sub> kunnen vermijden (in de veronderstelling dat de jaarlijkse CO<sub>2</sub>-voetafdruk ongeveer 68 ton equivalent is voor een dieselvrachtwagen en er zich circa 6.2 miljoen middelgrote en zware vrachtwagens op de markt bevinden) (Neste, z.d.; TRAFIGURA & H2 energy, 2021). Er wordt hierbij verondersteld dat het om groene waterstofgas betreft.

Specifiek worden er door Gunawan en Monaghan (2022) ook bevindingen opgesteld betreffende de *well-to-pump* (WTP), *pump-to-wheels* (PTW) en *well-to-wheels* (WTW) CO<sub>2</sub>-equivalente emissies voor zware dieselvrachtwagens en zware vrachtwagens op waterstof die ten dienste staan in de steengroevensector in Ierland, waarbij de elektriciteit voor de waterstofproductie door *onshore* en *offshore* windturbines gegenereerd werd en dit zowel voor een netgekoppeld als voor een onafhankelijk systeem. Deze zijn terug te vinden in tabel 2, waarbij ICET staat voor *diesel internal combustion engine heavy-duty truck* en FCET voor *hydrogen fuel cell electric heavy-duty truck*. Echter menen ze deze 'berekend' te hebben op basis van het onderzoek van Lee, Elgowainy, Kotz, Vijayagopal en Marcinkoski (2018). In dit onderzoek werden de WTP-waarden verkregen door middel van de GREET-software (waarbij GREET staat voor *Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Technologies*) en voor hun PTW-waarden maakten ze gebruik van specifieke voertuigspecificaties (Gunawan & Monaghan, 2022; Lee, Elgowainy, Kotz, Vijayagopal, & Marcinkoski, 2018).

Tabel 2: WTP-, PTW- en WTW-emissiebevindingen van Gunawan en Monaghan (2022)

		ICET	FCET
<b>Netgekoppeld systeem</b>	WTP ( <i>gCO<sub>2</sub>eq./kWh</i> )	46	36
	PTW ( <i>gCO<sub>2</sub>eq./kWh</i> )	239	0
	WTW ( <i>gCO<sub>2</sub>eq./kWh</i> )	285	36
<b>Onafhankelijk systeem</b>	WTP ( <i>gCO<sub>2</sub>eq./kWh</i> )	46	0
	PTW ( <i>gCO<sub>2</sub>eq./kWh</i> )	239	0
	WTW ( <i>gCO<sub>2</sub>eq./kWh</i> )	285	0

Uit deze tabel kan worden afgeleid dat de totale WTW-emissies voor een zware dieselvrachtwagen bijna acht keer groter zijn dan voor een zware vrachtwagen op waterstof bij het netgekoppeld systeem. Bij het onafhankelijk systeem stoot een zware vrachtwagen op waterstof zelfs helemaal geen emissies uit. Bij beide systemen valt ook af te leiden dat de zware vrachtwagen op waterstof geen emissies uitstoot bij het transport zelf.

### iii. Kosten en prijzen

Zoals reeds bij sectie III. d. v aan bod kwam, is het verlagen van de kosten van koolstofarme en koolstofvrije waterstof naarmate de industrie schaal de belangrijkste uitdaging die tussenkomt van de overheid vereist. De prijs voor groene waterstof aan de pomp in Europa komt neer op tien euro per kilogram, exclusief belasting over de toegevoegde waarde (btw) en inclusief productie-, opslag- en distributiekosten, en ligt bijgevolg veel hoger dan de prijs voor diesel (Europese Commissie, z.d.; Horlings, 2021; Lundblad, Taljegard, & Johnsson, 2023; Mohideen et al., 2023; TRAFIGURA & H2 energy, 2021).

Echter wordt er een snelle daling opgemerkt voor de systeemkosten van deze waterstof (Energy.gov, z.d.-a; Enkvist, Westerdahl en Elmqvist, 2020; TRAFIGURA & H2 energy, 2021). De aanschaf- en bouwkosten van een 'elektrolyser', die twintig procent van de productiekosten van groene waterstof vertegenwoordigen, zijn de afgelopen tien jaar met vijftig procent gedaald (Energy.gov, z.d.-a; TRAFIGURA & H2 energy, 2021). Deze dalende trend lijkt zich ook nog voort te zetten naarmate het vermogen blijft toenemen en als het platina dat erin verbruikt wordt, vervangen wordt door metaalvrije katalysatoren of gerecycleerd wordt (Liu, L. Mauzerall, Zhao, & Hao, 2021; Ishaq, Dincer, & Crawford, 2022; TRAFIGURA & H2 energy, 2021). Tegen 2030 wordt er verwacht dat de kost voor een 'elektrolyser' gehalveerd zal zijn door middel van schaalvoordelen. Enkvist, Westerdahl en Elmqvist (2020) melden namelijk dat de grote 'elektrolyserproducenten', zoals Nel en Siemens, goed voorbereid zijn om hun productie snel op te schalen. Merendeels willen ze dit bereiken door hun productieproces meer te gaan automatiseren, wat dan ook weer op kosten bespaart (Enkvist, Westerdahl en Elmqvist; 2020). Daarnaast verlagen ook de kosten van de hernieuwbare energiebronnen naarmate onder andere meerdere windturbines en zonnepanelen gebouwd worden (Energy.gov, z.d.-a; Gunawan & Monaghan, 2022; Kakoulaki et al., 2021; TRAFIGURA & H2 energy, 2021). Er wordt dan ook tegen 2030 verwacht dat groene waterstof een grote concurrent vormt voor fossiele brandstoffen (Kakoulaki et al., 2021; TRAFIGURA & H2 energy, 2021). Voorgaande twee elementen worden hierbij verondersteld voor de grootste kosten te zorgen (Liu, L. Mauzerall, Zhao, & Hao, 2021; Longden, J. Beck, Jotzo, Andrews, & Prasad, 2022; Mohideen et al., 2023; Wulf & Kaltschmitt, 2018).

Verder blijkt uit Gunawan en Monaghan (2022) dat de *total cost of ownership* (TCO) van een zware dieselvrachtwagen en van een zware vrachtwagen op groene waterstof in een onafhankelijk systeem in beide gevallen hoger is dan in een netgekoppeld systeem, aangezien deze eerste een kleinere uitrustingsformaat vereisen. Door deze bevinding samen te voegen met die van in de vorige deelsectie, kunnen we dus concluderen dat de onafhankelijke systemen de totale emissies bij de twee aandrijftechnologieën verminderen, maar wel meer kosten (Gunawan & Monaghan, 2022).



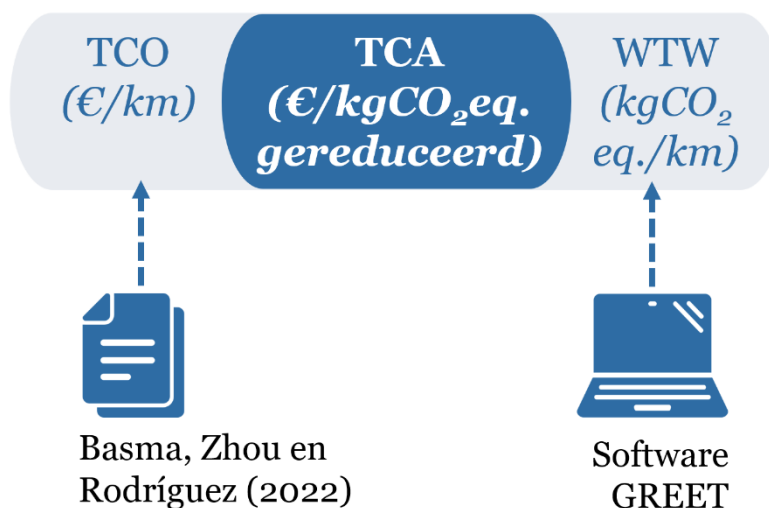


## IV. Methode

### a. Aanpak methode

Om antwoord te kunnen bieden op de hoofdvraag dienen verder de deelvragen, “Wat zijn de economische effecten van zware vrachtwagens op waterstofcellen in vergelijking met zware dieselvrachtwagens in Europa?”, “Wat zijn de milieueffecten van zware vrachtwagens op waterstofcellen in vergelijking met zware dieselvrachtwagens in Europa?” en “Hoeveel bedraagt de TCA van een zware vrachtwagen op waterstofcellen in vergelijking met een zware dieselvrachtwagen in Europa?”, onder de loep genomen te worden. In de volgende deelsecties wordt dit gedaan onder respectievelijk TCO-, WTW- en TCA-analyses. De samenhang van deze drie wordt samenvattend gevisualiseerd in figuur 1 hieronder. Deze analyses worden uitgevoerd in het perspectief waarbij een vlooteigenaar uit Europa de aankoper is van een nieuwe zware vrachtwagen in het jaar 2022, deze voor vijf jaar gebruikt en daarna er een restwaarde aan overhoudt.

*Figuur 1: samenhang TCO-, WTW- en TCA-analyses*



De gebruiksduur van vijf jaar wordt vooropgesteld, aangezien Argonne National Laboratory (z.d.) assumeert dat de gemiddelde leeftijd van voertuigen op de baan vijf jaar is. In Basma, Zhou en Rodríguez (2022), Basma en Rodríguez (2023) en Ruf, Baum, Zorn, Menzel en Rehberger (2020) wordt ook duidelijk dat vijf jaar de periode is waarbij de eerste aankoper van het voertuig dit voertuig gebruikt en deze daarna nog voor tien jaar bij de volgende eigenaar meegaat (The icct & European Clean Trucking Alliance, 2022).

Meer specifiek worden de analyses uitgevoerd voor zware vrachtwagens die lange afstanden afleggen, oftewel *long-haul* (LH) zware vrachtwagens. Deze namen in 2021 nog het grootste deel in van de nieuw geregistreerde vrachtwagens met een percentage van 61.9 procent ten opzichte van de referentieperiode van juli 2019 tot juni 2020 (Suzan, 2021).

Voor de analyses met waterstof wordt er enkel gefocust op groene waterstof, aangezien de Europese Commissie het gebruik van waterstof, geproduceerd uit hernieuwbare elektriciteit, tot op lange

termijn ondersteunt, zoals ook aan bod kwam in sectie III. d. v (Basma, Zhou, & Rodríguez, 2022). De vele technologische verbeteringen en de toenemende snelheid van de uitbreiding van hernieuwbare energiebronnen in Europa zijn hier voorbeelden van (Basma, Zhou, & Rodríguez, 2022; Lundblad, Taljegard, & Johnsson, 2023; Ruf, Baum, Zorn, Menzel, & Rehberger, 2020). Deze in steek wordt ook gerechtvaardigd door experts (Küffner, 2022).

Verder gaat de thesis enkel in op gasvormig waterstof, aangezien deze vorm meer matuur is (Basma, Zhou, & Rodríguez, 2022; Ruf, Baum, Zorn, Menzel, & Rehberger, 2020).

Alle cijfers worden afgerond tot op twee cijfers na de komma, behalve deze met betrekking tot de WTW-analyses betreffende broeikasgasemissies.

### b. '*Total cost of ownership*'-analyses

Om de economische effecten van het gebruik van een zware vrachtwagen op diesel en groene waterstof te onderzoeken, worden er TCO-analyses uitgevoerd. De berekeningen van de TCOs voor vlooteigenaars uit Europa van zware vrachtwagens op diesel en groene waterstof baseren zich hoofdzakelijk op Basma, Zhou en Rodríguez (2022). Aangezien zij geen specifieke eindbedragen uitbrengen, worden de kosten zelf nagegaan met behulp van de informatie die te vinden is in de paper. Hierbij wordt er soms afgeweken van de gegevens en uitvoeringen indien ergens duidelijkere, betere of recentere redeneringen aangebracht konden worden. Alsook worden er toevoegingen gedaan aan hun uitwerkingen om het totaalkostenplaatje zo accuraat mogelijk te maken. Echter vormden deze aanpassingen niet de hoofdzaak.

Basma, Zhou en Rodríguez (2022) beoogden *tractor-trailers* voor hun studie, aangezien zij 57 procent van de nieuwe registraties van de zware voertuigen uitmaken en verantwoordelijk zijn voor 75 procent van de CO<sub>2</sub>-emissies van de zware voertuigen in de EU. Zulke vrachtwagens met een 4x2 asconfiguratie zouden hieraan de grootste bijdrage leveren met een percentage van 68.2 (Basma, Zhou, & Rodríguez, 2022; Delgado, Rodríguez, & Muncrief, 2017; European Automobile Manufacturers Association, 2020; Meszler, Delgado, Rodríguez, & Muncrief, 2018).

Het is hierbij belangrijk te vermelden dat hun analyse voor een zware vrachtwagen op groene waterstof zich baseerde op productie in een gedecentraliseerd, netgekoppeld systeem (Basma, Zhou, & Rodríguez, 2022).

Specifiek wordt er voor beide vrachtwagens een gemiddelde genomen van de kosten en andere waarden van enkele Europese landen, namelijk: Duitsland, Frankrijk, Italië, Nederland, Polen, Spanje en het VK met het oog op 2022. Er werd voor deze landen gekozen, aangezien ze samen meer dan 75 procent van de Europese zware vrachtwagens vertegenwoordigen (Basma, Zhou, & Rodríguez, 2022).

De TCO van een zware vrachtwagen met een bepaalde aandrijftechnologie bestaat voornamelijk uit kapitaaluitgaven (CAPEX) en operationele uitgaven (OPEX) (Noll, del Val, S. Schmidt, & Steffen, 2022). In dit geval wordt de aanschafkost (I) van een zware vrachtwagen gefinancierd over vijf jaar,

waarbij de bedragen betaald dienen te worden aan het begin van elk jaar (Basma, Zhou, & Rodríguez, 2022). Dit kan uitgedrukt worden in  $I * CRF$ , waarbij CRF staat voor de *capital recovery factor* en deze CRF berekend wordt aan de hand van onderstaande wiskundige formule, formule 1:

$$CRF = \frac{i * (1+i)^T}{(1+i)^T - 1} \quad (1),$$

met  $i$  de interestvoet in procent en  $T$  de gebruiksduur van de eerste aankoper in jaar (Noll, del Val, S. Schmidt, & Steffen, 2022). Voor de rest omvat het de registratiebelasting (RT), restwaarde (SV), eigendomsbelastingen (OT), vaste vignetten (FV), onderhoudskosten (MC), tolheffingen (TC), tankkosten (FC) en verzekeringskosten (IC).

Bovenstaande parameters worden dan uiteindelijk herleid naar een netto contante waarde (NPV) voor het aanschafjaar 2022 op basis van volgende formule, formule 2:

$$NPV(TCO_a) = \sum_{t=0}^{T-1} \frac{I_{a,0} * CRF}{(1+r)^t} + RT_0 - \frac{SV_{a,T}}{(1+r)^T} + \sum_{t=1}^T \frac{(OT_t + FV_t + MC_t + TC_t + FC_{a,t} + IC_{a,t})}{(1+r)^t} \quad (2),$$

gebaseerd op Gunawan en Monaghan (2022), Navigator (2010) en Noll, del Val, S. Schmidt en Steffen (2022). Hierbij staat  $a$  voor een zware vrachtwagen met een bepaalde aandrijftechnologie,  $t$  is een specifiek jaarcijfer van  $T$  en  $r$  geeft de discontovoet weer in procent (Basma, Zhou, & Rodríguez, 2022). Een nul in het subscript wijst dan weer op het jaar van aanschaf.

Hierbij wordt er verondersteld dat er geen grote vervangingen, zoals een batterijvervanging, noodzakelijk zijn aan de zware vrachtwagen in kwestie en hier dan ook geen kosten uit voortkomen, zoals ook wordt geassumeerd door Basma, Zhou en Rodríguez (2022) en Noll, del Val, S. Schmidt en Steffen (2022). Bij deze laatste gaan ze onder meer uit van het feit dat batterijvervanging nodig is na zeven tot acht jaar (Noll, del Val, S. Schmidt & Steffen, 2022). Echter worden kleine vervangingen, zoals vervangingen van banden en smeermiddelen, en reparaties ondergebracht in MC (Basma, Zhou, & Rodríguez, 2022).

Lonen voor de chauffeurs worden in deze berekening niet in rekening gehouden.

### c. 'Well-to-wheels'-analyses betreffende broeikasgasemissies

Om de milieueffecten van de productie en consumptie van diesel en groene waterstof, gebruikt in zware vrachtwagens, te achterhalen, worden er WTW-analyses uitgevoerd. Dit gebeurt met behulp van de -gratis te downloaden- GREET software ("GREET", z.d.; Office of Scientific and Technical Information, 2022). Deze software werd hier namelijk aanbevolen.

#### i. Over GREET

Gesponsord door de *U.S. Department of Energy's (DOE) Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE)* werd de eerste versie van het GREET model in 1996 uitgebracht door *Argonne National Laboratory*. Meer bepaald is het een analytische tool die het energieverbruik en de milieuparameters (i.e. watergebruik en uitstoot van broeikasgassen en luchtverontreinigende stoffen) van verschillende voertuig- en brandstofcombinaties kan simuleren ("GREET", z.d.; Lu & C. Kelly, z.d.; Office of Scientific and Technical Information, 2022). Hierbij geeft GREET de optie om

een levenscyclusanalyse (LCA) uit te voeren voor een transportbrandstof en/of een voertuig ("GREET", z.d.; Office of Scientific and Technical Information, 2022).

Bij een brandstof kan er nog een onderverdeling gemaakt worden tussen WTP, PTW en WTW. WTP omvat de energie-, water- en emissie-effecten vertrekkende vanuit het verkrijgen van de grondstof van een brandstof (brandstofproductie) tot en met het vervoeren van die brandstof tot aan een pomp. PTW omvat deze effecten vanaf dat een voertuig een bepaalde brandstof tankt aan een pomp tot en met deze brandstof opgebruikt wordt door het voertuig (operationeel) en dus in de atmosfeer terechtkomt. WTW omvat dan weer de energie-, water- en emissie-effecten van WTP en PTW samen ("GREET", z.d.).

Bij een LCA van een voertuig worden de energie-, water- en emissie-effecten nagegaan die verband houden met de productie en terugwinning van voertuigmateriaal, de fabricage van voertuigcomponenten, de voertuigassemblage en de verwijdering of recyclage van het voertuig of voertuigonderdelen ("GREET", z.d.; Office of Scientific and Technical Information, 2022). De LCA van een brandstof en een voertuig samen kan gezien worden als een 'cradle-to-grave' (C2G)-analyse, oftewel een volledige levenscyclusanalyse (Argonne National Laboratory, z.d.; Malaise, z.d.).

Bovenstaande LCA-tools zijn beschikbaar op twee verschillende platformen: het GREET.net model en het GREET Excel model. Deze laatste bestaat nog uit twee sub-modellen: het brandstofcyclusmodel (GREET 1) en het voertuigcyclusmodel (GREET 2).

## ii. Algemene opstelling in GREET

In deze thesis wordt het GREET.net model met versie 1.3.0.13991, die werd uitgebracht op 11 oktober 2022, gehanteerd. Op de website van GREET wordt namelijk aangehaald dat het '.net'-model gemakkelijker is in gebruik ("GREET", z.d.). Hierbij wordt enkel gefocust op de WTW-analyses van zowel diesel als groene waterstof die dienen als aandrijving voor zware vrachtwagens.

Om aan te tonen dat de vrachtwagengerelateerde benamingen en gewichten, gebruikt in GREET, grotendeels overeenkomen met die van Europa, wordt de desbetreffende Europese vrachtwagencategorisatie, zoals beschreven in sectie III. b, vergeleken met die van de VS.

In de VS werken ze hiervoor met klassen, opgesteld door de *U.S. Department of Transportation* (USDOT). Klasse zeven staat voor voertuigen met een *gross vehicle weight* (GVW) vanaf 26,001 pond tot en met 33,000 pond en klasse acht representeert voertuigen van 33,001 pond of zwaarder (Fullbay, 2020; Satellic, 2018; Soard, 2017). Deze 26,001 pond kan worden omgezet naar 11.793855 ton, wat de twaalf ton van de Europese categorisatie dus benadert ("Berekenen.nl", z.d.).

Daarnaast includeren de klassen ook stadsvervoerbussen. Dit sluit echter niet aan met de Europese categorisatie, aangezien deze bussen worden ondergebracht in categorie 'M3': voertuigen voor het vervoer van passagiers, met meer dan acht zitplaatsen, die van de bestuurder niet meegerekend, en met een maximummassa van meer dan vijf ton ("Berekenen.nl", z.d.; European Commission,

z.d.-a; S., z.d.; Writer, 2020). Al bij al kan er besloten worden dat beide classificaties nagenoeg overeenstemmen, rekening houdend met de hierboven vermelde kanttekeningen.

In GREET is het mogelijk om de functionele eenheid van de eindresultaten aan te passen. Aangezien resultaten per energiehoeveelheid gebruikt door een aandrijving geen rekening houden met de voertuigefficiëntie, worden de resultaten weergegeven per afgelegde afstand van honderd kilometer (Argonne National Laboratory, z.d.). Bij deze wordt de analyse specifiek voor zware vrachtwagens uitgevoerd.

Om zo veel mogelijk in lijn te liggen met de TCO-analyses, worden de WTW-analyses dan ook zoveel mogelijk afgestemd met de gegevens uit Basma, Zhou en Rodríguez (2022). Hierdoor wordt bijvoorbeeld het jaar van simulatie aangepast naar 2022, aangezien de TCO-analyses zich hier ook op baseren. Dit jaartal wordt gebruikt bij de parameters in de processen waarvoor tijdsreeksen beschikbaar zijn binnen WTW-berekeningen. Dit is bijvoorbeeld het geval voor parameters van voertuigtechnologieën, zoals de efficiëntie van de aandrijving en emissiefactoren, en processen betreffende brandstofproducties (Argonne National Laboratory, z.d.).

De resultaten die in dit onderzoek van belang zijn, zijn de CO<sub>2</sub>-equivalenten van de broeikasgassen van de WTW-analyses voor zware vrachtwagens op diesel en groene waterstof. Deze resultaten kunnen rechtstreeks in GREET afgelezen worden. De berekeningen achter deze resultaten kunnen worden geverifieerd aan de hand van het GREET 1 Excel model. Hieruit blijkt dat enkel de CO<sub>2</sub>-equivalenten van de broeikasgassen worden berekend voor CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O met behulp van hun *global warming potential* (GWP) in een periode van honderd jaar. Met deze GWP wordt de toename van het broeikaseffect ten gevolge van een eenheidsemissie van een broeikasgas becijferd en gerelateerd aan dit van een eenheidsemissie CO<sub>2</sub> (Vlaamse Milieumaatschappij, z.d.). De GWP100s die voor deze stoffen gehanteerd werden, zijn respectievelijk 1, 29.8 en 273 (Life Cycle Associates, z.d.; "GREET", z.d.). Verder wordt er dan ook geen aandacht besteed aan andere effecten die de WTW-analyses met zich meebrengen.

### iii. Specifieke opstelling in GREET voor een zware vrachtwagen op diesel

Betreffende het voertuig: Het voertuig dat in GREET geselecteerd wordt, is de '*HDV: Combination Long-Haul Truck CIDI – LS Diesel*', omwille van het feit dat deze het beste overeenstemt met de vrachtwagen op diesel die in deze thesis beoogd wordt (Wang et al., 2022). Hierbij staat HDV voor *heavy-duty vehicle*, CIDI voor *compression-ignition direct-injection* en LS voor *low-sulfur* (All Acronyms, 2022; Wang et al., 2022).

Bij de specificaties van het voertuig worden echter wel een paar aanpassingen gedaan. Deze worden samen met hun standaardsettings weergegeven in tabel 3 op de volgende bladzijde.

*Tabel 3: standaardsettings en aanpassingen voor zware vrachtwagens op diesel in GREET*

Item	Standaardsetting (volgens Wang et al. (2022))	Aanpassing	Reden
Ladingsgewicht	19.0402 ton	26 ton	Gemiddelde van maximum ladingsgewichten in Basma, Zhou en Rodríguez (2022)
Aantal passagiers	0	1	Includeren van chauffeur

*Betreffende de brandstof:* In dit onderzoek wordt de originele opstelling in GREET voor de *pathway*: 'Low-Sulfur Diesel from Crude Oil' toegepast (Wang et al., 2022).

Zoals in sectie III. c. ii aangegeven, rijden alle Europese voertuigen sinds 2009 op ULSD. Echter is deze keuzeoptie nog niet beschikbaar in de GREET-software en kon er geen informatie gevonden worden om de *pathway* van *low-sulfur diesel* te wijzigen naar ULSD. Ook wordt er in de recente paper van Liu, Elgowainy, Vijayagopal en Wang (2021) *low-sulfur diesel* in GREET gehanteerd, wat de keuze verder ondersteunt.

iv. Specifieke opstelling in GREET voor een zware vrachtwagen op groene waterstof

*Betreffende het voertuig:* Het voertuigtype dat in GREET geselecteerd wordt, is de 'HDV: Combination Long-Haul Truck FCV – Gaseous H<sub>2</sub>', omwille van dezelfde reden als voor de zware vrachtwagen op diesel (Wang et al., 2022). De afkorting FCV staat hier voor *fuel cell vehicle* (Wang et al., 2022).

Ook hier worden er een paar aanpassingen gedaan aan de specificaties van het voertuig. Deze worden samen met hun standaardsettings weergegeven in tabel 4.

*Tabel 4: Standaardsettings en aanpassingen voor zware vrachtwagens op groene waterstof in GREET*

Item	Standaardsetting (volgens Wang et al. (2022))	Aanpassing	Reden
Ladingsgewicht	23.5868 ton	26.25 ton	Gemiddelde van maximum ladingsgewichten in Basma, Zhou en Rodríguez (2022)
Aantal passagiers	0	1	Includeren van chauffeur
<i>Base plant</i> (waaruit basisspecificaties voor het voertuig worden gehaald)	<i>HDV: Combination Short-Haul Truck CIDI – LS Diesel</i>	<i>HDV: Combination Long-Haul Truck CIDI – LS Diesel</i>	Mede overeenstemmen met Basma, Zhou en Rodríguez (2022)

Verder wordt het aandeel waarbij de vrachtwagen de motor aandrijft met brandstofcellen behouden op honderd procent. GREET laat echter niet toe om, zoals reeds besproken in sectie III. e. i, een deel van de aandrijving door de batterij te laten uitvoeren.

Betreffende de brandstof: De basis voor de opstelling in GREET wordt gehaald uit de *pathway*: 'Compressed G.H2 Combined for Medium- and Heavy Duty Vehicles (MHDV)', waarbij G.H2 staat voor gasvormig waterstof (Wang et al., 2022).

De hernieuwbare elektriciteit nodig voor de elektrolyse aan het tankstation zelf wordt bekomen uit wind- en zonne-energie, zoals vooropgesteld wordt in sectie III. d. i, met elk een gelijk aandeel van vijftig procent. Hierbij wordt de windenergie opgewekt door windturbines en de zonne-energie door PV-panelen, beide op een gedecentraliseerde plaats. Voor zon is de PV-technologie namelijk de technologie die het meeste voorkomt in Europa, nu en allicht ook in 2030 (Bhandari & Rakesh Shah, 2021; European Commission, z.d.-b; Helioscsp, 2018; Mohideen et al., 2023). Aangezien het oorspronkelijk gewijzigde model in GREET de elektriciteitsherkomst niet op een gepaste wijze aan de rest van het model koppelde, werd er navraag gedaan bij het GREET-team via mail. Dit, omdat er geen allesomvattend, up-to-date rapport is over de meest recente versie van het GREET-model en het zelf vinden van een antwoord op een specifieke vraag daarom dan ook vaak niet mogelijk is (Life Cycle Associates, z.d.). Na het contact lukte het om een volledig werkend model te creëren. Het mailverkeer met het GREET-team is terug te vinden in figuur B in de bijlagen en wordt in het vervolg gerefereerd als '(Z. Lu, persoonlijke communicatie, 3 & 6 april 2023)'.

Hoewel bij Basma, Zhou en Rodríguez (2022) ook elektriciteit van het Europees elektriciteitsnet wordt genomen in situaties waarin wind en zon onvoldoende energie opwekken, dient hier geen rekening mee gehouden te worden in de analyse. Dit, omdat er in de studie van Basma, Zhou en Rodríguez (2022) een PPA wordt aangegaan, waardoor de waterstof dus als groen kan worden beschouwd. Hierdoor laten we wel de mogelijke effecten van transmissie en verdeling van het elektriciteitsnet buiten beschouwing (Wang et al., 2022).

De elektrolyse reactie wordt uitgevoerd door middel van de PEM-technologie. Er werd voor deze technologie gekozen, omdat ze door verscheidene bronnen wordt gezien als de meest geschikte technologie in deze toepassing, zoals ook al werd aangegeven in sectie III. d. i, en bijkomstig als meeste wordt gebruikt in combinatie met fluctuerende hernieuwbare energiebronnen, zoals wind en zon (Bhandari & Rakesh Shah, 2021; Mohideen et al., 2023; Wulf & Kaltschmitt, 2018). De PEM-technologie die in GREET gehanteerd wordt, heeft een efficiëntie van 59.7 procent (55.8 kWh/kg H<sub>2</sub>) (Elgowainy et al., 2022). Dit blijkt overeen te komen met de technologie gebruikt in Basma, Zhou en Rodríguez (2022), waarbij de elektrische efficiëntie 56 kWh/kg H<sub>2</sub> bedraagt (Zhou & Searle, 2022).

In deze analyse wordt echter geen rekening gehouden met emissies, uitgezonden voor de productie van het geschikte water.

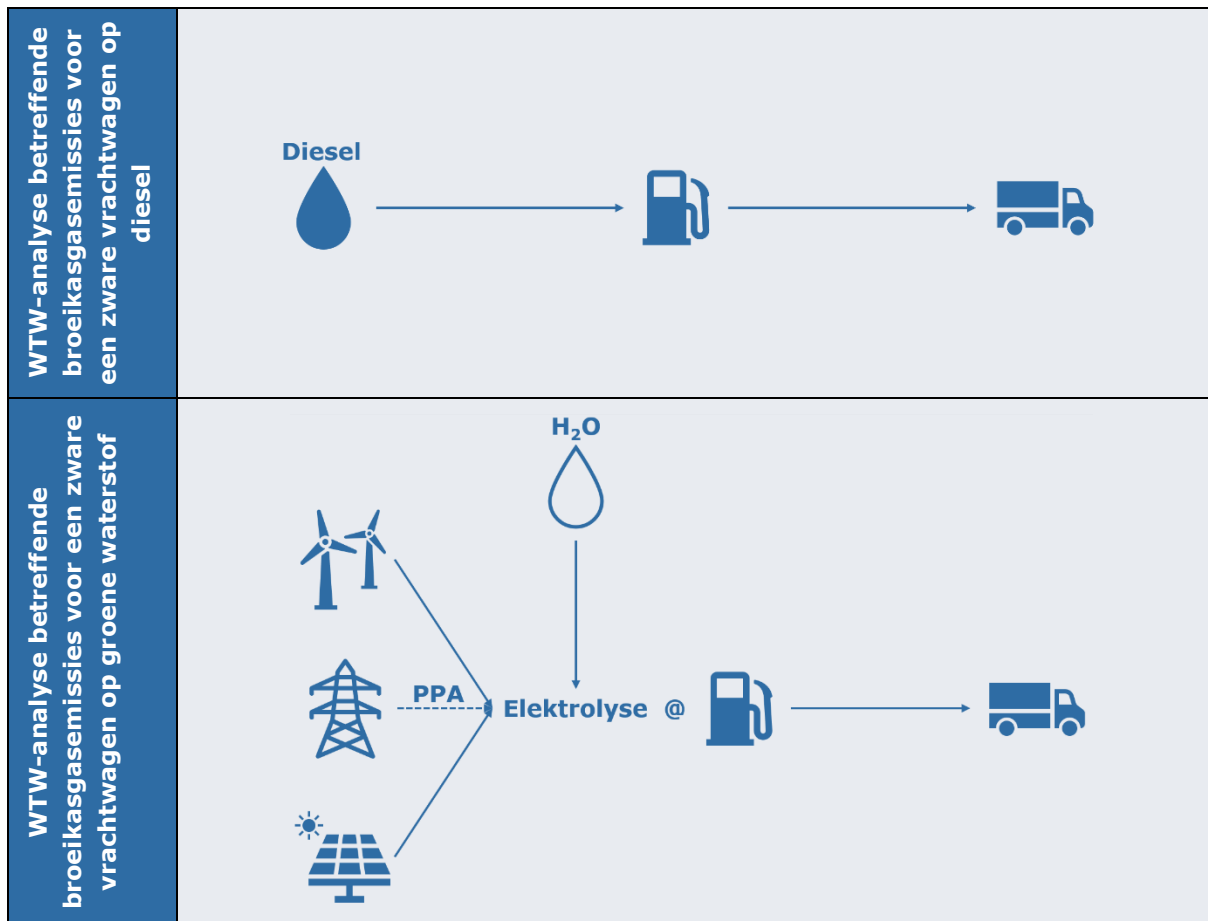
Verder wordt de waterstof ook nog gecomprimeerd tot 350 bar, wat in GREET wordt vooropgesteld (Wang et al., 2022). Er werd echter niet gevonden of een aanpassing hiervan naar de beoogde 700 bar mogelijk zou zijn. Na schriftelijke navraag bij het GREET-team werd er ook niet aangeraden om deze wijziging door te voeren wegens gebrek aan ervaring betreffende de software (Z. Lu, persoonlijke communicatie, 3 & 6 april 2023).



v. Samenvattende voorstelling van de 'well-to-wheels'-analyses betreffende broeikasgasemissies

Om eenvoudig duidelijk te maken hoe de WTW-analyses betreffende broeikasgasemissies van dit onderzoek eruit zien, geeft figuur 2 een versimpelde voorstelling voor een zware vrachtwagen op diesel en groene waterstof.

*Figuur 2: versimpelde voorstelling van de vooropgestelde WTW-analyses betreffende broeikasgasemissies voor een zware vrachtwagen op diesel en groene waterstof*



d. 'Total cost of carbon abatement'-analyse

Tot slot worden de resultaten van de TCO-analyses herleid naar een totaalkost per kilometer om een afweging ten opzichte van hun WTW-waarden mogelijk te maken. Een belangrijke parameter die deze verhouding representeert, is de TCA (Gunawan & Monaghan, 2022). In deze toepassing kan de TCA gedefinieerd worden als de kost voor het verminderen van de CO<sub>2</sub>-uitstoot met één kilogram CO<sub>2</sub>-equivalent door het gebruik van een zware vrachtwagen op groene waterstof in plaats van een zware vrachtwagen op diesel. In formulevorm wordt dit uitgedrukt in onderstaande formule, formule 3:

$$TCA = \frac{NPV(TCO_{ICET})_{km} - NPV(TCO_{FCET})_{km}}{GHG_{WTW,ICET} - GHG_{WTW,FCET}} \quad (3),$$

gebaseerd op Gunawan en Monaghan (2022). Hierbij staat GHG voor *greenhouse gases*.

## e. Sensitiviteitsanalyses

In voorgaande wordt telkens gebruikgemaakt van vaste waarden voor alle parameters. Om na te gaan in welke mate de berekende TCA-waarde zou veranderen na het wijzigen van enkele specifieke elementen, worden er sensitiviteitsanalyses uitgevoerd.

In wat volgt worden de veranderende elementen bij de twee uitgevoerde sensitiviteitsanalyses voorgesteld.

### i. Sensitiviteitsanalyse op de *total cost of carbon abatement* op basis van literatuurbevindingen

Specifiek worden er voor de volgende elementen begrensde veranderingen toegepast: de elektriciteitsherkomst voor de elektrolyse van water, de tankkosten (i.e. de dieselprijs en de waterstofprijs) en de jaarlijks afgelegde kilometers. De eerste werd gekozen om een beoordeling te kunnen maken betreffende de invloed van de herkomst van de elektriciteit en de twee laatste op basis van hun uiterst volatiel karakter. De specifieke wijzigingen worden hieronder geduid.

*Elektriciteitsherkomst elektrolyse van water:* De sensitiviteitsanalyse toont hierbij de verandering in TCA door het gebruik van wind- en zonne-energie voor de elektrolyse van water (i.e. groene waterstof) te wijzigen naar elektriciteit afkomstig van het Europese net. Hierbij worden de percentages uit sectie III. d. ii gebruikt in de opstelling van de elektriciteitsmix in GREET. Alsook wordt er hier rekening gehouden met de transitie en verdeling van de elektriciteit. De WTW-analyse betreffende broeikasgasemissies van dit proces komt uit op 1.755434 kgCO<sub>2</sub>eq./km, waarbij alles komt van WTP.

*Dieselprijs:* Zoals in sectie V. a. ii aan bod zal komen, bedraagt de gemiddelde dieselprijs van de referentielanden voor 2022 1.54 euro per liter. In de sensitiviteitsanalyse wordt de impact op de TCA gevisualiseerd door deze prijs te wijzigen naar de minimum (1.05 euro per liter in januari in Polen) en maximum (1.95 euro per liter in juli in het VK) dieselprijs dat behaald werd onder de referentielanden in 2022 (DKV, z.d.).

*Waterstofprijs:* Ook de invloed op de TCA van een wijziging in de waterstofprijs van 9.40 euro per kilogram wordt in de sensitiviteitsanalyse onderzocht. Hierbij wordt deze prijs veranderd naar de minimum (8.10 euro per kilogram in Polen) en maximum (11.20 euro per kilogram in Italië) waterstofprijs onder de referentielanden in 2022 (Basma, Zhou, & Rodríguez, 2022).

*Jaarlijks afgelegde kilometers:* Basma, Zhou en Rodríguez (2022) gingen uit van een jaarlijks afgelegde afstand van 158,000 kilometer (of een dagelijks rijbereik tot 660 kilometer). Basma en Rodríguez (2023) geven echter aan dat 20.09 procent van de overeenkomende VECTO (i.e. *Vehicle*

*Energy Consumption Calculation Tool*) subgroep 5-LH tussen de 500 en de 800 kilometer per dag rijdt. In de sensitiviteitsanalyse van Basma, Zhou en Rodríguez (2022) wordt ervan uitgegaan dat een werkjaar 250 dagen bevat. Hierdoor wordt er ook naar de invloed op de TCA gezocht van het veranderen van deze jaarlijks afgelegde afstand naar 125,000 kilometer per jaar en 200,000 kilometer per jaar.

ii. Sensitiviteitsanalyse op de *total cost of carbon abatement* op basis van procentuele veranderingen

Voor deze sensitiviteitsanalyse worden er veranderingen toegepast voor dezelfde elementen als in deelsectie IV. e. i, op de elektriciteitsherkomst voor de elektrolyse van water na. De specifieke veranderingen zijn het verlagen en verhogen van de gehanteerde waarden van de elementen met tien procent. Deze analyse geeft dan ook een algemener inzicht in de effecten van de wijzigingen in de gekozen elementen op de TCA-waarde dan bijvoorbeeld de vorige uitgevoerde sensitiviteitsanalyse op basis van literatuurbevindingen.

## V. Resultaten

### a. 'Total cost of ownership'-analyses

Basma, Zhou en Rodríguez (2022) gaan uit van een gemiddelde jaarlijkse, afgelegde afstand van 158,000 kilometer per vrachtwagen voor de eerste vijf jaar. Welke disconteringsvoet in de paper gebruikt wordt, wordt niet expliciet vermeld. Bijgevolg wordt een disconteringsvoet van 9.5 procent toegepast, die ook gehanteerd wordt in een hierop volgende paper van Basma en Rodríguez (2023).

Zoals in sectie IV. b reeds werd aangehaald, zijn de kosten die in de TCOs omvat zitten de jaarlijkse betalingen betreffende de aanschafkosten, registratiebelastingen, eigendomsbelastingen, vaste vignetten, onderhoudskosten, tolheffingen, tankkosten en verzekeringskosten. Daarenboven wordt er na vijf jaar een restwaarde ontvangen (Basma, Zhou, & Rodríguez, 2022). Voorgaande parameters worden in de volgende gedeeltes besproken en berekend. Hierbij worden beleidsmaatregelen buiten beschouwing gehouden.

#### i. Algemene kosten van een zware vrachtwagen op diesel of groene waterstof

Registratiebelastingen: Een gemiddelde registratiebelasting komt neer op 370 euro. Hierbij wordt uitgegaan van betaling aan het begin van het eerste jaar (Basma, Zhou, & Rodríguez, 2022).

Eigendomsbelastingen: Jaarlijks dient er een gemiddeld bedrag van 797 euro betaald te worden voor eigendomsbelastingen (Basma, Zhou, & Rodríguez, 2022).

Vaste vignetten: Jaarlijks dient er een gemiddeld bedrag van 1,210 euro betaald te worden voor vaste vignetten (Basma, Zhou, & Rodríguez, 2022).

Onderhoudskosten: De onderhoudskosten die in Basma, Zhou en Rodríguez (2022) opgenomen worden, bestaan uit de volgende items: 'vloeistoffen (olie en smeermiddelen)', 'AdBlue bijtanken', 'banden: voor- en aandrijfassen', 'banden: oplegger' en 'reparatie en preventief onderhoud'. De totale onderhoudskost komt neer op 18.50 euro per honderd kilometer. Dit resulteert dan in een jaarlijkse kost van 29,230 euro (Basma, Zhou, & Rodríguez, 2022).

Tolheffingen: De gemiddelde tolheffing per kilometer bedraagt afgerond 0.13 euro (Basma, Zhou, & Rodríguez, 2022). Hiervoor werd de tolheffing per kilometer die Basma, Zhou en Rodríguez (2022) hanteren voor Nederland op nul euro per kilometer gezet, aangezien deze pas vanaf het jaar 2024 geldt. Dit leidt tot een jaarlijkse kost van 20,540 euro.

#### ii. Specifieke kosten van een zware vrachtwagen op diesel

Jaarlijkse betalingen betreffende de aanschafkost: De aanschafkost bedraagt 133,000 euro inclusief trekker en oplegger. Zoals reeds vermeld in sectie IV. b, wordt dit gefinancierd over vijf jaar met

een interestvoet van twee procent (Basma, Zhou, & Rodríguez, 2022). De jaarlijkse betalingen komen hierbij neer op:

$$133,000_{\text{ICET},0} * \frac{0.02 * (1 + 0.02)^5}{(1 + 0.02)^5 - 1} = 28,217.07 \text{ euro.}$$

Tankkosten: In Basma, Zhou en Rodríguez (2022) worden dieselprijzen uit 2021 gehanteerd. Daarom werd voor deze studie een gemiddelde dieselprijs berekend voor 2022, gebaseerd op de maandelijkse dieselprijzen exclusief btw en na terugbetaling van accijnzen van de referentielanden voor 2022. Deze berekeningen werden gedaan aan de hand van de waarden gegeven op de website van DKV. Voor Italië waren er echter geen exacte waarden gegeven. Hiervoor werd dan telkens een schatting gemaakt op basis van de trendlijn (DKV, z.d.). Een overzicht van deze maandelijkse prijzen per land zijn weergegeven in tabel C in de bijlagen.

De gemiddelde dieselprijs exclusief btw en na terugbetaling van accijnzen van de referentielanden voor 2022 komt zo neer op 1.54 euro per liter. Echter dient hierbij wel in het achterhoofd gehouden te worden dat deze relatief hoge prijs ten opzichte van andere jaren grotendeels veroorzaakt werd door de Russische invasie in Oekraïne (DKV, z.d.; Europese Raad, z.d.; fuel-prices, z.d.).

In Basma, Zhou en Rodríguez (2022) assumeren ze dat een vrachtwagen op diesel 30.7 liter per honderd kilometer verbruikt. Dit resulteert dan in een jaarlijkse tankkost van 74,699.24 euro.

Verzekeringskosten: Aan de hand van Noll, del Val, S. Schmidt en Steffen (2022) wordt er verondersteld dat de verzekeringspremies twee procent van de CAPEX bedragen. Dit komt dan neer op een jaarlijkse kost van 2,660 euro.

Restwaarde: Na vijf jaar heeft de vrachtwagen een restwaarde van dertig procent van de aanschafkost, waardoor er in jaar vijf 39,900 euro wordt teruggewonnen (Basma, Zhou, & Rodríguez, 2022).

### iii. Specifieke kosten van een zware vrachtwagen op groene waterstof

Jaarlijkse betalingen betreffende de aanschafkost: De oplegger bedraagt 33,000 euro. De prijs voor de trekker wordt bepaald aan de hand van de specificaties van de verschillende componenten. Deze componenten zijn: 'chassis', 'vermogenselektronica', 'luchtcompressor', 'stuurpomp', 'airconditioning', 'verwarming', 'thermisch beheersysteem voor batterij', 'brandstofcel', 'waterstoftank', 'batterij', 'elektrische aandrijving' en 'indirecte kosten' en hebben een totaalprijs van 330,088.49 euro (Basma, Zhou, & Rodríguez, 2022). De totale aanschafkost van een vrachtwagen op waterstof komt dus neer op 363,088.49 euro.

Ook hier wordt de zware vrachtwagen gefinancierd over vijf jaar met een interestvoet van twee procent (Basma, Zhou, & Rodríguez, 2022). De jaarlijkse betalingen komen hierbij neer op:

$$363,088.49_{\text{FCET},0} * \frac{0.02 * (1 + 0.02)^5}{(1 + 0.02)^5 - 1} = 77,032.27 \text{ euro.}$$

Tankkosten: In 2022 is de gemiddelde prijs voor groene waterstof (inclusief productiekost, compressiekosten en tankstationkosten) in de geanalyseerde landen 9.40 euro per kilogram (Basma,

Zhou, & Rodríguez, 2022). In Basma, Zhou en Rodríguez (2022) gaan ze ervan uit dat een vrachtwagen op waterstof 8.3 kilogram per honderd kilometer verbruikt. Dit komt dan neer op een jaarlijkse tankkost van 123,271.60 euro.

Verzekeringskosten: Ook bij deze vrachtwagen wordt er verondersteld dat de verzekeringspremies twee procent van de CAPEX bedragen (Noll, del Val, S. Schmidt, & Steffen, 2022). Dit leidt hier tot een jaarlijkse kost van 7,261.77 euro.

Restwaarde: De restwaarde wordt berekend aan de hand van percentages van de aanschafwaarden van de volgende onderdelen: 'oplegger en elektrische aandrijving', 'brandstofcelsysteem', 'batterij' en 'waterstoftank'. Deze percentages zijn respectievelijk 30, 25, 15 en 70 procent (Basma, Zhou, & Rodríguez, 2022). Verder gebruikmakend van de gegevens vermeld in Basma, Zhou en Rodríguez (2022) resulteert dit dan in een totale restwaarde van 78,829.50 euro in jaar vijf.

#### iv. *Total costs of ownership* van een zware vrachtwagen op diesel en groene waterstof

De totale kost voor vlooteigenaars uit Europa van een zware vrachtwagen op diesel en/of groene waterstof, zonder rekening te houden met beleidsmaatregelen, wordt in deze deelsectie onthult. Hiervoor dienen de kosten, die in de vorige drie deelsecties vermeld werden, herleid te worden naar een netto contante waarde voor het jaar van aanschaf, 2022.

Voor een zware vrachtwagen op diesel wordt hiervoor formule 2 op de volgende wijze ingevuld:

$$NPV(TCO_{ICET}) = \sum_{t=0}^{t=4} \frac{28,217.07_{ICET,0}}{(1 + 0.095)^t} + 370_0 - \frac{39,900_{ICET,5}}{(1 + 0.095)^5} + \sum_{t=1}^{t=5} \frac{(797_t + 1,210_t + 29,230_t + 20,540_t + 74,699.24_{ICET,t} + 2,660_{ICET,t})}{(1 + 0.095)^t}$$

Na het uitrekenen van de berekening wordt een NPV-waarde van de TCO van een zware vrachtwagen op diesel bekomen van 589,508.11 euro.

Identiek voor een zware vrachtwagen op groene waterstof wordt formule 2 ingevuld:

$$NPV(TCO_{FCET}) = \sum_{t=0}^{t=4} \frac{77,032.27_{FCET,0}}{(1 + 0.095)^t} + 370_0 - \frac{78,829.50_{FCET,5}}{(1 + 0.095)^5} + \sum_{t=1}^{t=5} \frac{(797_t + 1,210_t + 29,230_t + 20,540_t + 123,271.60_{FCET,t} + 7,261.77_{FCET,t})}{(1 + 0.095)^t}$$

Deze berekening komt dan weer neer op een NPV-waarde van de TCO van een zware vrachtwagen op groene waterstof van 974,194.78 euro.

## b. *'Well-to-wheels'*-analyses betreffende broeikasgasemissies

### i. *'Well-to-wheels'*-analyse betreffende broeikasgasemissies voor een zware vrachtwagen op diesel

Na het toepassen van enkel de aanpassingen in tabel 3, wordt er echter geen verschil in resultaten waargenomen ten opzichte van de standaardsettings in GREET. Hierdoor werd eerst geconcludeerd dat GREET geen rekening houdt met rol- en luchtweerstand, aangezien verschillen in gewichten en ladingen geen invloed leken te hebben op de resultaten en raadpleging in de handleiding en de modeluitleg, terug te vinden via de software, hier ook op wees in respectievelijk de hoofdstukken '3.8.8 Vehicles Editor' en '9 Pump-to-Wheels Calculations' (Wang et al., 2022). Echter werd er na het schriftelijk contact met het GREET-team duidelijk dat de functionele eenheid 'per afgelegde afstand van honderd kilometer' inderdaad geen rekening houdt met de wijzingen van tabel 3. Enkel de functionele eenheden 'per ton mijl' en 'per passagiersmijl' doen dit wel (Z. Lu, persoonlijke communicatie, 3 & 6 april 2023).

Het algehele resultaat na uitvoering van de WTW-analyse betreffende broeikasgasemissies voor een zware vrachtwagen op diesel komt neer op 1.074817 kilogram CO<sub>2</sub>-equivalent per kilometer, waarvan 0.186583 CO<sub>2</sub>-equivalent per kilometer van WTP en 0.888234 CO<sub>2</sub>-equivalent per kilometer van PTW.

### ii. *'Well-to-wheels'*-analyse betreffende broeikasgasemissies voor een zware vrachtwagen op groene waterstof

Idem als bij de WTW-analyse betreffende broeikasgasemissies voor een zware vrachtwagen op diesel, werd er na het toepassen van enkel de aanpassingen in tabel 4, waarbij ten opzichte van tabel 3 ook nog eens de voertuigconstructie werd aangepast, geen verschil in resultaten waargenomen ten opzichte van de standaardsettings in GREET.

Het algehele resultaat dat bekomen wordt na uitvoering van de WTW-analyse betreffende broeikasgasemissies voor een zware vrachtwagen op groene waterstof is benaderend nul kilogram CO<sub>2</sub>-equivalent per kilometer.

## c. *'Total cost of carbon abatement'*-analyse

Om de teller- en noemertermen van de formule voor de TCA in te vullen, kunnen respectievelijk de resultaten van de vorige twee secties genomen worden. Echter dienen de resultaten van de TCO-analyses nog gedeeld te worden door de geassumeerde, gemiddelde jaarlijkse kilometers (i.e. 158,000) maal het aantal jaar (i.e. vijf). Dit maakt dan de volgende bewerking:

$$TCA = \frac{(1.23_{FCET,km} - 0.75_{ICET,km})}{(1.074817_{ICET,km} - 0_{FCET,km})}, \text{ uitgedrukt in } \text{€}/\text{kgCO}_2\text{eq. gereduceerd.}$$

Deze bewerking uitgewerkt, geeft een TCA van 0.45 euro per kilogram CO<sub>2</sub>-equivalent gereduceerd.

## d. Sensitiviteitsanalyses

In deze sectie wordt bekendgemaakt en toegelicht in welke mate de berekende TCA-waarde van 0.45 euro per kilogram CO<sub>2</sub>-equivalent gereduceerd zou veranderen na het wijzigen van de specifieke elementen, besproken in IV. e. i en ii.

### i. Sensitiviteitsanalyse op de *total cost of carbon abatement* op basis van literatuurbevindingen

De wijziging van de elektriciteitsherkomst voor de elektrolyse van water van hernieuwbare energie naar elektriciteit afkomstig van het Europese net blijkt geen milieuvoordeel teweeg te brengen. Dit, aangezien een zware vrachtwagen op diesel als referentie of standaard gerepresenteerd wordt in de TCA-formule en de WTW-emissies betreffende broeikasgasemissies nu hoger zouden liggen voor een zware vrachtwagen op waterstof dan voor een zware vrachtwagen op diesel.

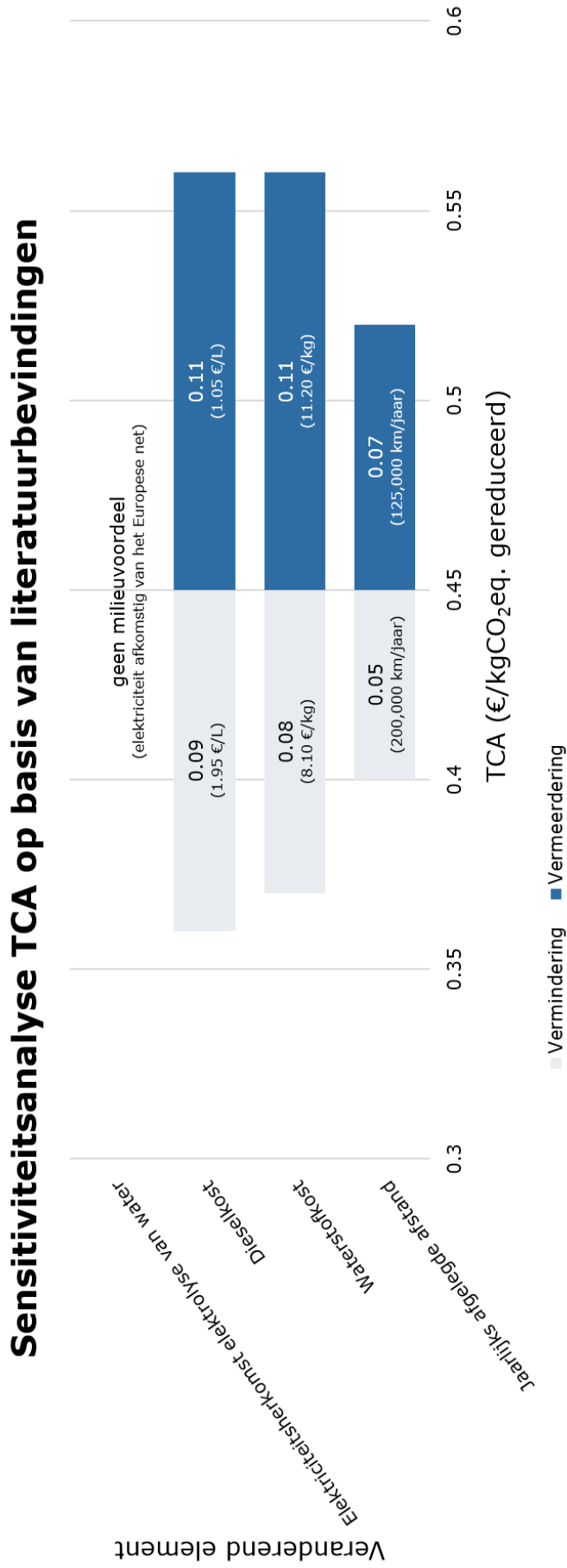
Uit de figuur kan ook geconcludeerd worden dat de doorgevoerde veranderingen in de dieselprijs en de waterstofprijs quasi gelijke wijzigingen weergeven in de TCA-waarde, maar wel omgekeerd van teken. De verlaging van de tankkosten van diesel zorgt voor een vermeerdering van de TCA met 0.11 €/kgCO<sub>2</sub>eq. gereduceerd, waardoor de TCA op 0.56 €/kgCO<sub>2</sub>eq. gereduceerd uitkomt. De verhoging van de tankkosten van diesel zorgt dan weer voor een vermindering van de TCA met 0.09 €/kgCO<sub>2</sub>eq. gereduceerd voor diesel, wat resulteert in een TCA van 0.36 €/kgCO<sub>2</sub>eq. gereduceerd. De verlaging van de tankkosten van waterstof zorgt verder voor een vermindering van de TCA met 0.08 €/kgCO<sub>2</sub>eq. gereduceerd, waardoor de TCA op 0.37 €/kgCO<sub>2</sub>eq. gereduceerd uitkomt. De verhoging van de tankkosten van waterstof zorgt voor een vermeerdering van de TCA met 0.11 €/kgCO<sub>2</sub>eq. gereduceerd, wat resulteert in een TCA van 0.56 €/kgCO<sub>2</sub>eq. gereduceerd.

De verlaging van de jaarlijks afgelegde afstand zorgt in dit geval voor een vermeerdering van de TCA-waarde met 0.07 €/kgCO<sub>2</sub>eq. gereduceerd, wat uitdraait in een TCA van 0.52 €/kgCO<sub>2</sub>eq. gereduceerd. De verhoging in afstand resulteert dan weer in een vermindering van de TCA-waarde met 0.05 €/kgCO<sub>2</sub>eq. gereduceerd, resulterende in een TCA van 0.40 €/kgCO<sub>2</sub>eq. gereduceerd.

De resultaten van voorgaande wijzigingen zijn terug te vinden in figuur 3 op de volgende bladzijde.



Figuur 3: sensitiviteitsanalyse TCA op basis van literatuurbevindingen



ii. Sensitiviteitsanalyse op de *total cost of carbon abatement* op basis van procentuele veranderingen

Als de waterstofprijs verlaagd wordt met tien procent (i.e. 8.46 €/kg), vermindert de TCA-waarde met 0.06 €/kgCO<sub>2</sub>eq. gereduceerd, wat resulteert in een TCA van 0.39 €/kgCO<sub>2</sub>eq. gereduceerd. De verhoging met tien procent tot een prijs van 10.34 €/kg zorgt voor een vermeerdering van de TCA-waarde met 0.05 €/kgCO<sub>2</sub>eq. gereduceerd, resulterende in een TCA van 0.50 €/kgCO<sub>2</sub>eq. gereduceerd.

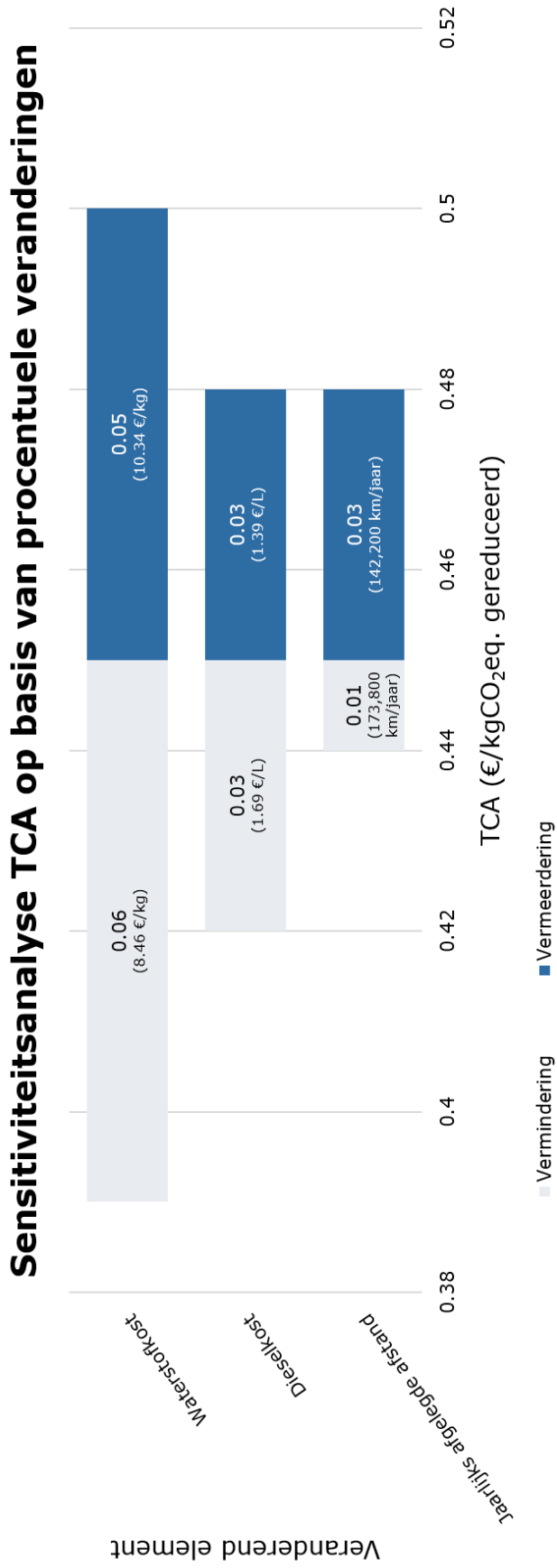
Dezelfde wijzigingen leiden tot een dieselprijs van 1.39 €/liter en 1.69 €/liter, die de TCA-waarde respectievelijk vermeerderd en vermindert met 0.03 €/kgCO<sub>2</sub>eq. gereduceerd, wat uitdraait in een TCA van respectievelijk 0.48 en 0.42 €/kgCO<sub>2</sub>eq. gereduceerd.

Verder zorgt de verlaging van de jaarlijks afgelegde afstand tot 142,200 kilometer voor een vermeerdering van de TCA-waarde met 0.03 €/kgCO<sub>2</sub>eq. gereduceerd, wat uitdraait in een TCA van 0.48 €/kgCO<sub>2</sub>eq. gereduceerd. De verhoging in afstand tot 173,800 kilometer resulteert dan weer in een vermindering van de TCA-waarde met 0.01 €/kgCO<sub>2</sub>eq. gereduceerd, resulterende in een TCA van 0.44 €/kgCO<sub>2</sub>eq. gereduceerd.

Over het algemeen kan op basis van deze sensitiviteitsanalyse gesteld worden dat een bepaalde verandering in de waterstofkost de grootste impact heeft van de geobserveerde elementen op de TCA-waarde, gevolgd door de dieselkosten en de jaarlijks afgelegde afstand.

De resultaten van voorgaande wijzigingen zijn terug te vinden in figuur 4 op de volgende bladzijde. De kleine verschillen tussen de verminderingswaarden en vermeerderingswaarden van hetzelfde element komen voort uit de afrondingen van de gebruikte waarden.

Figuur 4: sensitiviteitsanalyse TCA op basis van procentuele veranderingen



## VI. Conclusie

Tabel 5 geeft een overzicht van alle waarden die rechtstreeks een bijdrage leveren aan de berekening van de TCA voor het gebruik van een zware vrachtwagen op groene waterstof ten opzichte van een zware vrachtwagen op diesel. Zo geven ze ook een antwoord op de onderzoeksvragen die in de inleiding (sectie II) aan bod kwamen.

*Tabel 5: samenvattende tabel van de resultaten*

<b>TCOs</b>	TCO <sub>ICET</sub> per kilometer	0.75 €/km
	TCO <sub>FCET</sub> per kilometer	1.23 €/km
<b>WTW-emissies</b>	WTW-emissie <sub>ICET</sub>	1.074817 kgCO <sub>2</sub> eq./km
	WTW-emissie <sub>FCET</sub>	0 kgCO <sub>2</sub> eq./km
<b>TCA</b>		0.45 €/kgCO <sub>2</sub> eq. gereduceerd

Uit het onderzoek wordt een TCA-waarde bekomen van 0.45 €/kgCO<sub>2</sub>eq. gereduceerd. Deze waarde duidt dat het 0.45 euro kost per kilogram CO<sub>2</sub>-equivalent dat gereduceerd wordt gaande van het gebruik van een zware vrachtwagen op diesel naar het gebruik van een zware vrachtwagen op groene waterstof, dewelke quasi geen emissies uitstoot van WTW. Op jaarbasis spreekt men dan van een kost van 76,419.49 euro om een totaal van 169,821.086 kilogram CO<sub>2</sub>-equivalent te reduceren, rekening houdend met alle gemaakte assumpties uit het onderzoek.

De positieve effecten op het milieu van een zware vrachtwagen op waterstof gaan samen met de bevindingen over de kenmerken et cetera uit de literatuurstudie (sectie III). Wel hangt er momenteel nog een behoorlijke kostprijs aan vast, ten opzichte van een zware vrachtwagen op diesel. Deze kostprijs, tezamen met de waterstofkost zouden kunnen dalen door onder andere een verbeterde capaciteit en uitbreiding van energiegeneratoren en 'elektrolyzers' en verdere technologische vooruitgang in de toekomst.

Door middel van de sensitiviteitsanalyses werden er bijkomstig nog enkele inzichten verworven. Zo heeft de verandering van het gebruik van hernieuwbare energie voor elektrolyse naar elektriciteit van het Europese net bij een zware vrachtwagen op waterstof geen milieuvoordeel ten opzichte van een zware vrachtwagen op diesel. Daarnaast heeft een tien procent verandering van de waterstofkost de grootste impact op de TCA van de uitgevoerde veranderende elementen, waarbij een kost van 8.46 euro per kilogram resulteert in een TCA-waarde van 0.39 €/kgCO<sub>2</sub>eq. gereduceerd en een kost van 10.34 euro per kilogram in een TCA-waarde van 0.50 €/kgCO<sub>2</sub>eq. gereduceerd. Hierna volgen respectievelijk de dieselkost en de jaarlijks afgelegde afstand.



## VII. Discussie

In deze discussie komen eerst enkele beperkingen van het onderzoek aan bod, waarna aanbevelingen worden gedaan voor verder onderzoek.

### a. Beperkingen van het onderzoek

Doorheen de thesis worden reeds verscheidene assumpties en kanttekeningen gemaakt die het onderzoek afbakenen. In het bijzonder wordt in dit gedeelte aandacht besteed aan enkele.

De GREET-software beperkte het onderzoek door geen rekening te houden met de rol- en luchtweerstand bij de gebruikte functionele eenheid van 'per honderd kilometer' (Z. Lu, persoonlijke communicatie, 3 & 6 april 2023). Het gebrek aan professionele kennis van de software zorgde er dan ook weer voor dat het model voor de WTW-analyse betreffende broeikasgasemissies voor een zware vrachtwagen op waterstof compressie berekende voor 350 bar in plaats van de beoogde 700 bar én *low-sulfur* diesel als brandstof werd behouden in plaats van ULSD in het model voor de WTW-analyse betreffende broeikasgasemissies voor een zware vrachtwagen op diesel.

Daarnaast werd de groene waterstofprijs uit Basma, Zhou en Rodríguez (2022) ook gebruikt voor de TCA-sensitiviteitsberekening op basis van literatuurbepindingen voor een zware vrachtwagen op waterstof, bekomen door elektrolyse door middel van elektriciteit van het Europese net.

### b. Aanbevelingen voor verder onderzoek

Zoals al eerder in sectie IV. b. werd aangehaald, vormden de aanpassingen die gemaakt werden bij de TCO-analyses niet de hoofdzaak. Hierdoor kan het zijn dat er in deze analyses nog data mist zoals extra vervangingskosten et cetera. Verder onderzoek zou hierbij de eventueel missende gegevens kunnen opsporen. Alsook kan dit verder onderzoek ook nog lonen van de vrachtwagenchauffeurs opnemen om een totaler inzicht te creëren.

Vervolgonderzoek zou de WTW-analyses betreffende broeikasgasemissies kunnen uitbreiden door de CO<sub>2</sub>-equivalenten van de broeikasgasemissies van de behandelingsprocesstappen voor water te includeren in het geval van een zware vrachtwagen op waterstof. Ook kunnen de waarden of impacts van de hoeveelheid benodigde energie en andere verontreinigende stoffen geobserveerd worden, zoals die van *volatile organic compound* (VOC), koolstofmonoxide (CO), stikstofoxiden (NO<sub>x</sub>), *particulate matters* (PM10 en PM2.5), zwaveloxiden (SO<sub>x</sub>), *black carbon* (BC) en *particulate organic carbon* (POC) (Center for Transportation Research, Energy Systems Division, & Argonne National Laboratory, 2016; Environmental Protection Agency, 2022; Environmental Protection Agency, 2023; OceanColor Webmaster, z.d.).

Ook zou de VECTO-tool gebruikt kunnen worden in plaats van de GREET-software ter vorm van controle en kadering van bovenstaand onderzoek of om verder onderzoek uit te voeren.

Naast onderzoek voor waterstof verkregen door elektrolyse uit groene elektriciteit en elektriciteit van het Europese net kan het ook interessant zijn om de WTW-analyse betreffende broeikasgasemissies te berekenen voor een zware vrachtwagen die rijdt op blauwe waterstof, aangezien men hierin ook potentieel ziet (voor de transitieperiode naar groene waterstof, zoals vermeld in sectie III. d. v).

Ook kan er op basis van dit onderzoek verder mogelijkheden voor beleidsplannen en het kostenplaatje van andere vormen dan eigenaarschap van een zware vrachtwagen geanalyseerd worden.

Toekomstige onderzoeken kunnen ook de effecten van verbeteringen in (nieuwe) technologieën en hun veranderingen in hoeveelheid implementaties aan het licht brengen, zoals bij elektrolyse.

Daarnaast kan er ook bekeken worden wat de algemene gemiddelde levensduur van een zware vrachtwagen op waterstof zal zijn. In het onderzoek uitgevoerd in deze thesis werd ervan uitgegaan dat deze voor beide zware vrachtwagens hetzelfde is. Echter is er nog niet genoeg informatie over hoe lang deze vrachtwagens op waterstof effectief meegaan. Mogelijks kan dit ook langer zijn, aangezien deze waarschijnlijk niet vervangen moeten worden volgens emissiestandaarden.

Over het algemeen zijn toekomstige onderzoeken naar waterstof als brandstof voor zware vrachtwagens bevorderlijk wil de doorbraak of transitie er echt komen. Deze kunnen eventueel ook onderzoek uitvoeren voor verschillende toekomstige jaren.

## VIII. Bibliografie

- All Acronyms. (2022). *CIDI means Compression-Ignition Direct-Injection*. Geraadpleegd op 5 november 2022, van [https://www.allacronyms.com/CIDI/Compression-Ignition\\_Direct-Injection](https://www.allacronyms.com/CIDI/Compression-Ignition_Direct-Injection)
- ANWB. (z.d.). *Heeft de dieselmotor nog toekomst?* Geraadpleegd op 11 februari 2023, van <https://www.anwb.nl/auto/brandstof/diesel-b7#:~:text=Elke%20dieselauto%20is%20geschikt%20voor,wel%20'blauwe%20diesel'%20genoemd.>
- Argonne National Laboratory. (z.d.). *Well to Wheels*. Geraadpleegd op 6 februari 2023, van <https://greet.es.anl.gov/greet/gettingstarted/wtw.html>
- Baker Botts. (2021, 30 augustus). *Integrating Renewable PPAs Into Green Hydrogen Projects*. Geraadpleegd op 15 februari 2023, van <https://www.bakerbotts.com/thought-leadership/publications/2021/august/integrating-renewable-ppas-into-green-hydrogen-projects>
- Basma, H., & Rodríguez, F. (2022). *Fuel cell electric tractor-trailers: Technology overview and fuel economy*. *The icct*. Geraadpleegd op 16 maart 2023, van <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/07/fuel-cell-tractor-trailer-tech-fuel-1-jul22.pdf>
- Basma, H., & Rodríguez, F. (2023). *THE EUROPEAN HEAVY-DUTY VEHICLE MARKET UNTIL 2040: ANALYSIS OF DECARBONIZATION PATHWAYS*. *The icct*. Geraadpleegd op 3 februari 2023, van <https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/01/hdv-europe-decarb-costs-jan23.pdf>
- Basma, H., Zhou, Y., & Rodríguez, F. (2022). *FUEL-CELL HYDROGEN LONG-HAUL TRUCKS IN EUROPE: A TOTAL COST OF OWNERSHIP ANALYSIS*. *The icct*. Geraadpleegd op 2 november 2022, van <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/09/eu-hvs-fuels-eva-fuel-cell-hdvs-europe-sep22.pdf>
- Belgium.be. (z.d.). *Vrachtwagens*. Geraadpleegd op 6 januari 2023, van <https://www.belgium.be/nl/mobiliteit/Voertuigen/types/vrachtwagens>
- Berekenen.nl*. (z.d.). Geraadpleegd op 5 november 2022, van <https://www.berekenen.nl/>
- Bhandari, R., & Rakesh Shah, R. (2021). Hydrogen as energy carrier: Techno-economic assessment of decentralized hydrogen production in Germany. *Renewable Energy*, 177, 915–931. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.149>
- Birol, F. (2019 juni). *The Future of Hydrogen*. Geraadpleegd op 19 maart 2023, van <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- Boretti, A. (2021). There are hydrogen production pathways with better than green hydrogen economic and environmental costs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(46), 23988–23995. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.182>



- Broekhuijzen, F. (z.d.). *Wind Turbine Generatoren*. Geraadpleegd op 17 april 2023, van <https://www.duurzaambo.nl/windmolen-lessen/generatoren>
- CCUSNetwork. (z.d.). *What is Carbon Capture, Utilisation and Storage?* Geraadpleegd op 10 februari 2023, van <https://www.ccusnetwork.eu/ccus-europe/what-carbon-capture-utilisation-and-storage>
- Center for Transportation Research, Energy Systems Division, & Argonne National Laboratory. (2016). *GREET User Guide*. *GREET*. Geraadpleegd op 15 april 2023, van <https://greet.es.anl.gov/>
- CertifHy. (z.d.). Geraadpleegd op 21 februari 2023, van <https://www.certifhy.eu/>
- chevron. (2022, 18 mei). *Explainer: what is carbon capture, utilization, and storage?* Geraadpleegd op 10 februari 2023, van <https://www.chevron.com/newsroom/2022/q2/what-is-carbon-capture-utilization-and-storage>
- CNBC. (2020, 3 december). *What Is Green Hydrogen And Will It Power The Future?* [Videobestand]. Geraadpleegd op 17 februari 2023, van [https://www.youtube.com/watch?v=aYBGSfzaa4c&ab\\_channel=CNBC](https://www.youtube.com/watch?v=aYBGSfzaa4c&ab_channel=CNBC)
- Coertzen, R., Potts, K., Brannock, M., & Dagg, B. (z.d.). *Water for Hydrogen*. Geraadpleegd op 22 februari 2023, van <https://www.ghd.com/en/perspectives/water-for-hydrogen.aspx#:~:text=For%20hydrogen%20production%20from%20coal,content%20of%20the%20biomass%20feedstock>
- CORDIS. (2023, 7 januari). *Hydrogen fuel cell trucks for heavy-duty, zero emission logistics*. Geraadpleegd op 20 februari 2023, van <https://cordis.europa.eu/project/id/826236>
- de las Nieves Camacho, M., Jurburg, D., & Tanco, M. (2022). Hydrogen fuel cell heavy-duty trucks: Review of main research topics. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(68), 29505–29525. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.271>
- Delgado, O., Rodríguez, F., & Muncrief, R. (2017). *Fuel Efficiency Technology in European Heavy-Duty Vehicles: Baseline and Potential for the 2020–2030 Time Frame*. *The icct*. Geraadpleegd op 16 maart 2023, van <https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/EU-HDV-Tech-Potential-ICCT-white-paper-14072017-vF.pdf>
- DKV. (z.d.). *Diesel price comparison*. Geraadpleegd op 31 maart 2023, van <https://www.dkv-euroservice.com/portal/en/dieselpreis-index>
- DieselNet. (z.d.). *EU: Fuels*. Geraadpleegd op 11 februari 2023, van <https://dieselnet.com/standards/eu/fuel.php#:~:text=Three%20standards%20cover%20a%20automotive%20fuels,EN%20589%20for%20automotive%20LPG>.
- Elgowainy, A., Frank, E., Vyawahare, P., Ng, C., Bafana, A., Burnham, A., ... Wang, M. (2022). *Hydrogen Life-Cycle Analysis in Support of Clean Hydrogen Production*. Argonne National Laboratory. Geraadpleegd op 12 februari 2023, van <https://greet.es.anl.gov/publication-hydrogenreport2022>

- Energy.gov. (z.d.-a). *Hydrogen Production: Electrolysis*. Geraadpleegd op 17 februari 2023, van <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis#:~:text=Electrolysis%20is%20a%20promising%20option,a%20unit%20called%20an%20electrolyzer>
- Energy.gov. (z.d.-b). *Hydrogen Storage*. Geraadpleegd op 16 februari 2023, van <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage#:~:text=Hydrogen%20can%20be%20stored%20physically,pressure%20is%20%E2%88%92252.8%C2%B0C.>
- Energy Saver. (z.d.). *Hybrid Wind and Solar Electric Systems*. Geraadpleegd op 15 februari 2023, van <https://www.energy.gov/energysaver/hybrid-wind-and-solar-electric-systems>
- Engie. (z.d.). *Hoe wordt waterstof gemaakt?* Geraadpleegd op 6 februari 2023, van <https://www.engie.nl/over-ons/kennisbank/artikel/hoe-wordt-waterstof-gemaakt>
- Enkvist, P.-A., Westerdahl, R., & Elmqvist, A. (2020). *MAINSTREAMING GREEN HYDROGEN IN EUROPE. Material Economics*. Geraadpleegd op 18 februari 2023, van <https://materialeconomics.com/latest-updates/mainstreaming-green-hydrogen-in-europe>
- Environmental Protection Agency. (2022, 9 augustus). *Criteria Air Pollutants*. Geraadpleegd op 15 april 2023, van <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants>
- Environmental Protection Agency. (2023, 15 maart). *What are volatile organic compounds (VOCs)?* Geraadpleegd op 15 april 2023, van <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/what-are-volatile-organic-compounds-vocs>
- Erbach, G. (2019). *CO2 emission standards for heavy-duty vehicles* (PE 628.268). *European Parliament*. Member's Research Service. Geraadpleegd op 3 november 2022, van [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2018/628268/EPRS\\_BRI%282018%29628268\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2018/628268/EPRS_BRI%282018%29628268_EN.pdf)
- EUR-Lex. (2022, 7 juni). *Consolidated text: Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast) (Text with EEA relevance)*Text with EEA relevance. Geraadpleegd op 18 februari 2023, van <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02018L2001-20220607>
- European Automobile Manufacturers Association. (2020). *CO2 emissions from heavy-duty vehicles*. *European Automobile Manufacturers Association*. Geraadpleegd op 16 maart 2023, van [https://www.acea.auto/files/ACEA\\_preliminary\\_CO2\\_baseline\\_heavy-duty\\_vehicles.pdf](https://www.acea.auto/files/ACEA_preliminary_CO2_baseline_heavy-duty_vehicles.pdf)
- European Commission. (2023a, 13 februari). *Commission sets out rules for renewable hydrogen*. Geraadpleegd op 18 februari 2023, van [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_23\\_594](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_594)
- European Commission. (2023b). *Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL amending Regulation (EU) 2019/1242 as regards strengthening the CO<sub>2</sub>*

- emission performance standards for new heavy-duty vehicles and integrating reporting obligations, and repealing Regulation (EU) 2018/956.* European Commission. Geraadpleegd op 2 maart 2023, van [https://climate.ec.europa.eu/system/files/2023-02/policy\\_transport\\_hdv\\_20230214\\_proposal\\_en\\_0.pdf](https://climate.ec.europa.eu/system/files/2023-02/policy_transport_hdv_20230214_proposal_en_0.pdf)
- European Commission. (z.d.-a). *EU classification of vehicle types.* Geraadpleegd op 5 november 2022, van <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/general-information/vehicle-types>
- European Commission. (z.d.-b). *Solar energy.* Geraadpleegd op 7 maart 2023, van [https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/solar-energy\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/solar-energy_en)
- Europees Parlement. (2023). *Hydrogen and Decarbonised Gas Markets Regulation.* Europees Parlement. Geraadpleegd op 27 februari 2023, van [https://www.europarl.europa.eu/meetdocs/2014\\_2019/plmrep/COMMITTEES/ITRE/DV/2023/02-09/08\\_ACA\\_H2\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/meetdocs/2014_2019/plmrep/COMMITTEES/ITRE/DV/2023/02-09/08_ACA_H2_EN.pdf)
- Europese Commissie. (z.d.). *Btw (belasting over de toegevoegde waarde).* Geraadpleegd op 18 februari 2023, van [https://commission.europa.eu/business-economy-euro/accounting-and-taxes/vat-value-added-tax\\_nl](https://commission.europa.eu/business-economy-euro/accounting-and-taxes/vat-value-added-tax_nl)
- Europese Raad. (z.d.). *Markteffecten van de Russische invasie in Oekraïne: EU-respons.* Geraadpleegd op 1 april 2023, van <https://www.consilium.europa.eu/nl/policies/eu-response-ukraine-invasion/impact-of-russia-s-invasion-of-ukraine-on-the-markets-eu-response/>
- Eurostat. (2013, 30 mei). *Glossary:United Nations Economic Commission for Europe (UNECE).* Geraadpleegd op 4 maart 2023, van [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:United Nations Economic Commission for Europe \(UNECE\)#:~:text=The%20United%20Nations%20Economic%20Commission,promote%20pan%2DEuropean%20economic%20integration.](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:United_Nations_Economic_Commission_for_Europe_(UNECE)#:~:text=The%20United%20Nations%20Economic%20Commission,promote%20pan%2DEuropean%20economic%20integration.)
- Eurostat. (z.d.-a). *From where do we import energy?* Geraadpleegd op 20 februari 2023, van <https://ec.europa.eu/eurostat/cache/infographs/energy/bloc-2c.html>
- Eurostat. (z.d.-b). *From where do we import energy and how dependent are we?* Geraadpleegd op 7 juni 2023, van <https://ec.europa.eu/eurostat/cache/digpub/energy/2019/bloc-2c.html>
- Fernando, J. (2022, 29 juni). *Globalization in Business With History and Pros and Cons.* Geraadpleegd op 23 oktober 2022, van <https://www.investopedia.com/terms/g/globalization.asp>
- Fitzgerald, S. (2020, 13 oktober). *World's first mass-produced hydrogen powered truck.* Geraadpleegd op 20 februari 2023, van <https://imoveaustralia.com/news-articles/sustainability/world-first-mass-produced-hydrogen-powered-truck/>
- Fortune Business Insights. (2022, 15 september). *Top 10 Key Companies Redefining Hydrogen Generation.* Geraadpleegd op 20 februari 2023, van <https://www.fortunebusinessinsights.com/blog/top-hydrogen-generation-companies-10715>

- Fullbay. (2020, 23 juni). *Making Sense of Truck Classification*. Geraadpleegd op 6 januari 2023, van <https://www.fleetequipmentmag.com/making-sense-of-truck-classification/>
- fuel-prices. (z.d.). *Fuel prices in Europe: Diesel (B7), Petrol (E5) & LPG*. Geraadpleegd op 1 april 2023, van <https://www.fuel-prices.eu/>
- FuelCellsWorks. (2020, 27 december). *The First Hydrogen Trucks Are Rolling in Europe*. Geraadpleegd op 20 februari 2023, van <https://fuelcellsworks.com/news/the-first-hydrogen-trucks-are-rolling-in-europe/>
- George, S. (2023, 30 januari). *Wind and solar 'accounted for record share of European electricity generation in 2022'*. Geraadpleegd op 9 februari 2023, van <https://www.edie.net/wind-and-solar-accounted-for-record-share-of-european-electricity-generation-in-2022/>
- Gökçek, M., & Kale, C. (2018). Optimal design of a Hydrogen Refuelling Station (HRFS) powered by Hybrid Power System. *Energy Conversion and Management*, 161, 215–224. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.007>
- GREET. (z.d.). Geraadpleegd op 2 november 2022, van <https://greet.es.anl.gov/>
- Gunawan, T. A., & Monaghan, R.F.D. (2022). Techno-econo-environmental comparisons of zero- and low-emission heavy-duty trucks. *Applied Energy*, 308, 118327. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118327>
- H2Haul. (z.d.). *H2Haul in a Nutshell*. Geraadpleegd op 20 februari 2023, van <https://www.h2haul.eu/about/>
- Helgeson, B., & Peter, J. (2020). The role of electricity in decarbonizing European road transport – Development and assessment of an integrated multi-sectoral model. *Applied Energy*, 262, 114365. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114365>
- Helioscsp. (2018, 8 maart). *European Concentrated Solar Power capacity to reach as high as 5 GW by 2030*. Geraadpleegd op 2 maart 2023, van <https://helioscsp.com/european-concentrated-solar-power-capacity-to-reach-as-high-as-5-gw-by-2030/>
- Horlings, J. (2021, 14 juni). *Rijden in een waterstofauto*. Geraadpleegd op 18 februari 2023, van <https://tweakers.net/reviews/9110/rijden-in-een-waterstofauto-bereik-tanken-en-kosten-in-de-praktijk.html>
- Hot Shot's Secret. (2020, 30 januari). *IS DIESEL THE SAME EVERYWHERE IN THE WORLD?* Geraadpleegd op 11 februari 2023, van <https://www.hotshotsecret.com/is-diesel-the-same-everywhere-in-the-world/>
- Hydrogen Europe. (2020). *HYDROGEN PRODUCTION & WATER CONSUMPTION*. Hydrogen Europe. Geraadpleegd op 22 februari 2023, van [https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2022/02/Hydrogen-production-water-consumption\\_fin.pdf](https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2022/02/Hydrogen-production-water-consumption_fin.pdf)
- Hydrogen Europe. (2023, 14 februari). *Heavy Duty Vehicle regulation includes H2*. Geraadpleegd op 2 maart 2023, van <https://hydrogeneurope.eu/heavy-duty-vehicle-regulation-includes-h2/>

- Hydrogen Europe. (z.d.). *Myths*. Geraadpleegd op 3 maart 2023, van <https://hydrogeneurope.eu/in-a-nutshell/>
- Interplex. (z.d.). *The First Hydrogen Fuel Cell Vehicle was Created in 1966*. Geraadpleegd op 13 februari 2023, van <https://interplex.com/resources/the-first-hydrogen-fuel-cell-vehicle-was-created-in-1966/>
- Ishaq, H., Dincer, I., & Crawford, C. (2022). A review on hydrogen production and utilization: Challenges and opportunities. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(62), 26238–26264. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.11.149>
- Jonas, J. (2009, 1 april). *THE HISTORY OF HYDROGEN*. Geraadpleegd op 2 november 2022, van <https://www.altenergymag.com/article/2009/04/the-history-of-hydrogen/555/>
- Jones, D. (2023, 31 januari). *European Electricity Review 2023*. Geraadpleegd op 14 februari 2023, van <https://ember-climate.org/insights/research/european-electricity-review-2023/>
- Jones, P., Hecker, J.-X., Asumendi, J. M., Comer, A., Garrido, J., Meakim, S. C., & Thompson, J. (2021). *EMEA Hydrogen*. J.P.Morgan. Geraadpleegd op 14 februari 2023, van <https://buyhydrogen.com.au/wp-content/uploads/2021/04/J.P.Morgan-CAZENOVE-EMEA-Hydrogen.pdf>
- Kakoulaki, G., Kougiad, I., Taylor, N., Dolci, F., Moya, J., & Jäger-Waldau, A. (2021). Green hydrogen in Europe – A regional assessment: Substituting existing production with electrolysis powered by renewables. *Energy Conversion and Management*, 228, 113649. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113649>
- Khzouz, M., Gkanas, E. I., Shao, J., Sher, F., Beherskyi, D., El-Kharouf, A., & Al Qubeissi, M. (2020). Life Cycle Costing Analysis: Tools and Applications for Determining Hydrogen Production Cost for Fuel Cell Vehicle Technology. *Energies*, 13(15). <https://doi.org/10.3390/en13153783>
- Koebler, J. (2013, 26 februari). Hyundai Becomes First Company to Mass Produce Hydrogen Fuel Cell Cars. *U.S. News*. Geraadpleegd op 5 november 2022, van <https://www.usnews.com>
- Küffner, C. (2022). Multi-level perspective for the development and diffusion of fuel cell heavy-duty trucks. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 111, 103460. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103460>
- l'Anson, R. (2022, 2 december). *Outlook 2023: EU diesel demand begins to shift away from Russia*. Geraadpleegd op 20 februari 2023, van <https://pemedianetwork.com/petroleum-economist/articles/trading-markets/2022/outlook-2023-eu-diesel-demand-begins-to-shift-away-from-russia/#:~:text=The%20EU%20has%20several%20alternative,high%20of%20400%2C000bl%2Fd.>
- Lajevardi, S. M., Aksen, J., & Crawford, C. (2019). Comparing alternative heavy-duty drivetrains based on GHG emissions, ownership and abatement costs: Simulations of freight routes in

- British Columbia. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 76, 19–55. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.08.031>
- Lee, D.-Y., Elgowainy, A., Kotz, A., Vijayagopal, R., & Marcinkoski, J. (2018). Life-cycle implications of hydrogen fuel cell electric vehicle technology for medium- and heavy-duty trucks. *Journal of Power Sources*, 393, 217–229. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.05.012>
- Library of Congress. (z.d.). *Modes of Transportation*. Geraadpleegd op 20 februari 2023, van <https://guides.loc.gov/oil-and-gas-industry/midstream/modes>
- Life Cycle Associates. (z.d.). *REET MODEL*. Geraadpleegd op 9 februari 2023, van <https://www.lifecycleassociates.com/lca-tools/greet-model/>
- Liu, F., L. Mauzerall, D., Zhao, F., & Hao, H. (2021). Deployment of fuel cell vehicles in China: Greenhouse gas emission reductions from converting the heavy-duty truck fleet from diesel and natural gas to hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(34), 17982–17997. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.02.198>
- Liu, X., Elgowainy, A., Vijayagopal, R., & Wang, M. (2021). Well-to-Wheels Analysis of Zero-Emission Plug-In Battery Electric Vehicle Technology for Medium- and Heavy-Duty Trucks. *Environmental Science & Technology*, 55(1), 538–546. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c02931>
- Liu, X., Reddi, K., Elgowainy, A., Lohse-Busch, H., Wang, M., & Rustagi, N. (2020). Comparison of well-to-wheels energy use and emissions of a hydrogen fuel cell electric vehicle relative to a conventional gasoline-powered internal combustion engine vehicle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(1), 972–983. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.192>
- Longden, T., J. Beck, F., Jotzo, F., Andrews, R., & Prasad, M. (2022). 'Clean' hydrogen? – Comparing the emissions and costs of fossil fuel versus renewable electricity based hydrogen. *Applied Energy*, 306(B), 118145. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118145>
- Lu, Z., & C. Kelly, J. (z.d.). *Life-Cycle Analysis (LCA) with the REET® Model* [Presentatieslides]. Geraadpleegd van <https://greet.es.anl.gov/workshops>
- Lundblad, T., Taljegard, M., & Johnsson, F. (2023). Centralized and decentralized electrolysis-based hydrogen supply systems for road transportation – A modeling study of current and future costs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(12), 4830–4844. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.242>
- Maes. (z.d.). *Hoe wordt benzine en diesel gemaakt*. Geraadpleegd op 12 februari 2023, van <https://www.maesmobility.be/nl/blog/brandstof/hoe-wordt-benzine-en-diesel-gemaakt/#:~:text=Door%20aardolie%20te%20destilleren%20ontstaan,olie%20heeft%20haar%20eigen%20kookpunt.>
- Malaise, P. (z.d.). *Cradle to Grave/Cradle*. Geraadpleegd op 9 februari 2023, van <https://www.meta-consort.eu/cradle-to-gravecradle/>

- Mayyas, A., & Mann, M. (2019). Manufacturing competitiveness analysis for hydrogen refueling stations. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(18), 9121–9142. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.02.135>
- McWilliams, B., Tagliapietra, S., & Zachmann, G. (2023, 9 februari). *Europe's half a million barrels per day diesel supply question*. Geraadpleegd op 20 februari 2023, van <https://www.bruegel.org/blog-post/europes-half-million-barrels-day-diesel-supply-question-1#:~:text=Over%20the%20past%20few%20years,a%20million%20barrels%20per%20day.>
- Meszler, D., Delgado, O., Rodríguez, F., & Muncrief, R. (2018). *EUROPEAN HEAVY-DUTY VEHICLES: COST-EFFECTIVENESS OF FUELEFFICIENCY TECHNOLOGIES FOR LONG-HAUL TRACTOR-TRAILERS IN THE 2025–2030 TIMEFRAME*. *The icct*. Geraadpleegd op 16 maart 2023, van [https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/ICCT\\_EU-HDV-tech-2025-30\\_20180424\\_updated.pdf](https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/ICCT_EU-HDV-tech-2025-30_20180424_updated.pdf)
- Milieu Centraal. (z.d.). *Kernenergie*. Geraadpleegd op 15 februari 2023, van <https://www.milieucentraal.nl/klimaat-en-aarde/energiebronnen/kernenergie/>
- Military.com. (z.d.). *Diesel gaan: soorten dieselbrandstoffen*. Geraadpleegd op 11 februari 2023, van <https://www.military.com/off-duty/autos/going-diesel-types-of-diesel-fuels.html>
- Mohideen, M., Subramanian, B., Sun, J., Ge, J., Guo, H., Radhamani, A., ... Liu, Y. (2023). Techno-economic analysis of different shades of renewable and non-renewable energy-based hydrogen for fuel cell electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 174, 113153. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113153>
- Moradzadeh, M., Zwaenepoel, B., Boel, R., & Vandeveld, L. (2013). Use of Energy Storage for Belgian Power Network. *ScienceDirect*. <https://doi.org/10.1109/EPEC.2013.6802973>
- MVW Autotechniek. (z.d.). *Waterstof en brandstofcel*. Geraadpleegd op 17 februari 2023, van <https://www.mvwautotechniek.nl/waterstof-en-brandstofcel/>
- Navigator. (2010, 26 mei). 7.16. *Net Present Value*. Geraadpleegd op 6 februari 2023, van [https://www.navigator.nl/document/id7e6cc8355ad3f8fe8bd558ffc3ad8d8e/privacyrecht-is-code-recht-en-praktijk-nr-ict1-7-16-net-present-value?ctx=WKNL\\_CSL\\_1355](https://www.navigator.nl/document/id7e6cc8355ad3f8fe8bd558ffc3ad8d8e/privacyrecht-is-code-recht-en-praktijk-nr-ict1-7-16-net-present-value?ctx=WKNL_CSL_1355)
- Neste. (z.d.). *Goederenvervoer in Europa*. Geraadpleegd op 16 maart 2023, van <https://www.neste.be/neste-my-renewable-diesel-be-nl/op-weg-naar-duurzaam-transport/goederenvervoer-in-europa>
- Next Kraftwerke. (z.d.). *Wat is een Power Purchase Agreement (PPA)?*. Geraadpleegd op 21 februari 2023, van <https://www.next-kraftwerke.nl/kennis/power-purchase-agreement-ppa>
- Noll, B., del Val, S., S. Schmidt, T., & Steffen, B. (2022). Analyzing the competitiveness of low-carbon drive-technologies in road-freight: A total cost of ownership analysis in Europe. *Applied Energy*, 306(B), 118079. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118079>

- OceanColor Webmaster. (z.d.). *Particulate Organic Carbon (POC)*. Geraadpleegd op 15 april 2023, van <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/atbd/poc/>
- Office of Scientific and Technical Information. (2022, 10 oktober). *Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Technologies Model ® (2022 .Net)*. Geraadpleegd op 3 november 2022, van <https://www.osti.gov/doiencode/biblio/81029>
- Oponeo. (2020, 15 juni). *Waterstof tanken in België: waar en hoe doe je dat?* Geraadpleegd op 12 februari 2023, van <https://www.banden-oponeo.be/blog/waterstof-tanken>
- Pandev, M., Lucchese, P., Mansilla, C., Le Duigou, A., Abrashev, B., & Vladikova, D. (2017). Hydrogen Economy: the future for a sustainable and green society. *Bulgarian Chemical Communications*, 49, 84–92. Geraadpleegd van [https://www.researchgate.net/profile/Borislav-Abrashev/publication/317401949\\_Hydrogen\\_Economy\\_the\\_future\\_for\\_a\\_sustainable\\_and\\_green\\_society/links/5a9010a50f7e9ba4296a70e7/Hydrogen-Economy-the-future-for-a-sustainable-and-green-society.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Borislav-Abrashev/publication/317401949_Hydrogen_Economy_the_future_for_a_sustainable_and_green_society/links/5a9010a50f7e9ba4296a70e7/Hydrogen-Economy-the-future-for-a-sustainable-and-green-society.pdf)
- Perkins, R., & Staden-Coats, R. (2023, 19 januari). *Europe still buying over quarter of diesel imports from Russia ahead of new curbs*. Geraadpleegd op 20 februari 2023, van <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/oil/011923-europe-still-buying-over-quarter-of-diesel-imports-from-russia-ahead-of-new-curbs#:~:text=Since%20Russia's%20invasion%20of%20Ukraine,at%20the%20start%20of%202022>.
- Pinsent Masons. (2021, 2 september). *Green hydrogen PPAs could reshape market*. Geraadpleegd op 15 februari 2023, van <https://www.pinsentmasons.com/out-law/news/green-hydrogen-ppas-could-reshape-market>
- R. Beswick, R., M. Oliveira, A., & Yan, Y. (2021). Does the Green Hydrogen Economy Have a Water Problem? *ACS Energy Letters*, 6(9), 3167–3169. <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.1c01375>
- Ruf, Y., Baum, M., Zorn, T., Menzel, A., & Rehberger, J. (2020). *Fuel Cells Hydrogen Trucks. Fuel cells and hydrogen 2 joint undertaking*. Geraadpleegd op 1 maart 2023, van <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/9583ed75-70fd-11eb-9ac9-01aa75ed71a1/language-en>
- S., A. (z.d.). *What is the weight of a city bus?* Geraadpleegd op 6 januari 2023, van [https://www.ehow.co.uk/facts\\_6946836\\_weight-city-bus\\_.html](https://www.ehow.co.uk/facts_6946836_weight-city-bus_.html)
- Salt, M. (2022, 1 september). *Grid-connected Hydrogen: Buyer Beware*. Geraadpleegd op 15 februari 2023, van <https://www.impactx.tech/en/insights/buyer-beware-grid-connected-hydrogen>
- Satelllic. (2018). *Gids voor voertuigdocumenten (V1.3)*. *Satelllic*. Geraadpleegd op 6 januari 2023, van [https://www.satelllic.be/sites/default/files/Belgium\\_NL\\_0218-min180221170319.pdf](https://www.satelllic.be/sites/default/files/Belgium_NL_0218-min180221170319.pdf)



- Soard, B. (2017, 19 september). *Classifying Medium and Heavy-duty Trucks*. Geraadpleegd op 5 november 2022, van <https://fleetnetamerica.com/blog/post/classifying-medium-and-heavy-duty-trucks>
- Solar Edition. (2020, 5 december). *Green Hydrogen Production Paths: A Glimpse of a Zero Emission and Clean Future*. Geraadpleegd op 6 februari 2023, van <https://solaredition.com/green-hydrogen-production-paths/>
- Stamatakis, E., Perwög, E., Garyfallos, E., Sanz Millán, M., Zoulias, E., & Chalkiadakis, N. (2022). Hydrogen in Grid Balancing: The European Market Potential for Pressurized Alkaline Electrolyzers. *Energies*, 15(2). <https://doi.org/10.3390/en15020637>
- Suzan, S. (2021). *Easy Ride: why the EU truck CO2 targets are unfit for the 2020s*. *Transport & Environment*. Geraadpleegd op 15 maart 2023, van [https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/10/202108\\_truck\\_CO2\\_report\\_final.pdf](https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/10/202108_truck_CO2_report_final.pdf)
- Szalek, A., Pielecha, I., & Cieslik, W. (2021). Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV) Energy Flow Analysis in Real Driving Conditions (RDC). *Energies*, 14(16). <https://doi.org/10.3390/en14165018>
- Taekker Madsen, H. (2022). *Water treatment for green hydrogen*. *Eurowater*. Geraadpleegd op 22 februari 2023, van <https://www.eurowater.com/en/hydrogen-production>
- The icct. (2023, 14 februari). *EUROPE'S NEW HEAVY-DUTY CO2 STANDARDS, EXPLAINED*. Geraadpleegd op 2 maart 2023, van <https://theicct.org/eu-co2-hdv-standards-explained-feb23/>
- The icct & European Clean Trucking Alliance. (2022). *Road freight decarbonization in Europe*. *European Clean Trucking Alliance*. Geraadpleegd op 15 maart 2023, van <https://clean-trucking.eu/wp-content/uploads/2022/09/Road-freight-decarbonization-in-Europe-Report-A4-v4.pdf>
- TRAFIGURA & H2 energy. (2021). *Decarbonising heavy-duty trucking and accelerating the European hydrogen economy*. *Trafigura*. Geraadpleegd op 5 november 2022, van <https://www.trafigura.com/brochure/decarbonising-heavy-duty-trucking-and-accelerating-the-european-hydrogen-economy/>
- Transport & Environment. (2020, 8 december). *Ministers greenlight 50% toll discount for emissions-free trucks*. Geraadpleegd op 16 maart 2023, van <https://www.transportenvironment.org/discover/ministers-greenlight-50-toll-discount-emissions-free-trucks/>
- U.S. Department of Energy. (z.d.). *Hydrogen Production and Distribution*. Geraadpleegd op 6 februari 2023, van [https://afdc.energy.gov/fuels/hydrogen\\_production.html](https://afdc.energy.gov/fuels/hydrogen_production.html)
- Urbancic, N., Renshaw, N., Archer, G., Cuenot, F., Fergusson, M., Buffet, L., ... Allegretta, L. (2017). *Diesel: the true (dirty) story*. *Transport & Environment*. Geraadpleegd op 20 februari 2023,

- van [https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/2017\\_09\\_Diesel\\_report\\_final.pdf](https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/2017_09_Diesel_report_final.pdf)
- van den Brink, W. (2022, 31 januari). *Wat is waterstof? En hoe werken vrachtwagens op waterstof?* Geraadpleegd op 16 februari 2023, van <https://www.volvotrucks.nl/nl-nl/news/kennisbank/uitstoot-verminderen/wat-is-waterstof-waarom-waterstof-en-hoe-werken-vrachtwagens-op-waterstof.html#:~:text=Onder%20de%20cabine%20bevindt%20zich,opzichten%20eigenlijk%20als%20een%20accu>
- van Lier, R. (2023, 7 juni). België legt 'waterstofsnelweg van de toekomst' aan. *Het Laatste Nieuws*. Geraadpleegd op 7 juni 2023, van [https://www.hln.be/binnenland/belgie-legt-waterstofsnelweg-van-de-toekomst-aan~a9d784e5/?fbclid=IwAR1gHiK2llqGYrHvM9MNIjSS4btvDK6mXFbOjxg668rH6HB2\\_B3K\\_EZf6FWM](https://www.hln.be/binnenland/belgie-legt-waterstofsnelweg-van-de-toekomst-aan~a9d784e5/?fbclid=IwAR1gHiK2llqGYrHvM9MNIjSS4btvDK6mXFbOjxg668rH6HB2_B3K_EZf6FWM)
- Velazquez Abad, A., & Dodds, P. E. (2020). Green hydrogen characterisation initiatives: Definitions, standards, guarantees of origin, and challenges. *Energy Policy*, 138, 111300. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111300>
- VITO. (2010 februari). *Elektrolyse*. Geraadpleegd op 17 april 2023, van <https://emis.vito.be/nl/bbt/bbt-tools/techniekfiches/elektrolyse>
- Vlaamse Milieumaatschappij. (z.d.). *GWP*. Geraadpleegd op 5 november 2022, van <https://www.vmm.be/woordenboek/gwp>
- VREG. (z.d.). *Waarom nieuwe nettarieven?* Geraadpleegd op 16 februari 2023, van <https://www.vreg.be/nl/waarom-nieuwe-nettarieven>
- Wang, M., Elgowainy, A., Lu, Z., Baek, K., Bafana, A., Benavidas, P., Burnham, A., Cai, H., Cappello, V., Chen, P., Gan, Y., Gracida-Alvarez, U., Hawkins, T., Iyer, R., Kelly, J., Kim, T., Kumar, S., Kwon, H., Lee, K., ... Zaimes, G. (2022). Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Technologies Model ® (2022 .Net) (Versie Net 2022 (v1.3.0.13991)). Geraadpleegd van <https://greet.es.anl.gov/index.php?content=greetdotnet>
- WaterstofNet. (2022, 7 juni). *Vlaanderen verdubbelt subsidies voor waterstof trucks*. Geraadpleegd op 20 februari 2023, van <https://www.waterstofnet.eu/nl/nieuws/vlaanderen-verdubbelt-subsidies-voor-waterstof-trucks>
- WaterstofNet. (z.d.). *NIKOLA Tre: hydrogen-electric truck for European markets*. Geraadpleegd op 20 februari 2023, van <https://fuelcelltrucks.eu/project/nikola-tre/>
- Wolf, A., & Zander, N. (2021). Green Hydrogen in Europe: Do Strategies Meet Expectations? *Inter economics*, 56, 316–323. <https://doi.org/10.1007/s10272-021-1008-3>
- Woorden.org. (z.d.). *Het cetaangetal*. Geraadpleegd op 11 februari 2023, van <https://www.woorden.org/woord/cetaangetal>

- Writer, S. (2020, 28 maart). *What Is the Weight of a Bus?* Geraadpleegd op 6 januari 2023, van <https://www.reference.com/world-view/weight-bus-dee41e459d38318f>
- Wulf, C., & Kaltschmitt, M. (2018). Hydrogen Supply Chains for Mobility—Environmental and Economic Assessment. *Sustainability*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/su10061699>
- Zhou, Y., & Searle, S. (2022). *COST OF RENEWABLE HYDROGEN PRODUCED ONSITE AT HYDROGEN REFUELING STATIONS IN EUROPE*. *The icct*. Geraadpleegd op 16 maart 2023, van <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/02/fuels-eu-cost-renew-H-produced-onsite-H-refueling-stations-europe-feb22.pdf>

## IX. Bijlagen

### a. Tabellen

*Tabel A: kleurenspectrum van waterstof (Hydrogen Europe, z.d.)*

Soort waterstof	Betekenis
Groen	<p><i>'Green hydrogen is mainly produced by splitting water (i.e., water electrolysis) using electricity generated from renewable energy sources (RES). The reason it is called green is that there is no CO2 emission associated with the hydrogen production nor with its usage. When used in a fuel cell, the only by-product of its use is the pure water that was originally used in its production. Renewable hydrogen is generally more expensive than blue hydrogen, though prices are becoming more competitive. Although "green" hydrogen often refers to electrolytic hydrogen produced using electricity generated from renewable energy sources, it can also refer to hydrogen produced via different methods using other renewable sources such as biogas, biomethane, bio-waste and other renewable sources, these methods are less common than water electrolysis but also result in either very low or zero emissions.'</i></p>
Blauw	<p><i>'Blue hydrogen refers to hydrogen derived from natural gas, which is a fossil fuel, however, most (albeit not all) the CO2 emitted during the process would be captured and stored underground (carbon sequestration) or bound in a solid product (such as bricks) and utilized. This is called carbon capture, storage and utilisation (CCSU).</i></p> <p><i>One process for achieving this is called steam methane reforming (SMR). This mixes natural gas with very hot steam, in the presence of a catalyst, where a chemical reaction creates hydrogen and carbon dioxide and carbon monoxide. An improvement of this process, auto-thermal reforming (ATR) combines the steam reforming reaction and fuel oxidation into a single unit. This process is more efficient and is able to capture more of the CO2 emitted in course of production. When considering the CO2 emission reduction potential of "blue" hydrogen, it is important to acknowledge the importance of tackling methane leakage upstream of the hydrogen production plant. This should be done by applying a strict life-cycle assessment when determining the CO2 emissions associated with its production.</i></p> <p><i>Due to the differences in CO2 emissions that can occur in the production of "blue" hydrogen (depending on upstream methane emissions and the production technology used), the term itself can be considered too broad. Instead, when referring to hydrogen produced from natural gas, it is more accurate to refer to it using the actual GHG footprint associated to its production.'</i></p>
Turquoise	<p><i>'Extracted by using the thermal splitting of methane via methane pyrolysis, this process (though at the experimental stage) removes carbon in a solid form instead of CO2 gas.'</i></p>
Wit	<p><i>'White hydrogen refers to naturally occurring hydrogen in its most natural state.'</i></p>
Rood	<p><i>'Red hydrogen is produced through the high-temperature catalytic splitting of water using nuclear power thermal as an energy source.'</i></p>
Grijs	<p><i>'Grey hydrogen is produced from fossil fuel and commonly uses steam methane reforming (SMR) method. During this process, CO2 is produced and eventually released to the atmosphere.'</i></p>

Zwart/bruin	'Produced from coal, the black and brown colours refer to the type of bituminous (black) and lignite (brown) coal. The gasification of coal is a method used to produce hydrogen. However, it is a very polluting process, and CO2 and carbon monoxide are produced as by-products and released into the atmosphere.'
Roze	'Pink hydrogen is generated through electrolysis of water by using electricity from a nuclear power plant.'
Paars	'Purple hydrogen is made though using nuclear power and heat through combined chemo-thermal electrolysis splitting of water.'

*Tabel B: voorbeelden van alternatieve businessmodellen voor het traditionele model van eigendom van vrachtwagens (The icct & European Clean Trucking Alliance, 2022)*

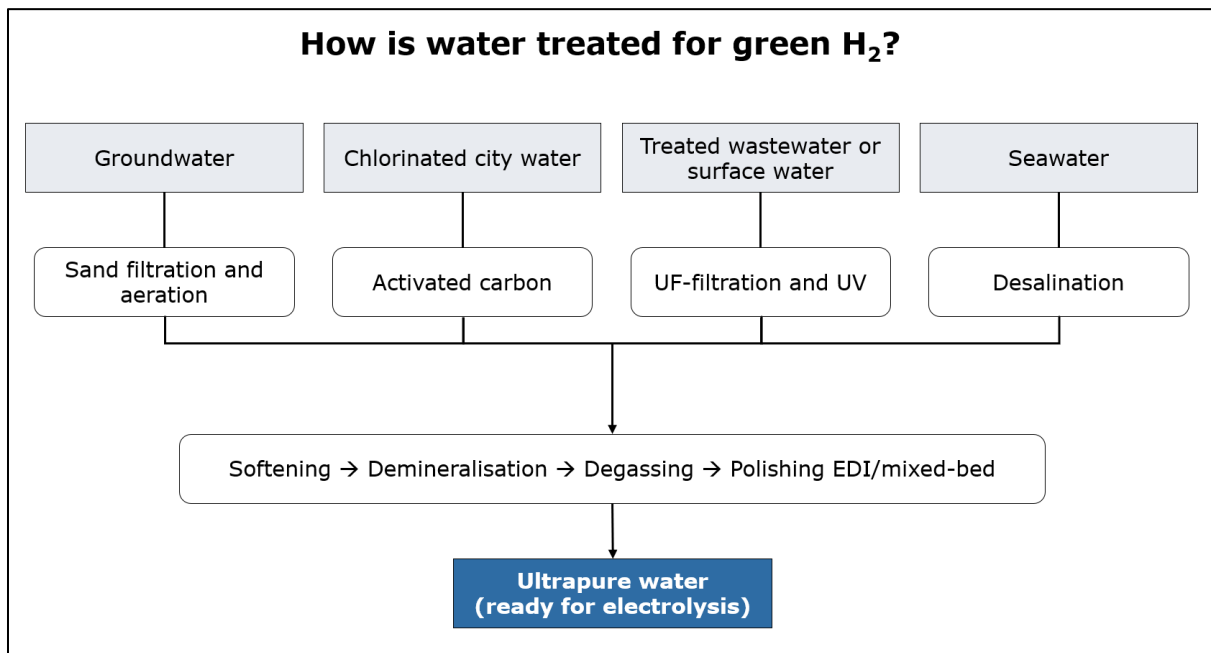
	<b>Truck ownership</b>	<b>Infrastructure ownership</b>	<b>Operational expenses</b>	<b>Payment</b>
<b>Traditional ownership</b>	Carrier	Carrier	Carrier	One-off upfront payment
<b>Leasing</b>	Carrier / manufacturer	Carrier	Carrier	Fixed monthly payment
<b>Trucking-as-a-service (TaaS)</b>	Service provider	Service provider	Carrier	Fixed monthly payment
<b>Pay as you drive</b>	Service provider	Service provider	Carrier	Monthly fee based on usage
<b>Charging-as-a-service (CaaS)</b>	Carrier	Service provider	Carrier	Fixed monthly payment

*Tabel C: dieselprijzen exclusief btw en na terugbetaling van accijnzen van de referentielanden voor 2022 in euro per liter (DKV, z.d.)*

	<b>Duitsland</b>	<b>Frankrijk</b>	<b>Italië</b>	<b>Nederland</b>	<b>Polen</b>	<b>Spanje</b>	<b>VK</b>
<b>01/2022</b>	1.342	1.217	1.155	1.445	1.050	1.116	1.522
<b>02/2022</b>	1.397	1.285	1.220	1.503	1.094	1.145	1.544
<b>03/2022</b>	1.804	1.556	1.650	1.812	1.379	1.394	1.759
<b>04/2022</b>	1.694	1.408	1.478	1.715	1.387	1.445	1.795
<b>05/2022</b>	1.703	1.434	1.525	1.709	1.399	1.484	1.806
<b>06/2022</b>	1.697	1.601	1.650	1.839	1.504	1.609	1.906
<b>07/2022</b>	1.636	1.505	1.630	1.769	1.425	1.565	1.947
<b>08/2022</b>	1.633	1.422	1.500	1.695	1.384	1.459	1.858
<b>09/2022</b>	1.733	1.324	1.506	1.713	1.394	1.478	1.748
<b>10/2022</b>	1.772	1.460	1.550	1.781	1.462	1.518	1.800
<b>11/2022</b>	1.664	1.437	1.516	1.644	1.471	1.496	1.809
<b>12/2022</b>	1.516	1.345	1.450	1.506	1.451	1.330	1.713

## b. Figuren

*Figuur A: soorten waterbehandelingen per watertype (Taekker Madsen, 2022)*



*Figuur B: mailverkeer met GREET-team (Z. Lu, persoonlijke communicatie, 3 & 6 april 2023)*

**Datum:** 3 april 2023

**Aan:** [greet@anl.gov](mailto:greet@anl.gov)

**Onderwerp:** Questions on use of GREET

**Mail:**

Dear Mr./Ms.,

I am using the GREET software v. 1.3.0.13991 for an important paper about the environmental impacts of heavy-duty trucks on diesel compared with green hydrogen for the simulation year 2022.

However, I am encountering two problems while performing the analyses.

1. For both the truck on diesel 'HDV: Combination Long-Haul Truck CIDI - LS Diesel' and on green hydrogen 'HDV: Combination Long-Haul Truck FCV - Gaseous H2', I want to change the default payload (for diesel from 19.0402 ton to 26 ton and for green hydrogen from 23.5868 ton to 26.25 ton) and number of passengers (from 0 to 1). If I run this, I find it odd that the results on for example energy or GHG-100 do not change with it. Like this, it seems like the model does not take air and road friction into account. Is the assumption I make here correct?
2. I want the electricity used for the electrolysis of hydrogen to come from solar or wind. For this I tried to modify the standard processes used in the pathway 'Compressed G.H2 Combined for Medium- and Heavy Duty Vehicles (MHDV)', what resulted in the new pathway 'Compressed G.H2 Combined for Medium- and Heavy Duty Vehicles (MHDV) NEW2'. If this pathway is opened in the WTP tab, you can see that the process 'Option: Electricity choice of Wind or Solar Electricity for Refueling Station PEM electrolysis

*NEW1* does not seem to have any results on the bottom left column while clicking on it, while the other steps do show results. Herefore, please consult the pathway '*Compressed G.H2 Combined for Medium- and Heavy Duty Vehicles (MHDV) NEW2*' in the file attached. Some modifications on the original processes used in the pathway are listed in their notes.

I hope you can help me to figure these things out.

Thank you very much in advance.

Yours sincerely,

Anke Maes  
(Belgium)

**Bijlage:** Waterstof 29-03 versie 2.greet

**Datum:** 6 april 2023

**Aan:** [greet@anl.gov](mailto:greet@anl.gov)

**Onderwerp:** Questions on use of GREET

**Mail:**

Dear Mr./Ms.,

I have sent an email earlier this week about the use of GREET for the environmental impacts of diesel heavy-duty trucks compared with green hydrogen heavy-duty trucks for the simulation year 2022.

Concerning:

*'1. For both the truck on diesel 'HDV: Combination Long-Haul Truck CIDI – LS Diesel' and on green hydrogen 'HDV: Combination Long-Haul Truck FCV – Gaseous H2', I want to change the default pay load (for diesel from 19.0402 ton to 26 ton and for green hydrogen from 23.5868 ton to 26.25 ton) and number of passengers (from 0 to 1). If I run this, I find it odd that the results on for example energy or GHG-100 do not change with it. Like this, it seems like the model does not take air and road friction into account. Is the assumption I make here correct?*

*2. I want the electricity used for the electrolysis of hydrogen to come from solar or wind. For this I tried to modify the standard processes used in the pathway 'Compressed G.H2 Combined for Medium- and Heavy Duty Vehicles (MHDV)', what resulted in the new pathway 'Compressed G.H2 Combined for Medium- and Heavy Duty Vehicles (MHDV) NEW2'. If this pathway is opened in the WTP tab, you can see that the process 'Option: Electricity choice of Wind or Solar Electricity for Refueling Station PEM electrolysis NEW1' does not seem to have any results on the bottom left column while clicking on it, while the other steps do show results. Herefore, please consult the pathway 'Compressed G.H2 Combined for Medium- and Heavy Duty Vehicles (MHDV) NEW2' in the file attached. Some modifications on the original processes used in the pathway are listed in their notes.*

*+ see the GREET-file I sent earlier: Waterstof 29-03 versie 2.greet'*

While opening GREET today, I got a request to update the database and saw some things were changed clicking on the updates, based on the things I mentioned in my previous email. However, I do not know what to do with it now, as nothing in the results seem to change the way I expected it to be.

Can you please send me some instructions?

I also want to do the same as in point 2 but then for electricity coming from the European grid (pathway: '*Distributed - European Electricity mix NEW1*'). So, I constructed the same pathway as in '*Compressed G.H2 Combined for Medium- and Heavy Duty Vehicles (MHDV) NEW2*', but then with the aforementioned change, resulting in '*Compressed G.H2 Combined for Medium- and Heavy Duty Vehicles (MHDV) NEW3*', which you can find in the GREET-file in attachment. However, even when using grid electricity, I get a result of GHG-100-emissions of zero, which does not seem correct, as the mix consists of for example natural gas.

In addition, I want to achieve a pressure of 700 bar for the gaseous hydrogen instead of the assumed 350 bar, but I don't know how to change the inputs to receive matching results for this.

I hope you can help me further.

Thank you very much in advance.

Yours sincerely,

Anke Maes  
(Belgium)

**Bijlage:** Waterstof 29-03 versie 3.greet

**Datum:** 6 april 2023

**Aan:** [anke.maes@student.uhasselt.be](mailto:anke.maes@student.uhasselt.be)

**Onderwerp:** Questions on use of GREET

**Mail:**

Anke,

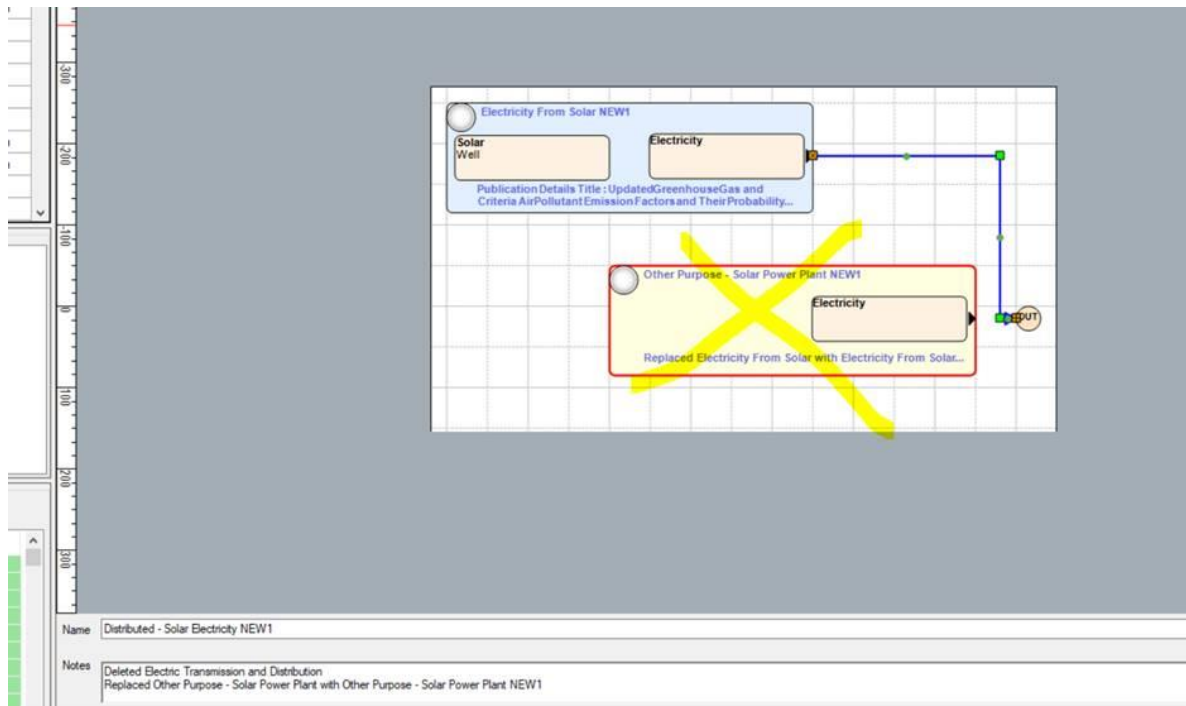
There are quite a lot of errors in your file and I think you did not modify and use the software properly. For example, in Pathway: "Algae Hydrothermal liquefaction (HTL) for Renewable Diesel III (2020 SOT)"(id:273767638), there are broken links in the pathway, causing some error messages. I would not work on any greet project that popping error messages until I fix the potential issues. Regarding your questions, I have some comments below.

1. First, payload or passenger number only affect the per ton mi or per passenger mi results, not /mi. Second, after changing any numbers in GREET (either .net or excel), you need to press F9 (or results->calculate) to recalculate the model and refresh the results. Otherwise, the results will not updated.

2. The electricity issue is because of the pathway "Distributed – Solar Electricity New1". Here you should not use a pathway alone as the input without any additional processes. Please see



my modification in the attached figure below (remember to delete the yellow box). With this change, electricity issue will be fixed.



3. In your case, I would not recommend you updating your file unless you are an experienced user. We just released a new greet file recently and that is the message about. You can download that new file but do not merge it with your existing file, unless you are very familiar with GREET.net. Or you can load the new file and rebuild your modifications with it.

Zifeng

-----  
Zifeng LU, Ph.D., Principal Energy Systems Scientist

Energy Systems and Infrastructure Analysis Division  
Argonne National Laboratory  
9700 South Cass Avenue, Lemont, IL 60439, USA  
1-630-252-9853 (Office); [zlu@anl.gov](mailto:zlu@anl.gov)