

Adressé à :

Monsieur Damien Sury
Bruxelles Environnement
Site de Tour & Taxis
Avenue du Port 86C / 3000
1000 Bruxelles

**ETUDE D'IMPACT SUR LA
MOBILITE, SUR LES ASPECTS
ECONOMIQUES ET SOCIAUX ET SUR
L'ENERGIE ET ROADMAP VERS
UNE SORTIE DES VEHICULES
THERMIQUES**

Rapport final du volet 1 – Partie 1 :
Évolutions technologiques, étude
d'impact sur l'environnement et
l'énergie

CSC N° 2019B0134

8 DECEMBER 2020



Personne de contact :

Sylvie Gayda
Directeur d'études
Tél. +32 (0)2 738 78 79
s.gayda@strateg.be



Deliverable	
Authors	Quentin De Clerck, Nils Hooftman, Koen Mommens, Jules Nuyttens, Lieselot Vanhaverbeke
Status	Final
Version	4
Document date	08/12/2020
Reviewers	Quentin De Clerck, Lieselot Vanhaverbeke

Inhoudstafel

TECHNOLOGISCHE ONTWIKKELINGEN	13
1. INLEIDING	13
2. VOERTUIGTECHNOLOGIEËN: CONTEXT EN OVERZICHT	14
2.1. CONTEXT	14
2.1.1. Europese CO ₂ -emissiedoelstellingen	14
2.1.2. De rol van <i>zero and low emission</i> (ZLEV) voertuigen	16
2.1.3. Eco-innovaties en andere stimulansen	19
2.2. OVERZICHT VOERTUIGTECHNOLOGIEËN	20
2.2.1. Diesel	20
2.2.2. Benzine	21
2.2.3. Emissiestandaarden	22
2.2.4. CNG/LNG	26
2.2.5. CBM/LBM	27
2.2.6. Biobrandstoffen	28
2.2.7. Batterij-elektrische voertuigen en hybride voertuigen	29
2.2.8. Waterstof	32
2.3. VOORUITZICHTEN VOERTUIGTECHNOLOGIEËN	35
2.4. OVERZICHT EN VOORUITZICHTEN TANK- EN LAADINFRASTRUCTUUR	38
2.5. CONCLUSIE	45
3. LEVENSCYCLUSANALYSE: VERGELIJKING VAN TECHNOLOGIEËN OP VLAK VAN MILIEU-IMPACT	48
3.1. INTRODUCTIE TOT LCA	48
3.2. INTRODUCTIE TOT RECIPE – LCIA METHODOLOGIE	52
3.3. LCA VAN VERSCHILLENDE VOERTUIGAANDRIJFLIJNEN IN EEN BRUSSELSE CONTEXT	54
3.4. LCIA METHODOLOGIE EN IMPACTCATEGORIEËN	56
3.5. LCI VAN DE VOERTUIGCYCLUS	56
3.6. LCIA RESULTATEN	57
3.6.1. Impact 1: Klimaatwijziging	58
3.6.2. Impact 2: Vorming van fijnstofdeeltjes	69
3.6.3. Impact 3: fotochemische oxidantvorming (smog)	73
3.6.4. Impact 4: Toxiciteit voor mensen	78
3.6.5. ENdpoint-impact op Volksgezondheid	80
3.7. CONCLUSIES	81
4. TOTAL COST OF OWNERSHIP: VERGELIJKING VAN TECHNOLOGIEËN OP VLAK VAN KOSTEN	84
4.1. INLEIDING	84
4.2. PERSONENWAGENS	84
4.2.1. Algemene assumpties voor personenwagens	84
4.2.2. Methodologie voor een nieuwe wagen	85

4.2.3. Resultaten voor een nieuwe wagen	90
4.2.4. Methodologie voor een tweedehandswagen	94
4.2.5. Resultaten voor een tweedehandswagen	95
4.2.6. Methodologie voor bedrijfswagens	97
4.2.7. Methodologie voor een nieuwe wagen in 2030	100
4.2.8. Resultaten voor een nieuwe wagen in 2030	103
4.3. AUTODELEN	105
4.4. LICHTE BEDRIJFSWAGENS	106
4.4.1. Methodologische aanpassingen t.o.v. bezit door particulier	107
4.4.2. Resultaten lichte bedrijfswagen	108
4.5. MIDDELGROTE EN ZWARE VRACHTWAGENS	111
4.6. BUSSEN	113
4.7. GEMOTORISEERDE TWEEWIELERS	115
4.7.1. Klassieke Brom- en Motorfietsen	115
4.7.2. Elektrische fietsen en speed pedelecs	116
4.8. AUTONOME VOERTUIGEN	117
4.9. CONCLUSIE	117
5. MARKTEVOLUTIES	121
5.1. GROEI WERELDWIJDE EV-MARKT	121
5.2. GROEI EUROPESE UNIE EV-MARKT	126
5.3. GROEI BELGISCHE EV-MARKT	129
5.3.1. Personenwagens	129
5.3.2. Goederenvervoer	131
5.4. GROEI BRUSSELSE EV-MARKT	134
5.5. CONCLUSIE	135
6. CONCLUSIE	136
BIBLIOGRAFIE	138
APPENDIX	150
1. TECHNOLOGICAL OVERVIEW	150
1.1. DIVERSIFICATION FROM THE VERY START	150
1.2. CONVENTIONAL PETROL AND DIESEL CARS	151
1.3. ALTERNATIVE FUELS	155
1.3.1. Biofuels	155
1.3.2. Power-to-X	158
1.3.3. Natural gas and LPG	161
1.4. POWERTRAIN ELECTRIFICATION	163
1.4.1. Hybrid electric vehicles	163
1.4.2. Series hybrids	164
1.4.3. Parallel hybrids	165
1.4.4. Power-split hybrids	166

1.4.5. Plug-in hybrids	167
1.5. ELECTRIC VEHICLES	168
1.5.1. Battery electric vehicles (BEV)	168
1.5.2. Fuel cell electric vehicles (FCEV)	172
2. STATE OF THE ART OF CHARGING INFRASTRUCTURE	175
2.1. CHARGING STATION TYPES	175
2.2. UNI- AND BI-DIRECTIONAL POWER FLOWS	175
2.3. (UN)COORDINATED CHARGING	176
2.4. CONDUCTIVE CHARGERS	177
2.4.1. AC or DC? The war between two different ways to charge	177
2.4.2. Charging modes	178
2.4.3. Plug/socket types	179
2.4.4. Power levels	181
2.5. DIFFERENT POSSIBLE STRUCTURAL CONFIGURATION	182
2.5.1. Integrated chargers	182
2.5.2. Isolated chargers	183
2.6. PANTOGRAPH CHARGERS	183
2.7. ALTERNATIVES TO CONDUCTIVE CHARGERS	184
2.7.1. Wireless charging of electric vehicles	184
2.7.2. Battery switching stations	184

Lijst van tabellen

Tabel 1: Euronormering voor benzine- en dieselwagens (bron: Dieselnet)	22
Tabel 2: Euronormering voor bestelwagens (bron: Dieselnet)	24
Tabel 3: Euronormering vachtwagens (bron: Dieselnet.com)	25
Tabel 4 – Overzicht laadmodi	41
Tabel 5: Algemene assumpties TCO	85
Tabel 6: Depreciatiepercentages van de verschillende technologieën (De Clerck et al., 2018).....	86
Tabel 7: Prijzen energiebronnen	87
Tabel 8: Vermenigvuldigingsfactoren per voertuigtechnologie	88
Tabel 9: Voertuigen voor TCO-analyse. Eigen opmaak op basis van data afkomstig van AutoGids.be (2020).	89
Tabel 10: Hypothetische prijzen energiebronnen in 2030	102
Tabel 11: Hypothetische voertuigen per segment en hun kenmerken	103
Tabel 12: Lichte bedrijfswagens voor de TCO-analyse. Eigen opmaak volgens gegevens uit (Lebeau, Macharis, & Mierlo, 2019a; Lebeau et al., 2019b).....	107
Tabel 13: Algemene assumpties voor de TCO-analyse van lichte bedrijfswagens (Lebeau et al., 2019a).	108
Tabel 14: TCO voor een selectie voertuigtechnologieën, met en zonder infrastructuurkosten (Lajevardi et al., 2019).....	113
Tabel 15: Marktaandeel EV's in 2030.....	126
Tabel 16: Groei totale vloot APV's in België. Bron: Opmaak door MOBI op basis van data van EAFO (2019a) en "Ecoscore" (2020).	129
Tabel 17: Groei tweedehandsmarkt EV's in België. Bron: Opmaak door MOBI op basis van data van en "Ecoscore" (2020).....	131
Tabel 18: Marktaandeel in 2035 per voertuigtype en aandrijvingstechnologie voor goederenvervoer	133
Tabel 19: Aantal voertuigen per voertuigcategorie, type bezit en voertuigtechnologie in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest (FOD Mobiliteit, 2019).	135

Lijst van tabellen in appendix

Table 1: Overview of tank-to-wheel efficiencies per EV powertrain type (based on (Ramachandran & Stimming, 2015))	174
---	-----

Table 2: Pros and cons of AC and DC chargers	177
Table 3: Four different charging modes with addition description and comments	178
Table 4: Four different types of connectors with additional information (DERİCİOĞLU et al., 2018) .	180
Table 5: Specific connection ports nomenclature.....	181
Table 6: Four different power levels with electrical specifications and characteristics	182

Lijst van figuren

Figuur 1 – Reductiedoelstellingen voor personenwagens in de EU, omgerekend naar equivalente emissiefactoren volgens de NEDC (Mock, 2019).....	15
Figuur 2 – Overzicht van het krediet dat wordt toegewezen aan een ‘zero and low emission electric vehicle’ t.e.m. 2030 (Dornoff, Miller, Mock, & Tietge, 2018)	17
Figuur 3 – Bepaling van het ZLEV gewicht volgens de CO ₂ -emissie (links) en de bepaling van de ZLEV factor volgens het gewogen ZLEV aandeel per constructeur (Bron: Dornoff et al. 2018).....	18
Figuur 4: Euronormering vrachtwagens.voor fijnstof (PM) en NO _x	25
Figuur 5 – Vergelijking tussen verschillende aandrijvingstechnologieën startende van hernieuwbare elektriciteit, waarbij een onderscheid wordt gemaakt tussen directe toepassing ervan in een batterij elektrisch voertuig, de toepassing ervan voor elektrolyse van water tot waterstof en de toepassing ervan voor de productie van synthetische brandstoffen (Earl, 2018).....	34
Figuur 6 – Overzicht van de energetische verliezen in zowel de productie van de energievector (WTT) en omzetting ervan in de aandrijvingslijn (TTW), alsook gecombineerd per type aandrijvingslijn. Met ICEV voor internal combustion engine vehicle, FCV voor fuel cell vehicle en BEV voor battery electric vehicle (Smit et al., 2018).	35
Figuur 7 – Marktadoptiecurve volgens Rogers (Mahmassani, 2016).....	40
Figuur 8 – Laadgedrag van de Belgische EV-rijder (Powerdale/VUB, 2019)	40
Figuur 9 – Grafisch overzicht van de laadmodi (TU Delft)	42
Figuur 10: Een eHighway proeftraject in Duitsland (bron: Siemens)	43
Figuur 11 – Een pantograafsnellaadstation voor bussen in Göthenburg (Volvo)	44
Figuur 12: Grafisch overzicht van de levenscyclusfasen van een product en diens interactie met de omgeving (Rangaraju, 2018)	49
Figuur 13: Het kader voor LCA en de directe toepassingen ervan (Rangaraju, 2018)	49
Figuur 14: Overzicht van de verplichte en optionele stappen in LCA (links) en het impactanalyseproces van inventarisatie tot mid- en endpointcategorieën (European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability, 2010)	51
Figuur 15: Het milieumechanisme met de verhoudingen tussen de LCI parameters (links), de midpoint- en endpointcategorieën (rechts) in de ReCiPe methode (Wernet et al., 2016)	53
Figuur 16: Systeemgrenzen en de belangrijkste deelprocessen binnen het systeem (Rangaraju, 2018)	55
Figuur 17: Overzicht van de generieke en technologiespecifieke componenten (Rangaraju, 2018)....	57
Figuur 18: Het opwarmingspotentieel van de verschillende voertuigtechnologieën uitgedrukt per gereden kilometer voor de Belgische elektriciteitsmix.	58

Figuur 19: Impact van de elektriciteitsmix op de LCA van een elektrische personenwagen (Messagie, 2017).....	59
Figuur 20: WTW-impact van een waterstofelektrisch voertuig op basis van de methode waarop waterstof wordt geproduceerd, met 'NG reforming' voor waterstof op basis van aardgasreformatie (JEC, 2019)	60
Figuur 21: Well-to-tank CO ₂ emissies per mega-Joule brandstof	62
Figuur 22: Overzicht van de well-to-tank klimaatimpact per energievecteur, met LMB = vloeibaar biomethaan, CBM = gecompriemd biomethaan, HVO = hydrotreated vegetable oil, ED95 = biobrandstof op basis van ethano voor toepassing in dieselmotorenI, NG = aardgas, DME = dimethyl ether (CONCAWE, 2020),	63
Figuur 23: Overzicht van de impact op klimaatverandering voor personenwagens waarbij het verschil tussen batterij-elektrische modellen met een verschillende nominale capaciteit wordt weergegeven. EV 40 kWh + 50 kWh verwijst naar een EV met een batterij-elektrische range-extender, EV 40 kWh + gen. ReX naar een EV met een generator-elektrische range-extender (Hooftman, Messagie, Joint, et al., 2018).....	64
Figuur 24: De impact op klimaatverandering voor stadsbussen met verschillende motorisaties, uitgedrukt in gCO ₂ per persoon per kilometer	66
Figuur 25: Totale uitstoot van broeikasgassen in ton CO ₂ voor vrachtwagens met verschillende soorten motorisaties. Een rekenvoorbeeld voor de Amerikaanse markt, met een elektriciteitsproductie voornamelijk op basis van steenkool (Sen, Ercan, & Tatari, 2017).....	67
Figuur 26: Technologische roadmap voor de transportindustrie tot en met 2050 volgens consultancybureau FEV (FEV Consulting GmbH, 2019)	69
Figuur 27: Primaire en secundaire deeltjesvorming per aandrijftechnologie	70
Figuur 28: Fijnstofproductie voor verschillende aandrijvingstechnologieën, met een specifiek onderscheid tussen batterij-elektrische voertuigen met een variërende capaciteit, voor de Belgische energiemix. (Hooftman, Messagie, Joint, et al., 2018)	71
Figuur 29: De lokale impact op vlak van fijnstofemissies, waarbij enkel wordt gekeken naar de brandstofproductie in België (refinery-to-tank, RTT), de tank-to-wheel emissies en de niet-uitlaatemissies (NEx) (Hooftman, Messagie, Joint, et al., 2018).....	72
Figuur 30:Fijnstofemissies voor stadsbussen met verschillende aandrijftechnologieën (Nordelöf et al., 2019).....	73
Figuur 31: Impact op smogvorming per aandrijftechnologie (Hooftman, Messagie, Joint, et al., 2018)	74
Figuur 32: Impact op lokale smogvorming per aandrijftechnologie voor personenwagens (Hooftman, Messagie, Joint, et al., 2018).....	75
Figuur 33: De impact van stadsbussen op ozon/smogvorming voor verschillende motorisaties (Nordelöf et al., 2019).....	77

Figuur 34: Overzicht van gemiddelde pollutienemissies voor vrachtwagens met verschillende soorten aandrijfliijnen (Sen et al., 2017).....	78
Figuur 35: De impact op de menselijke toxiciteit per voertuigtechnologie (Rangaraju, 2018)	79
Figuur 36: Lokale bijdrage van verschillende motorisatietypes aan toxiciteit	79
Figuur 37: Impact op menselijke toxiciteit voor stadsbussen met een verschillende aandrijftechnologie (Nordelöf et al., 2019).....	80
Figuur 38.....	81
Figuur 39: TCO van het stadswagen segment voor nieuwe wagens.....	91
Figuur 40: TCO van het middelgrote wagen segment voor nieuwe wagens	93
Figuur 41: TCO van verschillende VW Golf modellen en laadpatronen	94
Figuur 42: TCO van het stadswagen segment voor tweedehandswagens.....	96
Figuur 43: TCO van het middelgrote wagen segment voor tweedehandswagens	97
Figuur 44: TCO voor de aankoop van een bedrijfswagen.....	99
Figuur 45: TCO voor het leasen van een bedrijfswagen	100
Figuur 46: TCO van het stadswagen segment voor nieuwe particulierswagens in 2030	104
Figuur 47: TCO van het middelgrote wagen segment voor nieuwe particulierswagens in 2030	105
Figuur 48: TCO voor lichte bedrijfswagens (Lebeau et al., 2019a).....	110
Figuur 49: TCO voor verschillende voertuigtechnologieën (Lajevardi et al., 2019).	112
Figuur 50:TCO voor motorfietsen (Cox & Mutel, 2018).....	116
Figuur 51: Wereldwijde marktaandeel van elektrische voertuigen tussen 2013 en 2018 (Bunsen et al., 2019). Analyse gebaseerd op aantallen inschrijvingen per land, aangevuld met ACEA (2019); EAFO (2019); EV Volumes (2019); Marklines (2019); OICA (2019).....	121
Figuur 52: Globale EV overzicht: IEA analyse ontwikkeld met het IEA Mobility Model (Bunsen et al., 2019).....	122
Figuur 53: Wereldwijde groei EV's (Hertzke et al., 2019)	123
Figuur 54: Jaarlijkse groei EV-markt per regio (Hertzke et al., 2019)	124
Figuur 55: Langetermijn project van het verkoop van personenwagens (McKerracher et al., 2020).	124
Figuur 56: Globale lange termijn vloot personenwagens (McKerracher et al., 2020).	125
Figuur 57: Evolutie EV vloot in verschillende voertuigsegmenten (McKerracher et al., 2020)	126
Figuur 58: Aandeel nieuw ingeschreven voertuigen Q4 2019 (Piazza, 2019).	127
Figuur 59: Aantallen APV in EU. Bron: Visualisatie van MOBI gebaseerd op data van (EAFO, 2019b).	127

Figuur 60: Europees aantal EV's. Bron: Visualisatie van MOBI gebaseerd op data van (EAFO, 2019b).	128
Figuur 61: Evolutie Belgische APV-markt. Bron: Visualisatie van MOBI gebaseerd op data van EAFO (2019a).	129
Figuur 62: Groei van het aantal nieuwe registraties EV's in België. Bron: Visualisatie van MOBI gebaseerd op data van EAFO(2019a).	130
Figuur 63: Totaal aantal EV's in België. Bron: Visualisatie van MOBI gebaseerd op data van EAFO (2019a).	131
Figuur 65: Evolutie aantal APV's in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest. Bron: Visualisatie van MOBI gebaseerd op data van "Ecoscore" (2020).	134

Lijst van figuren in appendix

Figure 1: Measures to further reduce passenger car emissions according to the automotive industry (ERTRAC, 2016)	154
Figure 2: Well-to-wheel efficiencies for battery electric, fuel cell electric and synthetically fuelled vehicles (Earl, 2018)	160
Figure 3: Overall powertrain efficiency as a function of the electrification rate for passenger cars (based on (Politechnika Wroclaw, 2011), (Wu, Zhang, & Dong, 2015))	163
Figure 4: Schematic overview of a series (plug-in) hybrid architecture (based on (Malikopoulos, 2014),(Corbelli, 2011)).....	165
Figure 5 Schematic overview of a parallel (plug-in) hybrid architecture (based on (Malikopoulos, 2014),(Corbelli, 2011)).....	166
Figure 6: Schematic overview of a combined (plug-in) hybrid architecture (based on (Wu et al., 2015))	167
Figure 7: The Ragone chart (source: VUB-MOBI)	169
Figure 8 – Overview of the most common battery chemistries today and their application, showing the best compromise offered by NMC technology (EMIRI, 2017)	171
Figure 9 : An outlook for battery chemistries with higher energy and power densities (Baes et al., 2018)	172
Figure 10: EV architectures according to the possible power sources shown on the left-hand side (based on (Ramachandran & Stimming, 2015))	173
Figure 11 – Graphical overview of the power demand during a whole day, together with the potential for vehicle-to-grid (Gorguinpour, 2013)	176
Figure 12: Schematic representation of four different charging modes (Delft, n.d.)	179

Figure 13: Standard male plugs (Khaligh & Dantonio, 2019)	180
Figure 14: Schematic overview of an integrated charger (Yilmaz & Krein, 2013).....	182
Figure 15 Standards referenced in ASSURED project	183

TECHNOLOGISCHE ONTWIKKELINGEN

1. INLEIDING

Dit document heeft als doel een inventaris te bieden van de huidige en de verwachte situatie van de technologische ontwikkelingen van 2020 tot 2035-2040 van voertuigaandrijvingen die niet louter op het verbrandingsprincipe werken en alternatieve brandstoffen. Deze inventarisatie wordt uitgevoerd voor verschillende voertuigcategorieën. Daarnaast wordt ook voor elke technologie de ontwikkeling geschetst van laad-of tankinfrastructuur. Vervolgens worden de technologieën vergeleken, enerzijds op basis van milieu-impact aan de hand van Life Cycle Analysis (LCA), anderzijds op vlak van kosten aan de hand van Total Cost of Ownership (TCO)-analyse. Ten slotte wordt een overzicht gegeven van marktevoluties en prognoses voor de verschillende voertuigtechnologieën.

Hoofdstuk 2 beschrijft het beleidskader van de sector en geeft een overzicht van de technologische ontwikkelingen op vlak van voertuigtechnologieën en tank- en laadinfrastructuur alsook de vooruitzichten. In hoofdstuk 3 wordt de milieu-impact beschreven; hoofdstuk 4 beschrijft de kosten voor het bezitten en gebruiken van een voertuig. Hoofdstuk 5 geeft de marktevoluties weer voor mobiliteit en logistiek. In hoofdstuk 6 worden de resultaten samengevat ter conclusie.

Tot slot vindt de lezer van dit document in de appendix een ruimere context voor de technologische ontwikkeling van voertuigaandrijvingen.

2. VOERTUIGTECHNOLOGIEËN: CONTEXT EN OVERZICHT

In dit hoofdstuk wordt een samenvatting gegeven van de ruimer geschetste context in de appendix. Waar hier het potentieel voor alternatieve brandstoffen in een samenvatting wordt toegelicht, is de uitgebreide redenering die hierachter schuilt terug te vinden achteraan dit rapport (zie pagina 150).

2.1. Context

Alternatieven voor conventionele benzine- en dieselmotoren zijn er al sinds de auto op de markt kwam. Vanwege de historisch lage prijzen voor benzine- en dieselbrandstof werden de alternatieven echter al vroeg naar de marge geduwd, een situatie die tot op heden aanhoudt. Met behulp van CO₂-doelstellingen probeert de Europese Commissie hier echter versneld verandering in te brengen.

2.1.1. EUROPESE CO₂-EMISSIEDOELSTELLINGEN

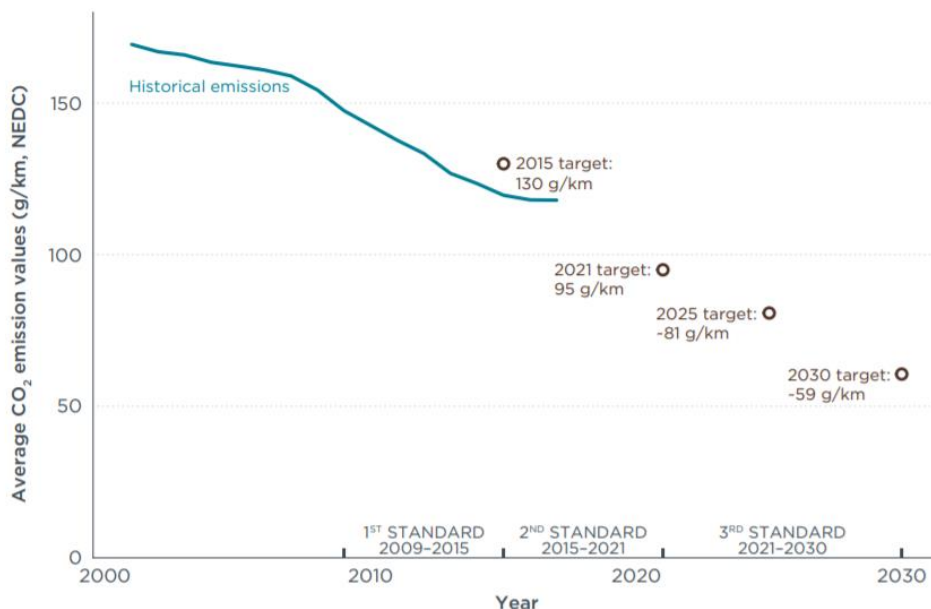
CO₂-doelstellingen uit het verleden en de bijbehorende 'superkredieten' hebben autofabrikanten ertoe aangezet hybridemodellen te introduceren, terwijl de 2020/2021 doelstelling van 95 g/km¹ en de daarop volgende reductie van 37,5%² in 2030 ten opzichte van de situatie in 2021 de introductie van stekkerhybride (PHEV) en volledig elektrische voertuigen (EV, een verzamelnaam voor zowel batterij- als brandstofcel elektrische voertuigen, of ook BEV's en FCEV's) stimuleert. Ook voor andere segmenten binnen het wegverkeer staan er veranderingen op til. Voor lichte bedrijfsvoertuigen (of ook *light-commercial vehicles*) wordt tegen 2021 een CO₂-reductiedoelstellingen opgelegd van 147 g/km¹ en een verdere reductie van 31% tegen 2030 ten opzichte van de situatie 2021. In de zware transportsector streeft men een allereerste CO₂-reductie van een bescheiden 15%³ na tegen 2025, vergeleken met de situatie in 2019. Dit is een stap in de goede richting, gezien het gemiddeld brandstofverbruik in deze sector al decennialang nagenoeg constant is gebleven op zo'n 30-35 l/100 km (Delgado & Rodriguez, 2018). Deze oplisting aan doelstellingen toont aan dat de Europese Commissie streeft naar drastische verbeteringen in de sector van het wegvervoer, terwijl de fabrikanten alle technologische mogelijkheden behouden om hieraan te voldoen. Drastische middelen zijn nodig, gezien de transportsector de enige is die jaar na jaar een stijging in totale CO₂-emissies laat noteren. Waar bij vrachtwagens het beoogde doel tegen 2025 grotendeels kan worden bereikt door een verbetering van de aerodynamische eigenschappen, is elektrificatie het belangrijkste voor zowel passagiers- als lichte bedrijfsvoertuigen. Steden profiteren weldra van deze verwachte trend, omdat zij het meest te lijden hebben onder de hoge concentraties van verontreinigende stoffen die worden

¹ Zie Verordening (EU) 2019/631 (...) tot vaststelling van CO₂-emissionormen voor nieuwe personenauto's en nieuwe lichte bedrijfsvoertuigen, en tot intrekking van Verordeningen (EG) nr. 443/2009 en (EU) nr. 510/2011

² Een doelstelling die zo mogelijk nog verstrengd kan worden in 2021

³ Zie Verordening (EU) 2019/1242 (...) tot vaststelling van CO₂-emissionormen voor nieuwe zware bedrijfsvoertuigen en tot wijziging van Verordeningen (EG) nr. 595/2009 en (EU) 2018/956 van het Europees Parlement en de Raad en Richtlijn 96/53/EG van de Raad

uitgestoten door het huidige wagenpark. Desalniettemin nemen steeds meer stadsbesturen het heft in eigen handen door lage-emissiezones in het leven te roepen en zo het duidelijk signaal te geven naar zowel de burger als de auto-industrie dat de kilometers die we nog afleggen op een individuele manier in een auto zo schoon en stil mogelijk moeten zijn.



Figuur 1 – Reductiedoelstellingen voor personenwagens in de EU, omgerekend naar equivalente emissiefactoren volgens de NEDC (Mock, 2019)

Om de marktpenetratie van zowel plug-in hybride als puur elektrische personenwagens en lichte bedrijfswagens te bespoedigen, heeft de Europese Commissie tot op heden twee mechanismen uitgewerkt. Deze dienen als hefboom om constructeurs te doen investeren in elektrische aandrijflijnen, hetgeen beloond wordt via de berekening van het gewogen gemiddelde van de CO₂-uitstoot van hun verkochte voertuigen. Dit is relevant in het licht van de CO₂-doelstellingen die moeten behaald worden, zoals hierboven besproken.

Voor de jaren 2025 en 2030 worden er doelen vooropgesteld die verwijzen naar de referentiesituatie in 2021. Dit nieuwe ijkpunt is nodig vanwege de overgang naar de nieuwe *Worldwide harmonised light-vehicle test protocol* (WLTP) test voor CO₂-waarden. Zo dienen de constructeurs zich te houden aan de streefcijfers die zijn opgenomen in Verordening (EU) 2019/631, goed voor een minimale reductiefactor van:

- Gemiddeld 15% voor personenwagens en lichte bedrijfswagens tegen 2025;
- Gemiddeld 37,5% voor personenwagens tegen 2030, en;
- Gemiddeld 31% t.o.v. 2021 voor lichte bedrijfsvoertuigen tegen 2030

De CO₂-reductie voor de gehele Europese vloot wordt volgens volgende formule bepaald:

$$CO_{2,EU \text{ jaar } 20XX} = CO_{2,EU \text{ ref } 2021} \times (1 - \text{reductiefactor})$$

Door per constructeur specifieke emissiedoelstellingen op te leggen, gebaseerd op de gemiddelde massa van hun verkochte vloot, mogen constructeurs met zwaardere modellen méér CO₂ uitstoten dan die met lichtere modellen. Dit geldt ook voor lichte bedrijfswagens. Er wordt echter een limietcurve gehanteerd opdat de objectieven voor de hele Europese vloot niet in het gedrang komen. Kritiek op deze aanpak houdt in dat ze aanzet tot grotere en zwaardere modellen, een trend die we al jaren optekenen. Bovendien kan deze insteek een verklaring zijn voor het feit dat de meeste Europese constructeurs zogenaamde *sports utility vehicles* of SUV's zijn gaan ontwikkelen, die mede dankzij een scherpe prijszetting sterk aan populariteit hebben gewonnen de laatste twee-drie jaar. Een andere insteek kijkt naar dat ijkpunt in 2021, waarvoor constructeurs nu zoveel mogelijk zware modellen willen verkopen, om zo dat ijkpunt zo hoog mogelijk te kunnen houden. Op die manier kunnen ze de geplande reducties makkelijker aan. In België rijden momenteel meer dan 1 miljoen SUV's rond, in Brussel zijn er zo net geen 81.000 SUV's geregistreerd⁴.

De referentiewaarde van het jaar 2021 waarop men de reducties tegen 2025 en 2030 bepaalt wordt als volgt berekend:

$$CO_{2,EU\ ref\ 2021} = WLTP_{CO_2, gemeten} \times \left(\frac{NEDC_{2020\ EU\ vloot}}{NEDC_{CO_2}} \right) + a(M_{\theta 2021} - M_{0,2021})$$

Met $WLTP_{CO_2, gemeten}$ als het gemeten gemiddelde over alle nieuwe modellen geregistreerd in 2020; $NEDC_{2020\ EU-vloot}$ zijnde de 95 g/km limiet; $NEDC_{CO_2}$ de gemiddelde specifieke emissies in 2020 (zonder toekenning van eco-innovaties of superkredieten); $M_{\theta,2021}$ de gemiddelde massa in rijklare toestand per fabrikant in 2021, en; $M_{0,2021}$ de gemiddelde massa in rijklare toestand in de EU (1.379,88 kg). Tot slot geldt een factor a , welke voor personenwagens gelijk is aan 0,0333 en voor lichte bedrijfsvoertuigen aan 0,096.

2.1.2. DE ROL VAN ZERO AND LOW EMISSION (ZLEV) VOERTUIGEN

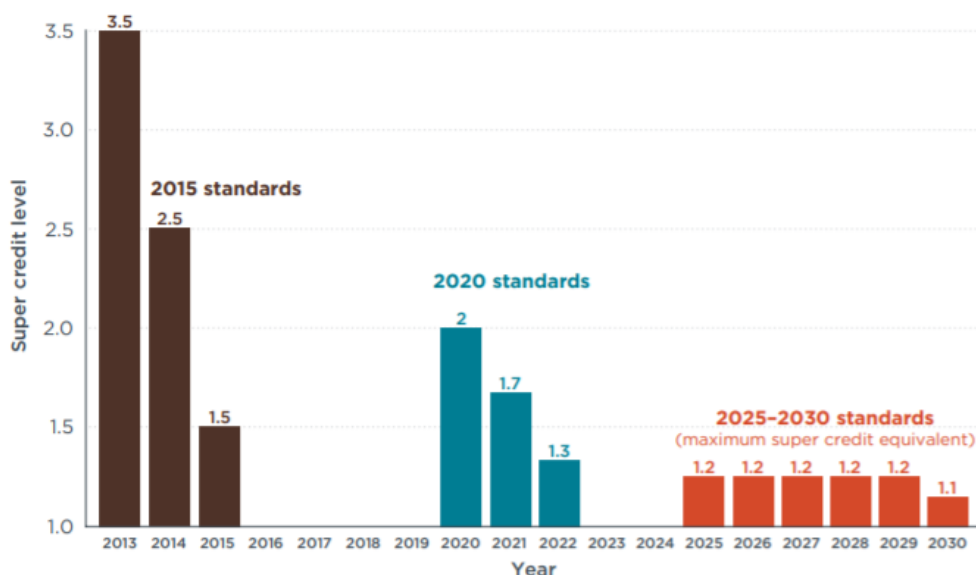
Een streefwaarde voor de gemiddelde CO₂-waarde per constructeur is het belangrijkste mechanisme om CO₂ te reduceren, maar daar bovenop zijn er regelingen om nieuwe, duurzame voertuig-technologieën extra te stimuleren. Deze leiden tot aanpassingen van de streefwaarde ten opzichte van dat gemiddelde. In de loop van de tijd zijn deze stimuleringsregels echter versoberd. Ook zijn er grenzen ingebouwd aan de voordelen die daarmee gehaald kunnen worden. Wat betreft die extra regelingen is er enerzijds het systeem van superkredietfactoren (dat sinds 2013 van kracht is) en anderzijds de versoepeling van de reductiefactor voor 2025 en 2030 via de zogenaamde *zero- and low-emission vehicle* (ZLEV) factor. Het eerste mechanisme is van toepassing voor zowel Verordening (EG) 443/2009 als Verordening (EU) 510/2011, zij het met een verschillende uitfasering in de tijd. Zo zien we in Figuur 2 het toegekende 'gewicht' voor personenwagens die voldoen aan de vereiste om tot de ZLEV-categorie te behoren. Dit houdt in dat hun CO₂-emissie lager ligt dan 50 g/km, hetgeen verklaart waarom er zoveel PHEV-modellen op de markt zijn gekomen doorheen de jaren die volgens de NEDC-cyclus nét onder deze grens uitkwamen. Tegelijkertijd verklaart dit waarom zoveel van deze modellen enige tijd van de radar verdwenen bij de introductie van de WLTC-cyclus, gezien men deze opnieuw moest kalibreren

⁴ Voor gedetailleerde informatie; zie Ecoscore

om alsnog in aanmerking te komen voor de kredietfactor. Voor lichte bedrijfsvoertuigen zien we een verschuiving in de tijd van de toepasbaarheid van de toegekende gewichten voor ZLEV's. Zo telde één ZLEV licht bedrijfsvoertuig voor:

- 3,5 lichte bedrijfsvoertuigen in 2014 en 2015;
- 2,5 in 2016;
- 1,5 in 2017, en;
- 1 sinds 2018

Verder dienen we voor deze voertuigcategorie op te merken dat PHEV-technologie nagenoeg ongebruikt is gebleven tot vandaag (H1 2020), waardoor deze krediettoekenning niet van toepassing is/was voor de lichte bedrijfsvoertuigen. Het is echter niet ondenkbaar dat hier snel verandering in komt, gezien batterijtechnologie snel goedkoper wordt, al zien we sinds de intrede van het tweede semester van 2020 steeds meer volledig elektrische bestelwagens verschijnen. Dit kan betekenen dat de (dure) plug-in technologie simpelweg wordt overgeslagen.



Figuur 2 – Overzicht van het krediet dat wordt toegewezen aan een 'zero and low emission electric vehicle' t.e.m. 2030 (Dornoff, Miller, Mock, & Tietge, 2018)

Zoals blijkt uit Figuur 2 wordt er vanaf 2025 met een *equivalent* van de superkredietfactoren gewerkt, waardoor ZLEV's maximaal met een factor 1,2 kunnen doorwegen in de berekening van de gemiddelde CO₂-emissie per constructeur. In de praktijk geldt er voor de periode 2025-2030 dus een afwijkende aanpak van de vorige, gezien er dan sprake zal zijn van een *ZLEV factor*. Per fabrikant geldt dan immers:

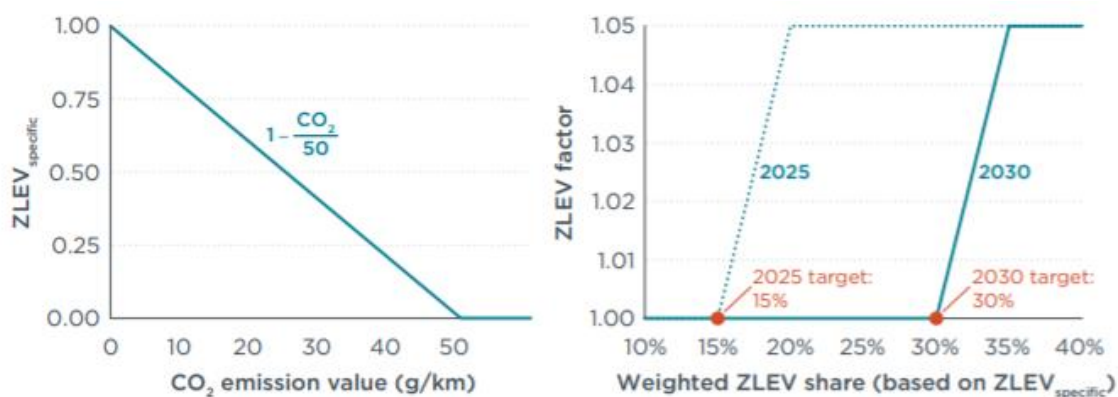
$$CO_2 \text{ doelstelling fabrikant} = (CO_2 \text{ doelstelling } 2025/2030) \times ZLEV \text{ factor}$$

Met de *ZLEV factor* = (1 + y - x)

Hierin is factor x de ZLEV verkoopdoelstelling van 15% tegen 2025 en 30% tegen 2030, en factor y het aandeel van verkochte ZLEV-voertuigen per fabrikant. Dit nieuwe mechanisme kadert in de niet-bindende aanpak van de Europese Commissie om via verkoopdoelstellingen de constructeurs te stimuleren om meer ZLEV-modellen op de markt te brengen. Worden de ZLEV verkoopdoelstellingen

gehaald, dan hangt er voor de constructeur in kwestie een versoepeling van de CO₂-limiet aan vast via de ZLEV factor. Deze varieert tussen een factor 1 en 1,05, en wordt bepaald door de specifieke CO₂-emissie van een ZLEV-model. In deze oefening zal een zero-emissievoertuig (dus een batterij- of brandstofcel-elektrisch voertuig) tellen voor een volledig voertuig, terwijl de CO₂-uitstoot van een PHEV diens doorweging bepaald. Zo krijgt een PHEV met een uitstoot van 50 g/km géén gewicht (0), terwijl alle andere modellen met een CO₂-uitstoot tussen de 0 – 49 g/km een gewicht krijgen volgens een lineaire functie tussen 0 en 1. Dit is te zien in de linkerhelft van Figuur 3. Op deze manier zal het gewogen aandeel ZLEV's t.o.v. de totale verkochte vloot per constructeurs bepaald worden in de jaren 2025 en 2030.

Het is mogelijk dat de 95 g/km streefwaarde van 2021 door sommige constructeurs gehaald wordt mits de verkoop een substantieel aandeel (hybride-/) elektrische voertuigen. Hierdoor zal voor de streefwaarden van 2025 en 2030 het effect van zulke voertuigen in hun vlootgemiddelde echter afzakken, gezien er dan minder gewicht aan toegekend kan worden. De uiteindelijke ZLEV factor zal bepalen in welke mate een constructeur al dan niet recht heeft op een soepelere CO₂-limiet (=krediet) voor diens resterende conventionele vloot, afhankelijk van het al dan niet halen van de ZLEV verkoopdoelstelling. Slaagt men hier niet in, dan bedraagt de ZLEV factor 1 en verandert er niks. Haalt men deze wel, dan bedraagt de factor 1,05 en kan er maximaal 5% aan 'CO₂-krediet' worden ingewonnen indien de verkoopdoelstelling met 5% of meer overschreden wordt. Dit wil zeggen dat de conventionele vloot van de constructeur in kwestie dan 5% extra CO₂ mag uitstoten. Dit zien we grafisch weergegeven in de rechterhelft van Figuur 3.



Figuur 3 – Bepaling van het ZLEV gewicht volgens de CO₂-emissie (links) en de bepaling van de ZLEV factor volgens het gewogen ZLEV aandeel per constructeur (Bron: Dornoff et al. 2018)

Deze aanpak verschilt van wat men bijvoorbeeld in China of in Californië doet, gezien men daar met *bindende* quota werkt en dus niet met *vrijblijvende* doelen. Of dit een gemiste kans is om meer uit de kan te halen zal nog moeten blijken, hoewel de grootste constructeurs in de laatste maanden alvast grotere ambities uitspraken (bv. Volkswagen en Daimler die tegen 2025 al 25% van hun verkoop elektrisch willen zien). Hierdoor zouden zij alvast een extra emissiemarge kunnen inbouwen die begrensd is tot 5% voor hun conventionele modellen die in 2025 verkocht worden. Gaan ze echter méér PHEV's verkopen dan zero-emissievoertuigen, dan zal het aantal PHEV's sterk hoger moeten liggen gezien deze minder doorwegen in de bepaling van het verkoopsaandeel van ZLEV's. Op deze manier

ondersteunt de Commissie indirect een toenemende batterijcapaciteit in ZLEV's en dus efficiëntere voertuigen, waar in het verleden de superkredietfactoren vooral hebben geleid tot een verhoogde opname van PHEV-voertuigen die (op papier) een CO₂-emissie hadden die nipt de bovengrens van 50 g/km respecteerden. In realiteit ging het hier over voertuigen met een zeer beperkte batterijcapaciteit gecombineerd met een zware verbrandingsmotor. Het feit dat het te verwerven krediet in de vorm van een CO₂-versoepeling voor constructeurs beperkt is tot 5% verhindert bovendien dat de limieten per constructeur niet buitensporig worden afgezwakt om zo op koers te blijven met de (voorlopig) vooropgestelde CO₂-reductie met 37,5% tegen 2030 voor personenwagens en 31% voor lichte bedrijfswagens. Desalniettemin is er geen sanctie ingebouwd voor constructeurs die de ZLEV verkoopdoelen missen, en dit ten gevolge van de niet-bindende aard van de maatregel.

Tot slot blijft er een verschil tussen de CO₂ cijfers die behaald worden via de geijkte testprocedure (WLTP) en wat er in realiteit wordt gemeten. De Commissie erkent dit probleem en heeft hiervoor het monitoren van het *in-use* brandstofverbruik in het leven geroepen voor nieuwe voertuigmodellen met ingang van 2021. Toch is het nog niet duidelijk hoe deze praktijkgegevens met de WLTP-waarden vergeleken moeten worden. Op dit moment is er, in tegenstelling tot schadelijke emissies, nog geen provisie in de wetgeving voor het onafhankelijk controleren van WLTP CO₂-waarden, bijvoorbeeld via *In-Service Conformity* of Markttoezicht. Het is echter wanneer men, naar analogie met de limitering van NO_x-emissies in de praktijk, een *not-to-exceed* (NTE) invoert voor de CO₂-emissies in de praktijk, dat de kloof tussen laboresultaten en die uit de werkelijkheid significant kan dichtgereden worden. Toch zal de Commissie pas na een monitoringsperiode die loopt tot 2027 de haalbaarheid inschatten voor de invoering van een mechanisme 'om de gemiddelde specifieke CO₂-uitstoot van een fabrikant vanaf 2030 bij te stellen om te voorkomen dat de kloof groter wordt' (zie Artikel 12 van Verordening (EU) 2019/631).

2.1.3. ECO-INNOVATIES EN ANDERE STIMULANSEN

Naast de superkredieten hebben autofabrikanten nog andere mogelijkheden om aan de CO₂-regelgeving te voldoen. Enerzijds, vaardigt de Commissie emissiekredieten uit voor technologische innovaties die CO₂-reducties opleveren welke gerealiseerd worden buiten de officiële testprocedure (zogenaamde '*off-cycle*' emissies). Dit zijn de zogenaamde 'eco-innovaties'. Denk hierbij aan het isoleren van het motorcompartiment om de warmte ervan beter vast te houden en zo de efficiëntie te verhogen, led-technologie of efficiëntere alternatorsystemen. Vereisten voor zo'n systemen zijn dat ze verifieerbare en reproduceerbare resultaten moeten opleveren. De toekenning van CO₂-emissiereducties via deze weg blijft echter beperkt tot maximum 7 g/km en dit zowel voor personenwagens als lichte bedrijfswagens. De mogelijkheden om eco-innovaties toe te passen voor de CO₂-streefwaarde worden beperkt uitgebreid met procedures voor airconditioning. De procedures zijn echter complex en specifiek. Anderzijds, kunnen fabrikanten aan groepsvorming (*pooling*) gaan doen. Deze maatregel is echter beperkt in de tijd, namelijk tot maximum vijf jaar. Een voorbeeld van zo'n groepsvorming is het samengaan van Fiat Chrysler (de slechtste leerling van de klas anno 2019 inzake haar vlootgemiddelde CO₂-uitstoot, in het bijzonder door de Amerikaanse modellen) met Tesla, om zo een miljardenboete in 2021 te vermijden/in te perken. In de praktijk zien we ook dat fabrikanten verder gaan dan het vormen van een tijdelijke groep, nl. door via overnames nieuwe consortia te creëren. Denk

hierbij aan de recente overname van Fiat Chrysler door de PSA-groep, die eerder in 2019 al Opel overnam. Gezien de nagenoeg compleet stilgevallen voertuigverkoop ten gevolge van de wereldwijde Corona-epidemie wordt het echter afwachten of de recent aangekondigde *poolings* door zullen gaan.

Een gevolg van superkredieten voor personenwagens is dat hoe meer ZLEV's een autoconstructeur verkoopt, hoe meer dit zijn bedrijfsgemiddelde brandstofverbruik zal beïnvloeden en hoe meer zijn resterende vloot mag uitstoten. Tot op heden ging de meeste aandacht van de autobouwers naar PHEV's, omdat het voormalige NEDC-typegoedkeuringsstelsel het mogelijk maakte om kunstmatig lage CO₂-emissies te certificeren, zonder te hoeven investeren in aanzienlijke batterijcapaciteit, in vergelijking met het ontwikkelen van volledige elektrische aandrijflijnen. Gezien de steeds verder zakkende batterijkost (€/kWh) lijkt hier een kentering in te ontstaan, getuige daarvan het aantal batterij-elektrische voertuigen dat wordt aangekondigd om op korte termijn te worden gelanceerd.

2.2. Overzicht voertuigtechnologieën

Ondanks het feit dat er op Europees niveau al jarenlang wordt geijverd voor een groter aanbod van duurzamere voertuigmodellen (zie hierboven), blijft de voertuigmarkt anno 2020 gedomineerd door diesel en benzine. Toch staan andere technologieën klaar om beduidend aan marktaandeel te winnen in de jaren die voor ons liggen (2020-2030). In dit overzicht bespreken we eerst de twee voornoemde conventionele brandstoftypes, om daarna hun alternatieven voor een toepassing in een verbrandingsmotor toe te lichten. Eindigen doen we met de verschillende mogelijkheden die elektrificatie van de aandrijflijn kan bieden en welke verwachtingen we hebben voor deze verschillende technologieën in de komende twee decennia.

2.2.1. DIESEL

Diesel wordt toegepast in een verbrandingsmotor waarin de chemische energie in de diesel wordt omgezet in mechanische energie. Dieselveertuigen stoten relatief veel fijn stof (PM) en stikstofoxiden (NO_x) uit, maar minder CO₂ dan benzinevoertuigen omdat ze doorgaans efficiënter werken. In realiteit convergeren benzine- en dieselwagens echter op vlak van gemiddelde CO₂-uitstoot, gezien dieselwagens typisch groter en zwaarder zijn.

Om schadelijke emissies in te perken legt de Europese Commissie intussen al bijna drie decennia lang emissielimieten op. De huidige Euro 6d-limiet houdt in dat een voertuig in de praktijk niet meer dan 114,4 mgNO_x/km en 4,5 mg/km fijnstof mag uitstoten. Dat laatste is geen enkel probleem meer sinds de introductie van de roetfilter bij intrede van Euro 5b (2011). Deze technologie is dusdanig efficiënt dat slechts een klein deel dieselveertuigen waarvan de roetfilter defect (of illegaal verwijderd) is nagenoeg de totale fijnstofuitstoot van personenwagens levert.

De recentste generatie personen- en lichte bestelwagens (klasse Euro 6d-Temp en 6d) en vrachtwagens (klasse Euro VI) zijn daarom uitgerust met een combinatie van een roetfilter, een oxidatiekatalysator en veelal een selectief katalytisch reductiesysteem (SCR). Deze laatste is nodig om

schadelijke concentraties aan stikstofoxiden (of NOx) te beperken en gebruikt daarvoor AdBlue, een vloeibare ureumoplossing die na verbranding in de uitlaatgassen wordt geïnjecteerd. Dit systeem werkt optimaal bij hoge uitlaatgastemperaturen zoals bij snelwegritten, en suboptimaal bij start-/stopverkeer zoals in een stedelijke context.

Bij particulieren blijft diesel een populaire keuze, al komen de marktaandeelen van benzine en diesel in de Belgische personenwagenmarkt steeds meer in balans te liggen. Zo tekenen we voor het Brussels Hoofdstedelijk Gewest in het jaar 2019 een benzineaandeel van 48,42% op, vergeleken met 48,06% voor diesel, waar deze verhouding tien jaar terug nog 37,94% versus 61,70% bedroeg ("Ecoscore," 2020)

Dieseltechnologie is ook de meest gebruikte aandrijving in het hedendaagse vrachtvervoer. Het is de standaard in de binnenvaart, in rangeerstations wordt er met diesel aangedreven locomotieven gewerkt en voor zowel bestelwagens als zwaar wegvervoer zijn dieselmotoren anno 2020 goed voor een marktaandeel van meer dan 90%. Daarenboven wordt het gebruik van diesel voor professioneel gebruik fiscaal aangemoedigd door de Belgische Federale Overheid. Momenteel kunnen professionele dieselgebruikers (zoals transportbedrijven, taxibedrijven e.d.) namelijk een gedeelte van de bijzondere accijns terugkrijgen van de Staat (art. 429, § 5, programmawet van 27 december 2004). De teruggave bedraagt € 247,62 per 1.000 liter diesel. Het systeem geldt voor alle eindgebruikers, nationaal en internationaal (EU). De toekomstige regering zal moeten beslissen over de verdere uitwerking van het systeem.

2.2.2. BENZINE

Ook bij benzinemotoren wordt chemische energie omzet in mechanische energie. Benzinemotoren stoten in het *tank-to-wheel* gedeelte minder luchtvervuilende pollutanten uit dan dieselmotoren, maar wel meer CO₂ (ongeveer 17%) voor vergelijkbare modellen, wat wil zeggen dat ze algemeen gezien meer verbruiken.

Qua nabehandelingssystemen ter zuivering van de uitlaatgassen hebben we het laatste decennium nauwelijks wijzigingen gezien voor benzinewagens. Sinds begin jaren '90 zijn ze namelijk uitgerust met een driewegkatalysator, een systeem dat onder de juiste omstandigheden voor wat betreft de aansturing van de verbranding een balans zoekt tussen de vermindering van zowel koolstofmonoxide (CO), stikstofoxiden (NOx) en onverbrande koolwaterstoffen (KWS). Doorheen de jaren is deze technologie verder uitgewerkt waardoor we kunnen spreken van een robuust systeem. Toch zien we dat ook dit systeem met de loop der tijd verslechterd. Zo zullen oudere benzinewagens (veelal boven de 160.000 km) tot driemaal meer NOx uitstoten dan is toegelaten. Qua injectie zagen we het laatste decennium wel een grote wijziging voor benzinemotoren. Zo neemt de directe injectietechniek het over van de indirecte om zo beter gedoseerd te kunnen werken, hetgeen zich vertaalt in een lager verbruik. Deze techniek zorgt er wel voor dat er aanzienlijk meer fijnstofdeeltjes worden uitgestoten. De direct-geïnjecteerde benzinemotoren die volgens Euronorm Euro 6d-Temp (2017) zijn gehomologeerd worden daarom van een roetfilter voorzien, zoals dit ook het geval is bij dieselveertuigen.

Benzinevoertuigen worden veel minder ingezet voor goederenvervoer. Enkel in de categorie van het lichtere wegvervoer (bestelwagens) zijn benzinevoertuigen terug te vinden (met een nationale grootteorde rond 5-10% anno 2020, hetgeen we gelijkaardig veronderstellen voor het Brussels gewest). De reden hiervoor is vooral dat benzinemotoren een hoger vermogen hebben, maar een lager koppel dan dieselmotoren. Gezien goederenvoertuigen groter en zwaarder zijn, hebben zij meer baat bij een motor met hogere koppel gezien dit betekent dat ze vanuit een laag toerental een grotere trekkracht hebben. Daarnaast zijn benzinemotoren minder efficiënt, doordat ze minder zuurstof gebruiken in hun verbrandingsproces. Dieselmotoren gebruiken meer zuurstof dan nodig om de brandstof te verbranden, waardoor ze optimaal gebruik maken van de energie die in de diesel opgeslagen zit. Deze manier van werken heeft echter gevolgen voor de vorming van onder meer fijnstof- en NO_x-deeltjes. Tot slot is er natuurlijk ook nog het fiscaal voordeel dat op professionele diesel van toepassing is, en niet op benzinemotoren.

2.2.3. EMISSIESTANDAARDEN

Emissiestandaarden kunnen tweeledig worden opgevat. Enerzijds zijn er de Euronormen opgelegd door de Europese Commissie. Deze normen hebben betrekking op nieuwe wegvoertuigen, nl. personenwagens en goederenvoertuigen. Ze normeren de luchtvervuilende emissies, en niet zozeer broeikasgasemissies. De Euronormen zijn verschillend voor personenwagens, verschillende types bestelwagens en vrachtwagens. Voorts is er een onderscheid voor benzine- en dieselmotoren en dienen LPG- en CNG-voertuigen te voldoen aan de benzinestandaarden. Euronormen worden gebruikt voor tarifiering van onder meer de kilometerheffing voor vrachtwagens en de toegangsbepaling tot bijvoorbeeld lage-emissiezones. De tabellen hieronder geven de waardes per norm weer.

Tabel 1: Euronormering voor benzine- en dieselwagens (bron: Dieselnet)

Stage	Date	CO	HC	HC+NO _x	NO _x	PM	PN
		g/km					
Positive Ignition (Gasoline)							
Euro 1†	1992.07	2.72 (3.16)	-	0.97 (1.13)	-	-	-
Euro 2	1996.01	2.2	-	0.5	-	-	-
Euro 3	2000.01	2.30	0.20	-	0.15	-	-
Euro 4	2005.01	1.0	0.10	-	0.08	-	-
Euro 5	2009.09 ^b	1.0	0.10 ^d	-	0.06	0.005 ^{e,f}	-
Euro 6	2014.09	1.0	0.10 ^d	-	0.06	0.005 ^{e,f}	6.0×10 ¹¹ e,g
Compression Ignition (Diesel)							
Euro 1†	1992.07	2.72 (3.16)	-	0.97 (1.13)	-	0.14 (0.18)	-
Euro 2, IDI	1996.01	1.0	-	0.7	-	0.08	-
Euro 2, DI	1996.01 ^a	1.0	-	0.9	-	0.10	-
Euro 3	2000.01	0.64	-	0.56	0.50	0.05	-
Euro 4	2005.01	0.50	-	0.30	0.25	0.025	-
Euro 5a	2009.09 ^b	0.50	-	0.23	0.18	0.005 ^f	-
Euro 5b	2011.09 ^c	0.50	-	0.23	0.18	0.005 ^f	6.0×10 ¹¹
Euro 6	2014.09	0.50	-	0.17	0.08	0.005 ^f	6.0×10 ¹¹
<p>* At the Euro 1..4 stages, passenger vehicles > 2,500 kg were type approved as Category N₁ vehicles</p> <p>† Values in brackets are conformity of production (COP) limits</p> <p>a. until 1999.09.30 (after that date DI engines must meet the IDI limits)</p> <p>b. 2011.01 for all models</p> <p>c. 2013.01 for all models</p> <p>d. and NMHC = 0.068 g/km</p> <p>e. applicable only to vehicles using DI engines</p> <p>f. 0.0045 g/km using the PMP measurement procedure</p> <p>g. 6.0×10¹² 1/km within first three years from Euro 6 effective dates</p>							

Tabel 2: Euronormering voor bestelwagens (bron: Dieselnorm)

Category†	Stage	Date	CO	HC	HC+NOx	NOx	PM	PN
			g/km					
Positive Ignition (Gasoline)								
N ₁ , Class I ≤1305 kg	Euro 1	1994.10	2.72	-	0.97	-	-	-
	Euro 2	1997.01	2.2	-	0.50	-	-	-
	Euro 3	2000.01	2.3	0.20	-	0.15	-	-
	Euro 4	2005.01	1.0	0.10	-	0.08	-	-
	Euro 5	2009.09 ^b	1.0	0.10 ^g	-	0.06	0.005 ^{e,f}	-
	Euro 6	2014.09	1.0	0.10 ^g	-	0.06	0.005 ^{e,f}	6.0×10 ¹¹ e ^j
N ₁ , Class II 1305-1760 kg	Euro 1	1994.10	5.17	-	1.40	-	-	-
	Euro 2	1998.01	4.0	-	0.65	-	-	-
	Euro 3	2001.01	4.17	0.25	-	0.18	-	-
	Euro 4	2006.01	1.81	0.13	-	0.10	-	-
	Euro 5	2010.09 ^c	1.81	0.13 ^h	-	0.075	0.005 ^{e,f}	-
	Euro 6	2015.09	1.81	0.13 ^h	-	0.075	0.005 ^{e,f}	6.0×10 ¹¹ e ^j
N ₁ , Class III >1760 kg	Euro 1	1994.10	6.90	-	1.70	-	-	-
	Euro 2	1998.01	5.0	-	0.80	-	-	-
	Euro 3	2001.01	5.22	0.29	-	0.21	-	-
	Euro 4	2006.01	2.27	0.16	-	0.11	-	-
	Euro 5	2010.09 ^c	2.27	0.16 ⁱ	-	0.082	0.005 ^{e,f}	-
	Euro 6	2015.09	2.27	0.16 ⁱ	-	0.082	0.005 ^{e,f}	6.0×10 ¹¹ e ^j
N ₂	Euro 5	2010.09 ^c	2.27	0.16 ⁱ	-	0.082	0.005 ^{e,f}	-
	Euro 6	2015.09	2.27	0.16 ⁱ	-	0.082	0.005 ^{e,f}	6.0×10 ¹¹ e ^j
Compression Ignition (Diesel)								
N ₁ , Class I ≤1305 kg	Euro 1	1994.10	2.72	-	0.97	-	0.14	-
	Euro 2 IDI	1997.01	1.0	-	0.70	-	0.08	-
	Euro 2 DI	1997.01 ^a	1.0	-	0.90	-	0.10	-
	Euro 3	2000.01	0.64	-	0.56	0.50	0.05	-
	Euro 4	2005.01	0.50	-	0.30	0.25	0.025	-
	Euro 5a	2009.09 ^b	0.50	-	0.23	0.18	0.005 ^f	-
	Euro 5b	2011.09 ^d	0.50	-	0.23	0.18	0.005 ^f	6.0×10 ¹¹
	Euro 6	2014.09	0.50	-	0.17	0.08	0.005 ^f	6.0×10 ¹¹
N ₁ , Class II 1305-1760 kg	Euro 1	1994.10	5.17	-	1.40	-	0.19	-
	Euro 2 IDI	1998.01	1.25	-	1.0	-	0.12	-
	Euro 2 DI	1998.01 ^a	1.25	-	1.30	-	0.14	-
	Euro 3	2001.01	0.80	-	0.72	0.65	0.07	-
	Euro 4	2006.01	0.63	-	0.39	0.33	0.04	-
	Euro 5a	2010.09 ^c	0.63	-	0.295	0.235	0.005 ^f	-
	Euro 5b	2011.09 ^d	0.63	-	0.295	0.235	0.005 ^f	6.0×10 ¹¹
	Euro 6	2015.09	0.63	-	0.195	0.105	0.005 ^f	6.0×10 ¹¹
N ₁ , Class III >1760 kg	Euro 1	1994.10	6.90	-	1.70	-	0.25	-
	Euro 2 IDI	1998.01	1.5	-	1.20	-	0.17	-
	Euro 2 DI	1998.01 ^a	1.5	-	1.60	-	0.20	-
	Euro 3	2001.01	0.95	-	0.86	0.78	0.10	-
	Euro 4	2006.01	0.74	-	0.46	0.39	0.06	-
	Euro 5a	2010.09 ^c	0.74	-	0.350	0.280	0.005 ^f	-
	Euro 5b	2011.09 ^d	0.74	-	0.350	0.280	0.005 ^f	6.0×10 ¹¹
	Euro 6	2015.09	0.74	-	0.215	0.125	0.005 ^f	6.0×10 ¹¹
N ₂	Euro 5a	2010.09 ^c	0.74	-	0.350	0.280	0.005 ^f	-
	Euro 5b	2011.09 ^d	0.74	-	0.350	0.280	0.005 ^f	6.0×10 ¹¹
	Euro 6	2015.09	0.74	-	0.215	0.125	0.005 ^f	6.0×10 ¹¹

† For Euro 1/2 the Category N₁ reference mass classes were Class I ≤ 1250 kg, Class II 1250-1700 kg, Class III > 1700 kg
a. until 1999.09.30 (after that date DI engines must meet the IDI limits)
b. 2011.01 for all models
c. 2012.01 for all models
d. 2013.01 for all models
e. applicable only to vehicles using DI engines
f. 0.0045 g/km using the PMP measurement procedure
g. and NMHC = 0.068 g/km
h. and NMHC = 0.090 g/km
i. and NMHC = 0.108 g/km
j. 6.0×10¹² 1/km within first three years from Euro 6 effective dates

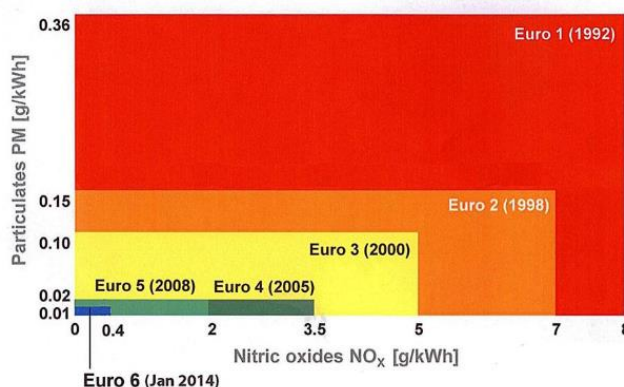
Tabel 3: Euronormering vrachtwagens (bron: Dieselnet.com)

Stage	Date	Test	CO	HC	NOx	PM	PN	Smoke	
			g/kWh				1/kWh	1/m	
Euro I	1992, ≤ 85 kW	ECE R-49	4.5	1.1	8.0	0.612			
	1992, > 85 kW		4.5	1.1	8.0	0.36			
Euro II	1996.10		4.0	1.1	7.0	0.25			
	1998.10		4.0	1.1	7.0	0.15			
Euro III	1999.10 EEV only		ESC & ELR	1.5	0.25	2.0	0.02		0.15
	2000.10			2.1	0.66	5.0	0.10 ^a		0.8
Euro IV	2005.10	1.5		0.46	3.5	0.02		0.5	
Euro V	2008.10	1.5		0.46	2.0	0.02		0.5	
Euro VI	2013.01	WHSC		1.5	0.13	0.40	0.01	8.0×10 ¹¹	

^a PM = 0.13 g/kWh for engines < 0.75 dm³ swept volume per cylinder and a rated power speed > 3000 min⁻¹

Momenteel liggen er drie opties op tafel voor de invoering van post-Euro 6/VI of 'Euro 7/VII'. Optie 1 gaat uit van een beperkte herziening van Euro 6/VI en focust vooral op de huidige uitdagingen, zijnde de verschillende types en emissietests. Een vereenvoudiging waarbij de nadruk blijft liggen op praktijkmetingen is het doel van deze optie. Optie 2 wil een brede herziening van Euro 6 waarbij naast vereenvoudiging ook strengere grenswaarden worden opgelegd voor alle voertuigen. Er wordt daarbij ook nagedacht over een uitbreiding naar andere verontreinigende stoffen. Optie 3 wil een volledige herziening van Euro 6/VI met strengere grenswaarden en een monitoring van emissies doorheen de gehele levensduur van een voertuig. Dit zou moeten gebeuren aan de hand van *On-Board Monitoring* en zou tevens ook als controlesysteem gehanteerd kunnen worden.

De vernieuwing van de vrachtwagenvloot versnelt sinds de invoering van de kilometerheffing in België. De Euronormen zorgen voor een sterke reductie in uitstoot op voertuigniveau, zoals weergegeven in Figuur 4.



Figuur 4: Euronormering vrachtwagens voor fijnstof (PM) en NO_x

Daarnaast legt de Europese Commissie ook limieten op inzake CO₂-emissies van nieuwe voertuigen, zoals eerder besproken in paragraaf 2.1. Voor personenwagens en bestelwagens is dit al geruime tijd het geval. Voor vrachtwagens bestaat er sinds kort (2019) een verordening goedgekeurd voor het reduceren van de CO₂-emissies van nieuw geproduceerde voertuigen. Het gaat om een juridisch bindend akkoord tussen het Europees Parlement en de lidstaten om de CO₂-uitstoot van nieuwe vrachtwagens (type N2 en N3) te verlagen met 15% tegen 2025 en met 30% tegen 2030 ten opzichte

van 2019. Daarnaast moeten fabrikanten verzekeren dat vrachtwagens met lage- of zero-emissie 2% van hun verkoopsaandeel vertegenwoordigen tegen 2025.

De invoering van dergelijke CO₂-emissiestandaarden voor zware vrachtvoertuigen mikt naast emissiereductie tevens op verlaagde brandstofkosten voor transportoperatoren via de verspreiding van kosteneffectieve technologieën. Daarnaast wordt dit ook belangrijk geacht voor de concurrentiepositie van de Europese vrachtwagenfabrikanten aangezien in de Verenigde Staten, Canada, Japan en China reeds regulerende maatregelen geïmplementeerd werden om de CO₂-uitstoot van zware bedrijfsvoertuigen te verminderen (van Lier et al., 2019).

De impact van normering op nieuwe voertuigen hangt natuurlijk sterk af van de snelheid waarmee een transportvloot vernieuwd wordt. Volgens ACEA⁵ ligt de gemiddelde levensduur voor lichte en zware vrachtwagens in België op 9,7 jaar, wat lager is dan het EU-gemiddelde van 11,7 jaar. Voor bestelwagens gaat ACEA uit van een gemiddelde levensduur van 8,2 jaar in België en 10,9 jaar in Europa. Afgaande op deze cijfers voldoet 51,5% van de Belgische vrachtwagens en 42,7% van de Europese vrachtwagens in 2035 aan de -30% normering. Daarnaast voldoet 48,5% van de Belgische vrachtwagens en 42,8% van de Europese vrachtwagens aan de -15% normering in 2035. Tot slot blijft 14,5% van de Europese vrachtwagens zonder reductie.

2.2.4. CNG/LNG

Mono-brandstof of bi-brandstof CNG (Compressed Natural Gas) en LNG (Liquified Natural Gas) aangedreven voertuigen verbruiken aardgas (methaan, CH₄). Ze worden onder meer naar voor geschoven als alternatief voor diesel- en benzinevoertuigen. Dankzij het samenpersen (tot 200-300 bar) of vloeibaar maken van aardgas wordt de volumetrische energiedichtheid verhoogd zodat ook een toepassing in het vrachtvervoer mogelijk wordt. LNG is geschikter voor vrachtvoertuigen met hoge kilometeraantallen per jaar en regelmatig gebruik. CNG is gepaster voor kleinere voertuigen met lagere kilometeraantallen. Momenteel wordt er vanuit de federale overheid een incentive gegeven aangezien er geen taksen betaald dienen te worden wanneer LNG en CNG getankt worden. Ook bestond er tot voor kort een tijdelijke incentive vanuit de nationale gasfederatie in vorm van een aankooppremie voor CNG-voertuigen, al heeft dit voor wat betreft CNG-personenwagens tot nog toe niet geleid tot een *rush* naar de technologie, gezien het marktaandeel anno 2020 ervan relatief marginaal blijft (<0.2% voor het Brussels Hoofdstedelijk Gewest).

Ondanks het lagere koolstofgehalte van aardgas in vergelijking met diesel, resulteert overschakeling op aardgasvoertuigen slechts in een geringe reductie van de CO₂-emissies (*well-to-wheel*) (International Energy Agency, 2017). Naast hun beperkt reductiepotentieel in termen van CO₂ uitstoot, is er ook het probleem van methaanlekages. Methaan komt vrij door lekkage (*methane slip*) bij de productie, verwerking, transmissie en distributie. De impact van dit nadelige verschijnsel neemt toe naarmate pijpleidingen grotere afstanden overbruggen, gezien de grotere kans op lekages bij koppelingen. Bovendien gaat het samendrukken van aardgas tot een tankdruk van 200 tot 300 bar bij CNG en het vloeibaar maken van aardgas gepaard met energieverlies. Bij grootschalige installaties bijvoorbeeld

⁵ <https://www.acea.be/statistics/tag/category/average-vehicle-age>

wordt ca. 10% van de energetische waarde van het geproduceerde LNG gebruikt voor het vloeibaar maken van LNG (Marynissen et al., 2018). Methaan is ook een broeikasgas, tevens veel sterker dan CO₂ (28 keer sterker op een tijdspanne van 100 jaar). Bijgevolg wordt het reductiepotentieel voor broeikasgassen van CNG en LNG ingeschat op 4,9% tot 7% (Kollamdhori et al., 2016). LNG- en CNG-vrachtwagens stoten wel minder grote hoeveelheden luchtvervuilende polluenten uit, al zijn deze waarden vergelijkbaar met goed onderhouden Euro VI dieselvrachtwagens. Beide (CNG/LNG) kunnen dus niet als zero-emissie beschouwd worden. Voor personenwagens noteren we een gelijklopende analyse, waarbij de CO₂-reductie beperkt is vergeleken met die van diesellootvoertuigen, terwijl op vlak van NO_x en fijnstof vergelijkbare hoeveelheden worden uitgestoten als benzinevarianten. CNG kan ook een geluidsreductie tijdens het verbrandingsproces van een voertuig realiseren.

Aardgas is wel niet-carcinogeen bij verbranding, in tegenstelling tot diesel. Dit, alsook de impact van methaanlekkages in het productieproces en het potentieel van biomethaan wordt verderop besproken in de context van een levenscyclusanalyse (zie paragraaf 3.6.1).

Op basis van de geannualiseerde kapitaal- en operationele kosten (ook de *total cost of ownership*) van het gebruik van aardgasvoertuigen in het zwaar transport blijkt in de meeste gevallen dat deze hoger zijn dan deze voor conventionele benzine- en diesellootvoertuigen, wat betekent dat het vanuit economisch oogpunt gezien voor transportoperatoren niet aantrekkelijk kan zijn om over te schakelen op CNG, LNG of biomethaan. Deze resultaten zijn uiteraard zeer gevoelig voor het verschil in brandstofkosten tussen diesel/ benzine en aardgasbrandstoffen. Voor personenwagens is CNG momenteel wél een interessant alternatief aan de pomp, al blijft het hier onduidelijk hoelang er geen accijnzen zullen worden gehoffen op de brandstof.

Voor binnenvaart betekent een overschakeling naar LNG een reductie in de emissies van NO_x en PM, tot wel 75%, hetgeen vooral te wijten is aan samenstelling van de dieselbrandstof die wordt toegepast in deze sector (TNO, 2015). Beschikbare gegevens tonen daarenboven aan dat grote LNG-motoren in schepen lage methaanemissie hebben, zodat de uitstoot van broeikasgassen in de *tank-to-wheelfase* vermindert met 15-20% ten opzichte van dieselmotoren. Knelpunten voor de binnenvaart zijn de kostenbatenerhouding, technische aspecten en het beperkte jaarlijkse totaal LNG-verbruik van de vloot schepen hetgeen voor een te lage *return on investment* zorgt voor binnenschippers om in nieuwe aandrijvingstechnologieën te investeren.

De verdere implementatie van CNG- en LNG-voertuigen voor personen- en vrachtverkeer vereist een gespecialiseerde tankinfrastructuur en aanpassingen aan het distributienetwerk. Daarnaast zijn er investeringen in de verdere ontwikkeling van voertuigtechnologie vereist (onder andere om motorefficiëntie te verhogen en methaanlekkage te reduceren). Anderzijds passen deze investeringen in de integratie van duurzaam biomethaan in de transportsector. Dat maakt dat de investeringen in CNG en LNG als tussenoplossing naar gecomprimeerd biomethaan (CBM) en vloeibaar biomethaan (LBM) mogelijk niet verloren zijn.

2.2.5. CBM/LBM

CBM (Compressed Biomethane) en LBM (Liquified Biomethane) zijn gebaseerd op biomethaan. Biomethaan is te vergelijken met aardgas. Het biogas is een hernieuwbaar gas dat ontstaat wanneer organisch materiaal door bacteriën wordt ontbonden in een zuurstofvrije omgeving (bijv. uit huishoudafval en ander organisch afval). Het biogas dat daarbij ontstaat kan opgewerkt worden tot biomethaan. Biomethaan heeft het potentieel om onder zeer beperkende voorwaarden klimaatneutraal te zijn (TNO et al, 2014). Zo zal de manier waarop biomethaan wordt gewonnen doorslaggevend zijn, net zoals dit het geval is voor andere biobrandstoffen (volgt verderop). Het werd ook opgenomen in het nieuwe Europese akkoord rond de hernieuwbare energierichtlijn (2018)⁶ als mee te tellen bij de verplichte doelstellingen voor 'geavanceerde brandstoffen' in transport. Het huidige *well-to-wheel* reductiepotentieel ten opzichte van diesel bedraagt 46% tot 52% CO₂ (Kollamdhoti et al., 2016), al is er een behoorlijk reductiepotentieel dat verderop besproken wordt. In deze getallen worden de methaanlekkages niet meegerekend. Beide (CBM/LBM) kunnen dus niet als 'zero-emissie' beschouwd worden.

Biomethaan is bovendien aanzienlijk duurder om te produceren dan fossiel aardgas. Er zijn stimulansen en subsidies om de productie en levering van biomethaan in veel EU-lidstaten te ondersteunen, maar deze zijn momenteel in het algemeen gunstiger voor producenten die aan warmte- en elektriciteitssectoren leveren, wat betekent dat het vaak niet economisch haalbaar is om biomethaan te produceren voor de transportsector. Biobrandstofvoertuigen worden in het zware transport beschouwd als voertuigen met een gemengd brandstofsysteem (*dual fuel*). In bestaande gemengde brandstofsysteemen voor zware vrachtwagens wordt momenteel nog een mix van diesel en LPG of aardgas (CNG/LNG) gebruikt. Momenteel is er een maximale bijmenging van 30% gas. Er bestaan systemen die een hoger gaspercentage toelaten, maar dit verlaagt momenteel nog het motorrendement. Ook bij deze brandstofsysteemen stellen zich problemen van onvolledige verbranding en methaanlekkage.

Een overschakeling naar biomethaan is echter mogelijk en wordt als duurzamer beschouwd, zoals hierboven reeds werd beschreven. Bij de overstap naar biomethaan stelt zich, naast het aanpakken van methaanlekkage langsheen de volledige aanvoerketen, momenteel het bijkomende probleem dat de kwaliteit van biomethaan nog niet standvastig is en de beschikbaarheid beperkt is.

Bepaalde opties voor biobrandstoffen kunnen een lagere impact hebben op lokale luchtvervuiling in vergelijking met diesel. Het gebruik van biomethaan resulteert in verminderde emissies van koolwaterstoffen, koolmonoxide, stikstofoxiden en fijn stof in vergelijking met dieselbrandstoffen. Deze verminderingen in emissies zijn gelijkaarig aan die gerealiseerd met fossiele aardgas als brandstof.

2.2.6. BIOBRANDSTOFFEN

Biobrandstoffen zijn brandstoffen die kunnen verwerkt worden uit natuurlijke, niet-fossiele grondstoffen. We onderscheiden biobrandstoffen van de eerste generatie en zogenaamde 'geavanceerde' biobrandstoffen. Bij die eerste vertrekt men van voedselgewassen als maïs en andere zetmeelhoudende gewassen (ethanol), en koolzaad en andere oliehoudende gewassen als palmen

⁶ RICHTLIJN (EU) 2018/2001 VAN HET EUROPEES PARLEMENT EN DE RAAD

(biodiesel). Bij geavanceerde biobrandstoffen vertrekt men voornamelijk vanuit afvalstromen uit verschillende industrieën.

De keuze van grondstoffen is een sleutelfactor in het koolstofarm maken van biobrandstoffen in vergelijking met fossiele brandstoffen. Bij biodiesel moet hierbij rekening worden gehouden met broeikasgasemissies die gepaard gaan met de teelt, de verandering van het landgebruik en de impact op afvalstromen (gerelateerd aan het nastreven van circulariteit) in het kader van een volledige levens-cyclusanalyse van op gewassen gebaseerde biodiesels. In hun analyse stellen Kollamthodi et al. (2016) dat naast duurzame biobrandstoffen afgeleid uit organisch afval, deze brandstof ook kan worden geproduceerd uit energiegewassen, afvalstromen en mogelijk ook uit hout. Hoewel de CO₂-uitstoot die vrijkomt bij de verbranding van biobrandstoffen geproduceerd uit energiegewassen niet als een bijdrage aan de klimaatverandering wordt beschouwd, omdat deze emissies deel uitmaken van de koolstofcyclus op korte termijn, is de impact van CO₂-emissies door verbranding van uit hout afgeleide brandstoffen minder duidelijk, aangezien bosbouwbronnen geen deel uitmaken van de koolstofcyclus op korte termijn. Bovendien kunnen energiegewassen leiden tot andere ongewenste milieueffecten, zoals indirecte verandering van landgebruik. De voorziene verhoging van de productie van biogas en biomethaan in Europa is ook strategisch belangrijk omdat het de EU kan helpen haar energiezekerheid te verbeteren door de afhankelijkheid van de invoer van fossiele brandstoffen van buiten de EU (hoofdzakelijk Rusland, de VS en het Midden-Oosten) te verminderen. Hiervoor zal echter de beschikbaarheid van voornamelijk organische afvalstromen bepalend zijn voor de toepassing van duurzame biobrandstoffen.

Biobrandstoffen worden vandaag in België al op nationale schaal gebruikt dankzij de inmenging van 7% biodiesel in fossiele diesel (B7) en van 10% ethanol in benzine (E10).

Een toepassing van biobrandstoffen in bestaande motoren betekent ook dat deze aan dezelfde efficiëntie blijven werken. Gezien een verbrandingsmotor gebruikelijk meer dan 75% van de chemische energie aanwezig in een brandstof verliest onder de vorm van warmte (Smit, Whitehead, & Washington, 2018), kunnen we ook biobrandstoffen niet categoriseren als een duurzame lange-termijnsoplossing. Mede door de beperkte beschikbaarheid van duurzame (tweede generatie) biobrandstoffen kijken we voor hun toepassing best richting die subsectoren van de transportsector waar een doorgedreven elektrificatie nog niet meteen voor morgen is. Denk hierbij aan lange-afstandswegtransport, lucht- en scheepvaart. Voor meer informatie omtrent de impact van biobrandstoffen, zie paragraaf 1.3.1 vanaf p.155 in de appendix van dit rapport.

2.2.7. BATTERIJ-ELEKTRISCHE VOERTUIGEN EN HYBRIDE VOERTUIGEN

Plug-in Hybride Elektrische Voertuigen (PHEV's) hebben doorgaans een volledig elektrische actieradius van ongeveer 50 km volgens de NEDC-typegoedkeuringsprocedure en werden op de Europese markt geïntroduceerd sinds de introductie van onder meer de Opel Ampera in 2013. Huidige PHEV's, getest volgens de WLTP-typegoedkeuringsprocedure, hebben een gemiddelde elektrische actieradius die vergelijkbaar is met de oudere, met uitschieters van 35 km tot 100 km. Vanuit het perspectief van een autofabrikant zijn PHEV's een interessante aanwinst in het licht van bindende CO₂-doelstellingen en de

superkredietfactoren die daarmee gepaard gingen in het Europese CO₂-berekeningssysteem per fabrikant, zoals eerder beschreven. Hoewel sommige PHEV-benzin modellen aanvankelijk een combinatie waren van een kleine verbrandingsmotoren (*internal combustion engines*, ICE's) met een geëlektrificeerde aandrijflijn, combineren de meeste modellen grote motoren met een bescheiden batterijpakket, gezien de milde NEDC-typegoedkeuring dit toestond. Dit is ook het geval voor de weinige PHEV's op basis van diesel. In totaal zijn 69 benzine- en 8 diesel PHEV-modellen beschikbaar op de Belgische markt anno 2020 ('Ecoscore', 2020), terwijl veel fabrikanten de komende jaren van plan zijn nieuwe modellen op de markt te brengen in een poging om de financiële sancties die hen bedreigen te beperken volgens de doelstelling van 95 g/km zoals vastgelegd in Verordening (EU) nr. 2009/443 en de verdere verlagingen tegen 2025 en 2030. PHEV's in de hele EU genieten een grotere populariteit naarmate er meer modellen worden uitgebracht. Deze populariteit is voornamelijk te verklaren door het voordeel voor de consument van een kunstmatig lage CO₂-uitstoot en de daaruit voortvloeiende lagere registratie- en jaarlijkse autobelastingen. Op deze manier profiteren zowel consumenten als fabrikanten van de duale technologie. Die 'kunstmatigheid' uit zich in het feit dat de dikwijls zware PHEV-modellen veel minder vaak worden opgeladen dan gewenst is, waardoor ze in realiteit vaak meer CO₂ en pollutanten gaan uitstoten dan hun niet-PHEV tegenhangers. Zo wordt uitgegaan van een gemiddeld elektrisch gereden aandeel van slechts 30% (N. Ligterink & Smokers, 2016).

Batterij-elektrische voertuigen (BEV's) bestaan al sinds de opkomst van de auto. In tegenstelling tot op ICE-gebaseerde aandrijflijnen, die worden gekenmerkt door ongeveer 1.400 bewegende onderdelen, blinken BEV's uit in eenvoud, aangezien ze ongeveer zes keer minder onderdelen nodig hebben om dezelfde functionaliteit te bieden. Dit resulteert in een aandrijflijnefficiëntie die door geen enkele andere technologie wordt geëvenaard. BEV's worden aangedreven door energie die is opgeslagen in batterijcellen. In de begintijd van de BEV werden loodzuuraccu's toegepast om energie elektrochemisch op te slaan, zij het met een lage energiedichtheid. In de jaren negentig werden verschillende batterijchemicaliën toegepast, variërend van nikkel-metaalhydriden (NiMH) en nikkel-cadmium (NiCd) tot hoge temperatuur natriumzwavelcellen (NaS). De eerste commerciële BEV-toepassing van lithiumchemie werd geïntroduceerd met Tesla's Roadster. Batterijonderzoek is een hot topic omdat er wordt gezocht naar chemie die wordt gekenmerkt door zowel een hoge energiedichtheid als vermogensdichtheid, terwijl het gebruik van onethische / niet-duurzame materialen zoals ambachtelijk gewonnen kobalt wordt beperkt.

Fabrikanten onderzoeken daarom continu de volgende generatie batterijen om hogere specifieke energie- en vermogensdichtheden, snellere oplaadtijden en minder risico op oververhitting (en dus brand) mogelijk te maken. Dit kunnen solid-state-, lithiumzwavel- of lithium-airbatterijen zijn. Verschillende fabrikanten richten zich momenteel op solid-state batterijen, waarvan de eerste commerciële versie door Mercedes wordt geïntroduceerd met de eCitaro stadbus. Andere veelbelovende technologieën die momenteel worden onderzocht en ontwikkeld, zijn lithiumzwavel-, lithiummangaan- en *metal air*-batterijen, evenals redox flow- en natrium-gebaseerde batterijen. Terwijl het onderzoek zich vooral richt op hogere energiedichtheden, zoekt men ook naar geschikte opvolgers van elementen als lithium en kobalt, bijvoorbeeld door ze te vervangen door rijkelijk beschikbare elementen als zwavel en magnesium. Bovendien probeert men de levensduur van batterijen te

verlengen, die nu op ongeveer 1.000 - 2.000 cycli of 250.000 - 500.000 km ligt. Het dichtst bij commercialisering zijn dus solid-state batterijen. Zij verschillen van de huidige lithium-ionbatterijen omdat het vloeibare elektrolyt van de laatstgenoemde wordt vervangen door een vaste, waardoor ze minder vatbaar zijn voor oververhitting en ontbinding, terwijl de energiedichtheid aanzienlijk (met 25%) toeneemt door gebruik onder hoge spanning. De uitdaging voor deze nieuwe batterijchemie is echter de beperkte vermogensdichtheid. Metal-airbatterijen, zoals lithium-air (Li-O₂ in figuur 9) zijn veelbelovend, aangezien ze een vergelijkbare energiedichtheid hebben als benzine, en ongeveer 10 keer de hoogste energiedichtheid die tegenwoordig wordt bereikt in prototype-batterijen. Lithium-air-technologie staat echter nog in de kinderschoenen en valt niet op korte termijn te verwachten.

De EV-batterijen blijven tegenwoordig een kostenintensief onderdeel van de EV, goed voor ongeveer een derde van de totale voertuigprijs (Kochhan et al., 2014). Desalniettemin daalden de prijzen per kilowattuur (kWh) op systeemniveau (cel + pakket) van \$1000 in 2010 tot ongeveer \$230 in 2017 en verder tot \$156 in 2019. Voorspellingen van Bloomberg's New Energy Finance wijzen op een verdere daling tot onder \$100/kWh in 2024 en zelfs tot \$61/kWh in 2030 (McKerracher et al., 2020). Deze voorspellingen gaat uit leerpercentages vanwege schaalvoordelen, aangezien hoe meer batterijcellen in de nabije toekomst zullen worden geproduceerd, hoe sneller prijzen naar verwachting zullen dalen. Veranderingen in de wereldwijde productiecapaciteit van batterijen gaan in een snel tempo, en Europese merken zijn van plan om van deze mogelijkheid gebruik te maken, aangezien fabrieken gepland zijn in Zweden, Hongarije, Polen en Duitsland. De capaciteit zal daarom naar verwachting meer dan verdubbelen van 116 gigawattuur in 2017 tot 289 gigawattuur in 2021 (Hirtenstein, 2017) (McKerracher, 2017). Dit heeft grote gevolgen voor de prijspariteit tussen elektrische auto's en conventionele auto's. Prognoses tonen aan dat deze mijlpaal zal worden bereikt in de periode 2022-2024 (Witkamp, van Gijlswijk, Bolech, Coosemans, & Hooftman, 2017), of zodra de kosten op batterijniveau lager worden dan \$125 / kWh (Schmuck, Wagner, Höpfer, Placke, & Winter, 2018). Dat moment wordt voorspeld een kantelpunt te zijn voor de marktadoptie van elektrische voertuigen.

In het segment van de bestelwagens zijn er ook marktwaardige BEV's. Voor de zware vrachtvoertuigen moet worden opgemerkt dat deze momenteel in ontwikkelingsfase zijn. De eerste modellen die momenteel op de markt verschijnen, worden nog hoofdzakelijk voor nichetoeepassingen door specifieke gebruiksprofielen gebruikt, zoals bijvoorbeeld terminalvoertuigen, betonmixers en vuilniswagens. Algemeen gebruik van elektrisch aangedreven zware vrachtvoertuigen voor goederenvervoer over de weg is nog uitdagend vanwege de ontoereikende huidige batterijtechnologie, waarbij het behouden van voldoende beschikbaar netto-laadvermogen bij zware BEV's een barrière vormt. Er wordt aangenomen dat door de evolutie in batterijtechnologie, ook meer algemene toepassingen met zware vrachtvoertuigen mogelijk worden.

Zo worden marktwaardige modellen voor zwaar vrachtvervoer al tegen 2025 verwacht. Het daadwerkelijk oppikken en inzetten van deze voertuigen wordt nog eens 5 jaar later (in 2030) verwacht (TNO, 2018). Dit is het gevolg van een initiële periode van onzekerheid en een te verwachten gedrag waarbij men eerst de kat uit de boom zal kijken. Hierdoor zal het aandeel van zero-emissie zware vrachtvoertuigen in de vloot nog relatief klein zijn in 2035 en zal hun gebruik nog steeds eerder niche

dan wel algemeen zijn. Het spreekt voor zich dat de schatting van het marktaandeel voor zware vrachtvoertuigen minder robuust is. Deze is, in tegenstelling tot bestelwagens, nog zeer afhankelijk van de technologische ontwikkelingen en van beleidsmaatregelen. Strenge normen en beleid zouden de ontwikkeling en marktevolutie kunnen versnellen. Om de TCO van BEV's aantrekkelijker te maken ten opzichte van conventionele vrachtwagens kunnen ondersteunende maatregelen vanuit de overheid geïntroduceerd worden. In 2018 kondigde de Duitse regering bijvoorbeeld aan dat met ingang van 1 januari 2019 de tol (LKW-Maut) verlaagd zal worden voor elektrische semi-vrachtwagens om de langzame elektrificatie van het vrachtwagenvervoer te stimuleren via de resulterende besparing voor transportbedrijven.

Brede introductie van BEV-vrachtoertuigen vereist een verdere uitbouw van laadinfrastructuur om aan de oplaadbehoeftes te kunnen voldoen. Daarnaast is de financiering van de vereiste introductie van een *smart grid*-structuur om het elektrisch energiesysteem te balanceren een mogelijke barrière voor de massale introductie van BEV's in het transportsysteem. De verwachte toename van BEV's op de weg vormt immers een uitdaging voor energiebedrijven (McKinsey, 2018). Er zal daarbij nood zijn aan het opvangen van (1) het massaal laden van vrachtoertuigen na de werkuren, (2) piekladingen op lokaal niveau in bepaalde gebieden waar veel vrachtoertuigen gestationeerd zijn en (3) snelladers voor zwaardere vrachtoertuigen die grotere eisen stellen aan het netwerk.

De uitstoot van BEVs (*well-to-wheel*) is heel afhankelijk van hoe de elektriciteit geproduceerd wordt. BEV's kunnen als zero-emissievoertuigen meegenomen worden vanuit een WTW-perspectief, als hernieuwbare elektriciteit wordt aangewend.

Inzake energieverbruik wordt er gerekend op zo'n 15-20 kWh/100 km voor personenwagens, 30 kWh/100km voor elektrische bestelwagens, 75 kWh/km voor elektrische lichte vrachtwagens en 200 kWh/100km voor elektrische zware vrachtwagens en stadsbussen.. Voor meer inzichten in de batterijtechnologieën van vandaag en die van morgen, zie paragraaf 1.5 in Appendix vanaf p.168

2.2.8. WATERSTOF

Waterstofvoertuigen of *fuel cell electric vehicles* (FCEV) gebruiken een brandstofcel waarin waterstof wordt omgezet in elektriciteit en waterdamp om het voertuig aan te drijven. Hiervoor doet het beroep op vloeibaar waterstof dat onder hoge druk wordt opgeslagen in tanks. Naast waterstof wordt er ook geëxperimenteerd met ammoniak als brandstof, al is hier nog geen sprake van een commercialisatie. We kunnen waterstofvoertuigen als zero-emissie beschouwen, gezien ze tijdens het gebruik (of *tank-to-wheel*, TTW) gedeelte geen CO₂ of pollutanten uitstoten. Wat het WTT-gedeelte betreft, hangt de impact sterk af van hoe waterstof geproduceerd wordt. De verschillen tussen de *pathways* zijn significant. Zo wordt waterstof vandaag voornamelijk aangemaakt via *steam methane reforming*, (SMR) op basis van een fossiel aardgas. Hiermee gaat een CO₂-uitstoot gepaard maar door de industriële schaal van toepassing wordt het kostenplaatje per kilogram 'grijze' waterstof wel aantrekkelijk. Een duurzamere waterstofproductie is gebaseerd op elektrolyse van water tot waterstof- en zuurstofatomen, waarvoor hernieuwbare energie wordt gebruikt. Deze 'groene' waterstof heeft dus het potentieel voor

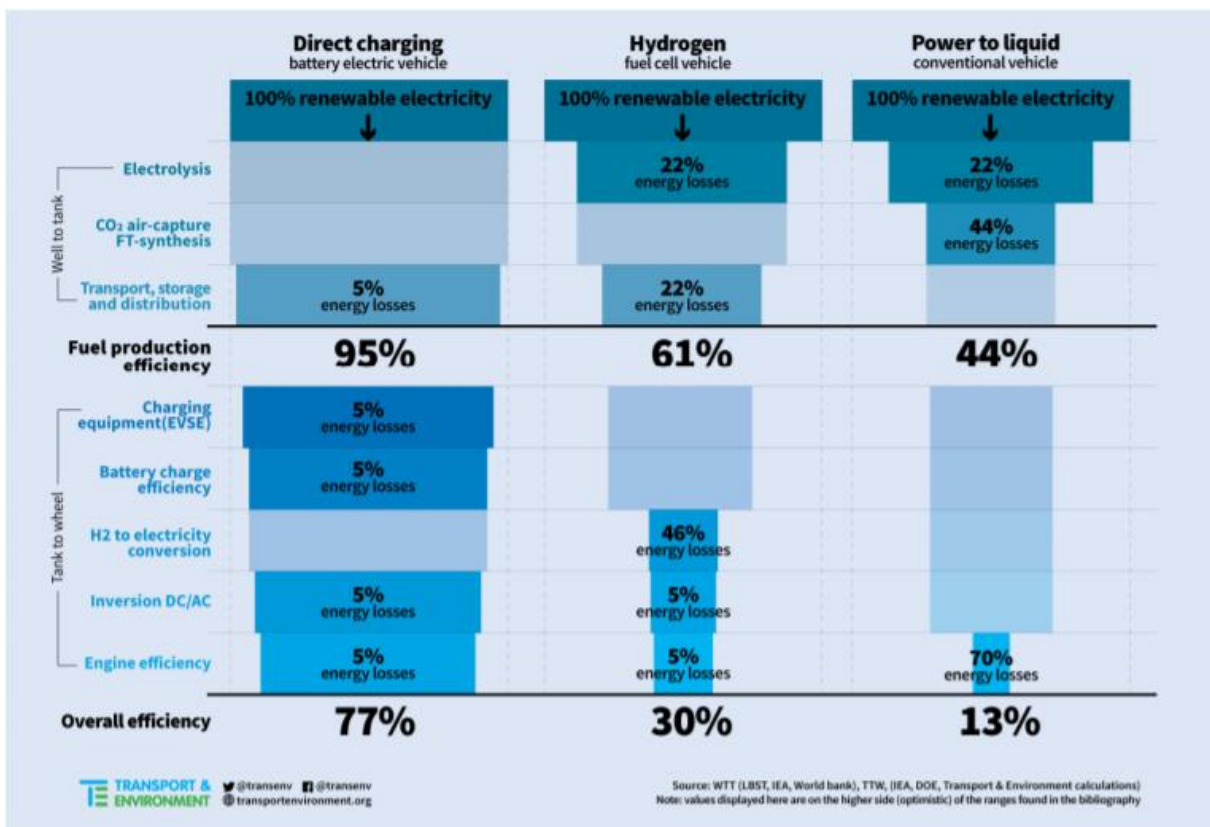
een heel lage klimaatimpact, al is elektrolyse een energie-intensief proces en is het eindproduct aanzienlijk duurder dan 'grijze' waterstof. Een tussenstap is het afvangen van de vrijgekomen CO₂ tijdens het conventionele SMR proces en het opslagen ervan, bijvoorbeeld ondergronds. Voor deze 'blauwe' waterstof doet men dus beroep op *carbon capture and storage* (CCS).

Waterstofvoertuigen hebben theoretisch een aantal voordelen ten opzichte van BEV's. Ten eerste heeft waterstof als energiedrager een hogere energiedichtheid dan de huidige generatie batterijen (ongeveer zes keer hoger per volume-eenheid en tot 20 keer hoger per gewichtseenheid (Collins & McLarty, 2020)). Op systeemniveau komt dit echter maar gedeeltelijk tot uiting omdat een brandstofcelaandrijving veel ruimte in beslag neemt. Zo kunnen personenwagens van die technologie momenteel 'slechts' zo'n 6 kg waterstof meenemen, al laat dit wel toe om zo'n 500-600 km ver te kunnen rijden. Dat is meer dan de 400-450 km die men met bepaalde batterij-elektrische modellen kan afleggen met één laadbeurt, al blijft het verschil bescheiden omwille van een lagere *tank-to-wheel* efficiëntie van de brandstofcel (zo'n 40% t.o.v. 70% voor BEV's). Ten tweede is tanksnelheid vergelijkbaar met die van voertuigen op traditionele brandstof, wat de operationele impact bij vervanging van bestaande benzine- en dieservoertuigen minimaliseert. Die tanksnelheid is echter relatief gezien de huidige voorziening infrastructuur vereist dat je eerst een pak kilometers moet afleggen vooraleer je kan tanken. Daartegenover staat dat de efficiëntie bij de opwekking van waterstof voor voertuigen lager ligt dan wanneer elektriciteit gebruikt wordt voor het laden van BEV's. Dit resulteert in een hoger energieverbruik per kilometer voor de voertuigen tijdens het rijden op waterstof ten opzichte van BEV's. Voor vrachtwagens komt dat neer op ongeveer 270 kWh/100 km bij FCEV's versus 200 kWh/100 km bij BEV's, voor personenwagens liggen deze gemiddelden veel lager, namelijk zo'n 14-23 kWh/100 km voor BEV's tegenover zo'n 30 kWh/100 km voor de huidige FCEV modellen. Een gemiddeld benzinevoertuig (6 l/100 km) en dieservoertuig (5 l/100 km) hebben zo een equivalent verbruik van zo'n 53 kWh/100 km en 45 kWh/100 km, respectievelijk.

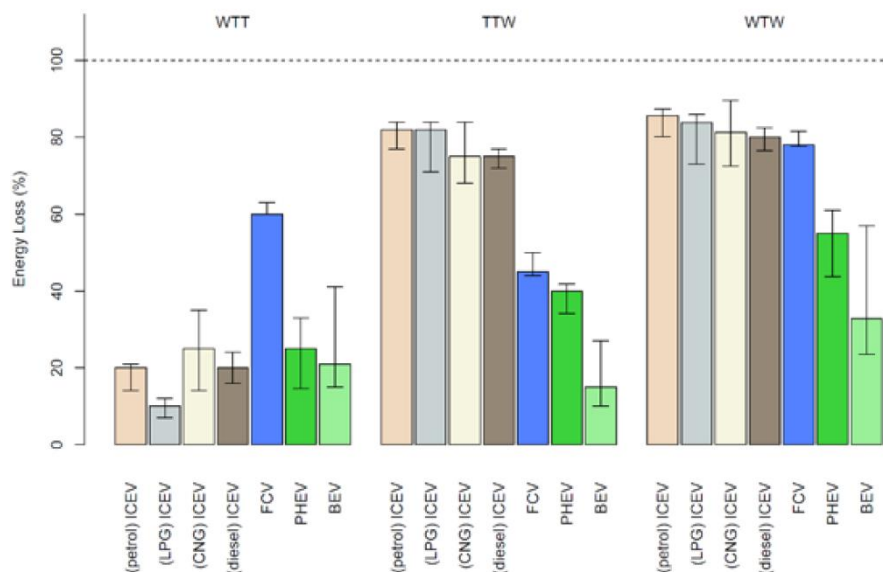
Waterstof wordt momenteel reeds in beperkte mate toegepast in bussen, heftrucks, vuilniswagens, vaartuigen en personenwagens. Trucks voor lange-afstandstransport zitten in ontwikkelingsfase. Waterstof wordt voornamelijk als duurzame oplossing gezien voor zwaar vrachtvervoer (Moultak et al., 2017). De voornaamste reden hiervoor is dat lichtere vervoersmiddelen als personenwagens eenvoudiger te elektrificeren zijn en we daarom duurzaam geproduceerd waterstof best uitsparen voor die sectoren waar dat (nog) niet mogelijk is, met name zwaar transport, lucht- en zeevaart, alsook industrie. Voor bestelwagens hebben Kleiner et al. (2016) berekend dat door de hoge kosten van de brandstofcel momenteel de TCO nog hoger is dan voor conventionele, hybride en batterij-elektrische bestelwagens. De belangrijkste barrières voor grootschalige introductie van deze technologie zijn momenteel de kosten van de nagenoeg geheel onbestaande tankinfrastructuur (124 waterstoftankstations anno 2020 in de hele Europese Unie commercieel beschikbaar (EAFO, 2020)), de kost van duurzame waterstof en de voertuigkost (met name de brandstofcel), maar tegen 2030 wordt ingeschat dat deze technologie economisch rendabel zou kunnen zijn. We spreken hier wel in de voorwaardelijke wijs, gezien waterstoftechnologie al decennialang naar voor wordt geschoven als de te kloppen technologie. Hindernissen zijn, naast de productie, enerzijds dat transport concurreert met tal van andere sectoren (zoals industrie, verwarming, energieopslag) voor beschikbare duurzame waterstof

en anderzijds de veiligheid. Gecomprimeerde waterstof is brandbaar en potentieel explosief indien het gas zich ophoopt.

Waterstof kan eveneens worden toegewend om zogenaamde synthetische brandstoffen, of *e-fuels*, te ontwikkelen. Hierbij worden met behulp van ingewikkelde chemische processen als de Fischer-Tropsch techniek waterstofatomen gebonden aan koolstofatomen. In het beste geval wordt het waterstof hier via hernieuwbare energie gewonnen uit de elektrolyse van water, terwijl de koolstofatomen worden afgevangen van industriële activiteit (*carbon capture*). Door de aanzienlijke inefficiënties in de tussenstappen om van waterstof tot een *e-fuel* te komen in de *well-to-tank* fase, alsook de verbranding ervan in een (zeer) inefficiënt verbrandingsproces, zal de vergelijking tussen het rechtstreeks aanwenden van hernieuwbare energie in een batterij-elektrisch voertuig en het gebruik ervan om via ingewikkelde en dure processen tot een synthetische brandstof te komen al snel in het voordeel van het elektrisch voertuig spelen. Zo zal de rechtstreekse toepassing van de energie in een batterij-elektrisch voertuig drie- tot viermaal meer energie-efficiënt zijn. Dit zien we grafisch voorgesteld in Figuur 5. Een overzicht van de *well-to-tank* efficiëntie van verschillende aandrijvingstechnologieën vinden we terug in Figuur 6.



Figuur 5 – Vergelijking tussen verschillende aandrijvingstechnologieën startende van hernieuwbare elektriciteit, waarbij een onderscheid wordt gemaakt tussen directe toepassing ervan in een batterij elektrisch voertuig, de toepassing ervan voor elektrolyse van water tot waterstof en de toepassing ervan voor de productie van synthetische brandstoffen (Earl, 2018)



Figuur 6 – Overzicht van de energetische verliezen in zowel de productie van de energievecteur (WTT) en omzetting ervan in de aandrijvingslijn (TTW), alsook gecombineerd per type aandrijvingslijn. Met ICEV voor internal combustion engine vehicle, FCV voor fuel cell vehicle en BEV voor battery electric vehicle (Smit et al., 2018).

2.3. Vooruitzichten voertuigtechnologieën

Gezien de ambitie om halverwege deze eeuw CO₂-neutraal te worden, volgens het klimaatakkoord van Parijs, moet de stimulering van de alternatieven voor benzine en diesel in een hogere versnelling worden geschakeld. Deze langetermijndoelstelling vereist proactieve regelgeving om de marktintroductie van alternatieve technologieën te verbeteren, terwijl begeleiding moet worden geboden voor de geleidelijke uitfasering van conventionele technologieën op de middellange termijn, d.w.z. tegen 2030-35. De centrale vraag blijft of de investering in tussentijdse (hybride) oplossingen met interne verbrandingsmotor-technologie (ICE) nog steeds levensvatbaar is, aangezien deze broeikasgassen en pollutanten blijven uitstoten in de atmosfeer. In dit opzicht kaarten we dus ook de alternatieven voor benzine- en dieselbrandstof aan, welke worden aangewend in de bestaande motoren zonder dat er grote aanpassingen nodig zijn aan onze huidige vloot én infrastructuur. Denk hierbij aan de inzet van bio- en synthetische brandstoffen. Deze vraag is in de eerste plaats relevant omdat een verhoogde marktintroductie voor elektrische voertuigen sterk bijdraagt aan de reeds sterk dalende kosten per kWh batterijcapaciteit.

Volgens de Europese autofabrikanten staat de elektrificatie van aandrijflijnen voor de toekomst voor de deur. Wanneer deze omslag echt wordt gemaakt in de praktijk, blijft echter nog onduidelijk gezien ze hun ICE-technologie zo lang mogelijk in het zadel willen houden om het rendement op de gemaakte investering te maximaliseren. Een argument van de auto-industrie is dat diesel-technologie noodzakelijk is om aan de CO₂-doelstellingen te voldoen, hoewel men met zulke uitspraken de *well-to-wheel*-impact van dieselauto's negeert. Desalniettemin is een aanzienlijk deel van de nieuwe modellen voor personenauto's medio 2020 volledig elektrisch en stijgt het aantal beschikbare modellen heel sterk in de komende jaren. Dit weerspiegelt echter niet noodzakelijk de bezorgdheid van de auto-industrie voor

de toekomst van ons klimaat. In plaats daarvan heeft de laattijdige visie van Europa inzake elektromobiliteit de autoindustrie in een precaire situatie gebracht, waarin het misschien de 'elektrificatietrein' misloopt tenzij een grootschalige inhaalactie wordt ingezet. Dit wordt aangegeven door het marginale aandeel dat de Europese industrie vertegenwoordigt in de wereldwijde productie van batterijcapaciteit (4%), in tegenstelling tot de rol van Europa als marktleider in de productie van ICE-aandrijvingen. Zo verliezen Europese fabrikanten handenvol geld omdat ze motoren en 'batterijcellen moeten importeren van voornamelijk fabrikanten uit het Verre Oosten, waar de productieprocessen veelal een grotere impact hebben door de fossiele grondstoffen die wordt aangewend om elektriciteit op te wekken. Om dit tegen te gaan, is een groei in de Europese productiecapaciteit voor batterijen gepland van 4% van de wereldwijde productie in 2019 tot 11% in 2025, waarvoor miljarden euro's worden geïnvesteerd (Krukowska & Starn, 2019). Een ander probleem dat opdaagt bij het produceren van EV's is de tewerkstelling, gezien er driemaal minder werknemers nodig dan dat dit het geval is om een conventioneel voertuig te assembleren. Toch zal een grootschalige Europese batterijproductie ook tot extra jobcreatie leiden. Het contrast met China op het gebied van EV-productie is momenteel enorm, omdat de langetermijnvisie van het land voor mobiliteit onmiskenbaar duidelijk is, gezien de quota die ze oplegt voor duurzame voertuigen⁷, waarbij ICE-voertuigen op korte termijn geleidelijk af worden gebouwd.

De argumenten voor Europa zijn ongetwijfeld complexer, omdat de dominante ICE-industrie goed is ingebed in de verschillende lidstaten, alsook de weerstand om afstand te nemen van de verbrandingsmotor als een zeer sterk ontwikkeld product. Daarom schuift de industrie onder meer biobrandstoffen naar voor in een prominente rol voor de toekomst. Een kritisch aspect van biobrandstoffen, hiervoor reeds aangehaald, dat aanvankelijk over het hoofd werd gezien is echter hun potentiële impact wanneer we deze bekijken over hun hele levenscyclus. Vandaag zijn biobrandstoffen bijna volledig gebaseerd op voedselgewassen (zogenaamde 'eerste generatie' biobrandstoffen), waarvan meer dan de helft buiten Europa wordt geteeld. Dit genereert indirecte veranderingen in landgebruik (*indirect land-use change*, ILUC), waardoor onder meer ongerepte wouden plaats moeten maken voor akker- en weiland. Hiermee gaat belangrijke koolstofopslagcapaciteit verloren, waardoor er meer CO₂ blijft hangen in onze atmosfeer. Vanwege de overheersing van eerste generatie biobrandstoffen berekende men dat de helft van de mix ervan naar verwachting de CO₂-uitstoot van fossiele brandstoffen in 2020 overtreft⁸. Dus in plaats van de bestaande ICE-vloot duurzamer te maken, gebeurt het tegenovergestelde. Een valabel alternatief zijn dus biobrandstoffen van de tweede generatie, waarbij men vertrekt vanuit biologische afvalstromen en in een later stadium zelfs algen en bacteriën. Deze worden echter op een dubieuze manier gestimuleerd omdat er onvoldoende beschikbare afvalstromen kunnen worden gegenereerd en ze beroepen op - en afhangen van - hernieuwbare reststroom. Ondanks de circulaire koolstofcyclus van algenolie en synthetische brandstoffen, een tweede vorm van geavanceerde biobrandstoffen, zullen ze in realiteit hooguit de CO₂-bijdrage door transport op een constant niveau houden, in plaats van de totalen te verlagen. Dit omdat

⁷ Zie ook <https://theicct.org/publications/china-announced-2019-subsidies-new-energy-vehicles>

⁸ Zie https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/Final%20Report_GLOBIOM_publication.pdf

het eeuwen duurt voordat koolstof in de atmosfeer wordt afgebroken, waardoor we *koolstofopslag* (*carbon sinks*) moeten creëren in plaats van te streven naar een evenwicht. Bovendien houden biobrandstoffen de behoefte aan verbrandingsmotoren in leven en negeren ze de impact op de lokale luchtkwaliteitsniveaus. In dit opzicht zijn er geen biobrandstoffen die effectief bijdragen aan het koolstofarm maken van onze samenleving, omdat ze allemaal in conventionele motoren worden verbrand die bovendien ontzettend inefficiënt zijn/blijven.

In navolging van de CO₂-doelstelling voor personenauto's in 2020 is hybridisatie van conventionele aandrijflijnen de laatste levenslijn voor fabrikanten om de 'levensduur' van een goedkope verbrandingsmotortecnologie te verlengen, omdat het productieproces ervan perfect beheerst wordt. Terwijl momenteel voor ICE's een piekrendement van ongeveer 40% haalbaar is, streeft de automobiellindustrie naar een langetermijnsefficiëntie van 50%, terwijl door elektrificatie verdere verbeteringen aan de aandrijflijn kunnen worden bereikt. De ambities van de industrie kunnen niettemin abrupt gewijzigd worden door politieke keuzes, aangezien overheden in heel Europa de geleidelijke uitfasering van verbrandingsmotoren bespreken, in navolging van hun steden. Dit bedreigt de ambities van autofabrikanten om verder te investeren in ICE-technologie, omdat er geen zekerheid is over een rendement op de investering. Anderzijds zouden dergelijke signalen van overheden kunnen dienen als katalysatoren voor investeringen en ontwikkeling van zero-emissietechnologie.

Ondertussen wordt er hard gewerkt aan batterijtechnologieën die aan de duurzaamheidstoets voldoen. Hierin speelt voornamelijk het aandeel kobalt een rol, gezien dit een grondstof is die vaak op een onethische manier wordt ontgonnen en bovendien niet altijd traceerbaar is tot aan de bron. Gestimuleerd door een volatiele kobaltprijs, die verwacht wordt nog verder te stijgen naarmate een regelgevend kader wordt uitgewerkt voor diens ontginning en de toepassing ervan op wereldschaal, zoeken batterijproducenten naar nieuwe samenstellingen waarbij de hoeveelheid kobalt zoveel mogelijk kan worden gereduceerd. Een ander objectief is om batterijen zo performant mogelijk te maken door hun energie- en vermogensdichtheid te vergroten. Zo kan er met een kleiner batterijpakket verder gereden worden. Zogenaamde *solid-state* batterijen beloven binnenkort een grote stap in deze richting te zijn. Ook qua brandveiligheid zullen deze een belangrijke innovatie zijn, al kunnen we met zekerheid stellen dat de batterijen in de huidige generatie elektrische voertuigen dusdanig beveiligd zijn dat het brandgevaar tot een minimum herleid is. Het zijn echter enkele gevallen van uitgebrande EV's die het nieuws halen, terwijl er wekelijks meerdere conventionele voertuigen in vlammen opgaan waar nauwelijks nog aandacht aan wordt geschonken. Qua aanbod verwachten we in de komende vijf jaar een verviervoudiging van het aantal elektrische automodellen op de Europese markt, komende van een 40-tal keuzes in 2019. Ook op vlak van betaalbaarheid staan we voor een kantelpunt, gezien de prijzen van batterijen het laatste decennium gekelderd zijn, zowel door het opdrijven van de productie ervan (schaalvoordeel) als het verbeteren van het productieproces. Experts verwachten dat het aandeel van de batterij in het totale kostenplaatje van een elektrisch voertuig tegen 2024 dusdanig klein zal worden zijn, dat de productiekost van een gemiddeld elektrisch voertuig lager zal komen te liggen dan die voor een gelijkwaardig model met een benzinemotor (Curry, 2017; Henze, 2019; Soulopoulos, 2017). Deze richtdatum, 2024, is in feite al een bijstelling van een eerdere inschatting uit 2017 waarbij men uitging van een kantelpunt in het jaar 2026. Van zodra elektrische voertuigen betaalbaar worden kunnen we

ons verwachten aan een grootschalige marktadoptie, hetgeen ten goede zal komen van een verdere verlaging van de productiekost van de batterij. Zo kan ook in andere transportsectoren makkelijker de overstap naar een doorgedreven elektrificatie kan plaatsvinden, bijvoorbeeld in het zware vervoer.

Intussen zetten de grote autobouwers hun onderzoek naar waterstofaandrijvingen verder, al blijft het afwachten of zij verder zullen geraken dan het aantonen van technologische haalbaarheid. De achilleshiel van een toepassing van de technologie in het wegverkeer blijft namelijk de afwezigheid van tankinfrastructuur, terwijl de productie van waterstof vandaag nog verre van duurzaam is. Deze verduurzaming vraagt om hernieuwbare elektriciteit die wordt toegepast voor de elektrolyse van water. Voor personenwagens kan terecht de afweging gemaakt worden waarom die elektriciteit niet rechtstreeks in batterij-elektrische voertuigen wordt geladen in plaats van via veel inefficiënte omwegen een brandstof te maken die op zijn beurt op een inefficiënte wijze (aan een rendement van zo'n 40%) wordt omgezet in bewegingsenergie. Voor subsectoren zoals het zwaar transport, waar batterijen (nog) geen ideale toepassing kennen komt waterstof dan weer wel in beeld, hoewel we hier evenwel duurzame biobrandstoffen kunnen aanwenden om zo de beschikbare groene waterstof te kunnen inzetten in de industrie, de scheep- en/of luchtvaart.

2.4. Overzicht en vooruitzichten tank- en laadinfrastructuur

In deze sectie wordt een samenvatting gegeven van een ruimere bespreking achteraan dit rapport in de appendix. Voor meer informatie; zie p. 175 en verder.

Een overgang van een conventionele aandrijving op benzine of diesel in een verbrandingsmotor naar een alternatief hiervoor vraagt eveneens om een aanpassing van hoe we de nieuwe energievectoren kunnen linken aan de krachtbron. Wanneer we de verbrandingsmotor behouden en simpelweg de brandstof wijzigen blijft de impact beperkt. Biobrandstoffen als ethanol of biodiesel, die vandaag al respectievelijk 10% en 7% uitmaken van de conventionele brandstoffen die in België worden getankt, vragen geen aanpassingen aan het netwerk van tankstations. Hetzelfde geldt voor synthetische brandstoffen, gezien zij als eindproduct nagenoeg identiek zijn aan conventionele, fossiele brandstoffen. Enkel de wijze waarop ze geproduceerd worden is hier dus verschillend. Een overstap op gasvormige brandstoffen, zoals aardgas (CNG voor personenwagens, LNG voor zwaar vervoer) of waterstof vragen dan wel enige aanpassing. CNG-stations zijn voorhanden op een redelijke schaal, alhoewel dit er voor het Brussels Hoofdstedelijk Gewest voorlopig slechts 4 zijn⁹. Zulke stations worden meestal aangesloten op de grotere vertakkingen van het nationale aardgasnetwerk. Voor waterstofstations is dit echter anders, gezien hier (nog) geen centraal netwerk voor aanwezig is en de vraag kan worden gesteld of dit er ooit zal komen. Waar er in bepaalde (pro-waterstof) kringen wordt geopperd om het bestaande aardgasnet om te bouwen zodat het compatibel kan gemaakt worden aan de

⁹ Zie <http://cngeurope.com/countries/belgium/>

veiligheidsvoorschriften voor waterstof, blijven we spreken over een gigantische investering. Bovendien vraagt de ondermaatse totaalefficiëntie van een waterstofvoertuig, gezien van *well-to-wheel* (of van (waterstof)bron tot omzetting in de verbrandingsmotor/brandstofcel), drie- tot viermaal méér energie dan wanneer we hernieuwbare stroom rechtstreeks in een batterij-elektrisch voertuig zouden laden. Gezien de kosten voor de productie van een batterij al dusdanig zijn gekelderd sinds 2010, is waterstof voor de meeste personenwagensegmenten een te dure technologie geworden. Enkel in het topsegment zou ze nog kunnen worden toegepast, gezien de productiekost hier minder van belang is. Toch steken nu ook grote autoconstructeurs als Daimler de technologie in de koelkast¹⁰ voor een toepassing ervan in personenwagens. Concurrenten als BMW beloven dan weer om op korte termijn de technologie te integreren in hun i-reeks, hetgeen erop wijst dat er geen consensus bestaat over de toekomst ervan voor personenwagens.

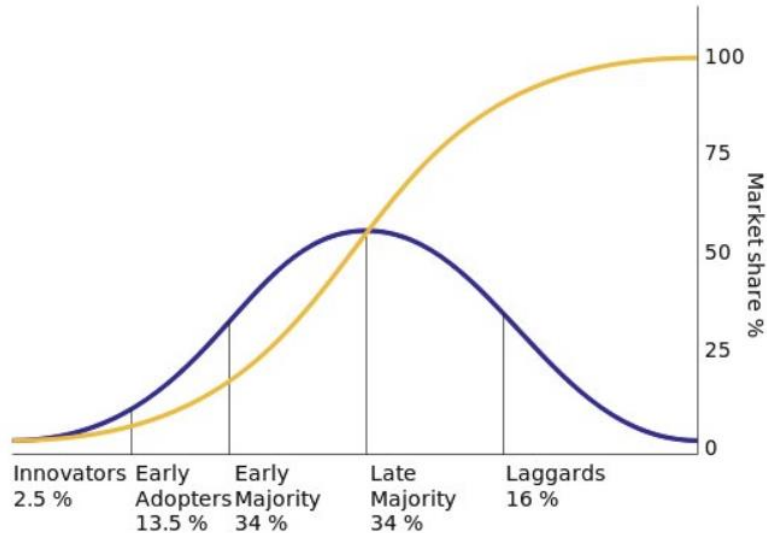
Voor andere voertuigen dan personenwagens is waterstof echter wel een valabel antwoord op de duurzaamheidstransitie waarvoor we staan. Denk hierbij aan lange-afstandstransport over de weg (hoewel ook hier elektrificatie een oplossing kan worden naarmate de batterijen performanter en goedkoper worden), binnenscheepvaart, lucht- en zeevaart. Korte-afstandstransport, zogenaamde '*last-mile deliveries*', behoort niet toe aan deze groep gezien hier, net als voor personenwagens, doorgedreven elektrificatie zowel technisch als economisch haalbaar is.

Batterijtechnologie is voorlopig in absolute cijfers nog marginaal vertegenwoordigd, hoewel de jaarverkoopscijfers voor 2019 in de meeste Europese lidstaten een substantiële toename laten optekenen ten opzichte van het jaar ervoor. Zoals iedere innovatie, denk bijvoorbeeld aan de smartphone, ondergaat ook het elektrisch voertuig de marktdynamiek volgens Rogers et al. (Rogers, 2003). Figuur 7 toont zijn principe van marktadoptie dat een verloop kent dat overeenkomt met een s-curve. In België situeren we ons anno 2020 (H1) qua verkoopscijfers voor elektrische voertuigen nog in het eerste segment (voor Brussel waren dit er 2.231 in 2019). De eerste eigenaars die elektrisch rijden klasseren we dus nog als 'innovators' of 'pioniers'. In termen van publieke oplaadmogelijkheden voor deze gebruikers kunnen we stellen dat we nog heel even veilig zitten met de grofweg 3.000 laadpunten¹¹ die doorheen België zijn geïnstalleerd. In Brussel alleen telde Engie in september 2020 350 laadpunten, al is dit een combinatie van zowel publieke als private punten. Deze pioniers beschikken immers veelal over een eigen garage of parkeerplaats waar ze hun voertuig kunnen opladen. Een derde van deze Belgische gebruikers laadt hun voertuig grotendeels thuis op aan het lichtstroomnet via een stopcontact (mode 2), terwijl vier op de tien nooit publiek laadt, zoals we zien in Figuur 8 (Powerdale/VUB, 2019). Het is echter wanneer elektrische voertuigen door een groot deel van de consumentenmarkt worden aangekocht dat de beschikbaarheid van laadinfrastructuur problematisch kan worden. Gezien een verviervoudiging van het aantal EV-modellen wordt voorspeld in de komende vijf jaar, is het ook aannemelijk dat de markt hierop zal inspelen en het aandeel EV's in de verkoopscijfers voor personenwagens gevoelig zal toenemen. Laadpaalproducenten spelen in op dit aanvoelen door residentiële laadoplossingen aan te bieden, terwijl netbeheerders nadenken over welke punten

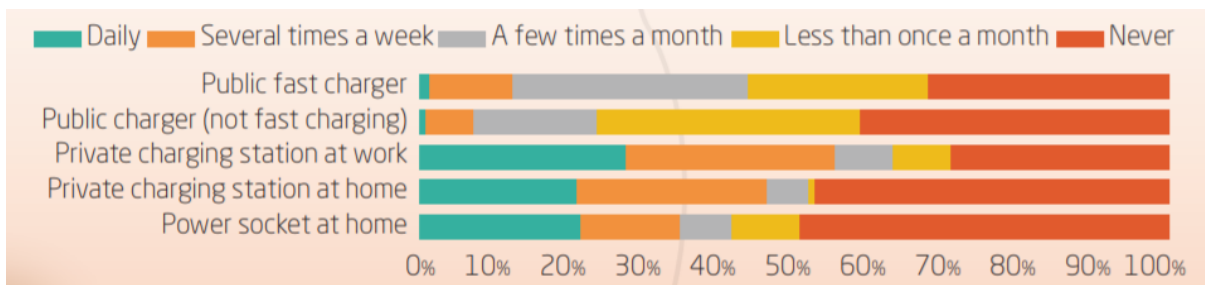
¹⁰ Zie <https://europe.autonews.com/automakers/daimler-will-end-development-fuel-cell-cars>

¹¹ Zie <https://www.tijd.be/ondernemen/auto/10-000-laadpalen-in-belgie/10107810.html>

strategisch van belang kunnen zijn voor het plaatsen van een publiek laadpunt. Dit is niet onbelangrijk, gezien een groepering van laadpunten of snellaadpunten een belangrijke impact kan hebben op het lokale stroomnet. In wat volgt van deze samenvatting wordt een overzicht gegeven van de verschillende laadmogelijkheden en hoe we ze kunnen onderscheiden.



Figuur 7 – Marktadoptiecurve volgens Rogers (Mahmassani, 2016)



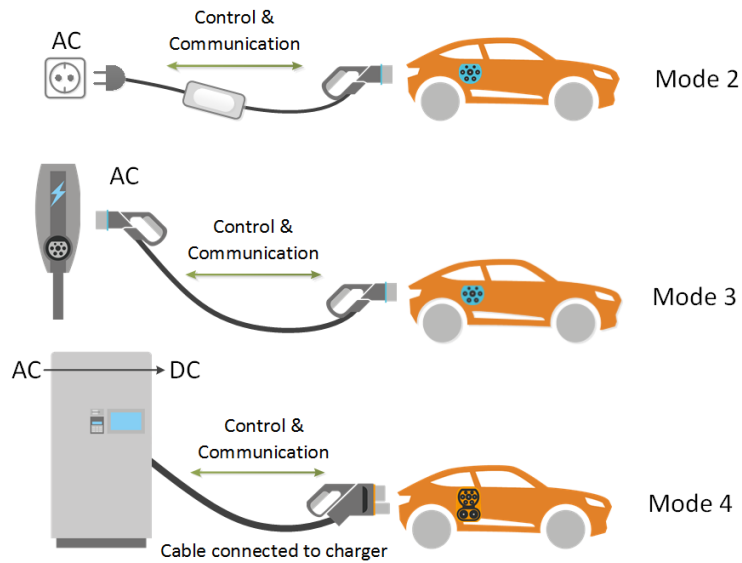
Figuur 8 – Laadgedrag van de Belgische EV-rijder (Powerdale/VUB, 2019)

Zo onderscheiden we residentiële van (semi-)publieke laadstations. Thuis laden kan zowel in een conventioneel stopcontact dat verbonden is aan het lichtstroomnet als via een specifieke laadinstallatie die werkt aan een hogere stroomsterkte. Dit laatste geval vereist wel dat er een grotere stroomsterkte dan de gebruikelijke 16A aanwezig is in de woonst of een ombouwing ervan door de netbeheerder. Beide laadoplossingen vragen geen ingewikkelde technologie gezien er geen identificatie of meting van de verbruikte stroom mee gepaard gaat. Voor (semi-)publieke laadpunten is dit veelal wel het geval, tenzij de lading gratis wordt aangeboden (bijvoorbeeld op de parking van een supermarkt). Afhankelijk van de beschikbare stroomsterkte spreekt men van semi-snelle, snelle en supersnelle laadpunten. In Tabel 4 wordt een overzicht gegeven van de verschillende laadmodi en wat hen typeert. Merk op dat Onderzoek & Ontwikkeling (O&O) zich voornamelijk toespitst op het snelladen, opdat laadtijden zoveel mogelijk kunnen worden gereduceerd tot iets wat in de buurt komt van de duur van een tankbeurt met

een conventioneel benzine-/dieselveertuig. Niet alle batterijtypes kunnen echter zulke hoge stromen aan, hetgeen ook geldt voor het lokale stroomnet.

Tabel 4 – Overzicht laadmodi

Laadmodus	Beschrijving	Opmerking
Modus 2	Huishoudelijk stroomnet mits specifieke kabel met ingebouwde beveiliging	Meest eenvoudige oplaadmodus waarbij aangesloten wordt op een huishoudelijk stopcontact, zij het met een beveiliging die tussen de auto en de stroomkring wordt geplaatst. Zo beschikt de kabel over een 'In-Cable Control Box' (ICCB) bestaande uit een stroomonderbreker en een aardlekschakelaar om de veiligheid te waarborgen. Dit is de traagste manier van opladen, gezien de lage stroomsterkte die beschikbaar is in huishoudelijke situaties (vaak beperkt tot 10A). Met opladen in modus 2 is een laadsnelheid van 2,3 kW per uur mogelijk.
Modus 3	Specifieke aansluiting op een daarvoor voorzien stroomnetwerk	Modus 3 maakt een hoger laadvermogen mogelijk, variërend van 3,7 kW tot 22 kW, afhankelijk van het beschikbare stroomnetwerk. Het maakt gebruik van een laadstation of 'wall box' waarin alle soorten beveiligingsapparatuur zijn voorzien. Modus 3 laadstations hebben een conventionele verbindingsstekker, d.w.z. de 'Mennekes Type 2'
Modus 4	Gelijkstroom-verbinding voor snelladen	Dit is de snelste modus voor opladen en wordt gebruikt in snelladers die vermogens van 50 kW en hoger kunnen leveren. Afhankelijk van de batterijgrootte van een EV, kan deze in relatief korte tijd worden opgeladen (vanaf een half uur). Opladen met het hoogste vermogen vereist een ChaDeMo of CCS2-connector



Figuur 9 – Grafisch overzicht van de laadmodi (TU Delft)

Waar verder nog onderzoek naar wordt gedaan is hoe elektrische voertuigen actief kunnen worden ingezet in de stroomproductie- en levering. Hiervoor is de mogelijkheid vereist dat het voertuig niet alleen stroom uit het net kan onttrekken, maar er ook weer stroom op kan injecteren wanneer hier vraag naar is. Hier spreken we over zogenaamde ‘*vehicle-to-grid*’ of V2G technologie. Deze is veelbelovend omdat, indien er veel EV’s verbonden zijn aan het stroomnet, deze als buffer kunnen werken in het stroomproductieplan. Zo kan de verzamelde capaciteit van deze voertuigen worden aangesproken wanneer het stroomnet in onbalans is, wanneer er een plotse piek is in de stroomvraag of op het moment van de dag dat de stroomvraag doorgaans het grootste is. Vandaag worden in deze gevallen veelal milieubelastende energiebronnen aangesproken zoals gasturbines en in het slechtste geval steenkool- of oliecentrales, gezien deze op korte tijd aan- en uitgeschakeld kunnen worden. Voor de EV-eigenaar vormt het inspelen op de behoefte van de markt een interessant verdienmodel, al zal de impact van het frequenter laden en ontladen van het batterijpakket op de levensduur ervan nog via grootschalig onderzoek moeten aangetoond worden. De huidige batterijtechnologie is nochtans ontworpen om een equivalent van ongeveer 250.000 km¹² af te leggen, hetgeen voor veel voertuigen ruimschoots volstaat gezien ze dikwijls met een lagere kilometerage worden gesloopt aan het einde van hun leven. Vandaag zijn zulke bi-directionele laadinstallaties nog niet commercieel beschikbaar in België, maar kan men wel al aan ‘*smart-charging*’ doen met een conventionele éénrichtingslader. Dit houdt in dat de auto pas gaat laden wanneer de vraag naar stroom het laagste is, bijvoorbeeld tussen middernacht en vijf uur ’s ochtends. Zo’n manier van gecontroleerd laden is de weg die met z’n allen moeten inslaan, willen we voorkomen dat het bestaande stroomnet te veel wordt belast wanneer we massaal op hetzelfde moment ons elektrisch voertuig willen opladen. Energieregulator CREG berekende in 2017 dat we ons hiervoor nog geen zorgen moeten maken indien er een miljoen EV’s zouden rondrijden in België. Een ongecontroleerd laden van deze vloot zou namelijk slechts een extra belasting op het stroomnet van 4% betekenen, hetgeen geen risico vormt. Door al deze voertuigen gecontroleerd te gaan laden, kunnen

¹² Toyota gaat hier verder in door voor haar PROACE Electric model een batterijgarantie tot 15 jaar of 1.000.000 km te bieden

we met het huidige netwerk zelfs twee miljoen EV's aan. Het is echter zo dat wanneer we met nagenoeg heel de Belgische personenwagenvloot van meer dan vijf miljoen wagens de overstap naar 100% elektrisch maken, dat het stroomnet met 20% extra belast wordt. Zo'n situatie verwachten we echter nog niet in het komende decennium, waardoor ook de elektriciteitssector de nodige tijd krijgt om zich hiervoor te wapenen. Zo zal er steeds meer hernieuwbare stroomcapaciteit bijkomen, waarvoor opslag in EV's via V2G heel interessant kan zijn.

Naast de conventionele manier van laden via een kabel, het zogenaamde 'conductieve' laden, bestaan er ook alternatieven. Zo onderscheiden we pantograafladen, hetgeen identiek is aan hoe trams zich verbinden met het bovengrondse stroomnet. Voor personenwagens zien we deze toepassing niet doorbreken, maar een heropleving hiervan voor bijvoorbeeld vrachtwagens en bussen dan weer wel. In een stedelijke omgeving verlenen de bovenleidingen van trams zich ertoe dat een (hybride) elektrische bus zich emissievrij kan bewegen. Zo wordt er in Zuid-Yorkshire (V.K) een 'eHighway' proefproject opgestart met bovengrondse stroomleidingen voor vrachtwagens, waarbij 40 km snelweg wordt voorzien van de nodige hardware¹³. Ook in Duitsland (zie Figuur 10) en Zweden zijn zulke proeftrajecten in dienst. Afhankelijk van de beschikbare stroomsterkte kunnen ook stationaire pantograafstations dienen als snellaadstations. Zo zijn er modulaire systemen op de markt waarbij in blokken van 150 kW een laadstation kan worden opgebouwd. Ter vergelijking werken de meest krachtige snellaadstations voor personenwagens aan een stroomsterkte van zo'n 150 kW (bijvoorbeeld de laatste generatie Tesla 'super-chargers'), terwijl er voor bussen en vrachtwagens stroomsterktes tot 450 kW kunnen worden ingezet. Dit vraagt echter belangrijke aanpassingen aan het lokale stroomnet gezien zulke installaties spanningsniveau's tot 900 V vereisen. In voornamelijk Scandinavische steden als Göthenburg past men pantograafstations toe in de onmiddellijke nabijheid van een bushokje, zodat de bus die de halthoudt in zeer korte tijd haar batterijpakket kan bijladen. Een voorbeeld hiervan zien we in Figuur 11.



Figuur 10: Een eHighway proeftraject in Duitsland (bron: Siemens)

¹³ <https://electricalreview.co.uk/think-tank-proposes-railway-style-catenary-lines-to-power-electric-trucks/>



Figuur 11 – Een pantograafsnellaadstation voor bussen in Göthenburg (Volvo)

Waar we bij pantografen nog steeds gebruik maken van een fysieke connectie tussen de batterij en het stroomnet, bestaat ook de mogelijkheid om draadloos te laden. Hier spreken we over inductief laden. Inductie vindt plaats tussen twee spoelen en is in het dagelijks leven ingeburgerd door o.m. elektrische tandenborstels. In het geval van een voertuig bevindt de ene spoel die verbonden is met het stroomnet zich ofwel op de grond of wel erin, terwijl de andere spoel verbonden is aan het voertuig. Deze manier van laden is qua gebruiksvriendelijkheid het makkelijkste om toe te passen, gezien er niet meer moet gesleurd worden met kabels. In de praktijk ondervindt men echter nog redelijk wat problemen met deze techniek, bijvoorbeeld omdat de twee spoelen goed ten opzichte van elkaar moeten gepositioneerd worden om een efficiënte stroomoverdracht te laten plaatsvinden. Desalniettemin is inductie een belangrijke piste die naar voor geschoven wordt, ondanks het feit dat de technologie nu nog duur is. Toch is het statische inductief laden intussen reeds goed onderzocht en zijn er veel spelers op de markt om op korte termijn met laadoplossingen op de proppen te komen. Dit wordt mede vergemakkelijkt door de standaarden die zijn ontwikkeld om het laadproces veilig te laten verlopen. Voor wat betreft dynamisch laden tijdens het rijden zelf, kijken we eerder richting 2050 dan naar 2030, voornamelijk gezien de kost en de praktische realisatie van een wegdek dat het laden faciliteert en de impact ervan op het stroomnetwerk.

Waar de mogelijkheden om thuis uni-directioneel te laden goed zijn uitgewerkt, verwachten we in de komende jaren een intrede van bi-directioneel laden. Deze technologie wordt intussen al bijna 10 jaar toegepast in Japan, waar Nissan haar elektrische voertuigen voorzag van deze functionaliteit om, na de kernramp in Fukushima, in te kunnen staan voor een kortstondige overname van de stroomproductie in huizen en andere gebouwen. In Europa gaat het voorlopig nog om proefprojecten, terwijl merken zoals onder meer Nissan, Honda, Tesla en Audi zich klaarstomen voor een grootschalige uitrol van de technologie in hun voertuigen.

Voor wat betreft snelladers wordt er onderzoek gedaan naar steeds hogere stroomsterktes, en dus kortere laadtijden. Waar Tesla de geleverde stroomsterkte door haar *Super Charger*-netwerk begrenst tot 120 kW (maar 150 kW mogelijk is), werken andere constructeurs aan mogelijkheden om aan 250 kW en meer te kunnen laden. Een belangrijke piste die daarvoor wordt onderzocht is om de nominale

batterijspanning van 400V te verhogen naar 800V, zoals Porsche en Kia dat momenteel doen. Door deze verdubbeling van de spanning kunnen de batterijen ook hogere stroomsterktes aan, waardoor zelfs de heel hoge batterijcapaciteiten (denk aan 100 kWh-batterijpakketten) in enkele tientallen minuten nagenoeg volgeladen kunnen worden. Zulke technologie komt echter met een hoog prijskaartje, waardoor we 800V batterijen voornamelijk bij de *top-end* voertuigmodellen zullen terugvinden. Hoge laadstromen en –vermogens zullen bovendien nodig zijn wanneer ook vrachtwagens (denk aan 1.000 kWh-batterijpakketten) elektrisch gaan rijden. Daarom dat er vandaag al modulaire snelladers bestaan voor vrachtwagens en bussen waarmee men aan vermogens tot 450 kW kan laden.

2.5. Conclusie

De Europese Commissie probeert de sector van het wegvervoer te verbeteren door CO₂-emissiedoelstellingen op te leggen voor de verschillende voertuigcategorieën. Voor personenwagens geldt de doelstelling van 95 g/km¹⁴ tegen 2021 en (voorlopig) een verdere reductie van 37,5% in 2030 ten opzichte van de situatie in 2021. Voor lichte bedrijfsvoertuigen wordt tegen 2021 een CO₂-reductiedoelstellingen opgelegd van 147 g/km¹ en (voorlopig) een verdere reductie van 31% tegen 2030 ten opzichte van de situatie 2021. In de zware transportsector streeft men een allereerste CO₂-reductie van een bescheiden 15%¹⁵ na tegen 2025, vergeleken met de situatie in 2019. Deze doelstellingen voor vrachtwagens kunnen grotendeels bereikt worden door verbeteringen van aerodynamische eigenschappen. Echter, voor personen- en lichte bedrijfsvoertuigen zal elektrificatie de voornaamste stap zijn om het beoogde doel te bereiken.

Om de marktpenetratie van elektrische voertuigen te stimuleren, hanteert de Europese Commissie twee mechanismen: het systeem van superkredietfactoren en de versoepeling van de reductiefactor voor 2025 en 2030 via de *zero-and-low-emission vehicle* (ZLEV) factor. Deze mechanismen dienen als hefboom om constructeurs te doen investeren in elektrische aandrijflijnen, hetgeen beloond wordt via de berekening van het gewogen gemiddelde van de CO₂ uitstoot van hun verkochte voertuigen.

Gezien de ambitie om halverwege deze eeuw CO₂-neutraal te worden volgens het klimaatakkoord van Parijs, moet de stimulering van de alternatieven voor benzine en diesel (en verbrandingsmotoren in het algemeen) in een hogere versnelling worden geschakeld. Deze langetermijndoelstelling vereist proactieve regelgeving om de marktintroductie van alternatieven te verbeteren, terwijl begeleiding wordt geboden voor de geleidelijke uitfasering van conventionele technologieën op de middellange termijn, d.w.z. tegen 2030-35.

¹⁴ Zie Verordening (EU) 2019/631 (...) tot vaststelling van CO₂-emissienormen voor nieuwe personenauto's en nieuwe lichte bedrijfsvoertuigen, en tot intrekking van Verordeningen (EG) nr. 443/2009 en (EU) nr. 510/2011

¹⁵ Zie Verordening (EU) 2019/1242 (...) tot vaststelling van CO₂-emissienormen voor nieuwe zware bedrijfsvoertuigen en tot wijziging van Verordeningen (EG) nr. 595/2009 en (EU) 2018/956 van het Europees Parlement en de Raad en Richtlijn 96/53/EG van de Raad

Doordat Europa een dominante autoindustrie heeft welke is gebaseerd op de sterk ontwikkelde verbrandingsmotor, worden biobrandstoffen naar voren geschoven als mogelijke oplossing. Het risico van zowel 1ste als 2de generatie biobrandstoffen bestaat echter dat ze de *tank-to-wheel* CO₂-uitstoot door wegtransport op eenzelfde niveau houden, terwijl ten opzichte van een *well-to-tank* benadering een uitrol van 1ste^e generatie biobrandstoffen ertoe zou kunnen leiden dat de impact van fossiele brandstoffen wordt overschreden. Ook blijven deze brandstoffen de energievectoren van inefficiënte verbrandingsmotoren die de lokale luchtkwaliteit impacteren.

Voertuigen op waterstofgas en synthetische brandstoffen, die opgewekt worden door hernieuwbare elektriciteit, worden door de Europese Commissie als alternatieven gezien, al zijn ze veel minder energie-efficiënt dan batterij elektrische voertuigen die met diezelfde elektriciteit rechtstreeks geladen worden.

Om de 'levensduur' van een goedkope ICE-technologie zo lang mogelijk te rekken blijft de automobiellindustrie streven naar thermische rendementswinsten voor de verbrandingsmotor, terwijl verdere winsten voor conventionele voertuigen worden verwacht door verder te elektrificeren. Een uitgesproken uitfasering van conventionele verbrandingsmotoren kan de fabrikanten het signaal geven om meer te investeren en ontwikkelen van zero-emissietechnologie, al komen zulke signalen voorlopig enkel van steden en niet van de lidstaten zelf.

Ondertussen worden er stappen gezet om de batterijtechnologie te verbeteren door de samenstelling ervan te wijzigen zodat de hoeveelheden kobalt gereduceerd worden en om hun energie- en vermogensdichtheid te vergroten. *Solid-state* batterijen zouden binnen een aantal jaar een grote stap in deze richting zijn. Gezien deze voortgang en de forse daling in batterijprijzen tijdens het laatste decennium, wordt er verwacht dat elektrische voertuigen steeds betaalbaarder zullen worden. Waar er voor elektrische voertuigen momenteel nog een redelijk beperkt aanbod aan modellen bestaat, zal dit aantal in de komende vijf jaar verviervoudigen. Een waar kantelpunt wordt verwacht wanneer de combinatie van het opdrijven van de productie met de daling van de batterijkosten ervoor zal zorgen dat de productiekost van elektrische voertuigen onder die van een gelijkwaardig benzinevoertuig duikt, iets wat men tegen 2024 (of vroeger) verwacht.

Wat tank-en laadinfrastructuur betreft kunnen we stellen dat afhankelijk van de alternatieve voertuigtechnologie er andere aanpassingen aan de infrastructuur nodig zijn. Voor bio- of synthetische brandstoffen, zijn er geen aanpassingen aan het netwerk nodig. Voor aardgas moeten de stations aan het nationale aardgasnetwerk verbonden worden en voor waterstof moet zo'n gelijkaardig netwerk aangemaakt worden, wat zeer grote investeringen zou vereisen (€1-2 mio). Elektrische voertuigen zijn flexibeler op dat vlak. Er kan zowel publiek, op het werk als residentieel geladen worden. Eén derde van de Belgische EV--bezitter laadt voornamelijk thuis en 40% laadt nooit publiek. Echter blijft het belangrijk voor netwerkbeheerders om punten te identificeren die van strategisch belang zijn voor het publiek laadinfrastructuurnetwerk gezien de impact die de infrastructuur kan hebben op het stroomnet.

Hiernaast kan ook nagedacht worden hoe het elektrisch voertuig actief ingezet kan worden in de stroomproductie/-voorziening. Veelbelovend is de 'vehicle-to-grid' technologie, waarmee men PHEV's en BEV's zou toelaten om de stroomvraag op het net te helpen balanceren. Tegenwoordig worden hier milieubelastende energiebronnen voor gebruikt. Om de vraag naar energie af te vlakken kan de 'smart charging' technologie gebruikt worden, hetgeen vandaag al kan. Deze technologie zorgt dat de vraag naar energie van meerdere voertuigen pas wordt beantwoord op momenten dat de algemene stroomvraag laag is. Gebruikmakend van deze technologie kan het huidige Belgisch elektriciteitsnet tot 2 miljoen elektrische voertuigen aan, hoewel een verdere versterking van het elektriciteitsnet nodig zal zijn indien de volledige Belgische vloot om zou schakelen naar elektrische voertuigen. Zo'n transitie zal echter gespreid over de komende decennia gebeuren waardoor netwerkbeheerders de tijd hebben om de nodige versterkingen uit te voeren.

Er bestaan naast conductief laden, laden via een kabel, nog andere alternatieven, namelijk aan de hand van pantografen of contactloos (inductief laden). Pantografen zouden eerder voor bussen of vrachtwagens toegepast kunnen worden, eventueel ook als snellaadstation mits belangrijke aanpassingen aan het lokale stroomnet. Inductief laden is gemakkelijk toepasbaar voor de gebruiker maar in de praktijk is deze technologie nog duur en zijn er nog efficiëntieproblemen die weggewerkt dienen te worden.

3. LEVENSCYCLUSANALYSE: VERGELIJKING VAN TECHNOLOGIEËN OP VLAK VAN MILIEU-IMPACT

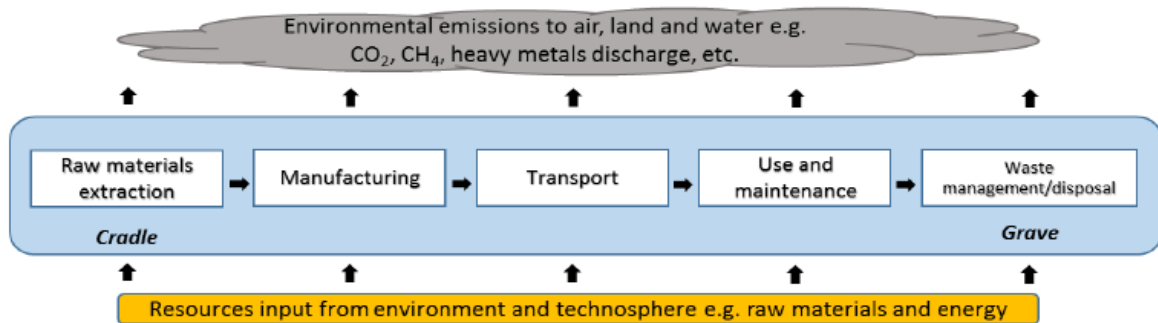
In het kader van de studie naar een uitfasering van dieselloze voertuigen binnen het Brussels Hoofdstedelijk Gewest vanaf 2030, en een uitfasering van benzinevarianten in 2035, richten we ons in dit hoofdstuk tot de milieu-impact van gemotoriseerde voertuigen. Op die manier proberen we aan te tonen waarom een “termische ban” gerechtvaardigd is, welke alternatieven er op korte tot middellange termijn (zullen) zijn en of deze daadwerkelijk tot een verbetering van de Brusselse luchtkwaliteit en van haar klimaatimpact zullen zorgen. Hiervoor baseren we ons op de levenscyclusanalyse (LCA) van gemotoriseerde voertuigen.

3.1. Introductie tot LCA

Het vergelijken van de milieuprestaties van verschillende voertuigtechnologieën vereist een gestandaardiseerde, wetenschappelijke methodologie gebaseerd op een uitgebreid 'systeemperspectief'. Doen we dit niet, dan kunnen de interpretaties van zulke analyses misleidend zijn. Als we bijvoorbeeld bij een vergelijking tussen alternatieve voertuigen, zoals een batterij-elektrisch, en een conventioneel benzinevoertuig alleen zouden kijken naar de emissies tijdens de gebruiksfase van het voertuig, dan spreekt deze vergelijking uitdrukkelijk in het voordeel van het alternatieve voertuig. Het bredere systeemperspectief omvat echter niet alleen de uitlaatemissies die verwijzen naar de gebruiksfase maar ook de emissies die plaatsvinden in de fase van de brandstofproductie en -toevoer, de productie van materialen en onderdelen, de assemblage van voertuigen, enz. Zelfs in de gebruiksfase zijn er niet-uitlaatemissies van fijnstof die verband houden met de slijtage van remmen, banden en het wegdek, welke moeten worden verantwoord bij het kwantificeren van de milieuprestaties van voertuigen.

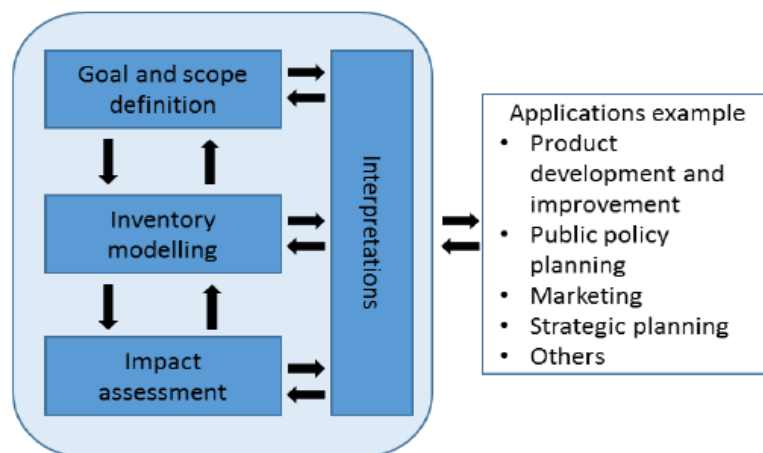
Levenscyclusanalyse (LCA) is zo'n instrument voor systeemanalyses om de mogelijke milieuprestaties en het verbruik van grondstoffen van/door een product, proces, systeem of dienst gedurende de hele levenscyclus te omvatten vanuit een *cradle-to-grave*-perspectief (European Commission for Standardization, 2009). Het concept van de levenscyclus van een product is eenvoudig voor te stellen. Het begint bij de "wie" (*cradle*) waar de ontginning van grondstoffen plaatsvindt, gaat verder via de productie en assemblage van de componenten, het transport ervan, het gebruik van het eindproduct en het onderhoud eraan. Tot slot wordt ook het afvalbeheer en de afvalverwijdering aan het einde van de levensduur of het "graf" (*grave*) in kaart gebracht. Op die manier worden alle levensfasen van een product verrekend op vlak van hun milieu-impact Volgens de ISO-normen verwijst de term "product" naar zowel goederen als diensten. Figuur 12 illustreert de stadia van de levenscyclus van een productsysteem en de interactie ervan met het milieu. Elke activiteit neemt grondstoffen, in de vorm van

materialen en energie, uit de natuur en de zogenaamde 'technosfeer' als *input*, en produceert producten/diensten in de *output* samen met de milieu-emissies naar lucht, land en water.



Figuur 12: Grafisch overzicht van de levenscyclusfasen van een product en diens interactie met de omgeving (Rangaraju, 2018)

Het unieke van een LCA is dat het een totaalaanpak biedt, die suboptimalisatie of lastenverschuiving (of in het vakjargon 'burden shifting') voorkomt. Dit laatste kan zich voordoen wanneer bijvoorbeeld slechts één of enkele fasen van de (onvolledige) levenscyclus in rekening worden genomen. Aangezien LCA het hele productsysteem van de wieg tot het graf bestudeert, voorkomt het dat de impact verschuift, bijvoorbeeld van de ene geografische regio naar de andere, van de ene levenscyclusfase naar de andere, of van de ene milieuproblematiek naar de andere (Finnveden et al., 2009). LCA-studies omvatten verschillende taken zoals het identificeren en begrijpen van de technische systemen, het verzamelen van gegevens over energie- en grondstoffenverbruik, het analyseren van verschillende milieugegevens, enz. In de praktijk kost het veel moeite en tijd om een LCA grondig uit te voeren. Desalniettemin varieert het detailniveau en de hoeveelheid tijd die nodig is om een LCA uit te voeren in grote mate van de ene studie tot de andere, afhankelijk van het doel en de omvang ervan. ISO 14040 definieert LCA aan de hand van de vier volgende stappen voor het uitvoeren van een LCA-studie. Figuur 13 toont het typische LCA-kader en de directe toepassingen ervan volgens de ISO-normen.



Figuur 13: Het kader voor LCA en de directe toepassingen ervan (Rangaraju, 2018)

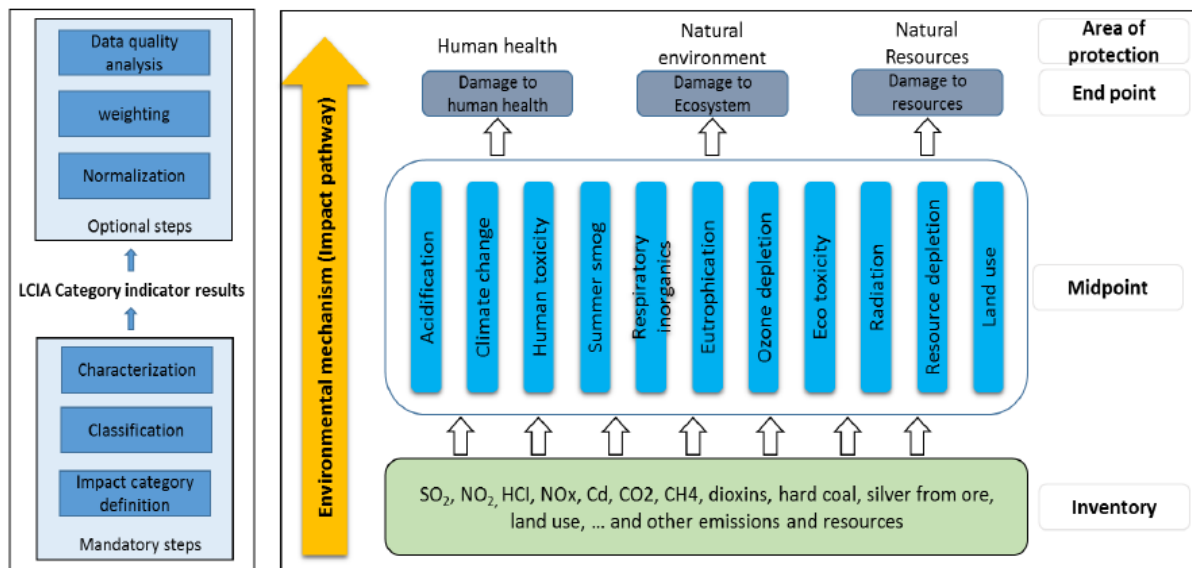
In een eerste stap moeten we een doel en de omvang van de beoordeling (scope) definiëren. Dit gaat samen met het bepalen van een functionele eenheid, die de functionaliteit of het product dat het systeem levert beschrijft, evenals de systeemgrenzen. De functionele eenheid geeft een referentie waarop de in- en uitvoergegevens worden genormaliseerd en de basis voor de weergave van het resultaat. Voor het overzicht in dit specifieke werk is het ons doel om de milieubelasting voor verschillende aandrijflijnen en/of brandstoffen te vergelijken, waarbij we de impact per gereden kilometer als functionele eenheid nemen. Een systeemmodel toont typisch een geïllustreerd stroomdiagram van een technisch systeem met daarin alle milieurelevante activiteiten binnen de gedefinieerde systeemgrenzen (bijv. *cradle to gate* (i.e. de fabriekspoort) of *cradle to grave*, vergelijkbaar met wat we zien in Figuur 12). In het inventarisatieschema worden alle vanuit milieuoogpunt belangrijke stromen geïdentificeerd en opgesomd.

De tweede stap is het verzamelen van de in- en outputgegevens van alle activiteiten in het productsysteem in een zogenaamde levenscyclusinventarisatie (LCI). De verzamelde gegevens omvatten de input en output van eenheidsprocessen zoals de aankoop van grondstoffen, het productieproces, het gegenereerde afval en de emissie naar de bodem/lucht/water. Typisch bevat het resultaat van zo'n inventarisatie de hoeveelheden van verbruikte materialen en energie (bijv. 1 kg staal, 0,5 kg koper, 2 kWh elektriciteit, 1MJ diesel...) en de milieutechnische producten (bijv. 2 kg CO₂, 0,1 kg CH₄, etc.). Tot slot kwantificeren we het gebruik van grondstoffen en de milieu-emissie van het systeem in relatie tot de functionele eenheid. Inventarisatieresultaten worden meestal gepresenteerd in de vorm van grafieken of tabellen en uitgedrukt in hoeveelheden per functionele eenheid.

Vervolgens vindt een levenscyclusimpactanalyse (LCIA) plaats om de significante potentiële milieueffecten van de emissies te berekenen die uit de inventarisatie in de vorige stap worden gekwantificeerd. Optioneel kan er ook nog een normalisatie en weging doorgevoerd worden om de interpretatie te ondersteunen. De reden voor deze stap is om de ruwe inventarisgegevens om te zetten in begrijpbare en gemakkelijk overdraagbare milieu-informatie, d.w.z. informatie over de effecten in plaats van informatie over talrijke inputs en outputs van het systeem. In het algemeen worden de LCI-gegevens gekoppeld aan specifieke milieueffecten en categorie-indicatoren. Een categorie-indicator geeft de omvang van het potentiële effect weer. Figuur 14 laat zien hoe de resultaten van de inventarisatie worden omgezet in categorieën van midden- en eindpunteeffecten (i.e. *midpoints* en *endpoints*), samen met de impacttrajecten. De effectbeoordeling kan probleem- of schadegericht zijn, gebaseerd op het doel en de omvang.

Bij probleemgerichte beoordelingen stopt de kwantitatieve modellering in het midden van het effecttraject en worden de LCI-resultaten gekoppeld aan de *midpoint*-categorieën, die aparte milieueffecten voorstellen, bijvoorbeeld voortvloeiend uit klimaatverandering, verzuring, eutrofiëring, enz. Aan de andere kant wordt bij schadegerichte beoordelingen de oorzaak-gevolgketen tot aan de milieuschade of *endpoints* gemodelleerd. De drie *endpoints* zijn schade aan de volksgezondheid, uitputting van grondstoffen en milieuschade. Bij de normalisatie- en de wegingsstap worden deze eindpunten verder geaggregeerd tot één enkele score. Hierbij gaat echter behoorlijk wat nauwkeurigheid verloren, hetgeen we ook merken bij de benadering van *endpoint*- t.o.v.

midpointcategorieën. Om die reden proberen we zoveel mogelijk op het niveau van de *midpoints* te werken.



Figuur 14: Overzicht van de verplichte en optionele stappen in LCA (links) en het impactanalyseproces van inventarisatie tot mid- en endpointcategorieën (European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability, 2010)

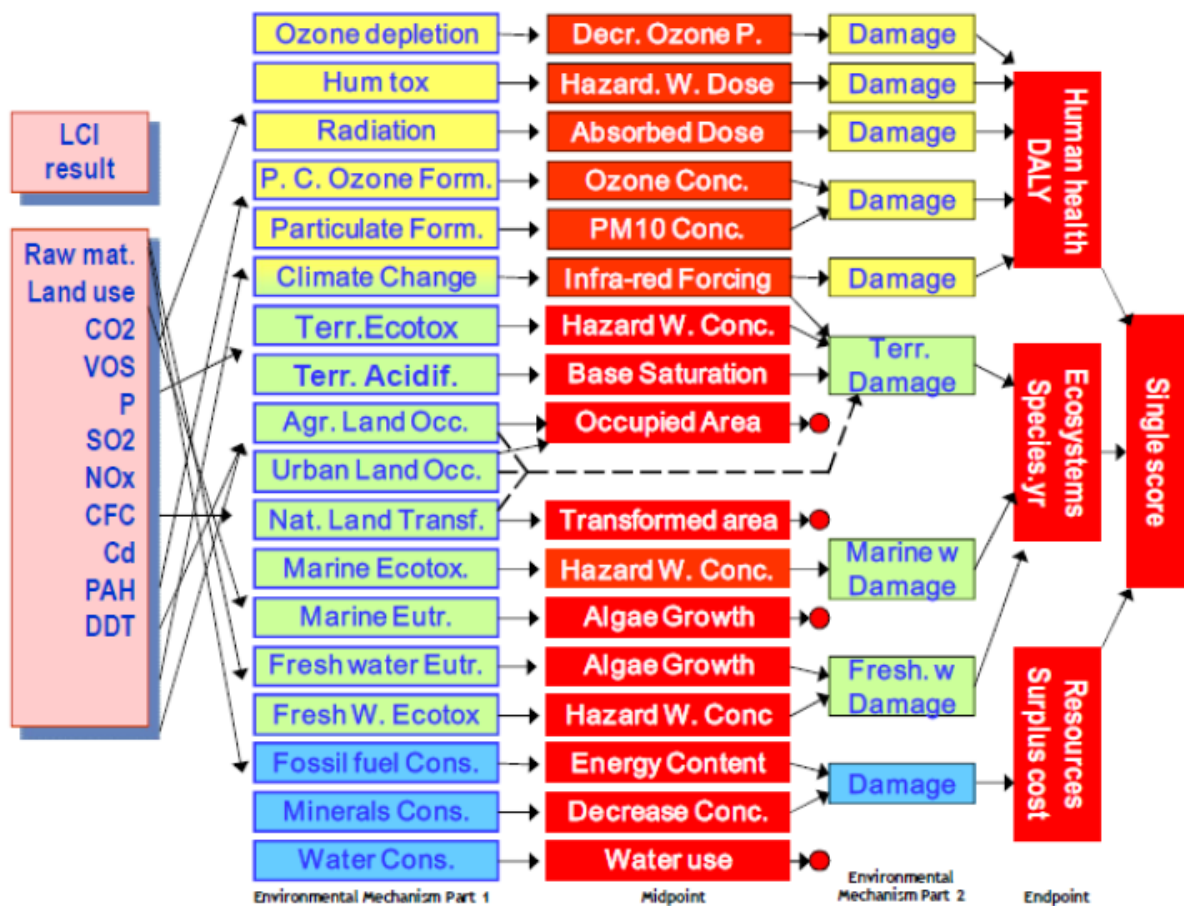
Een impactanalyse of effectbeoordeling wordt doorgaans in drie stappen uitgevoerd. De eerste stap is de classificatie, waarbij de resultaten van de inventarisatie worden gesorteerd in effectcategorieën die relevant en geschikt zijn voor het doel en de omvang van de studie. Dan volgt de karakteriseringsstap voor de berekening van de emissie en het gebruik van grondstoffen voor elke effectcategorie. Een voorbeeld hiervan is de omzetting van alle broeikasgasemissies naar CO₂-equivalenten en de optelling ervan tot één indicatorscore als "broeikaseffect". Er zijn veel kant-en-klare effectbeoordelingsmethoden beschikbaar voor gebruik. ReCiPe, Ecoindicator'99, CML 2001, IMPACT 2002+, EDIP, etc. zijn hier enkele van.

Een laatste stap is de interpretatie, waarbij we de resultaten van de studie en alle modelleringskeuzes en -aannames die tijdens de implementaties zijn gemaakt, evalueren op hun robuustheid en betrouwbaarheid, om zo tot een betere algemene conclusie te komen. Deze stap kan een aantal taken omvatten zoals een gevoeligheidsanalyse, bijdrageanalyse, de introductie van een alternatief, een onzekerheidsanalyse, het herzien van de LCI om gegevens te wijzigen, het analyseren van resultaten, het trekken van conclusies en het maken van aanbevelingen. Een van de belangrijkste doelstellingen van de interpretatie is het valideren van de inventarisatieanalyse en de effectbeoordeling ten opzichte van het vastgestelde doel en de omvang van de studie. Hoewel LCA een krachtig instrument is, heeft het ook enkele beperkingen. Aangezien de hele levenscyclus wordt geanalyseerd, is LCA misschien geen *locatiespecifieke* studie, hoewel het wel *productspecifiek* kan zijn. Het is dus mogelijk dat de milieueffecten niet op een zeer gedetailleerd niveau worden beoordeeld. Gewoonlijk komen economische en sociale aspecten in LCA niet in aanmerking, behalve wanneer de resultaten worden

gebruikt als een gemiddelde voor een weging. Ook het risico wordt niet behandeld in LCA (Klöpffer, 2006; Rangaraju, 2018)

3.2. Introductie tot ReCiPe – LCIA methodologie

Voor de studie die we in dit rapport voorstellen maakten we gebruik van de ReCiPe-methodologie voor de beoordeling van de levenscyclus van elektrische en andere voertuigtechnologieën. ReCiPe is een van de vele kant-en-klare methoden voor de impactanalyse binnen een LCA. Deze methode zet een grote hoeveelheid inventarisatiegegevens over de gehele levenscyclus om in betekenisvolle indicatorscores. Figuur 15 toont het milieumechanisme (d.w.z. hoe de emissies van de inventaris worden omgezet en geaggregeerd tot op eindpuntniveau) dat in ReCiPe gebruikt wordt om de interventies te koppelen aan de geselecteerde beschermingsgebieden. Zo zijn er de *midpoint* indicatoren, waarvan er in totaal achttien stuks de relatieve ernst van een milieu-impactcategorie zoals klimaatverandering uitdrukken. Merk op dat in Figuur 15 ‘*environmental mechanisms part I*’ en *midpoints* samen moeten worden gezien, hetgeen ook geldt voor ‘*environmental mechanisms part II*’ en de *endpoints*. Deze meest uitgebreide set aan *midpoint* indicatoren is de voornaamste reden waarom we in ons onderzoek vaak voor deze methodologie kiezen. Elk van deze impactcategorieën wordt weergegeven met de bijbehorende karakteriseringsfactoren. De *midpoint* indicatoren worden verder geaggregeerd tot drie *endpoint* milieu-indicatoren, die de schade aan de menselijke gezondheid, het ecosysteem en de grondstoffen uitdrukken.



Figuur 15: Het milieumechanisme met de verhoudingen tussen de LCI parameters (links), de midpoint- en endpointcategorieën (rechts) in de ReCiPe methode (Wernet et al., 2016)

Verschillende milieumechanismen zoals klimaatverandering en aantasting van de ozonlaag hebben een wereldwijde impact, terwijl andere, zoals de vorming van fijnstof en fotochemische oxidatie (smog) eerder een regionale invloed hebben. Categorie-indicatoren zijn kwantificeerbare plaatsen in een impacttraject en verwijzen naar de milieueffecten. De resultaten van de categorie-indicatoren worden berekend met behulp van karakteriseringsfactoren die karakteriseringsmodellen vereisen. Voor meer details over de indicatoren en hun karakteriseringsnamen wordt verwezen naar Goedkoop et al. (2009).

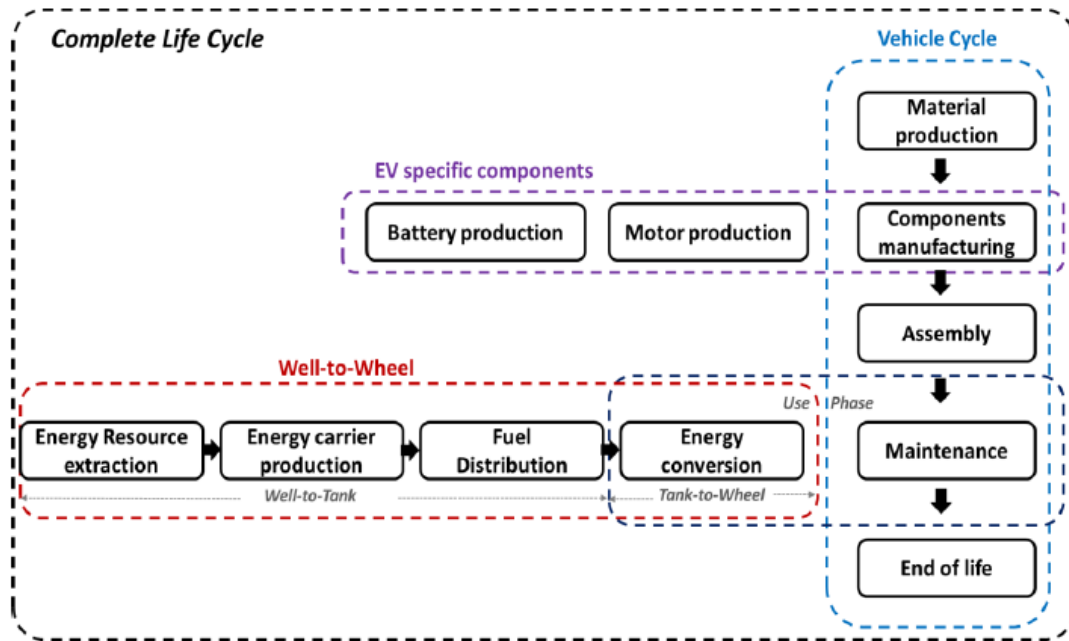
Wat de eindpunten betreft, beoordeelt de schadecategorie 'schade aan de menselijke gezondheid' de schade aan de hand van het concept 'disability adjusted life years' (DALY). Deze maatstaf van een ziekte wordt afgeleid met behulp van de statistische gegevens over verloren levensjaren (YLL) en levensjaren met een fysieke beperking (YLD). DALY is de som van YLL en YLD. Het aantal levensjaren met een fysieke beperking wordt bepaald door de ernstfactor (0 = volledige gezondheid en 1 = overlijden) en de duur van de ziekte. De schade aan het ecosysteem wordt uitgedrukt in soortjaar (*species year*). Deze berekening in ReCiPe houdt rekening met de mogelijke verdwijningsfractie aan soorten en de soortdichtheid in landelijke, zoetwater- en zeewatersystemen. De categorie "uitputting van grondstoffen" berekent de extra kosten voor de toekomstige generaties om materialen en fossiele grondstoffen uit onze omgeving/de natuur te halen, in termen van economische waarde.

Tot slot heeft de ReCiPe methode de normalisatie- en wegingsfactoren die kunnen worden gebruikt om afzonderlijke scores te berekenen. Tijdens de normalisatiestap wordt het milieueffect van het onderzochte productsysteem genormaliseerd naar een gemiddeld jaartotaal per hoofd van de bevolking in een regio of in de wereld. Deze methode heeft twee sets van normalisatiefactoren: Europa en de wereld.

3.3. LCA van verschillende voertuigaandrijflijnen in een Brusselse context

In het kader van dit onderzoek waarmee de haalbaarheid van een uitfasering van dieselveertuigen tegen 2030 en benzinevarianten in 2035 wordt voorzien, is het belangrijk om een vergelijking te maken van de aandrijvingstechnologieën die nu beschikbaar zijn en degene die we op korte tot middellange termijn mogen verwachten. Dit hoofdstuk dient in dat opzicht samen te worden gelezen met het hoofdstuk van het technologische overzicht waarin we bespreken welke technologieën we voorspellen dominant te blijven/worden in de toekomst. In deze oefening zullen we enerzijds aantonen waarom dieseltechnologie in dichtbevolkte regio's als het Brussels Hoofdstedelijk Gewest geen duurzame optie is, terwijl we anderzijds zullen zien welke alternatieven effectief tot een verbetering kunnen leiden in zowel het energie- als het luchtkwaliteitsvraagstuk. Hiervoor kijken we in de eerste plaats naar de milieueffecten van conventionele benzine- en dieselveertuigen in het segment van de stadswagens, waarbij we een vergelijking maken met hybride (HEV), stekkerhybride (PHEV), LPG en CNG wagens. Hiernaast bespreken we ook studies naar grotere voertuigsegmenten en de milieu-impact van het gewicht van een batterijpakket van een elektrisch voertuig in dagelijks gebruik. Naast een nadruk op de mogelijkheden voor alternatieve brandstoffen, andere dan conventionele diesel en benzine, kijken we specifiek voor de elektrificatie van voertuigen ook naar hun ecologische hotspots en analyseren we deze met het oog op het identificeren van de mogelijkheden om de levenscyclusemissies van deze voertuigen verder te verminderen. Tot slot staan we ook stil bij de *lokale* impact van voertuigen door de systeemgrenzen van de LCA te verkleinen tot alle emissies die binnen België plaatsvinden. Naast personenwagens bespreken we ook bestelwagens en zwaar vervoer.

De toegepaste systeemgrenzen omvatten alle milieurelevante processen zoals weergegeven in Figuur 16, welke de levenscyclus van een voertuig illustreert. Deze zijn verdeeld in twee hoofdonderdelen, namelijk de *well-to-wheel* (WTW) cyclus en de voertuigcyclus. Het WTW-gedeelte van het systeem heeft betrekking op de milieubelasting bij de productie van de energiedrager (bv. een brandstof, waterstof of elektriciteit), bestaande uit het *well-to-tank* gedeelte (WTT) en de energieomzetting in de voertuigen, het zogenaamde *tank-to-wheel* gedeelte (TTW). De voertuigcyclus omvat de productie van het gehele voertuig, het onderhoud en uiteindelijk de verwerking ervan aan het einde van de levensduur van het voertuig (*end of life*, EoL), gepaard met de bijbehorende emissies.



Figuur 16: Systeemgrenzen en de belangrijkste deelprocessen binnen het systeem (Rangaraju, 2018)

In het geval van conventionele voertuigen verwijst de productiefase voor de energiedrager naar de ontginning en verwerking van ruwe olie of gas, terwijl dit bij elektrische voertuigen (EV) duidt op de elektriciteitsopwekking uit verschillende bronnen zoals kernenergie, gas en hernieuwbare energiebronnen. Ook worden EV-specifieke componenten afzonderlijk behandeld, net als de batterij en de elektrische motor(en). Het is relevant om dit apart te bekijken gezien er voornamelijk materialen als koper worden toegepast in deze onderdelen, hetgeen een schadelijke impact heeft op lokale waterkwaliteit in het ontmijningsgebied. De gebruiksfase is niets anders dan het rijden en het onderhoud aan de voertuigen gedurende hun levensduur.

De functionele eenheid definieert de basisfunctionaliteit van de te beoordelen producten, welke in dit geval een verplaatsing over een bepaalde afstand is. De functionele eenheid wordt dus gebruikt als een gemeenschappelijke referentie-eenheid waarmee we de verschillende voertuigen op dezelfde basis kunnen vergelijken. Aangezien de gehele levenscyclus van de voertuigen in aanmerking wordt genomen, moeten de totale levensduur en de totale afgelegde afstand over de levensduur worden beschouwd. De gemiddelde levensduur van de personenwagens die in deze studie wordt gehanteerd bedraagt 14,1 jaar. Daarnaast gaan we uit van een gemiddelde jaarkilometrage van 14.856 km, hetgeen dichtbij het jaargemiddelde voor personenwagens in het Brussels Gewest ligt¹⁶. Vermenigvuldiging van de gemiddelde levensduur en de jaarkilometrage levert een totale afgelegde levensduur van 209.470 km op. De functionele eenheid van deze studie is dus gedefinieerd als de impact van het rijden van 209.470 km. In de grafieken die hierop volgen zullen we de omgerekende impact per gereden kilometer tonen voor de indicatoren in kwestie. Dit is een geschikte functionele eenheid omdat het de ultieme

¹⁶ Zie ook https://mobilit.belgium.be/sites/default/files/rapport_kilometers_2017_nl.pdf

functionaliteit van de voertuigen vertegenwoordigt en het de efficiëntie van de energieconversie of het energetisch rendement van de vergeleken technologieën omvat.

Het modelleren van de levenscyclus van de personenwagens gebeurt met behulp van de ecoinvent v 3.0.2 databank en Simapro 8.4 software. De ecoinvent-database (Greenhouse Gas Protocol, 2016) bevat tal van materialen en processen, die verschillende sectoren omvatten zoals landbouw, energie, transport, bouw, chemische industrie, metaalindustrie, elektronica, afvalverwerking, enz. Alle processen en materialen binnen de datasets bevatten de bijbehorende grondstoffen, nevenproducten en emissies. De datasets worden aangepast aan de gebruikersspecifieke *real-world* condities, wanneer deze of betere gegevens beschikbaar zijn. In de toegepaste methodiek wordt tevens gebruik gemaakt van de "*default allocation*" dataset, waarbij de emissies van co-producerende processen worden verdeeld over de producten op basis van hun economische waarden. Aan de andere kant zijn de gerecycleerde materialen in het kader van het "*cut-off*" principe niet belastend voor het oorspronkelijke proces. Dit wil zeggen dat zulke materialen enkel de impact meedragen van het recyclageproces en de ophaling van de materialen die eraan vooraf is gegaan. De Simapro software vergemakkelijkt de effectbeoordeling met veel verschillende methoden (zoals ReCiPe, IMPACT 2002+, EPD, CML, TRACI, CED, enz.), vergelijkende beoordeling, onzekerheidsanalyse (met behulp van Monti Carlo-simulaties), netwerkanalyse, bijdrageanalyse, enz. met de ingebouwde functies.

3.4. LCIA methodologie en impactcategorieën

Voor de effectbeoordeling wordt de ReCiPe-methode gebruikt. Hoewel er 18 *midpoint* indicatoren beschikbaar zijn in ReCiPe, worden slechts 4 ervan hier in detail besproken in dit overzicht, namelijk klimaatverandering (CC), vorming van fotochemische oxidanten (smog) (POF), deeltjesvorming (PMF) en menselijke toxiciteit (HT). De reden voor deze specifieke selectie is dat deze impactcategorieën het meest van belang zijn in een stedelijke context. We leggen de nadruk op batterij-elektrische voertuigen gezien hun geschiktheid in deze context dankzij de lokale nuluitstoot van uitlaatgassen en de geluidloze werking in een stedelijke context, maar bespreken evenwel andere alternatieven qua technologie en brandstoffen. Daarnaast analyseren we de *endpoint*-impactcategorieën van schade aan de menselijke gezondheid. Hou er rekening mee dat deze schadecategorieën een samenvoeging zijn van alle 18 *midpoint* indicatoren, terwijl dit ook het geval is voor schade aan ecosystemen en uitputting van grondstoffen.

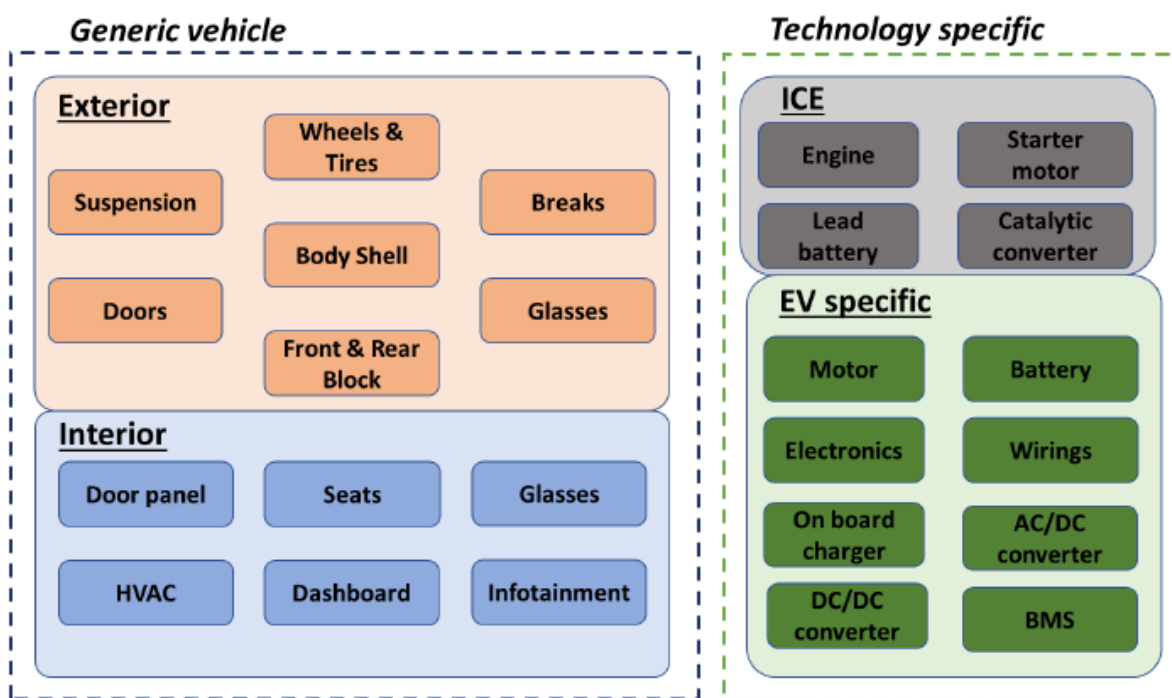
Waar de nadruk ligt op de impact van personenwagens, die vandaag het straatbeeld domineren, leggen we ook de link met bestelwagens en zwaar vervoer. Waar mogelijk bespreken we ook andere voertuigcategorieën.

3.5. LCI van de voertuigcyclus

De vergeleken aandrijvingstechnologieën voor personenwagens verschillen in termen van fysieke componenten en kenmerken. Alle voertuigen hebben echter generieke basisonderdelen zoals bijvoorbeeld het koetswerk. Figuur 17 onderscheidt deze generieke voertuigonderdelen van de

technologiespecifieke onderdelen. Alle voertuigen bestaan uit een *glider*, welke een verzamelnaam is voor ophanging, de wielen en banden, de deuren, de remmen, de ruiten, enz. in het exterieur, en het interieur met dashboard, het infotainment, de verwarming, de ventilatie en de airconditioning (HVAC), de zetels en de bedieningspanelen.

De conventionele voertuigen en de voertuigen op alternatieve brandstoffen zoals CNG en LPG hebben een interne verbrandingsmotor, brandstofsysteem, startmotor, loodaccu en een uitlaatsysteem. De elektrische voertuigen hebben daarentegen een batterijpakket en een gerelateerd batterijmanagementsysteem (BMS), een elektrische motor, een oplaadinrichting aan boord, stroomomvormers, andere elektronische componenten en bedrading. Deze zijn allemaal meegenomen in de LCI. Voor meer details, zie Rangaraju (2018). Door met de proportionele gewichten van al deze onderdelen rekening te houden kunnen verschillende voertuigsegmenten vergeleken worden. Voor de voertuigcategorieën waarvan we binnen VUB-MOBI geen eigen LCA-resultaten hebben, bespreken we de voornaamste bevindingen uit de vakliteratuur.



Figuur 17: Overzicht van de generieke en technologiespecifieke componenten (Rangaraju, 2018)

3.6. LCIA resultaten

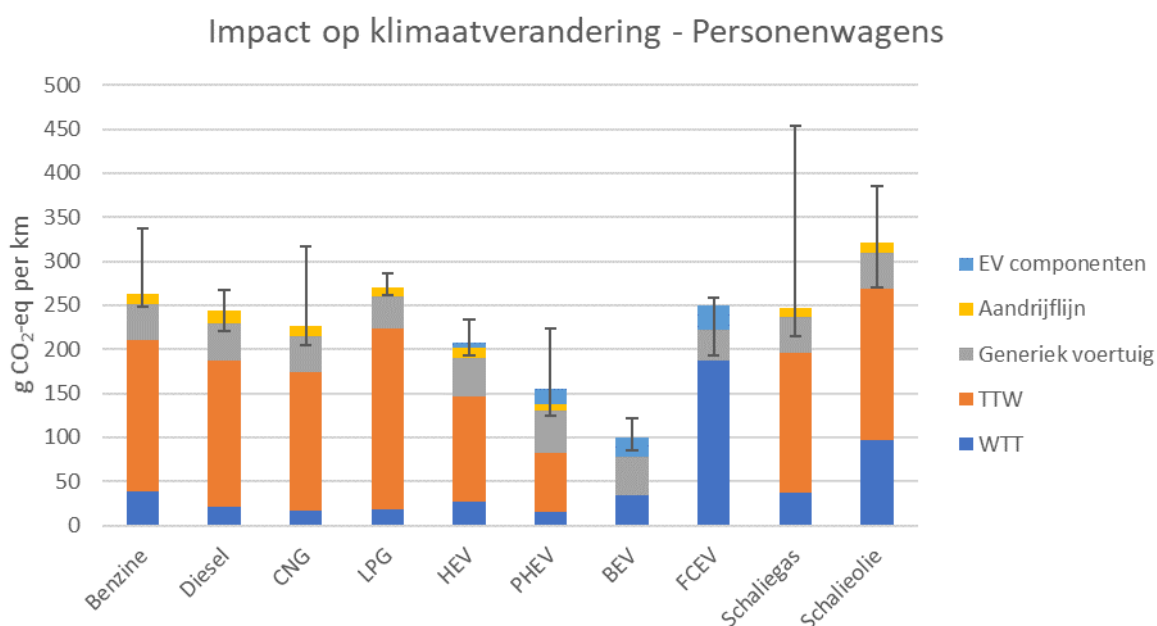
In dit deel worden de resultaten van de levenscyclusanalyse in detail besproken, en dit zowel voor de *midpoints* als de *endpoints* van de impactindicatoren. Een dominantieanalyse wordt gebruikt om de milieuhotspots aan te tonen, zijnde de levensfasen/processen die een uitgesproken bijdrage hebben bij het bepalen van de totale milieueffecten van de verschillende voertuigen. Zoals eerder besproken, worden de effecten uitgedrukt in kg emissie-equivalent per km voor de respectievelijke indicatoren. De discussie over elke geselecteerde impactindicator omvat een korte inleiding van de indicator zelf, de onderlinge vergelijking van verschillende voertuigtechnologieën en speciale aandacht voor de

identificatie van milieuhotspots voor elektrische voertuigen en andere alternatieven voor conventionele benzine- en dieselveertuigen. De discussie is dus vooral gericht op het identificeren van de mogelijkheden om de milieubelasting van EV's verder te verminderen, terwijl we ook nagaan waarom een uitfasering voor verbrandingsmotoren gerechtvaardigd zou kunnen zijn.

3.6.1. Impact 1: Klimaatswijziging

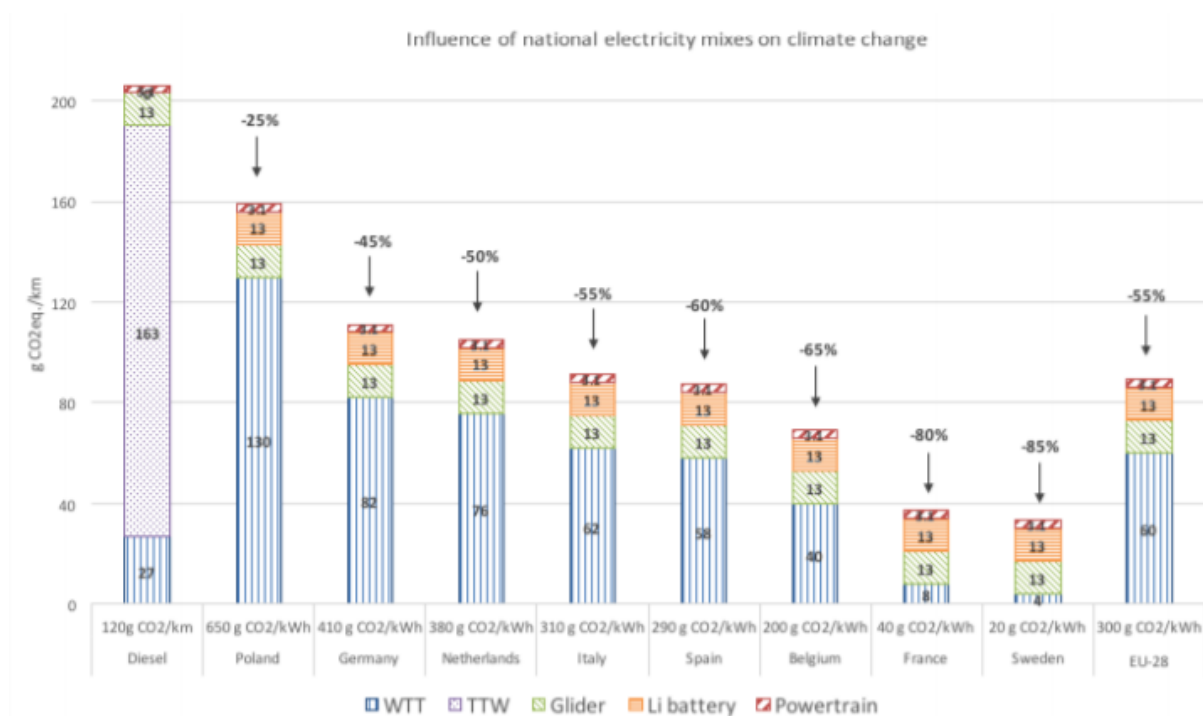
Een klimaatverandering wordt veroorzaakt door de uitstoot van broeikasgassen door zowel biologische als antropogene activiteiten. Broeikasgassen zijn stoffen die infraroodstraling van de aarde kunnen absorberen (*radiative forcing*) en zo de atmosfeer meer doen opwarmen dan in een normale, natuurlijke cyclus. Hoewel er veel stoffen zijn die bijdragen aan de klimaatverandering, zijn koolstofdioxide (CO₂), methaan (CH₄) en lachgas (N₂O) de belangrijkste broeikasgassen. Hun potentieel tot opwarming van de atmosfeer wordt uitgedrukt in CO₂-equivalenten. Zo stelt het IPCC een *global warming potential* (GWP) van 28 (dus 28x sterker dan CO₂) voor CH₄ en van 265 voor N₂O (Greenhouse Gas Protocol, 2016). Hierbij dient echter vermeld te worden dat deze equivalenten een tijdspanne van 100 jaar betrekken en dat hun klimaatimpact in kortere tijdspannes veel hoger kunnen liggen. Dit is bijvoorbeeld het geval voor methaangas, welke in feite een kortlevende *climate forcer* is waarvan de impact over 100 jaar gezien heel sterk is afgezwakt. Hierover wijden we verder meer uit.

In de ReCiPe-methode wordt de klimaatverandering uitgedrukt als het opwarmend vermogen (stralingsforcering) van een stof ten opzichte van de opwarmend vermogen van CO₂ als het referentiebroeikasgas. Ook hier omvat het CO₂-equivalent alle relevante broeikasgasemissies. Klimaatverandering heeft negatieve gevolgen voor de diversiteit van de ecosystemen en de menselijke gezondheid, gaande van overstromingen, cyclonen, droogtes, natuurrampen tot aandoeningen van de luchtwegen, hart- en vaatziekten, ziekten die door ongedierte worden overgedragen, enz.



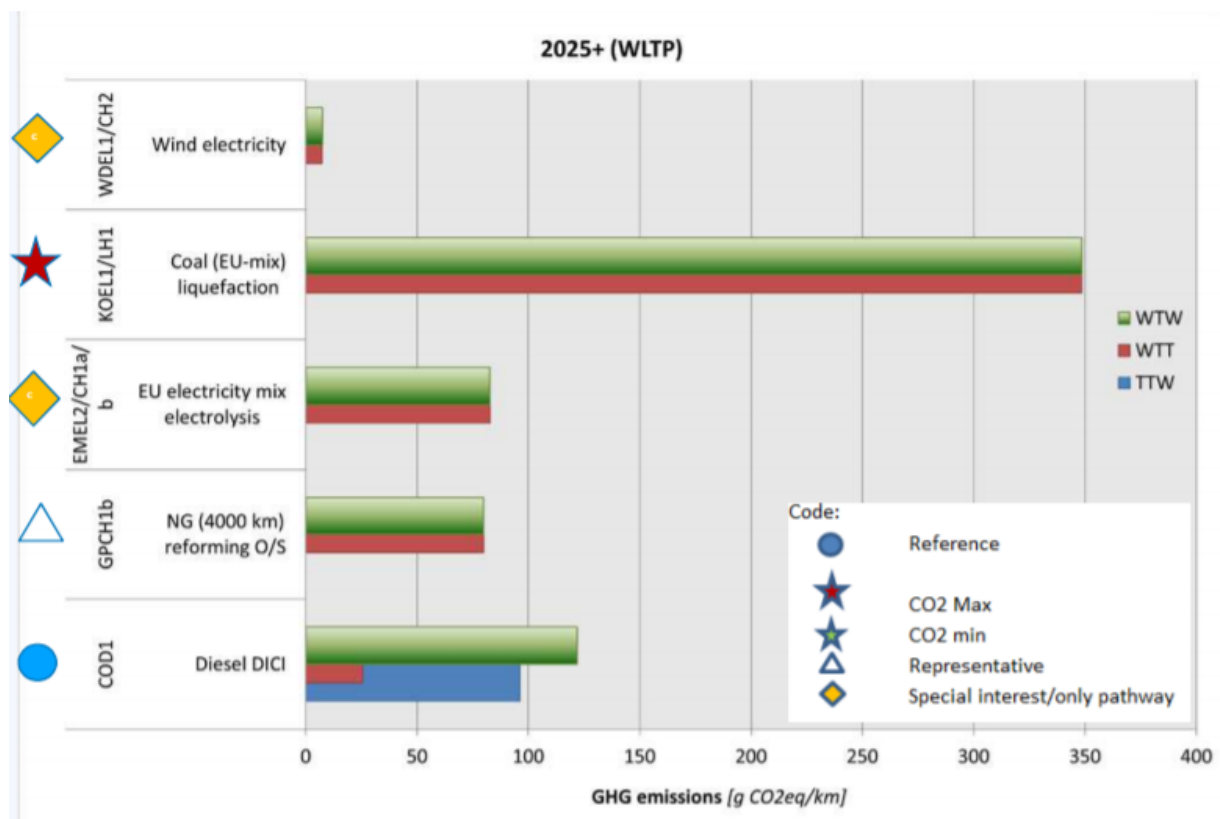
Figuur 18: Het opwarmingspotentieel van de verschillende voertuigtechnologieën uitgedrukt per gereden kilometer voor de Belgische elektriciteitsmix.

Figuur 18 toont de resultaten voor de klimaatverandering voor alle vergeleken aandrijvingstechnologieën voor personenwagens. In het algemeen heeft het batterij-elektrisch voertuig (BEV) dat geladen is met de Belgische elektriciteitsmix (in geval van de studie waarop we ons baseren die van in 2015) de laagste score op het gebied van klimaatverandering. Ten eerste omdat er geen uitlaatemissies zijn en ten tweede omdat de *well-to-tank* (WTT) uitstoot van de Belgische elektriciteitsmix geen grote impact heeft op de klimaatverandering. Wanneer we zouden kijken naar de recentste cijfers (2017) voor deze Belgische mix, dan zien we dat de koolstofintensiteit in 2017 reeds 20% lager is dan in 2015 (European Environment Agency, 2020), hetgeen enerzijds te wijten is aan het uitvallen van nucleaire capaciteit in 2015, de import van elektriciteit op basis van aardgas en de gestage toename van hernieuwbare energie (zonnepanelen en wind). Op vlak van klimaatverandering heeft de stijging van aardgasgebruik in de productiemix dus voor een stijging gezorgd die er met recentere cijfers opnieuw uitgehaald zou worden. In dat opzicht zou het elektrisch verbruik van een (stekkerhybride/batterij) elektrisch voertuig een lagere impact hebben in de WTT-fase in de bovenstaande figuur. Tegelijkertijd dienen we hier ook de kanttekening bij te maken dat, wanneer er bij een kernuitstap voornamelijk wordt ingezet op aardgas in plaats van hernieuwbare energiebronnen, deze impact weer kan toenemen in de nabije tot middellange toekomst. Dit voornamelijk wanneer we steeds meer op schaliegas beroep zouden doen, hetgeen in Europa gevoelig aan marktaandeel aan het inwinnen is. In Figuur 19 wordt een vergelijking getoond tussen de impact in gram CO₂ per gereden kilometer voor een conventionele dieselwagen (uiterst links) en een elektrisch voertuig dat telkens met een andere elektriciteitsmix wordt geladen. Het overzicht toont twee uitersten, zijnde elektriciteit uit steenkool (Polen, links), voornamelijk uit nucleaire bronnen (Frankrijk, rechts) en via hernieuwbare bronnen (Zweden, rechts), Dit inzicht is belangrijk omdat een elektriciteitsmix geen constante is en dus een belangrijke impact kan hebben in het totale beeld.



Figuur 19: Impact van de elektriciteitsmix op de LCA van een elektrische personenwagen (Messagie, 2017)

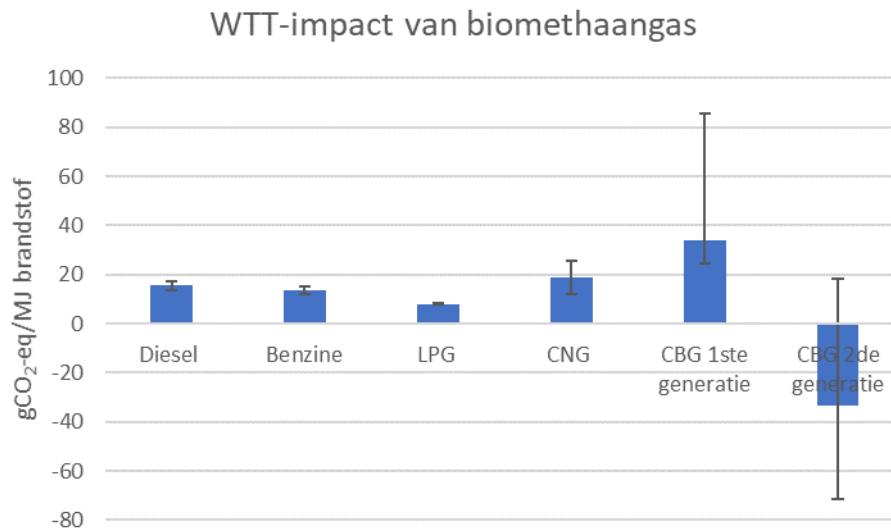
In deze WTT-fase zijn de emissies voor de PHEV en de BEV in Figuur 18 dus vooral afkomstig van de gascentrales, aangezien de kerncentrales in dat jaar een grote terugval kenden vanwege veiligheids- en onderhoudsproblemen. In het algemeen hebben alle geëlektrificeerde voertuigen, met uitzondering van de brandstofcel-elektrische voertuigen (FCEV), een lagere uitstoot in vergelijking met andere voertuigtechnologieën. Elektrificatie van personenauto's blijkt in dit scenario dus een veelbelovend alternatief te zijn in het klimaatvraagstuk. De autobouwers zijn zich hiervan bewust en lanceren, mede door de strengere CO₂-limieten tegen 2025 en 2030 (welke mogelijk nóg strenger wordt) steeds meer PHEV's en BEV's. De FCEV heeft voorlopig een vergelijkbare impact als de conventionele voertuigen en dit is vooral te wijten aan de substantiële emissies in het WTT-gedeelte, aangezien we de waterstofproductie op basis van aardgas in aanmerking nemen. Dit is momenteel het gangbare proces in Europa en vertegenwoordigt ongeveer 95% van de huidige waterstofproductie. Desalniettemin moet worden opgemerkt dat dit effect aanzienlijk kan afnemen als waterstof wordt geproduceerd via elektrolyse, aangedreven door hernieuwbare elektriciteit. De impact van de waterstofproductie kunnen we ook afleiden uit Figuur 20, waarin de WTW-impact (groene balk) van conventionele dieseltechnologie wordt vergeleken met de aandrijving op waterstof, welke op verschillende manieren kan gewonnen worden. In deze figuur gaat CONCAWE echter uit van efficiëntere dieselwagens (WTW-impact van slechts 120 g/km) op korte termijn (na 2025) en een vergelijkbare impact voor de productie van waterstof op basis van de toekomstige EU-elektriciteitsmix en op basis van aardgas (NG). De belangrijkste boodschap uit deze figuur zit in de verhoudingen tussen de verschillende productiemethodes.



Figuur 20: WTW-impact van een waterstofelektrisch voertuig op basis van de methode waarop waterstof wordt geproduceerd, met 'NG reforming' voor waterstof op basis van aardgasreformatie (JEC, 2019)

Plug-in (stekker)hybride elektrische voertuigen (PHEV) kunnen worden opgeladen door een grote verscheidenheid aan primaire energiebronnen - waaronder gas, biomassa, wind, zonne-energie en kernenergie. Merk op dat in vergelijking met niet-stekker hybride elektrische voertuigen (HEV), de frequentie van het opladen van een PHEV de potentiële CO₂-reductie bepaalt ten opzichte van conventionele voertuigen. Dit wordt aangegeven door de spreiding van het PHEV-model, welke toont dat als het model slechts 30% van de tijd elektrisch rijdt, de gemiddelde CO₂-uitstoot kan toenemen tot de gemiddelde CO₂-uitstoot van een dieselauto. Voor BEV's bepaalt de koolstofintensiteit van de elektriciteit waarmee ze worden geladen hun gemiddelde bijdrage aan de klimaatverandering (European Environment Agency, 2020).

Wat betreft aardgasvoertuigen, die in Figuur 18 zowel gecompriëerd aardgas (CNG) als schaliegas omvatten, moeten we voorzichtig zijn bij de beoordeling van hun bijdrage aan de klimaatverandering. De reden hiervoor is dat methaanlekkages doorgaans ondervertegenwoordigd zijn in de huidige emissie-inventarissen. Bevindingen van Alvarez (Alvarez et al., 2018) en Riddick (Riddick et al., 2019) geven aan hoe methaanlekkages tijdens de normale werking van gasproductiesites en tijdens het transport (onder meer via pijpleidingen) met 50 - 60% worden onderschat, en dit zowel voor de Amerikaanse gassector als voor een in de Noordzee gelegen ontginningsplatform. Daarom hebben we het gemiddelde van 55% toegepast voor het verhogen van de *well-to-tank* impact. Uit de bevindingen van Yacovitch (Yacovitch et al., 2018) blijkt echter dat in de gasvelden van Groningen (NL) deze lekkages de totale methaanemissie met een factor 10 (1.000%) verhogen. Dit wordt in Figuur 18 aangegeven door middel van de bovenste foutmarge voor CNG- en schaliegaswagens. Het werkelijke effect van methaan (CH₄) is echter niet volledig in deze figuur weergegeven, aangezien methaan genormaliseerd is voor zijn CO₂-equivalent gezien over een periode van 100 jaar. Binnen die periode wordt algemeen aangenomen dat methaan een 28 keer sterkere *climate forcer* dan CO₂. Hoewel CO₂-moleculen een atmosferische levensduur van enkele eeuwen hebben, breekt CH₄ reeds af na ongeveer 12 jaar. Gedurende deze jaren werkt het echter als een zeer krachtige *climate forcer*. Dit in zulke mate dat het opwarmingsvermogen van de atmosfeer over een periode van 20 jaar stijgt tot een factor 80 in verhouding tot CO₂. Bovendien is de invoer van aardgas uit de VS de afgelopen jaren verdrievoudigd, wat betekent dat het aandeel van het toegepaste schaliegas ook evenredig toeneemt. Van de andere landen die voornamelijk aardgas naar West-Europa exporteren, denk aan Rusland, Qatar en Algerije, zijn eenvoudigweg geen gegevens beschikbaar over methaanlekkages (iets wat ook grotendeels het geval is voor Europa). Als we de vergelijking van de aandrijfliijnen zouden herdoen voor een tijdspanne van 20 jaar, dan zou de impact van aardgas veel groter zijn dan die van conventionele auto's (benzine en diesel). Daarom kunnen we veiligheidshalve aardgasvoertuigen voornamelijk als een duurzame oplossing beschouwen wanneer ze worden getankt met biomethaan, wat doorgaans gegenereerd wordt uit afvalstromen. Dit wordt weergegeven in Figuur 21, waarin het aardopwarmingsvermogen in gCO₂-eq/MJ-brandstof voor de brandstofproductie (WTT) wordt getoond volgens CONCAWE. Zij blijven voorlopig echter een conservatieve aanpak hanteren waarbij het potentieel van lekkages onderschat wordt.

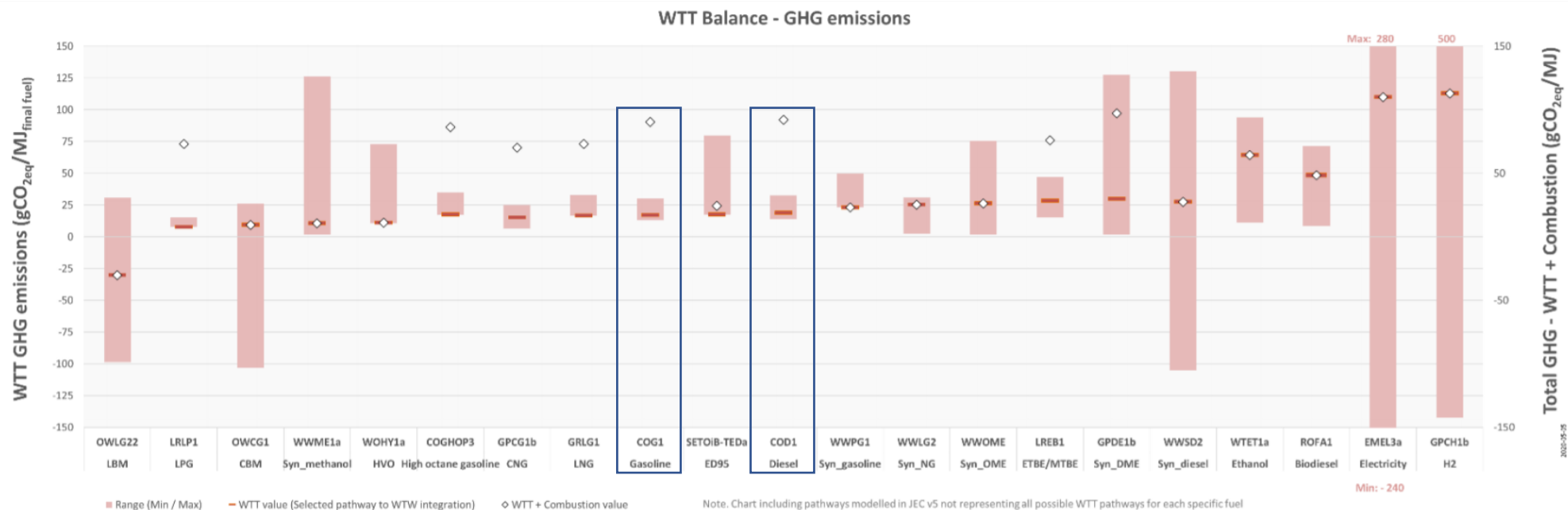


Figuur 21: Well-to-tank CO₂ emissies per mega-Joule brandstof

Merk op hoe gecomprimeerd biomethaangas (CBG) de well-to-tank bijdrage significant kan verminderen als het gebaseerd is op afvalstromen (i.e. de tweede generatie CBG) in plaats van op voedselgewassen (i.e. de eerste generatie CBG). Het probleem met biomethaan in België ligt echter in het feit dat CBG niet afzonderlijk als brandstof wordt verkocht. In plaats daarvan wordt het rechtstreeks in het gasnet geïnjecteerd, wat slechts enkele procenten van het totale gasverbruik vertegenwoordigt. Gezien verschillende sectoren interesse hebben in CBG als duurzamer alternatief, verwachten we niet dat aardgasvoertuigen in de toekomst meer aanspraak gaan kunnen maken op de biobrandstof.

In Figuur 22 wordt een overzicht getoond van de WTT-impact voor verschillende alternatieve brandstofsoorten volgens de laatste inzichten van CONCAWE. Wat opvalt is dat er vijf energiedragers zijn waarvoor een negatieve WTT-impact wordt verondersteld. Dit zijn vloeibare en gecomprimeerde biomethaan (LBM en CBM), synthetische diesel (e-fuel), elektriciteit en waterstof. Op deze twee laatste zit echter een grote spreiding gezien hun productie op basis van bijvoorbeeld steenkool of aardgas een grote klimaatimpact kan hebben. Voor de synthetische diesel zullen de grootste reducties worden behaald door middel van het opvangen en opslagen van koolstof (*carbon capture and storage, CCS*). Wat verder opvalt in de spreiding van de resultaten is dat er nog behoorlijk wat alternatieven voor benzine en diesel zijn die een grotere WTT-impact kunnen hebben. Bovendien dient het biomethaanpotentieel met een korrel zout te worden genomen omwille van het eerder vermelde feit van de beschikbaarheid ervan.

Tenslotte dienen we te benadrukken dat de WTT-fase bij voertuigen die voornamelijk op basis van een verbrandingsmotor worden aangedreven relatief klein is ten opzichte van de TTW-fase, gezien tijdens het gebruik van een voertuig het overgrote merendeel van de broeikasgassen worden uitgestoten. Dit kunnen we veralgemenen voor alle voertuigtypes met een verbrandingsmotor. Toch toont Figuur 22 dat we conventionele wegvoertuigen nog kunnen verduurzamen, hetgeen voornamelijk geldt voor segmenten als lange-afstandstransport waar een doorgedreven elektrificatie nog niet meteen mogelijk is.

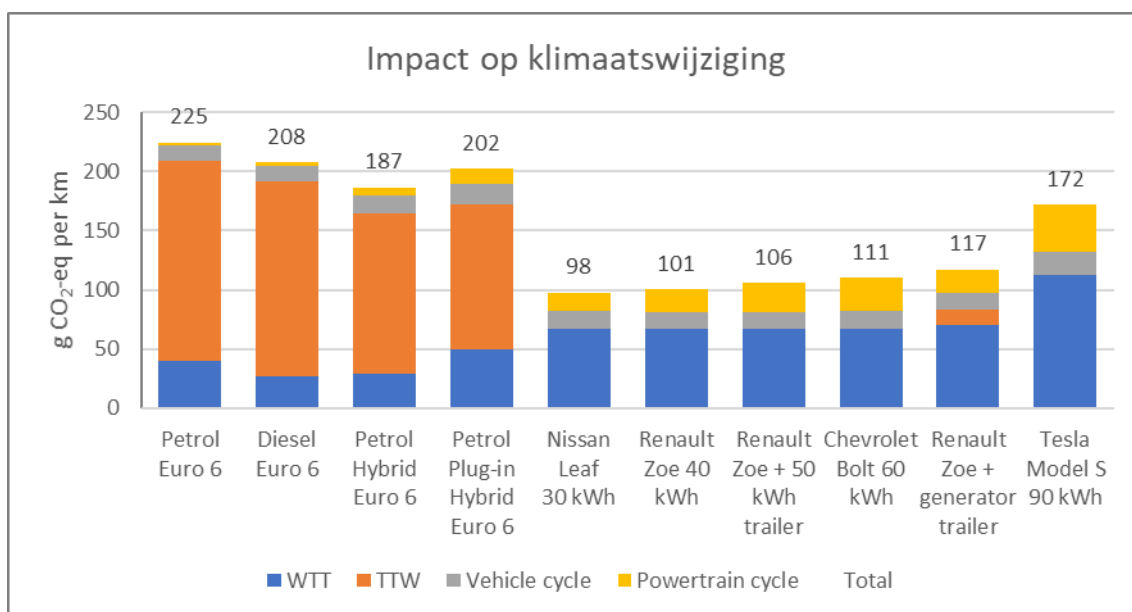


Figuur 22: Overzicht van de well-to-tank klimaatimpact per energievector, met LMB = vloeibaar biomethaan, CBM = gecompriemd biomethaan, HVO = hydrotreated vegetable oil, ED95 = biobrandstof op basis van ethano voor toepassing in dieselmotoren, NG = aardgas, DME = dimethyl ether (CONCAWE, 2020),

3.6.1.A. IMPACT VAN VOERTUIGGEWICHT OP ENERGIE-EFFICIËNTIE

Een belangrijke factor in de bepaling van de energetische efficiëntie van een aandrijflijn in een stedelijke context is het voertuiggewicht. Dit omdat een typische stadsrit gekenmerkt is door lage snelheden met veel starten en stoppen. Vooral bij dit laatste speelt de massa van het voertuig een grote rol, gezien deze steeds weer versneld en vertraagd moet worden, hetgeen meer energie vraagt dan een voertuig op constante snelheid te houden. Dit fenomeen geldt voor alle voertuigtypes en aandrijflijnen.

Een studie waarin de impact van het voertuiggewicht in het kader van een levenscyclusanalyse werd besproken door VUB-MOBI werd in 2018 uitgevoerd voor het Franse EP-Tender, een start-upbedrijf dat range-extender aanhangwagens voor elektrische personenwagens van het mediumsegment aanbiedt (Hooftman, Messagie, Joint, Segard, & Coosemans, 2018). De motivatie hiervoor is dat zware elektrische voertuigen, met een grote batterijcapaciteit, slechts zelden beroep doen op hun maximale actieradius. Daarom vergeleken we enerzijds recente conventionele personenwagens met (plug-in) hybridemodellen en keken we anderzijds naar vier bestaande EV-modellen met verschillende batterijcapaciteiten (30 kWh, 40 kWh, 60 kWh en 90 kWh), terwijl we deze groep tenslotte vergeleken met een EV met een bescheiden capaciteit (40 kWh) waaraan ofwel een batterij-range-extender van 50 kWh ofwel een benzinegenerator-range-extender (gen. ReX) werd gekoppeld.



Figuur 23: Overzicht van de impact op klimaatverandering voor personenwagens waarbij het verschil tussen batterij-elektrische modellen met een verschillende nominale capaciteit wordt weergegeven. EV 40 kWh + 50 kWh verwijst naar een EV met een batterij-elektrische range-extender, EV 40 kWh + gen. ReX naar een EV met een generator-elektrische range-extender (Hooftman, Messagie, Joint, et al., 2018)

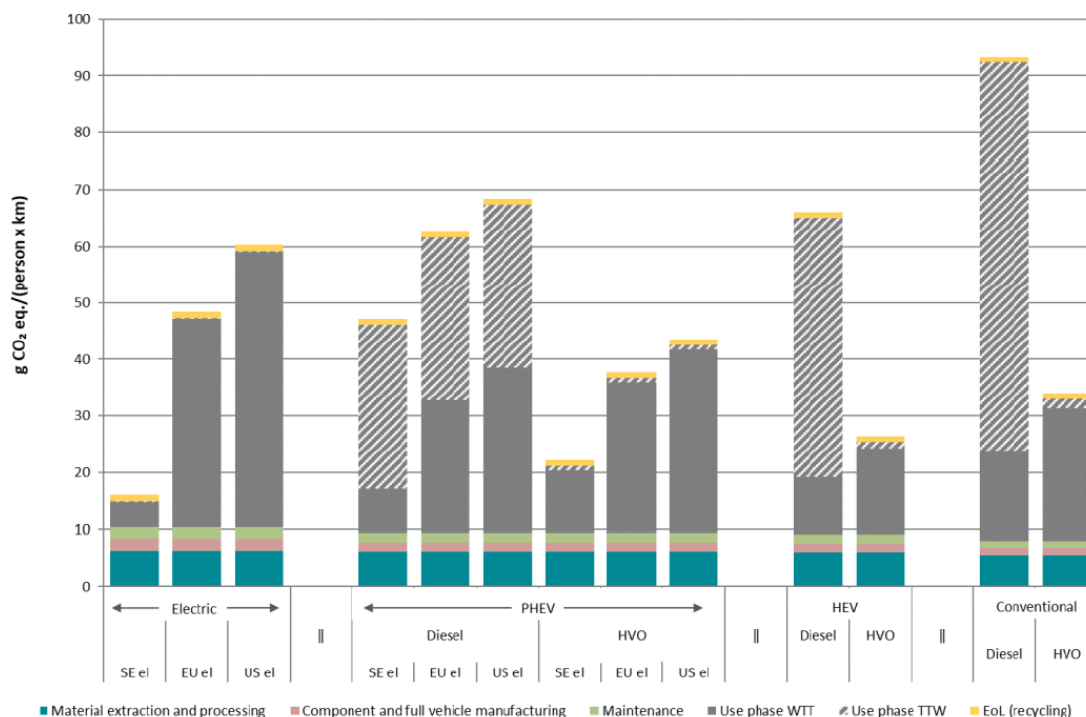
Los van de impact van de range-extenders kunnen we uit Figuur 23 afleiden dat naarmate de nominale batterijcapaciteit bij de elektrische modellen toeneemt, ook de algemene CO₂-uitstoot stijgt. Dit is te wijten aan het feit dat zwaardere batterijpakketten gepaard gaan met een hoger elektrisch verbruik, wat zich voor puur-elektrische voertuigen vertaalt in een grotere impact in de WTT-fase. In de onderstaande

figuur zien we dit voornamelijk bij het 90 kWh-model. Bij de bespreking van de volgende *midpoint* indicatoren komt deze invloed van het voertuiggewicht opnieuw terug. Merk op dat de TTW-fase voor de PHEV in Figuur 23 veel sterker naar voor komt dan dat dit het geval was in Figuur 18, hetgeen te wijten is aan voortschrijdend inzicht in de praktijkemissies van deze voertuigen gezien deze voornamelijk worden bepaald door hoeveel kilometers er elektrisch worden afgelegd, en dus hoe vaak het voertuig wordt opgeladen.

3.6.1.B. BESTELWAGENS, BUSSEN EN VRACHTWAGENS

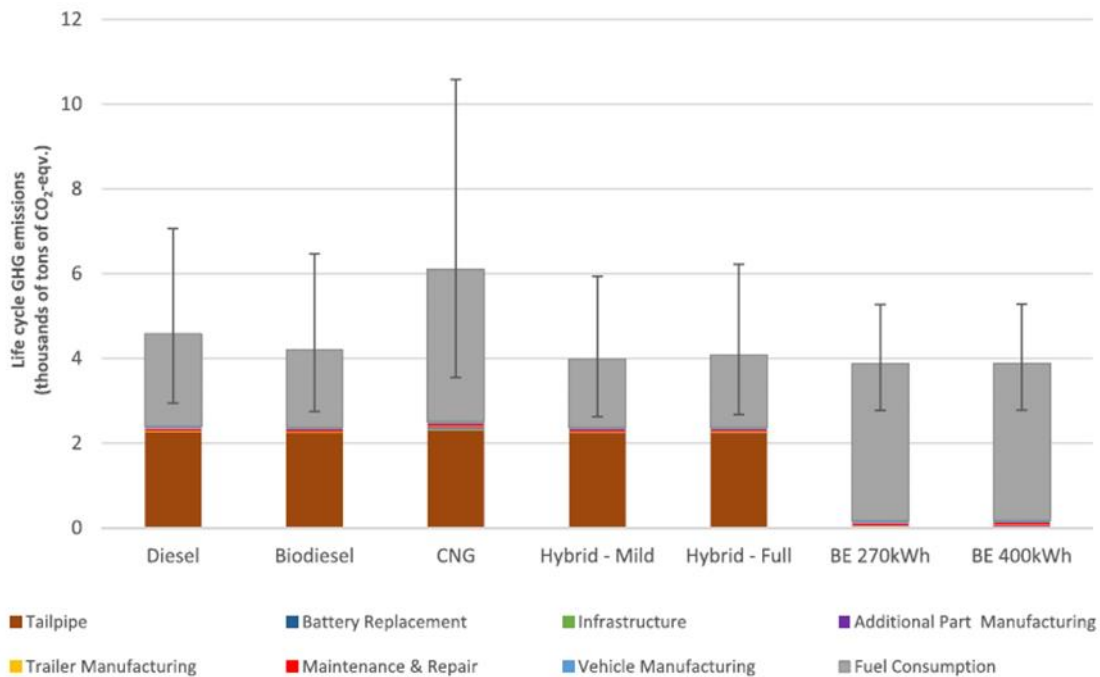
Waar de voorafgaande figuren voornamelijk om personenwagens gingen, kunnen we algemeen stellen dat dezelfde verhoudingen ook gelden voor bestelwagens. Deze zijn namelijk uitgerust met identieke aandrijflijnen als (diesel) personenwagens, al zal hun TTW-impact iets hoger komen te liggen omdat bestelwagens typisch zwaarder beladen worden en omdat bestelwagens in het algemeen minder streng benaderd worden op vlak van EU-regelgeving. Ook toont de doorgaans zwaardere belading de impact van voertuiggewicht op de efficiëntie en dus het verbruik van een voertuig aan.

Voor wat betreft vrachtwagens en bussen moeten we terugvallen op de literatuur. Zo toont een recente studie van Nordelöf, Romare, & Tivander (2019) de impact van stadsbussen met verschillende aandrijflijnen. Het resultaat voor klimaatverandering zien we hieronder in Figuur 24, waarin een conventionele dieselbus (rechts) wordt vergeleken met een batterij-elektrische, een diesel-plug-in en een diesel-hybride motorisatie. Bij de verbrandingsmotoren wordt tevens een onderscheid gemaakt tussen conventionele diesel en HVO of *hydrogenated vegetable oil* (biodiesel), in deze studie vervaardigd uit afvalstromen (tweede generatie biobrandstof). Verder maakt men een onderscheid tussen de Zweedse, Europese en Amerikaanse elektriciteitsmix.



Figuur 24: De impact op klimaatverandering voor stadsbussen met verschillende motorisaties, uitgedrukt in gCO₂ per persoon per kilometer

Wat opvalt is dat ook voor stadsbussen de WTW-fase bepalend is in de LCA. Bij de conventionele dieselbus zien we dat deze impact al drastisch zou kunnen worden teruggedrongen indien men van brandstof zou veranderen. Dit in zulke mate dat een HVO-bus per passagier per kilometer (dit zijn er gemiddeld 16 per km) een beduidend kleinere bijdrage zou kunnen hebben dan een elektrische bus. Dit is natuurlijk puur hypothetisch, gezien de afvalstromen waaruit HVO-brandstof kan worden gemaakt beperkt zijn en we in de praktijk eerder zouden spreken van HVO-diesel mengsels.



Figuur 25: Totale uitstoot van broeikasgassen in ton CO₂ voor vrachtwagens met verschillende soorten motorisaties. Een rekenvoorbeeld voor de Amerikaanse markt, met een elektriciteitsproductie voornamelijk op basis van steenkool (Sen, Ercan, & Tatari, 2017)

Voor de impact van de aandrijftechnologie bij vrachtwagens zien we een voorbeeld van een LCA-berekening in Figuur 25 waarbij een gemiddelde elektriciteitsmix voor de Noord-Amerikaanse markt wordt gebruikt. Merk op dat deze rekening houdt met een groot aandeel steenkool in de productiemix, waardoor batterij-elektrische vrachtwagens maar nipt beter presteren dan de andere technologieën wanneer hun uitstoot van broeikasgassen over de gehele levensduur wordt becijferd. De auteurs van deze studie (Sen et al., 2017) geven daarom ook aan dat indien de minst vervuilende elektriciteitsproductie uit hun steekproef gekozen wordt, de WTT-impact (in Figuur 25 weergegeven als 'Fuel Consumption') met meer dan 63% zou zakken. Wat verder opvalt in deze vergelijking is dat CNG-vrachtwagens de grootste CO₂-uitstoot laten optekenen, hetgeen te verklaren is door een lagere energie-efficiëntie en grotere WTT-impact.

3.6.1.C. VERWACHTTE EVOLUTIE IN DE BIJDRAGE AAN KLIMAATVERANDERING DOOR GEMOTORISEERDE WEGVOERTUIGEN

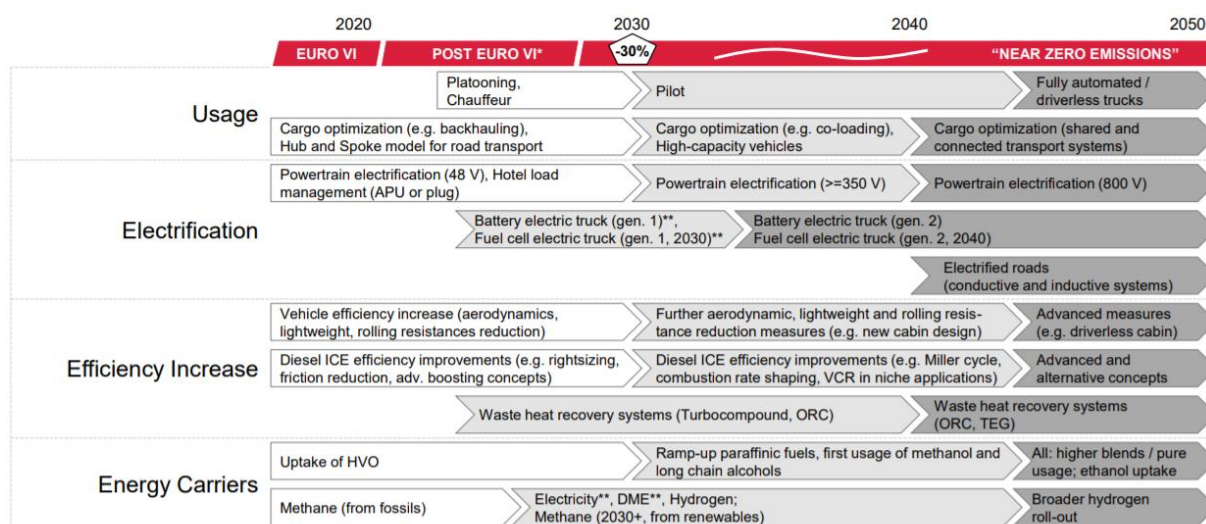
Waar de hierboven getoonde figuren op het eerste zicht een 'foto' lijken te geven van de huidige toestand, schuilt er ook een zekere trend in voor de komende decennia. Zoals aangegeven in het technologische overzicht verwachten we dat de elektrificatiebeweging zoals we nu al merken bij personenwagens (denk aan de vele hybridemodellen) op korte termijn zal voortgezet worden om aan de steeds strengere CO₂-doelstellingen te kunnen voldoen. Met een eerste beoordeling van de gemiddelde vlootuitstoot per constructeur aan het eind van dit jaar (2020) ten opzichte van de 95 g/km-limiet lijkt de industrie nu op grote schaal stekkerhybridemodellen uit te rollen. Deze genieten de voorkeur omdat ze, net als zero-emissiemodellen een zwaarder gewicht toegekend krijgen in de

beoordeling (dankzij zogenaamde superkredietfactoren, zie (Dornoff et al., 2018)). Gezien de industrie haar conventionele modellen nog zo lang mogelijk wil blijven verkopen verwachten we hier minimaal een shift naar milde/full hybrides (HEV), waarbij het motormanagement de aandrijving bij lagere snelheden zoveel mogelijk puur elektrisch zal aansturen. Grote sprongen in de efficiëntie van de verbrandingsmotor moeten we op korte tot middellange termijn echter niet verwachten, en hier blijft het de vraag of de substantiële investeringen die hiermee gepaard gaan nog interessant zullen zijn voor de constructeurs. Dit laatste voornamelijk wanneer er steeds meer steden als Brussel een uitstap van conventionele aandrijvingstechnologieën inplannen en zo een signaal geven aan de consument om voor alternatieven te kiezen bij een nieuwe aankoop.

In dat opzicht zien we in de komende vijf jaar voornamelijk hybride- en stekkerhybridemodellen verschijnen, ten nadele van de conventionele benzine- of dieselmotor in personenwagens. Voor wat betreft stekkerhybrides zien we dat voor de jaren 2025 en 2030 een versoerd gunstregime zal worden gehanteerd vergeleken met de huidige superkredietfactoren. Dit regime houdt voornamelijk in dat indien verkoopdoelstellingen voor zogenaamde 'zero-and-low-emission' voertuigen (stekkerhybride, batterij- en brandstofcel-elektrisch, ZLEV) worden gehaald (15% tegen 2025 en 35% tegen 2030), de constructeur de toestemming krijgt om met de resterende, conventionele vloot tot maximum 5% méér CO₂ uit te stoten. ZLEV's krijgen in dit verhaal een specifiek 'gewichtsfactor' toegekend op basis van hun WLTP CO₂-uitstoot, gaande van 1 voor een uitstoot van 0 g/km tot 0 voor een uitstoot van 50 g/km. Deze aanpak staat beschreven in Verordening (EU) 2019/631 en is van een niet-bindende aard, wat wil zeggen dat er geen sancties verbonden zijn voor constructeurs die de verkoopdoelstellingen voor ZLEV's niet halen. Toch wordt verwacht dat dit een interessante piste wordt voor constructeurs van personenwagens, zeker wanneer de CO₂-reductiedoelstelling van 37,5% voor deze voertuigcategorie mogelijk nog verder aangescherpt zou worden in het kader van de klimaatambities via *The New Green Deal*. In dat opzicht verwachten we, naast een gevoelige stijging van het aantal puur elektrische modellen ook steeds meer stekkerhybridemodellen in de komende tien jaar. Of deze zoals vandaag voornamelijk zullen worden gekalibreerd om tijdens de WLTP-test gunstige CO₂-resultaten voor te kunnen leggen of net een groter elektrisch bereik zullen krijgen ten gevolge van een invoering van een praktijktest voor CO₂ is voorlopig nog niet duidelijk. Voor dit laatste zal de Europese Commissie pas na een monitoringsperiode die loopt tot 2027 de haalbaarheid inschatten voor de invoering van een mechanisme 'om de gemiddelde specifieke CO₂ uitstoot van een fabrikant vanaf 2030 bij te stellen om te voorkomen dat de kloof groter wordt' (zie Artikel 12 van Verordening (EU) 2019/631).

Voor lichte bestelwagens zien we in feite geen noemenswaardige verschillen met de LCA-resultaten die in dit hoofdstuk reeds werden getoond voor personenwagens, gezien we over identieke motorisaties spreken aan die van dieselwagens. Wel tekenen we gebruikelijk een groter verbruik op bij bestelwagens, hetgeen zich vertaalt in een grotere bijdrage door de *tank-to-wheel*-fase. Alternatieven voor de huidige dieselbestelwagens zijn vandaag nog eerder een nichemarkt, met enkele puur elektrische modellen, slechts één plug-inmodel en enkele CNG-varianten. Desalniettemin gelden er voor lichte bestelwagens ook reductiedoelstellingen van 15% tegen 2025 en 31% tegen 2030, ten opzichte van de situatie in 2021. Daarom verwachten we dat ook in deze categorie een elektrificatie zal worden doorgezet.

Voor zwaar vervoer geldt er in Europa eveneens een eerste CO₂-doelstelling, namelijk een reductie van 15% tegen 2025 en 30% tegen 2030, ten opzichte van de situatie in 2019. Voor vrachtwagens zal dit nog niet direct betekenen dat er volop zal ingezet worden op elektrificatie, gezien er nog veel efficiëntiewinst te boeken is op vlak van aerodynamica. Figuur 26 toont een overzicht van de *heavy-duty* industrie tot 2050 waarin een onderscheid wordt gemaakt om tot de gewenste CO₂-reducties te komen. Merk op dat er simultaan zal/kan worden ingezet op nieuwe gebruiksoptimalisaties, elektrificatie van de aandrijflijn, het verhogen van de motorefficiëntie en alternatieven voor fossiele dieselbrandstof.

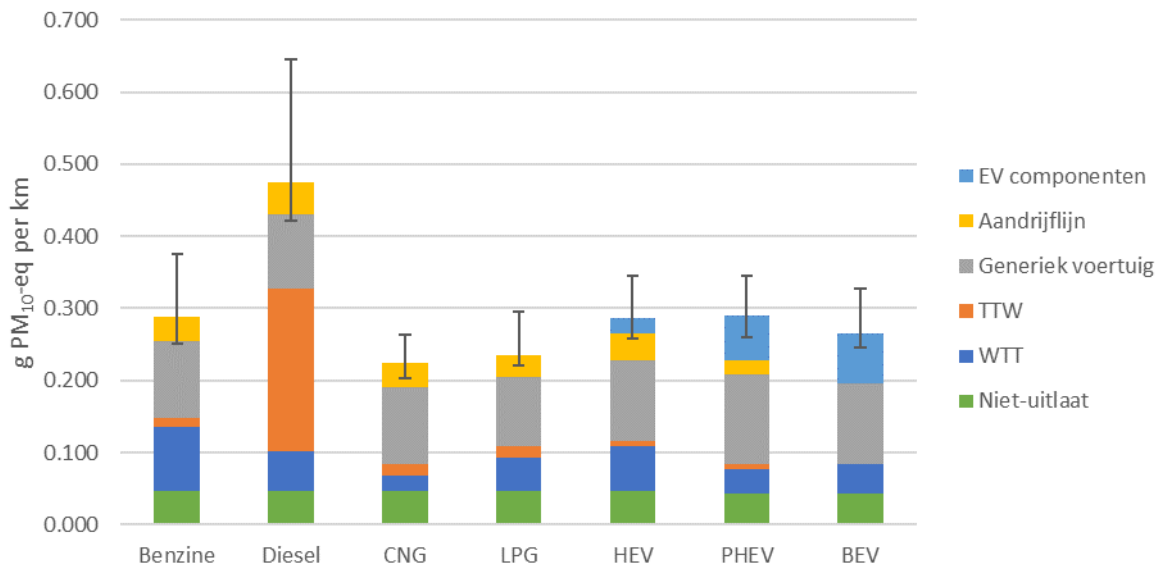


Figuur 26: Technologische roadmap voor de transportindustrie tot en met 2050 volgens consultancybureau FEV (FEV Consulting GmbH, 2019)

3.6.2. IMPACT 2: VORMING VAN FIJNSTOFDEELTJES

Voertuigen stoten stofdeeltjes uit ten gevolge van zowel het verbrandingsproces in conventionele motoren als de slijtage van remmen, banden en het wegdek. Inademing van de fijnstofdeeltjes veroorzaakt verschillende gezondheidsproblemen. Er zijn twee soorten fijnstof in de atmosfeer, namelijk primaire en secundaire. Primaire deeltjes worden rechtstreeks door de bron (in dit geval de gemotoriseerde wegvoertuigen) uitgestoten, terwijl secundaire deeltjes ontstaan wanneer sulfaten (SO₂), stikstofdioxide (NO₂) en ammoniak (NH₃) in de atmosfeer reageren op UV-licht en andere stoffen. Figuur 27 illustreert de effecten van verschillende aandrijftechnologieën voor personenwagens op de vorming van deeltjes in PM₁₀-equivalenten, d.w.z. deeltjes met een aërodynamische afmeting van 10 micrometer en kleiner. Merk op dat hier zowel de primaire als de secundaire PM-emissies worden weergegeven.

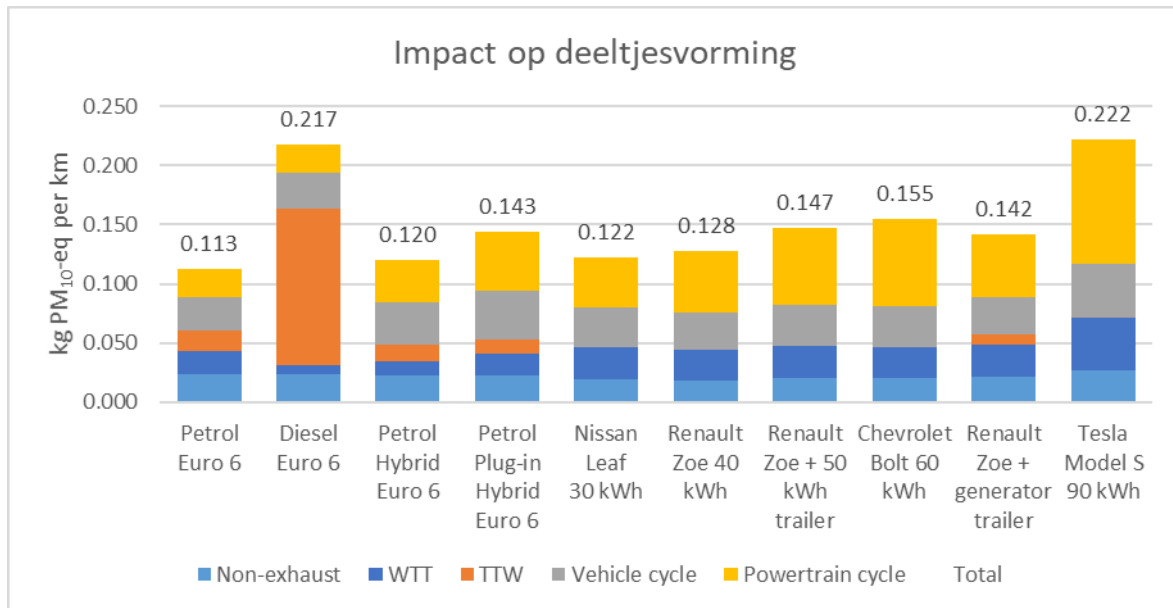
Vorming van fijnstofdeeltjes



Figuur 27: Primaire en secundaire deeltjesvorming per aandrijftechnologie

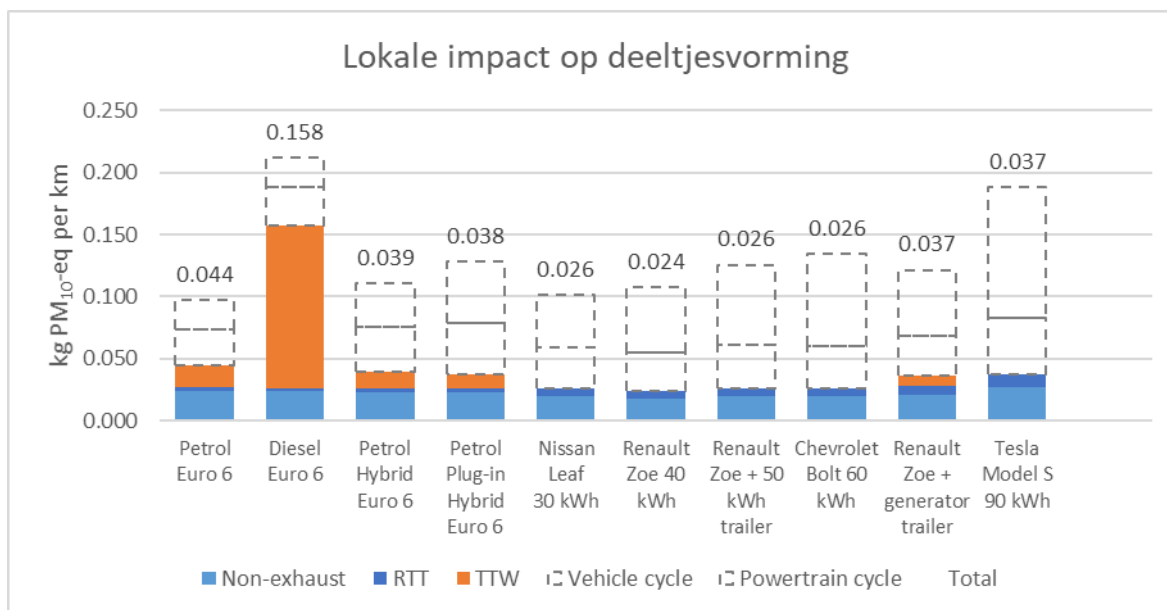
In bovenstaande figuur zien we dat dieselauto's doorgaans het meest bijdragen vanwege de directe PM-uitstoot bij de verbranding van diesel enerzijds en de secundaire PM-vorming ten gevolge van de relatief hoge NO_x- en SO_x-uitstoot in de gebruiksfase anderzijds. Sinds de introductie van roetfilters voor dieselauto's sinds Euro 5b in 2011 is de primaire uitstoot van fijnstof voor deze motortechnologie eigenlijk niet meer aan de orde gezien de extreem efficiënte werking van de filters. Schade aan, of het illegaal verwijderen van zo'n filter zal het aantal primaire uitgestoten deeltjes echter met meer dan een factor 1000 tot 10000 doen toenemen, terwijl de massa 100 tot 200-maal hoger kan komen te liggen (N. E. Ligterink et al., 2019). Dit geldt ook voor andere types dieselwegvoertuigen die van een roetfilter zijn voorzien. Dit intrinsieke risico van de dieseltechnologie is niet weergegeven in Figuur 27.

Benzinewagens, PHEV's en HEV's hebben bijna dezelfde impact. De niet-uitlaatemissies van banden, remmen en wegdekslijtage leveren een aanzienlijke bijdrage, die vergelijkbaar is voor de verschillende technologieën. Over het geheel genomen hebben CNG-voertuigen het laagste totale effect van de vergeleken voertuigtechnologieën, hetgeen voornamelijk te wijten is aan de relatief lage bijdrage in de WTT-fase. Hoewel er minder primaire PM-emissies zijn die afkomstig zijn van de uitlaat van een CNG-voertuig, vertegenwoordigen de secundaire emissies een grote fractie in het TTW-gedeelte. BEV's hebben geen uitlaatemissies, maar een iets lagere bijdrage aan niet-uitlaatemissies van PM ondanks een systematisch hogere voertuigmassa dankzij het batterijpakket. Dit omdat elektrische voertuigen veel minder mechanisch remmen dankzij de mogelijkheid tot recuperatief remmen op de (elektro)motor (zie ook (Hooftman, Oliveira, Messagie, Coosemans, & Van Mierlo, 2016)).



Figuur 28: Fijnstofproductie voor verschillende aandrijvingstechnologieën, met een specifiek onderscheid tussen batterij-elektrische voertuigen met een variërende capaciteit, voor de Belgische energiemix. (Hoofman, Messagie, Joint, et al., 2018)

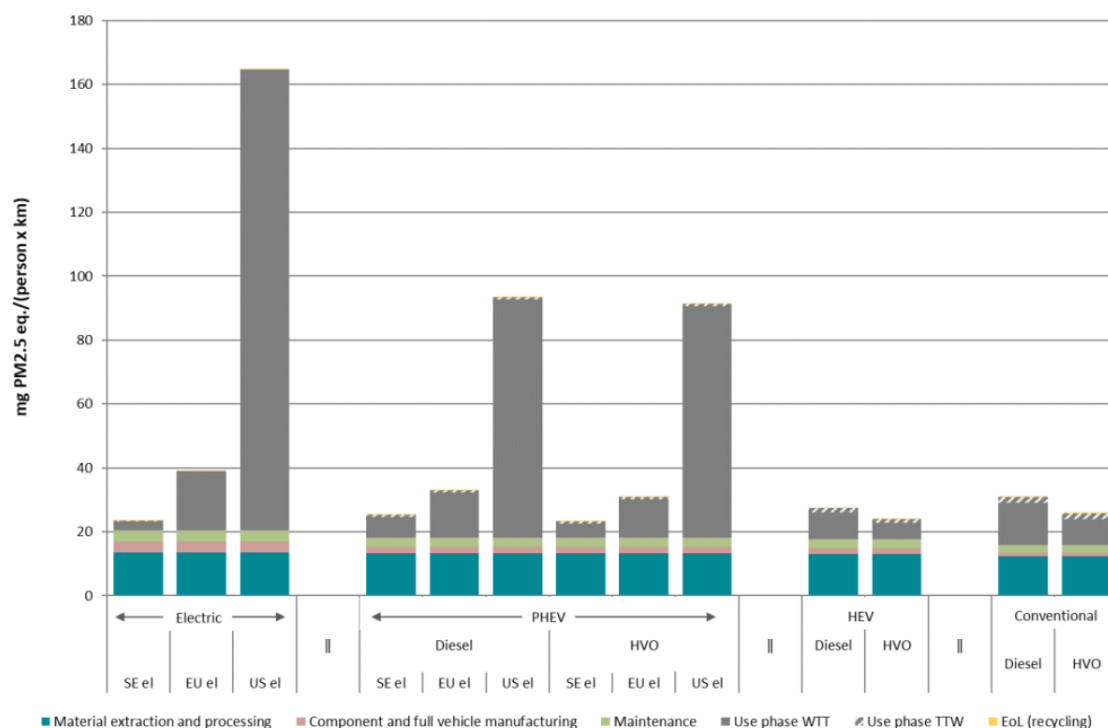
Wanneer we kijken naar de impact van het voertuiggewicht in geval van elektrische personenwagens (zie Figuur 28) dan merken we een duidelijke trend waarbij, naarmate de batterijcapaciteit (en dus het gewicht) toeneemt, de uitstoot aan fijnstofdeeltjes ook toeneemt. Merk op dat in Figuur 28 een substantieel deel van de fijnstofproductie gelinkt is aan de productie van de aandrijflijn, waaronder de batterij valt bij (plug-in) hybrides en batterij-elektrische voertuigen. Wanneer we echter enkel gaan kijken naar de lokale impact, bijvoorbeeld in de Brusselse context, dan hoeven we enkel rekening te houden met de niet-uitlaatemissies en de fijnstofproductie tijdens de WTT- en de TTW-fase. Dit zien we in Figuur 29, waar RTT verwijst naar *refinery-to-tank* omdat er hier enkel wordt gekeken naar de productie van de brandstof binnen de landsgrenzen van België. Hierbij beogen we de verwerking van aardolie tot benzine en diesel in de Antwerpse haven. Voor meer details hierover verwijzen we door naar Hoofman et al. (2016). Wat Figuur 29 onderstreept is dat dieseltechnologie (ook met roetfilter) lokaal het sterkste bijdraagt aan de emissie van fijnstof, terwijl naarmate de elektrificatie van de aandrijflijn toeneemt (HEV, PHEV) deze impact verder afneemt. Bij volledig elektrische aandrijflijnen worden de mechanische remmen algemeen gezien veel minder vaak gebruikt dan dat dit het geval is bij conventionele voertuigen die niet voorzien zijn van de mogelijkheid om elektrisch te remmen. Wat wel opvalt is dat de zwaardere EV's beduidend meer niet-uitlaat fijnstof genereren, een fenomeen dat we kunnen veralgemenen voor alle types van motorisatie en van voertuigsegment, gezien een hogere voertuigmassa grotere remkrachten vereist, waardoor de slijtage aan remmen, banden en het wegdek hoger komt te liggen. Wat deze figuur aantoont is dat ter verbetering van de lokale luchtkwaliteit het zin heeft om dieselvoertuigen te mijden en in te zetten op de stimulatie van lichtere voertuigen.



Figuur 29: De lokale impact op vlak van fijnstofemissies, waarbij enkel wordt gekeken naar de brandstofproductie in België (refinery-to-tank, RTT), de tank-to-wheel emissies en de niet-uitlaatemissies (NEx) (Hooftman, Messagie, Joint, et al., 2018)

Voor wat betreft bestelwagens zien we geen afwijking van de waarnemingen voor personenwagens. Dezelfde PM₁₀ emissielimiet van 4,5 mg/km is immers van kracht, hetgeen de implementatie van een roetfilter vereist. Hierdoor liggen de praktijkemissies van fijnstof voor een moderne dieselbestelwagen gebruikelijk lager dan 1 mg/km. Net als bij personenwagens geldt ook hier het risico van manipulaties, al is er bij bestelwagens een minder uitgesproken motivatie om over te gaan tot zulke praktijken. Dit omdat ze doorgaans voldoende belast worden tijdens snelwegritten zodat de roetfilter voldoende kan regenereren. Bij bussen en vrachtwagens is de roetfilter intussen ook al vijftien jaar ingeburgerd en zien we dus meer niet-uitlaat fijnstof geproduceerd worden dan wat er nog uit de roetfilter kan ontsnappen. Ook hier zal dus een regulering van deze steeds signifikanter wordende bron van fijnstofemissies doorslaggevend zijn om de totale uitstoot van fijnstof, over alle bronnen heen, aan te kunnen pakken.

Figuur 30 toont de impact van onder meer biobrandstoffen op de uitstoot van fijnstof, in dit geval voor stadsbussen. Algemeen gezien verminderen biobrandstoffen de productie van deze pollutant tijdens het verbrandingsproces, hoewel dit nauwelijks zichtbaar is voor de HVO-brandstof in deze figuur. In de WTT-fase zien we die invloed er wel goed doorkomen. Naarmate de stadsbussen, die in deze figuur getoond worden, meer geëlektrificeerd worden, wordt de energiemix bepalender voor de WTT-bijdrage aan fijnstof.



Figuur 30: Fijnstofemissies voor stadsbussen met verschillende aandrijftechnologieën (Nordelöf et al., 2019)

3.6.2.A. VERWACHTE EVOLUTIE IN DE BIJDRAGE AAN FIJNSTOFEMISSIONS DOOR GEMOTORISEERDE WEGVOERTUIGEN

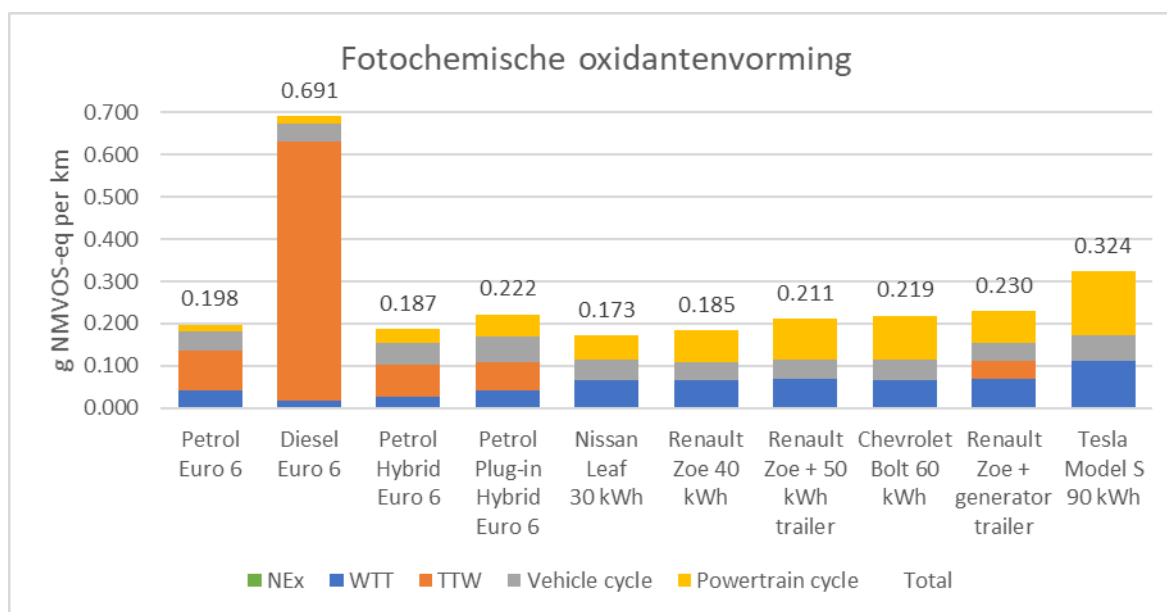
Sinds de introductie van Euronorm 6c (2017) moeten ook direct geïnjecteerde benzinevoertuigen voorzien zijn van een roetfilter. Dit motorisatietype is al even de norm bij nieuwe modellen gezien ze betere verbruikscijfers kunnen voorleggen. In dat opzicht zal de uitstoot van zowel PM (deeltjesmassa) als PN (aantal deeltjes) steeds verder afnemen naarmate de vloot met een roetfilter toeneemt. Zoals eerder aangehaald houdt dit echter wel een risico in wanneer deze roetfilters illegaal worden gemanipuleerd/verwijderd. Dit vraagt om een invoering van de deeltjesteller tijdens een periodieke technische inspectie, waarmee men deze praktijken heel efficiënt en snel kan opsporen.

Op vlak van niet-uitlaat fijnstofemissies wordt er op Europees niveau gewerkt aan een test om remmenslijtage vast te kunnen stellen, waardoor er ook een limiet kan worden bepaald. Voor bandenslijtage bestaat zo'n uniforme test echter nog niet, zodat er hiervoor op korte termijn geen veranderingen kunnen worden verwacht. Niet-uitlaat fijnstofemissies zijn heel relevant geworden sinds de introductie van roetfilters, omdat deze laatste dusdanig efficiënt zijn dat het fijnstof via banden en remmen een grotere bijdrage in mg/km levert dan de verbranding in de motor zelf.

3.6.3. IMPACT 3: FOTOCHEMISCHE OXIDANTVORMING (SMOG)

Deze indicator drukt het potentieel uit van ozonvorming door atmosferische stikstofoxide (NO_x) en niet-methaan-vluchtige organische stoffen (NMVOS) formaties. In de ReCiPe-methode wordt NMVOS hierbij gebruikt als referentiestof. Deze ozonvorming mag niet worden verward met stratosferisch ozon,

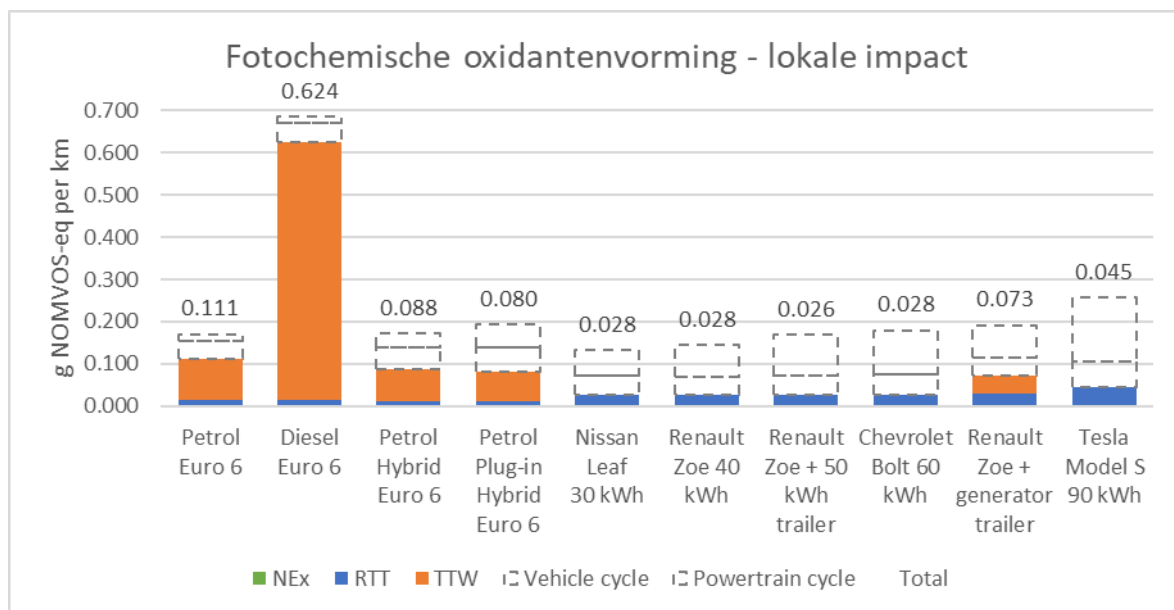
waarvoor een aparte indicator is voorzien in ReCiPe, zijnde de aantasting van ozonlaag. De inademing van ozon veroorzaakt ademhalingsproblemen en is verantwoordelijk voor de zomersmog in de stedelijke omgeving.



Figuur 31: Impact op smogvorming per aandrijftechnologie (Hooftman, Messagie, Joint, et al., 2018)

De bijdrage tot smogvorming van verschillende motorisaties voor personenwagens wordt geïllustreerd in Figuur 31. Wat we hieruit kunnen afleiden is dat conventionele dieselauto's de grootste invloed hebben in deze impactcategorie. De voornaamste reden hiervoor is dat er in plaats van de officiële emissiefactoren voor Euro 6(a,b,c) NO_x werd gewerkt met praktijkemissies, welke nog steeds 3-4 maal hoger liggen dan toegelaten. Dit verklaart de grote fractie van de bijdrage in de *tank-to-wheel* (TTW) fase van het dieselveertuig. Voor de meest recente Euro 6d-Temp en 6d-gecertificeerde dieselauto's kan een beduidend lagere reële NO_x-uitstoot worden bereikt door geavanceerde nabehandelingssystemen voor uitlaatgassen en een strengere controle bij de typegoedkeuring van nieuwe modellen. Hierdoor zou de TTW-impact kunnen halveren. We spreken hier echter in de voorwaardelijke wijs omdat Euro 6d-eisen pas vanaf januari 2021 de norm worden voor alle nieuwe voertuigen en er dus nog maar weinig van zulke dieselmodellen rondrijden. Bijgevolg zijn deze voertuigen nog niet uitvoerig getest door onafhankelijke instellingen, waar dit bij de eerdere generaties meestal grote discrepanties met de officiële emissiefactoren blootlegden. In geval van de laatste twee generaties (Euro 6d-temp en 6d) komt het er vooral op aan om te gaan testen tegen de grenzen van de officiële praktijktest (of ook de boundary conditions) aan. Deze dekken namelijk nog steeds maar een deel van alle praktijksituaties, al is dit deel wel aanzienlijk groter dan dit het geval is bij een rollenbanktest. Zulke testen dienen echter ook voor de recentste benzinevoertuigen te worden gedaan, gezien deze steeds meer via een directe brandstofinjectie werken en zo meer NO_x uitstoten dan hun voorgangers, al stoten benzinevoertuigen gebruikelijk heel lage hoeveelheden van deze pollutant uit. Zoals we eerder besproken voor roetfilters bestaat er ook een intrinsieke bedreiging voor de zeer efficiënte nabehandelingssystemen zoals SCR's voor NO_x-emissies, waarbij na een illegale verwijdering/uitschakeling ervan zeer hoge NO_x-emissies kunnen worden uitgestoten. Zulke manipulaties zien we voorlopig voornamelijk opdagen bij Euro V en

VI vrachtwagens, waarbij de motivatie hiertoe veelal het besparen van AdBluekosten is. AdBlue is een zogenaamde dieseluitlaatvloeistof die in de uitlaatgassen wordt geïnjecteerd om schadelijke NO_x-moleculen om te zetten in onschadelijke stoffen als stikstof en CO₂. Aangezien gelijkaardige (SCR) emissiebeheersingsapparatuur in de recentste dieselwagens wordt toegepast zullen gelijkaardige manipulaties echter niet achterwege blijven. De TTW-fase kan daardoor meerdere malen zwaarder doorwegen en daarmee ook de totale impact van de recentste dieselauto's, bestelwagens en vrachtwagens. Hoewel we voor benzine een relatief lagere TTW-uitstoot optekenen, zien we een relatief grote bijdrage door de WTT-fase, die verwijst naar het productieproces van de brandstof. In het algemeen heeft de BEV samen met een CNG-motorisatie de laagste impact op vlak van smogvorming. Deze laatste is echter niet opgenomen in Figuur 31.

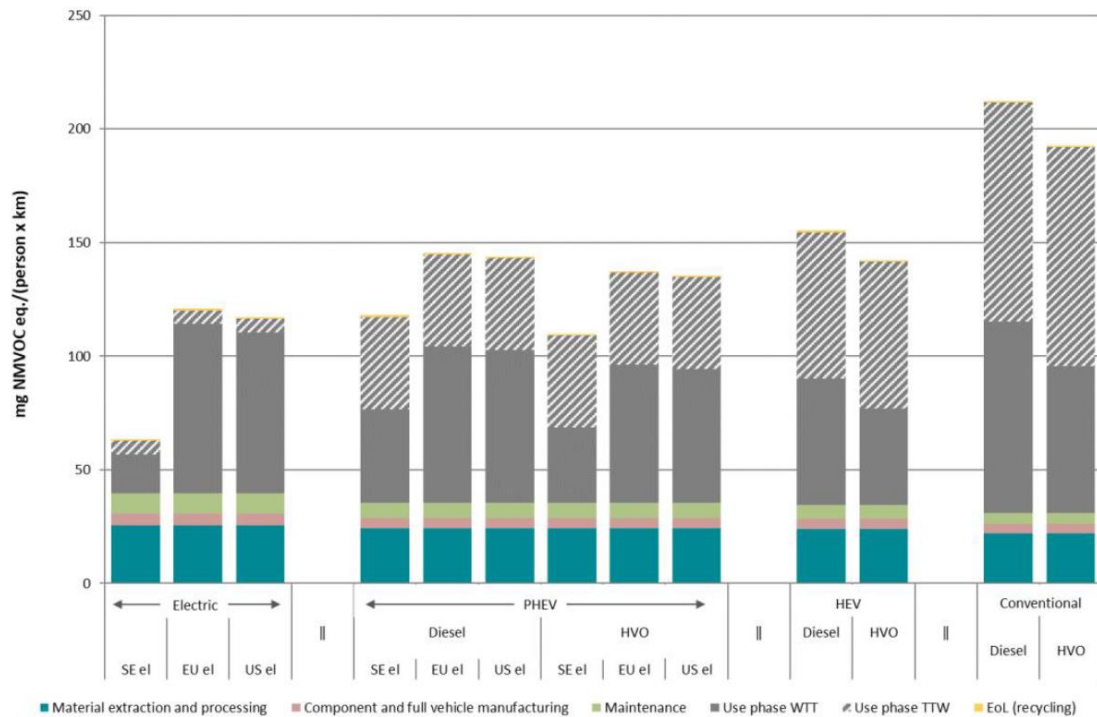


Figuur 32: Impact op lokale smogvorming per aandrijfttechnologie voor personenwagens (Hooftman, Messagie, Joint, et al., 2018)

Figuur 32 toont wat de lokale bijdrage is van verschillende types motorisaties voor personenwagens op vlak van smogvorming. Waar de *refinery-to-tank* (RTT) emissies in feite niet meetellen wanneer we over een impact in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest praten (de brandstof wordt immers buiten Brussel geproduceerd en smogvorming is een eerder lokaal fenomeen), dienen we dus voornamelijk te kijken naar de bijdrage tijdens de TTW-fase. In dat opzicht verbaast het niet dat dieselloertuigen de meest uitgesproken lokale bijdrage hebben en dat naarmate een groter aandeel van de voertuigaandrijving elektrisch gebeurt de TTW-bijdrage algemeen gezien afneemt. Ook in dit opzicht valt de uitfasering van dieselloertuigen in een dichtbevolkte omgeving te rechtvaardigen, al zal het TTW-gedeelte voor de nieuwste Euro 6d-temp en 6d dieselwagens al beduidend lager zijn. Toch zal deze wellicht een veelvoud blijven van bijvoorbeeld benzine wagens. CNG-voertuigen, die niet in deze vergelijking zijn opgenomen, scoren gunstig op vlak van lokale emissies die tot smog kunnen leiden, dit mede door een lagere WTT-bijdrage. Hierdoor zou deze technologie in de rangschikking tussen PHEV's en EV's komen te liggen. Biomethaan zou op vlak van lokale (TTW) emissies geen verschil geven ten opzichte van fossiele CNG (Van Mierlo, Messagie, & Rangaraju, 2017).

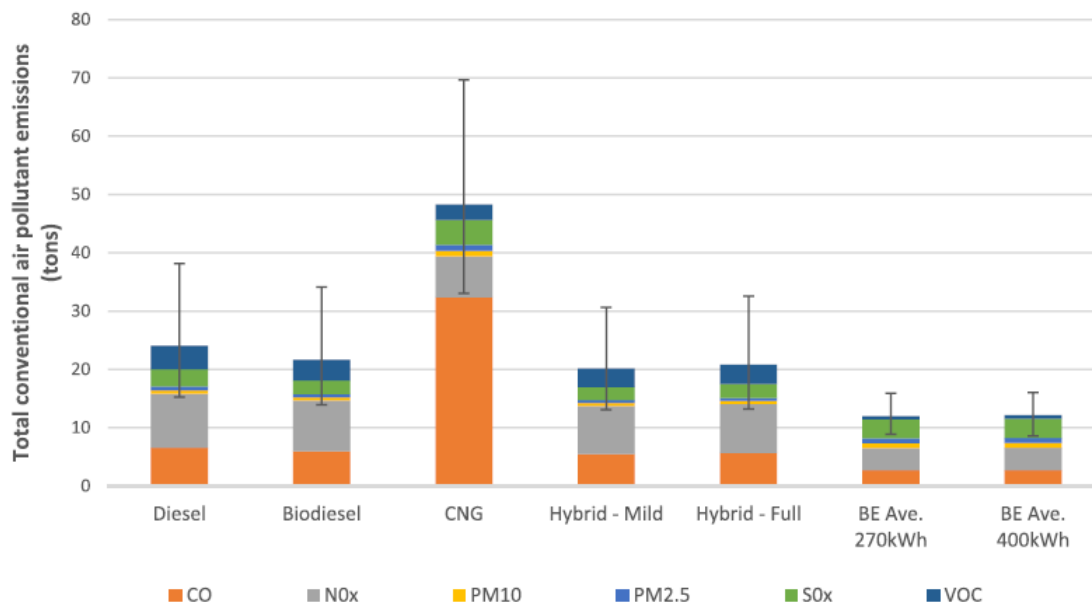
Voor wat betreft bestelwagens zien we geen wijziging ten opzichte van personenwagens gezien deze aan gelijkaardige (iets minder strenge) NO_x emissielimieten moeten voldoen volgens de Euronormen en op identieke motorisaties werken als (diesel) personenwagens. Waar bestelwagens onder verschillende beladingen kunnen worden gebruikt, zien we bij de recente modellen voornamelijk een stijging in CO₂-emissies, terwijl er geen eenduidig verband is met systematisch hogere NO_x-emissies. Vergeleken met de typegoedkeuringslimiet stootten de door TNO geteste bestelwagens eind 2017 wel tot acht keer meer NO_x uit dan toegelaten, hoewel er ook modellen waren waarvoor heel lage emissies werden gerapporteerd tijdens praktijkgebruik (Kadijk et al., 2017). Waar echter momenteel nog geen uitvoerig onderzoek naar is gedaan, is de uitstoot van bestelwagens wanneer ze stationair draaien, bijvoorbeeld tijdens een levering. Vooral wanneer de motor dan extra belast wordt om bijvoorbeeld een koeling in het vrachtruim op temperatuur te houden wordt verwacht dat de stationaire emissies hoog oplopen. Dit vraagt om een betere vertegenwoordiging van deze situatie tijdens de typegoedkeurings-test waarbij gebruik wordt gemaakt van mobiele meetapparatuur (PEMS).

Voor wat betreft stadsbussen en vrachtwagens mogen we algemeen stellen dat deze op vlak van NO_x-emissies goed scoren en veelal onder de opgelegde emissielimiet blijven, ook in de praktijk (Vermeulen, van Gijlswijk, van Heesen, Buskermolen, & van Goethem, 2019). In tegenstelling tot bij personenwagens, waarvoor *in-service conformity* tests pas vanaf september 2020 worden ingevoerd, bestaan zulke tests al sinds 2014 voor Euro VI voertuigen. Dit heeft ervoor gezorgd dat constructeurs voor deze technologie ook in de praktijk goede resultaten kunnen voorleggen (Keramydas et al., 2018). Toch worden deze lage emissies voornamelijk bereikt bij hogere, constante snelheden, zoals tijdens een rit buiten de stad of op snelwegen. Frequent stoppen en lage snelheden zorgen er immers voor dat de SCR-katalysator voor de omzetting van NO_x niet optimaal kan werken. Daarom zien we voor vuilniswagens, distributiewagens en andere vrachtvoertuigen die zich in de stad begeven dat de tijdelijke NO_x-uitstoot hoog kan zijn en dat deze sterk afhangt van de inzet van het voertuig. Bij stadsbussen speelt dit effect minder, omdat de inzet van dit type voertuigen beter te voorspellen is dan bij andere vrachtvoertuigen, nl. korte trajecten aan een constante snelheid met veel stops. Ook hierbij is het belangrijk dat er op Europees niveau wordt gestreefd naar een betere vertegenwoordiging van rijtsituaties in de typegoedkeuringstest waarbij de motor sterk belast wordt bij lage motortemperaturen (zoals in de stad tijdens het frequent optrekken en afremmen). Voor stadsbussen is het stedelijke gedeelte al beter afgedekt in de praktijktest dan voor de andere vrachtvoertuigen. Illegale manipulaties aan de SCR (waarbij meestal de roetfilter ook wordt verwijderd en 'weggeschreven' uit de boordcomputer) hebben een heel grote impact op de NO_x-emissies. Zo zal een gemanipuleerde Euro V vrachtwagen evenveel uitstoten als 3,5 reguliere varianten, terwijl dit voor de recentste Euro VI vrachtwagens gelijk komt te staan aan 15 reguliere varianten.



Figuur 33: De impact van stadsbussen op ozon/smogvorming voor verschillende motorisaties (Nordelöf et al., 2019)

Figuur 33 toont dat de toepassing van een alternatieve (HVO) brandstof in de conventionele dieselmotor weinig verschil oplevert in de TTW-fase wanneer het op NMVOS-equivalenten aankomt. Een verdere elektrificatie, waarbij de verbrandingsmotor elektrisch wordt geassisteerd bij sterk belastende momenten zoals bij het optrekken vanuit stilstand, kan dan weer wel beduidend bijdragen aan een reductie. Figuur 34 geeft een overzicht van de voornaamste polluenten voor vrachtwagens met verschillende motorisaties. Hier springt CNG in het oog door de hoge gecombineerde bijdrage aan polluenten tijdens de levensduur van het voertuig, hetgeen voornamelijk veroorzaakt wordt door bijdrage aan emissies van koolstofmonoxide (CO) tijdens de TTW-fase en zwaveloxides (SO_x). Deze laatste ontstaan voornamelijk tijdens de WTT-fase en dus tijdens de productie en verwerking van aardgas. Verder zien we in deze figuur een iets lagere NO_x-uitstoot voor biodieselvarianten, alsook een lagere CO-uitstoot, terwijl een elektrificatie van de aandrijflijn tot sterke reducties van de polluenten in het algemeen kan leiden.



Figuur 34: Overzicht van gemiddelde pollutienemissies voor vrachtwagens met verschillende soorten aandrijflijnen (Sen et al., 2017)

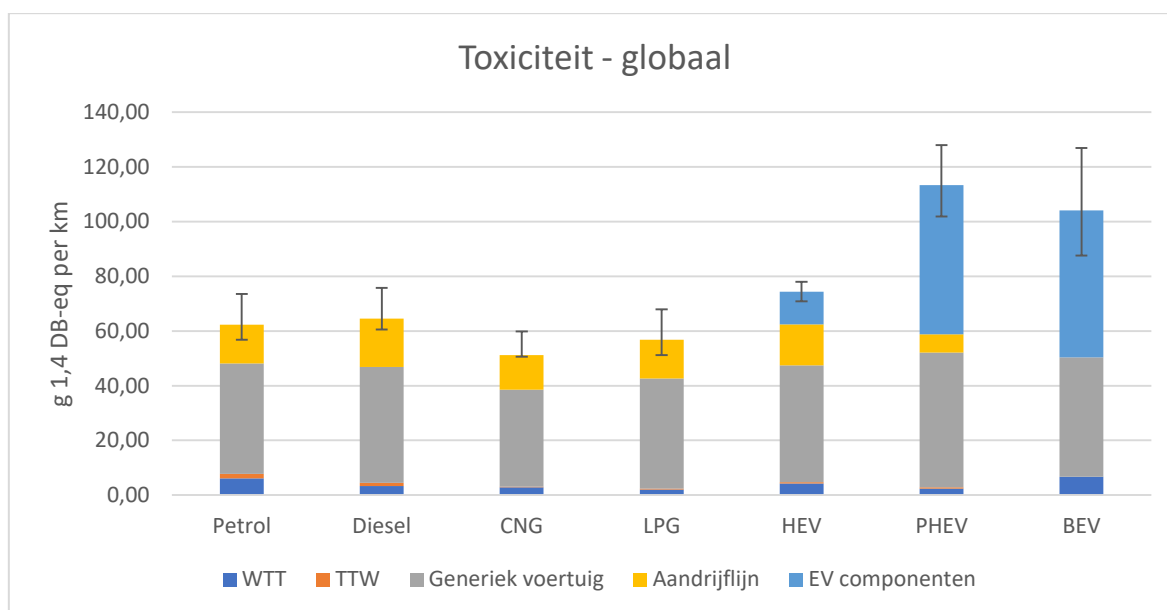
3.6.4. IMPACT 4: TOXICITEIT VOOR MENSEN

Deze impactcategorie geeft de persistentie in het milieu en de accumulatie van chemische toxiciteit in de voedselketen aan. De menselijke blootstelling bevat alle vormen van consumptie zoals drinken, inslikken, maar ook aanraken en inademen. Equivalenten aan de chemische stof 1,4-dichloorbenzeen (DCB), een veelgebruikt bestrijdingsmiddel, dient als referentie voor deze impactcategorie.

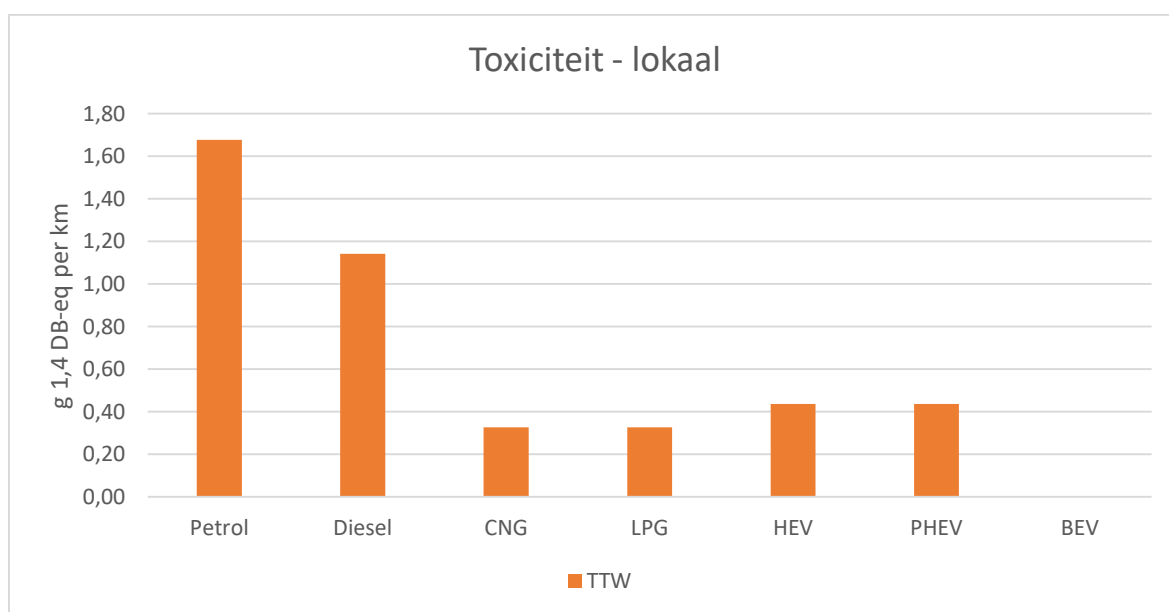
Wat belangrijk is in deze vergelijking is dat de grotere impact die we zien bij meer doorgedreven elektrificatie zich lokaal afspeelt op die plaatsen waar er aan mijnbouw wordt gedaan waarbij stoffen als arseen in het grondwater terechtkomen. Dit betekent dat de afgebeelde toxiciteit niet van toepassing is ten tijde van het gebruik van het voertuig, bijvoorbeeld in een Brusselse stedelijke context.

Figuur 35 toont het effect van verschillende voertuigtechnologieën op de menselijke toxiciteit. Elektrische voertuigen, met name PHEV's en BEV's, hebben in de vergelijking de grootste impact, terwijl CNG-voertuigen de minste impact hebben. Ongeacht de technologie is het grootste deel van de impact afkomstig van de voertuigfabricage. Bij de productie van het generieke voertuig (zonder aandrijflijn) is de belangrijkste bijdrage afkomstig van elektronische onderdelen zoals de motorregeleenheden (ECU) en de koperen bedrading. In het geval van een BEV maken specifieke onderdelen zoals het batterijpakket, de motor en de elektronica meer dan de helft, tot 52 %, van de totale impact uit. Vooral de elektronische componenten die worden gebruikt in het batterijmanagementsysteem, AC/DC- en DC/AC-omvormers, de ingebouwde lader en de stroomverdeler veroorzaken 26% van de schade. De printplaten, koperen en aluminium onderdelen zijn hier de belangrijkste reden voor zo'n grote impact. In de elektromotor zijn de contributies voornamelijk afkomstig van het gebruik van koper voor de secundaire spoelen. Zelfs in het geval van conventionele (benzine en diesel) voertuigen heeft de aandrijflijn van de motor (voornamelijk de kleine elektrische startmotor en de katalysatoren in het conventionele uitlaatsysteem) een aanzienlijke invloed op de toxiciteit. De toxische stoffen zijn dus

hoofdzakelijk gerelateerd aan de mijnbouwprocessen van grondstoffen voor de elektronica en andere componenten. De WTT-gedeelten van de plug-in EV's hebben een relatief hogere uitstoot dan de meeste andere voertuigen vanwege de ontginning van grondstoffen voor nucleaire energieproductie en andere fossiele brandstoffen in de brandstoftoevoerfasen. Daarnaast draagt de energie-intensieve materiaalverwerking en het afvoeren van mijnbouwafval in de uraniumwinning in belangrijke mate bij aan de toxiciteit. Intensief gebruik van koper en nikkel in onderdelen zoals batterijen, synchrone motor en vermogenselektronica zorgt voor een overmatige verwijdering van mijnafval dat sulfiden en arseen bevat. In dit opzicht kan een verbeterde afvalverwerking in de mijnbouwindustrie en een elektriciteitsmix die minder afhankelijk is van kernenergie de resultaten voor EV's sterk veranderen en de toxiciteit ervan verminderen.

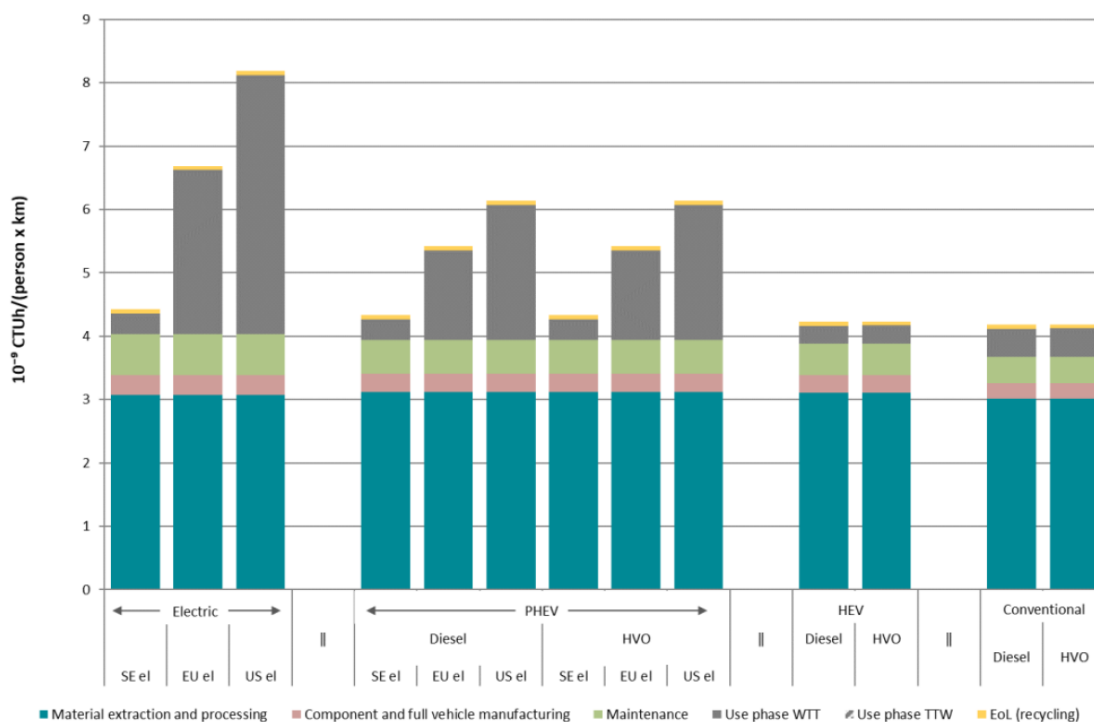


Figuur 35: De impact op de menselijke toxiciteit per voertuigtechnologie (Rangaraju, 2018)



Figuur 36: Lokale bijdrage van verschillende motorisatietypes aan toxiciteit

Wanneer we naar de lokale impact op de toxiciteit gaan kijken moeten we uit Figuur 37 de deelimpacten van het generiek voertuig en die van de aandrijflijn, de WTT impact en EV-specifieke componenten wegdenken. Wat resteert zijn zeer lage cijfers waarbij benzinevoertuigen het slechtste scoren, gevolgd door dieseltechnologie. Algemeen kunnen we stellen dat dezelfde trends zich voordoen bij andere voertuigcategorieën dan personenwagens. Uit Figuur 37 onthouden we dat er geen verschil zit tussen conventionele diesel en het HVO-alternatief voor deze impactcategorie.

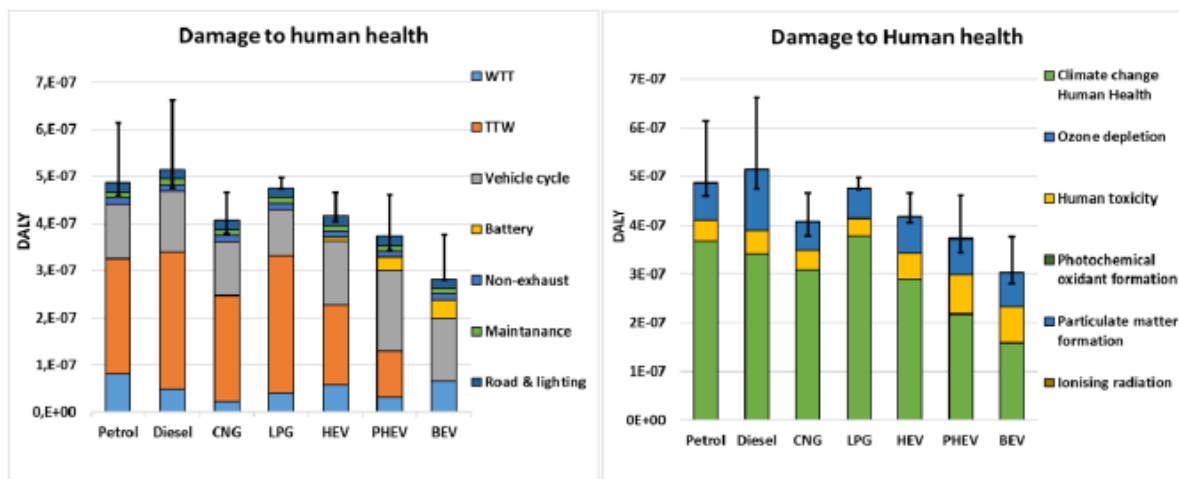


Figuur 37: Impact op menselijke toxiciteit voor stadsbussen met een verschillende aandrijftechnologie (Nordelöf et al., 2019)

3.6.5. ENDPOINT-IMPACT OP VOLKSGEZONDHEID

Een eenvoudigere, maar veel onzekerere manier om de prestaties van aandrijflijntechnologieën op het gebied van milieu en menselijke gezondheid te vergelijken is de beoordeling van de schade aan het einde van het karakterisatietraject. Deze tonen de impact van voertuigen op het gebied van bescherming, de maatschappelijke waarden en het streven naar bescherming. Er zijn drie *endpoint*-categorieën in de ReCiPe-methodologie, namelijk schade aan de menselijke gezondheid, schade aan het ecosysteem en uitputting van grondstoffen. Uit Figuur 15 onthouden we dat verschillende *midpoint*-impactcategorieën bijdragen aan deze drie *endpoint*-schades en alle 18 impactcategorieën in rekening worden genomen. Het eerste eindpunt, de menselijke gezondheid, wordt beïnvloed door de klimaatverandering, de aantasting van de ozonlaag, de vorming van fotochemische oxidanten, deeltjes en ioniserende straling. Deze wordt uitgedrukt in "Disability Adjusted Life Years" (DALY) en geeft de verloren levensjaren of de veroorzaakte invaliditeit aan in termen van tijd als gevolg van het effect van de emissies. Schade aan ecosystemen wordt beïnvloed door verzuring op het land, zoetwatereutrofiëring, toxiciteitsgerelateerde effecten, het bezetten van landbouw- en stedelijke grond

en transformaties van natuurlijke landschappen. De schade aan ecosystemen wordt aangeduid met het soortenjaar (*species years*), wat duidt op het verlies van dier- en plantsoorten. Ten slotte wordt de schade aan de grondstoffen berekend op basis van de uitputting van de fossiele en metaalgrondstoffen en wordt deze uitgedrukt in de geldwaarde van de uitgeputte hulpbronnen.



Figuur 38: Schade aan de volksgezondheid door de verschillende voertuigtechnologieën (Rangaraju, 2018)

Figuur 38 toont het geaggregeerde effect op de menselijke gezondheid voor de verschillende fasen van de levenscyclus, samen met de bijdrage van de verschillende *midpoint* categorieën van de impact aan de schade. Merk op dat dieselveertuigen over het algemeen schadelijker worden beoordeeld voor de menselijke gezondheid, terwijl BEV's van alle voertuigen de minste impact hebben. In alle voertuigen met verbrandingsmotoren levert het TTW-gedeelte een aanzienlijke bijdrage aan de totale score. Als we kijken naar de grafiek aan de rechterkant, dan zien we dat de klimaatverandering de grootste invloed heeft op de impact van alle voertuigen op de menselijke gezondheid, gevolgd door de vorming van deeltjes en de toxiciteit voor de mens. In het geval van PHEV's en BEV's heeft de toxiciteit een significant hogere bijdrage aan de totale score dan bij andere voertuigen. Dit is vooral te wijten aan de overmatige effecten op de menselijke gezondheid die worden veroorzaakt door de productie van EV-specifieke componenten, zoals eerder uitgelegd. De eerder aangehaalde methaanlekkages en hun nefaste impact op klimaatverandering zitten niet vervat in deze figuren, al kunnen we stellen dat CNG-voertuigen in geval van een onderschatte lekkage qua impact op volksgezondheid op hetzelfde niveau als de benzine- en dieselmotoren zou komen te liggen.

3.7. Conclusies

Een levenscyclusanalyse laat toe om voertuigen met verschillende aandrijvingstechnologieën op een gelijke manier met elkaar te kunnen vergelijken. In dit deelrapport hebben we gekeken naar de verschillende technologieën die vandaag van toepassing zijn voor de gemotoriseerde voertuigen die worden ingezet in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest. De belangrijkste bevindingen zijn:

1. Naarmate de elektrificatiegraad van aandrijfliijnen vergroot gaan algemeen gezien de lokale emissies omlaag. Hierbij wordt de manier waarop de elektriciteit, waarmee deze voertuigen worden opgeladen, wordt opgewekt doorslaggevend voor de *well-to-wheel*-impact van de voertuigen. Hoe meer hernieuwbare energie wordt aangewend, hoe lager de impact.
2. Alternatieven voor benzine- en dieselbrandstof bestaan in vorm van biobrandstoffen en binnenkort ook als zogenaamde e-fuels. Wanneer biobrandstoffen worden gewonnen uit afvalstromen uit verschillende sectoren, dan kunnen er aanzienlijke *well-to-tank* emissiereducties worden gerealiseerd. De *tank-to-wheel* emissies blijven in de meeste gevallen echter ongewijzigd, alsook de lokale impact van de verbranding ervan op schadelijke concentraties van pollutanten in de omgevingslucht. In dat opzicht moeten zulke brandstoffen hoofdzakelijk worden aangewend voor die transportsectoren waar elektrificatie op korte tot middellange termijn moeilijk te realiseren is. Denk hierbij aan lange-afstandstransport via vrachtwagens, of aan lucht- en scheepvaart.
3. De recentste Euro 6d-temp en 6d dieselwagens zullen aanzienlijk minder NO_x uitstoten dan hun voorgangers, al blijft hun impact beduidend groter dan voor de andere technologieën. Het intrinsieke risico van de hoogst-performante emissiecontrolesystemen zoals SCR-katalysatoren en roetfilters is dat, wanneer deze minder zouden gaan werken door slijtage (ouderdom) of illegaal zouden worden verwijderd, de bijdrage van zulke voertuigen enorm kan zijn.
4. Voor bestelwagens zien we, behalve een grotere CO₂-uitstoot ten gevolge van een grotere belading van het voertuig, weinig verschillen met personenwagens. Dit omdat er in de meeste gevallen sprake is van identieke (diesel)motorisaties en ongeveer dezelfde emissielimieten.
5. Voor wat betreft vrachtvervoer verwachten we tegen 2025 en 2030 zekere aanpassingen opdat ook deze sector sterke emissiereducties voor CO₂ zal moeten kunnen aantonen tegen die jaren. Het verbruik naar beneden krijgen is dan ook de grootste uitdaging voor vrachtwagens, gezien strenge emissielimieten voor pollutanten én een goede controle erop sinds 2014 ervoor heeft gezorgd dat vrachtwagens in het algemeen lage lokale emissies hebben. Dit uiteraard enkel wanneer er geen emissiefraude wordt gepleegd, hetgeen we de laatste jaren steeds vaker rapporteren.
6. Qua technologische vooruitgang verwachten we voor de komende vijf tot tien jaar een verschuiving van conventionele personen- en bestelwagens naar *full hybrids* en stekkerhybrides, simpelweg omdat de CO₂-emissiedoelstellingen tegen 2025 en 2030 heel ambitieus zijn. Deze houden uiteraard ook in dat steeds meer batterij-elektrische voertuigen op de markt zullen komen. Voor waterstof zien we in de *light-dutymarkt* nog geen directe doorbraak omdat de tankinfrastructuur nagenoeg onbestaande is en waterstof momenteel nog niet duurzaam kan worden opgewekt op een rendabele manier. Ook indien waterstof op een groene manier wordt opgewekt, lijkt het verstandiger om deze aan te wenden in sectoren als het zwaar vervoer, scheep- en luchtvaart en de industrie.
7. CNG-technologie lijkt ons met voorzorg te worden benaderd, gezien er nog veel vraagtekens zijn te plaatsen bij de *well-to-tank* impact voor klimaatverandering. Bovendien blijft ook aardgas een fossiele brandstof die lokaal bijdraagt aan schadelijke concentraties van pollutanten. In dat

opzicht bevelen we aan om deze technologie samen met conventionele benzinetecnologie uit te faseren tegen 2035.

8. Voertuiggewicht heeft, zeker in een stedelijke context, een grote impact op de energie-efficiëntie van gemotoriseerde voertuigen, gezien massa bij stadsritten steeds versneld en vertraagd moet worden. Bovendien zullen zwaardere voertuigen een grotere bijdrage hebben aan fijnstofemissies via slijtage van banden en remmen. In dat opzicht lijkt het verstandig om in te zetten op de sensibilisering van kleinere voertuigen.

4. TOTAL COST OF OWNERSHIP: VERGELIJING VAN TECHNOLOGIEËN OP VLAAK VAN KOSTEN

4.1. Inleiding

De kosten van de verschillende voertuigtechnologieën worden geanalyseerd aan de hand van een Total Cost of Ownership analyse of in het kort TCO-analyse. Een TCO-analyse voor voertuigen houdt niet enkel rekening met de aankoopkosten maar met alle kosten gedurende de eigendom van het voertuig.

In onderstaande TCO-analyses worden conventionele benzine- (P) en dieselveertuigen (D) vergeleken met hybride elektrische voertuigen (HEV), plug-in hybride elektrische voertuigen (PHEV), batterij-elektrische voertuigen (BEV), gecomprimeerde- aardgasvoertuigen (CNG) en waterstofvoertuigen (H2). Andere technologieën werden niet opgenomen in de analyse wegens een gebrek aan modellen op de markt. Deze voertuigen worden vergeleken voor de segmenten van stadswagens en medium wagens. Naast een analyse voor particuliere personenwagens, worden het aankopen en leasen van personenwagens als bedrijfswagens bekeken en het aankopen van lichte bedrijfswagens voor particulier gebruik.

Voor andere voertuigcategorieën worden de TCO of kosten aan de hand van de literatuur besproken. Deze voertuigcategorieën omvatten vrachtwagens, bussen, motorvoertuigen, elektrische fietsen, speed pedelecs en autonome voertuigtechnologieën. De opportuniteiten voor deelwagens worden ook aan de hand van literatuur besproken.

4.2. Personenwagens

4.2.1. ALGEMENE ASSUMPTIES VOOR PERSONENWAGENS

In Tabel 5 staan de verschillende assumpties opgesomd. De Belg bezit een wagen gemiddeld gedurende ongeveer 9 jaar (FEBIAC, 2020) en rijdt een afstand van 14.790 km per jaar (Kwanten, 2018). Dit komt overeen met een totale afstand van 133.110 km tijdens de jaren dat men het voertuig bezit.

Een reële verdisconteringsvoet van -0,42% wordt gebruikt (European Central Bank, 2020)¹⁷. Deze verdisconteringsvoet komt overeenkomt met de 9 jaar nominale interestvoet in de Eurozone voor staatsobligaties van landen met een AAA-rating. Deze waarde dateert van 17 februari 2020. Een

¹⁷ Deze verdisconteringsvoet is niet significant veranderd door de COVID-19 context (-0,54% op 30 september 2020), waardoor de resultaten met deze verdisconteringsvoet nog steeds toepasselijk zijn.

negatieve verdisconteringsvoet duidt aan dat er in België voorspeld wordt dat de groei beperkt zal zijn, gepaard met een hoge inflatie. Deze economische situatie zorgt voor een stimulatie van de investeringen (Lebeau, Macharis, & Mierlo, 2019b).

Tabel 5: Algemene assumpties TCO

Assumptie	Waarde	Referentie
Aantal jaren bezit voertuig	9 jaar	(FEBIAC, 2020)
Jaarlijks kilometerafstand	14.790 km/jaar	(Kwanten, 2018)
Totaal kilometerafstand tijdens bezit	133.110 km	/
Disconteringsvoet	-0,42%	(European Central Bank, 2020)
Aantal eigenaars	1	/

4.2.2. METHODOLOGIE VOOR EEN NIEUWE WAGEN

De kosten die in de toekomst voorkomen worden geschat aan de hand van de huidige-waarde methodologie. De huidige waarde simuleert de huidige prijs van een aankoop die men pas in de toekomst maakt. Onderstaande formule voor een eenmalige kost (De Clerck et al., 2018):

$$PV = A_t * \frac{1}{(1+r)^t}$$

Om de huidige prijs van een repeterende kost te benaderen, wordt volgende formule gebruikt:

$$PV = A_0 * \frac{(1+r)^t - 1}{r * (1+r)^t}$$

Waar:

- PV: huidige waarde
- A_t : eenmalige kost op tijdstip t
- A_0 : repeterende kosten
- r: verdisconteringsvoet
- t: tijd uitgedrukt in jaren

De TCO-analyse wordt in volgende drie stappen onderverdeeld:

1. De analyse van de kosten.
2. Het berekenen van de huidige waarde van deze kosten.
3. De huidige waarde delen door het aantal afgelegde kilometers tijdens het bezit van het voertuig voor het verkrijgen van een kost per kilometer.

Deze drie stappen worden wiskundig genoteerd in onderstaande formule voor de TCO:

$$TCO = \sum A_t * \frac{1}{(1+r)^t} + \sum A_0 * \frac{(1+r)^t - 1}{r * (1+r)^t}$$

Voor een TCO-analyse van personenwagens komen er drie verschillende soorten kosten in aanmerking, namelijk, de kosten bij aankoop, de operationele kosten en de niet-operationele kosten (De Clerck et al., 2018). De TCO is dus een functie van onderstaande parameters:

- Aankoopkosten:
 - Initiële waarde van de wagen (inclusief BTW)
 - Belasting op inverkeerstelling (BIV)
- Operationele kosten:
 - Brandstof- en elektriciteitsprijzen
- Niet-operationele kosten:
 - Jaarlijkse verkeersbelasting (VB)
 - Verzekering
 - Onderhoudskosten

4.2.2.A. AANKOOPKOSTEN

De initiële waarden van de voertuigen die in de analyse opgenomen worden, bevatten de belasting op toegevoegde waarde (BTW) maar geen prijsvermindering of promoties van de autodealers. De prijzen werden gevonden op de website van ("AutoGids," 2020).

Tabel 6: Depreciatiepercentages van de verschillende technologieën (De Clerck et al., 2018)

Technologie	Depreciatie percentage
Benzine	84,5%
Diesel	82,7%
HEV	83,4%
BEV	78,6%
PHEV	82,4%
CNG	78,1%
H2	78,6%

Aangezien voertuigen over de tijd hun waarde verliezen, moet er rekening gehouden worden met de depreciatie per jaar van een voertuig. De percentages in Tabel 6 stellen de percentages van de jaarlijkse depreciatie voor. De depreciatiepercentages werden overgenomen uit het werk van De Clerck et al. (2018). Door een gebrek aan data voor de Belgische markt wordt de depreciatie per jaar voor waterstofvoertuigen gelijkgesteld aan deze van BEV's, aangezien beide technologieën uitsluitend aangedreven worden door een elektrisch motor. In werkelijkheid zou deze depreciatie waarschijnlijk lager zijn door een gebrek aan tweedehandsmarkt, maar er wordt toch gekozen om geen veel lagere depreciatiewaarde te geven om de resultaten zo weinig mogelijk te vertekenen.

De belasting op inverkeerstelling (BIV) is een eenmalige kost die men bij de aankoop van een nieuw voertuig moet betalen. Ook voor tweedehandswagens moet men deze belasting betalen. Deze belasting wordt in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest bepaald in functie van het vermogen, de fiscale PK en de cilinderinhoud van het voertuig (Brussel Fiscaliteit, 2020).

4.2.2.B. OPERATIONELE KOSTEN

De prijzen voor benzine en diesel komen overeen met de gemiddelde prijzen van 2019 volgens de Belgisch Petroleum Federatie (2020a). De gemiddelde prijs voor benzine in 2019 bedroeg 1,457 €/l en voor diesel was de gemiddelde prijs 1,5216 €/l. Accijnzen ter waarde van 0,6002 €/l worden geheven op benzine en diesel en zijn inbegrepen in boven vermeldde prijzen (Belgisch Petroleum Federatie, 2020b).

Voor elektriciteit werd de prijs per kilowattuur berekend door de gemiddelde prijs van vorig jaar te berekenen aan de hand van het rapport van Brugel van het laatste kwartaal van 2019 (Brugel, 2019). Het rapport bevat een overzicht van de prijzen van de verschillende abonnementen in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest. Aangezien het abonnement *Electrabel Customer Solutions Easy Indexé* het standaardcontract is in het Brussels Gewest, werd dit als referentie beschouwd. Vervolgens werd de prijs per kWh voor dit abonnement berekend aan de hand van de prijzen voor het verbruik van een gemiddeld gezin (3500 kWh per jaar). Dit resulteerde in een gemiddelde van 0,2306 €/kWh. De elektriciteitsprijs in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest bestaat uit 26,03% aan heffingen opgelegd door de overheid (CREG, 2020).

Als referentie voor de prijs van CNG, werden de prijzen die online beschikbaar zijn op de website van CNG Europe (2020) beschouwd voor België. Het gemiddelde werd genomen tussen de hoogste en laagste prijs. De gemiddelde prijs voor CNG bedraagt 0,92 €/kg. Er worden geen accijnzen geheven op CNG. Zouden dezelfde accijnzen geheven worden voor CNG als voor benzine of diesel, dan zou de prijs voor één kg CNG gelijk zijn aan 1,49 €/kg, dus tussen de prijzen van één liter benzine en diesel.

De referentieprijs voor waterstof is €10/kg volgens eGear.be (2019). Op waterstof worden er ook geen accijnzen geheven.

Tabel 7: Prijzen energiebronnen

Energiebronnen	Prijzen	Referentie
Benzine	1,457 €/l	(Belgisch Petroleum Federatie, 2020a)
Diesel	1,5216 €/l	(Belgisch Petroleum Federatie, 2020a)
Elektriciteit	0,2306 €/kWh	(Brugel, 2019)
CNG	0,92 €/kg	(CNG Europe, 2020)
H2	10 €/kg	(eGear.be, 2019)

Het verbruik van de brandstofvoertuigen werd aan de hand van de website van Autogids.be (2020) bepaald. Deze waarden zijn uitgedrukt in NEDC verbruikscijfers. Om het reële verbruik van de voertuigen te bekomen, werd er een correctie per voertuigtechnologie toegepast door vermenigvuldiging met een factor. De factoren per voertuigtechnologie worden in onderstaande tabel weergegeven (Bernard et al., 2018).

Tabel 8: Vermenigvuldigingsfactoren per voertuigtechnologie

Voertuigtechnologie	Factor
Benzine	1,33
Diesel	1,39
CNG	1,33
HEV(P)	1,33
PHEV	2,1

De verbruikscijfers voor BEV's zijn genomen uit de EV Database (EV Database, 2020). De EV Database "Real range" energieverbruikscijfers zijn parktijkwaarden die bekomen werden aan de hand van de boordcomputer van het voertuig die het echte verbruik van de aandrijving en boordsystemen meet. Deze waarden worden beïnvloed door een groot aantal parameters zoals weersomstandigheden, rijstijl en het gebruik van boordsystemen zoals airconditioning. De EV Database verzamelt op regelmatige basis nieuwe data uit praktijktesten om zijn "Real range" verbruikwaarden zo dicht mogelijk van de realiteit te houden.

Door een gebrek aan data wordt er geen correctie toegepast op het verbruik van waterstofvoertuigen.

4.2.2.C. NIET-OPERATIONELE KOSTEN

De verkeersbelasting wordt in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest bepaald volgens de fiscale PK en de cilinderinhoud van het voertuig (Brussel Fiscaliteit, 2020). Dit is een jaarlijks terugkerende kost.

In België is het verplicht om voertuigen te verzekeren. De minimumverzekering is de burgerlijke aansprakelijkheid die alle schade van de andere voertuigen bij een ongeval verzekert. De omniumverzekering is duurder maar verzekert ook de wagen van de bestuurder. In voorliggend TCO-model wordt een voertuig de eerste drie jaren verzekerd met een omniumverzekering en pas daarna wordt de burgerlijk aansprakelijkheidsverzekering verkozen.

Aangezien de prijs van de omniumverzekering afhangt van tal van factoren, werd er een fictief bestuurdersprofiel opgemaakt waarmee de verzekeringskosten bepaald werden op de website Verzekeringen.be (2020):

- Geboren op 1 januari 1982
- Rijbewijs behaald op 1 januari 2000
- Heeft de verzekering nooit verloren
- Kocht de wagen op 1 januari 2020
- Is de eerste bezitter van de wagen
- Gebruikt het voertuig voor woon-werk verkeer en privégebruik
- Rijdt 14.770km per jaar
- Bediende
- Woont in 1000 Brussel

Het onderhoud van een voertuig kan onderverdeeld worden in klein en groot onderhoud. Deze vinden respectievelijk plaats om de 20.000 km en 40.000 km (De Clerck et al., 2018). De prijzen van onderhoud zijn specifiek aan ieder model en werden online bepaald aan de hand van de onderhoudssimulator van Midas (Midas, 2020). Aangezien het onderhoud van elektrische voertuigen goedkoper is, nemen we een conservatieve aanname dat het onderhoud 35% minder kost voor BEV's dan voor de gemiddelde

ICEV's (Danielis, Giansoldati, & Rotaris, 2018). Waterstofvoertuigen hebben ook kleinere onderhoudskosten. Hun onderhoudskosten zijn 30% kleiner dan voor brandstof voertuigen (Jones, Genovese, & Tob-Ogu, 2019). Voor hybride en CNG-voertuigen is de aanname dat de onderhoudsprijzen gelijk zijn aan die voor conventionele brandstof voertuigen (Goedecke, Therdthianwong, & Gheewala, 2007).

Om de 40.000 km worden de banden van het voertuig vervangen. De nieuwe banden en hun prijzen werden bepaald via de websites van Hallobanden.be (2020). Er wordt ook een extra kost van €56 euro aangerekend voor het vervangen en balanceren van de banden (De Clerck et al., 2018).

Na vier jaar moet het voertuig jaarlijks een autokeuring afleggen. De kost van deze controle is in totaal €36,90 voor niet-dieselveertuigen en €45,20 voor dieselveertuigen, waarvan €32,70 voor een basiskeuring en €4,20 voor de milieucontrole van een niet-dieselveertuig en €12,50 voor een dieselveertuig. Batterij-elektrische voertuigen zijn niet onderhevig aan de milieukeuring, hierdoor bedraagt de kost van de controle voor zo'n voertuig enkel de kost van een basiskeuring (€32,70) (Autocontrole, 2019).

Er wordt tijdens het eigenaarschap van BEV's geen batterijpack vervangen (De Clerck et al., 2018).

4.2.2.D. DE WAGENS

In Tabel 9 worden de voertuigen die beschouwd werden voor de TCO-analyse opgesomd. De voertuigen zijn onderverdeeld in twee verschillende segmenten, namelijk stadswagens en middelgrote wagens. Deze segmenten worden gedefinieerd op basis van de grootte van het voertuig, de kofferruimte en het vermogen van de motor. Er wordt geen diesel-PHEV-model in de analyse opgenomen aangezien er bijna 30 keer meer benzine-PHEV zijn in Brussel (4.289 benzine-PHEV's t.o.v. 152 diesel-PHEV's) ("Ecoscore," 2020). Voor stadswagens worden er geen dieselveertuigen opgenomen aangezien deze technologie minder voorkomt in dit voertuigensegment.

Tabel 9: Voertuigen voor TCO-analyse. Eigen opmaak op basis van data afkomstig van AutoGids.be (2020).

Merk	Model	Type	Vermogen in KW
Stadswagen segment			
VW Up!	1.0 MPi 44kW up!	P	44
Renault Twingo	0.9 TCe 95 Edition One	P	68
Toyota Yaris	1.0 VVT-i Y-oung	P	53
Fiat Panda	1.2 69 S&S Easy	P	51
Renault Zoë	Life B-buy R110	BEV	80
VW Up!	e-up!	BEV	61
Toyota Yaris	1.5 VVT-i Hybrid Active e-CVT	HEV(P)	74
VW Up!	1.0 MPi CNG 50kW eco up!	CNG	50
Fiat Panda	0.9 70 CNG Easy	CNG	51
Middelgrote wagen segment			

VW Golf	Golf VIII 2.0 TDI 85kW Life	D	85
Audi A3	Sportback 1.6 30 TDi 85kW	D	85
VW Golf	Golf VIII 5d 1.5 TSI Life	P	96
Nissan Micra	1.0 DIG-T N-Connecta	P	86
Toyota Corolla	1.2 Turbo Corolla	P	85
Audi A3	Sportback 1.0 30 TFSi 85kW	P	85
VW Golf	e-Golf	BEV	100
Nissan Leaf	Acenta 40kWh	BEV	110
Hyundai Ioniq	Electric Feel	BEV	100
Tesla Model 3	Standard RWD Plus	BEV	225
Toyota Corolla	1.8 Hybrid Corolla e-CVT	HEV(P)	90
Toyota Prius	1.8 VVT-i Hybrid Comfort	HEV(P)	90
Toyota Grand Prius +	1.8 VVT-i Hybrid Active	HEV(P)	100
Hyundai Ioniq	1.6 GDi ISG DCT Hybride Inspire	HEV(P)	104
Audi A3	Sportback 40 e-tron S tronic	PHEV(P)	150
VW Golf	1.4 GTE hybrid	PHEV(P)	180
Toyota Prius	1.8 VVT-i PHEV Hybrid Solar	PHEV(P)	90
Hyundai Ioniq	1.6 Plug-in Hybride Feel	PHEV(P)	100
VW Golf Variant	1.5 TGI Trendline DSG	CNG	125
Audi A3	Sportback 1.5 30 g-tron 96kW S tronic	CNG	81
Toyota Mirai		H2	114

4.2.3. RESULTATEN VOOR EEN NIEUWE WAGEN

In deze sectie worden de resultaten van de TCO voor een nieuwe wagen per voertuigsegment gepresenteerd. De voertuigsegmenten die besproken worden zijn de stadswagens en medium wagens.

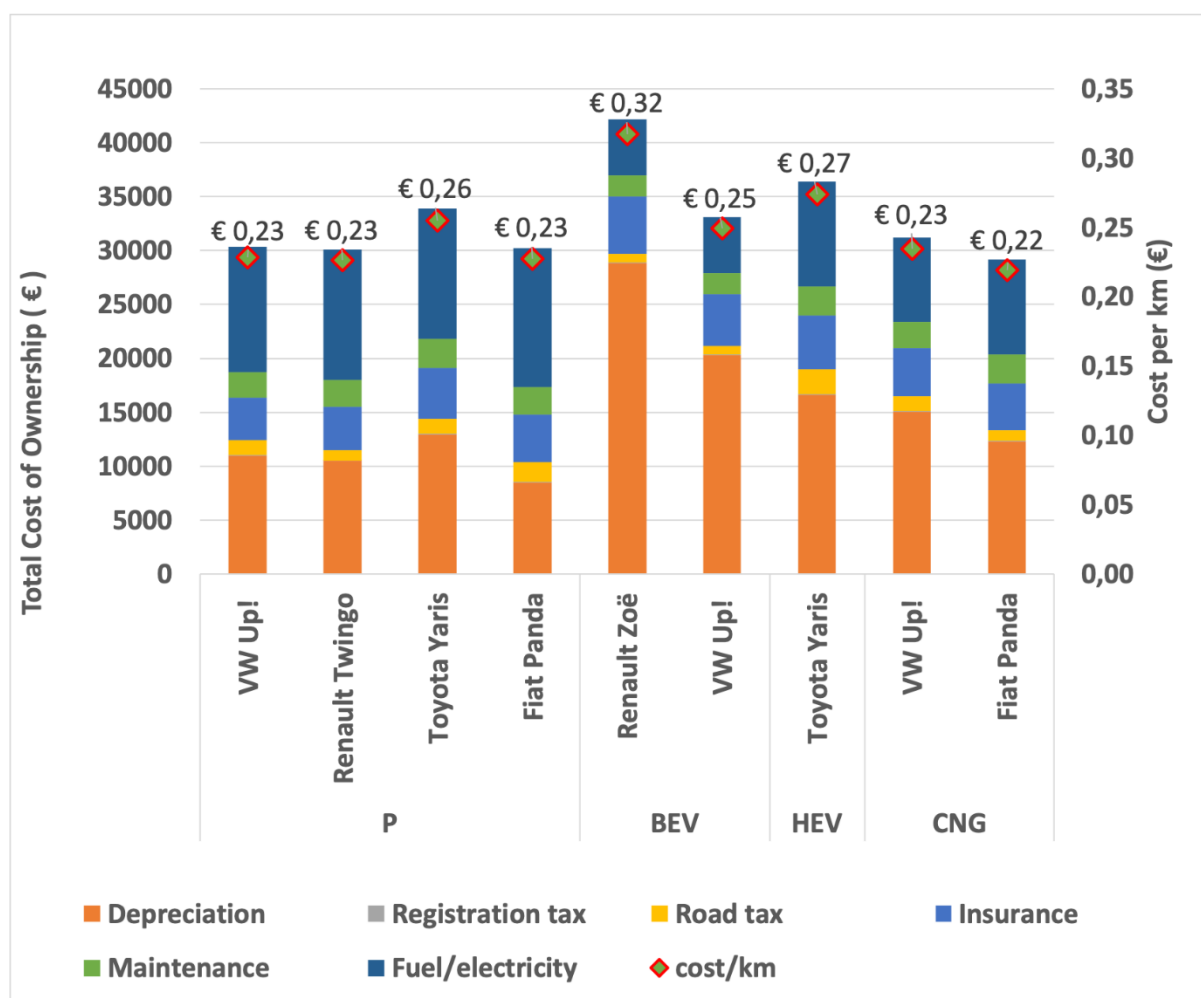
4.2.3.A. STADSWAGEN SEGMENT

De TCO-resultaten voor de stadswagens worden in Figuur 39 afgebeeld aan de hand van een staafdiagram. Op de x-as worden de verschillende voertuigen weergegeven (geordend volgens voertuigtechnologie). De waarde van de TCO is af te lezen op de linker y-as. De grootte van de staaf geeft aan hoe groot de TCO is van het voertuig. De staaf wordt onderverdeeld in verschillende kleuren. Iedere kleur stelt een verschillende kost voor. Hoe groter het deel van een staaf in één kleur, hoe groter de kost die eraan verbonden is. Op de rechter y-as wordt de kost per km weergegeven. De ruit met een rode boord en een groene vulling toont per voertuig aan hoeveel die kost per km bedraagt.

Bij Figuur 39 merkt men op dat de depreciatiekost voor de BEV's nog zeer hoog ligt ten opzichte van de depreciatiekost voor de benzinevoertuigen. Deze kost is gemiddeld meer dan 2 keer zo groot. De depreciatiekost van HEV's en CNG-voertuigen liggen hiertussen, met een klein voordeel voor CNG-voertuigen. Een andere kost die in de berekeningen groter is bij BEV's ten opzichte van de andere voertuigtechnologieën, is de kost van de verzekeringen. Sommige verzekeraars bieden echter lagere premies aan elektrische voertuigen, zoals bij Ethias. Al konden zo'n aanbiedingen de TCO verlagen, werd er hiermee geen rekening gehouden in de TCO analyse. Er werd enkel gewerkt met de premies die ontvangen werden tijdens de verzekeringssimulaties. Voor alle andere soorten kosten zijn BEV's

goedkoper. Wat de operationele kosten betreft, zijn BEV's het meest goedkope alternatief, met een elektriciteitskost die bijna 2,5 keer zo klein is als de brandstofkosten voor benzinevoertuigen (€ 5000 t.o.v. € 12000). Dit vertaalt zich in een gemiddelde TCO van 0,23 €/km voor de benzine- en CNG-voertuigen, 0,27 €/km voor HEV's en 0,28 €/km voor BEV's. Indien de NEDC verbruikscijfers gebruikt zouden worden, zou de TCO per km van de brandstof technologieën met 1-2 cents per km verlaagd worden (benzine: 0,21 €/km, HEV: 0,27 €/km en CNG: 0,21 €/km).

Betreffend de modellen, is in deze vergelijking duidelijk dat de Renault Zoë het duurste model is met een TCO van 0,32 €/km. Deze kost wordt vooral verklaard door de grote batterij waarmee de Renault Zoë uitgerust is (52 kWh). Het CNG model van de Fiat Panda is het goedkoopste model met een TCO ter waarde van 0,22 €/km. Bij het vergelijken van de verschillende modellen van de Volkswagen Up! merkt men dat de verschillen in TCO tussen de technologieën niet zo groot zijn. Het benzine model van de VW Up! heeft een TCO van 0,23 €/km. Deze TCO is gelijk aan die van het CNG-model en 0,02 €/km goedkoper dan van het elektrische model. Indien de depreciatiekost van de VW e-Up! in de toekomst daalt (zoals voorspeld door een reductie van de kost van de batterij), dan zal de TCO van dit model mogelijk kleiner kunnen zijn dan die van de benzine- en CNG-modellen.



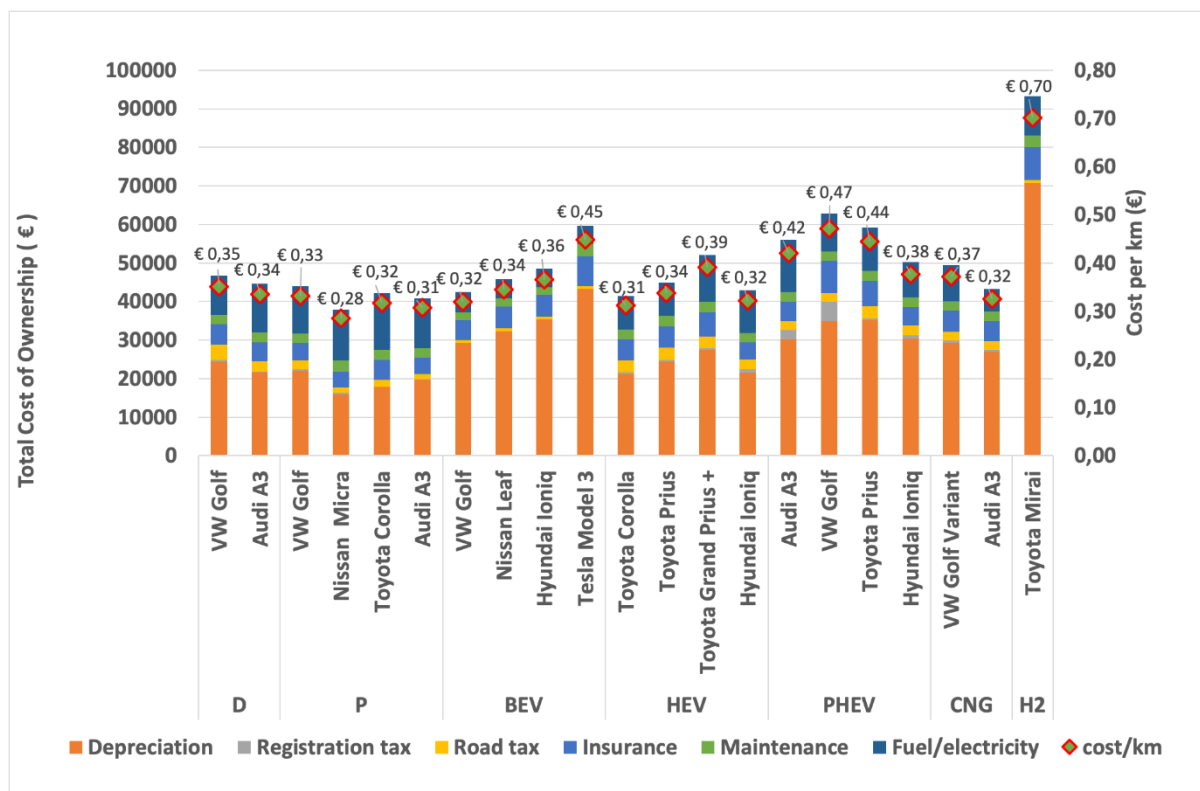
Figuur 39: TCO van het stadswagen segment voor nieuwe wagens

4.2.3.B. MIDDELGROTE WAGEN SEGMENT

In het middelgrote wagen segment is de kloof kleiner tussen conventionele voertuigtechnologieën en alternatieve voertuigtechnologieën. Figuur 40 toont de TCO van de verschillende modellen geordend per type technologie. Opnieuw, is de depreciatiekost van de alternatieve voertuigtechnologieën groter dan die van benzine- of dieselveertuigen. Echter is deze kost geen verdubbeling meer, zoals in het stadswagen segment. Deze kost blijft duidelijk de grootste kost in de TCO van BEV's en bedraagt in dit segment nog gemiddeld ongeveer 70% van de TCO voor BEV's. De andere kosten liggen gemiddeld in dezelfde grootordes bij de verschillende technologieën, behalve voor de operationele kosten waar BEV's en CNG-voertuigen beduidend minder kosten hebben. Gemiddeld, hebben BEV's operationele kosten rond de €5.000, CNG-voertuigen rond de €7.500 en de andere technologieën tussen de €10.000 (HEV) en €13.250 (P).

De gemiddelde TCO per voertuigtechnologie bedraagt 0,31 €/km voor benzinevoertuigen, 0,34 €/km voor dieselveertuigen, hybride elektrische voertuigen en CNG-voertuigen, 0,37 € voor BEV's (inclusief Tesla Model 3), 0,43 €/km voor PHEV's en 0,70 €/km voor waterstofvoertuigen. Al werd er maar één model bestudeerd (Toyota Mirai), kan er geconcludeerd worden dat waterstofvoertuigen momenteel nog zeer duur zijn. Dit vooral omwille van de zeer hoge aankooprijks (€ 79.900) en de hoge operationele kosten. Plug-in hybride voertuigen zijn meer dan 0,10 €/km duurder dan benzinevoertuigen en blijken dus nog een duur alternatief te zijn. Wat BEV's betreft, zijn deze voertuigen gemiddeld 0,03 €/km duurder dan dieselveertuigen. Deze waarde dient genuanceerd te worden. De TCO van BEV's is hard onderhevig aan de hoge kosten van de Tesla Model 3. Zonder de Model 3, zou de TCO per km van de BEV's 0,34 €/km bedragen, wat resulteert in eenzelfde TCO per km.

Als men de TCO van de andere modellen beschouwt, zijn er geen andere uitschieters naast de Tesla Model 3 en de Toyota Mirai. De Nissan Micra is de goedkoopste wagen met een TCO van 0,28 €/km en, zoals eerder vermeld, is de Toyota Mirai de duurste wagen met een TCO van 0,70 €/km.



Figuur 40: TCO van het middelgrote wagen segment voor nieuwe wagens

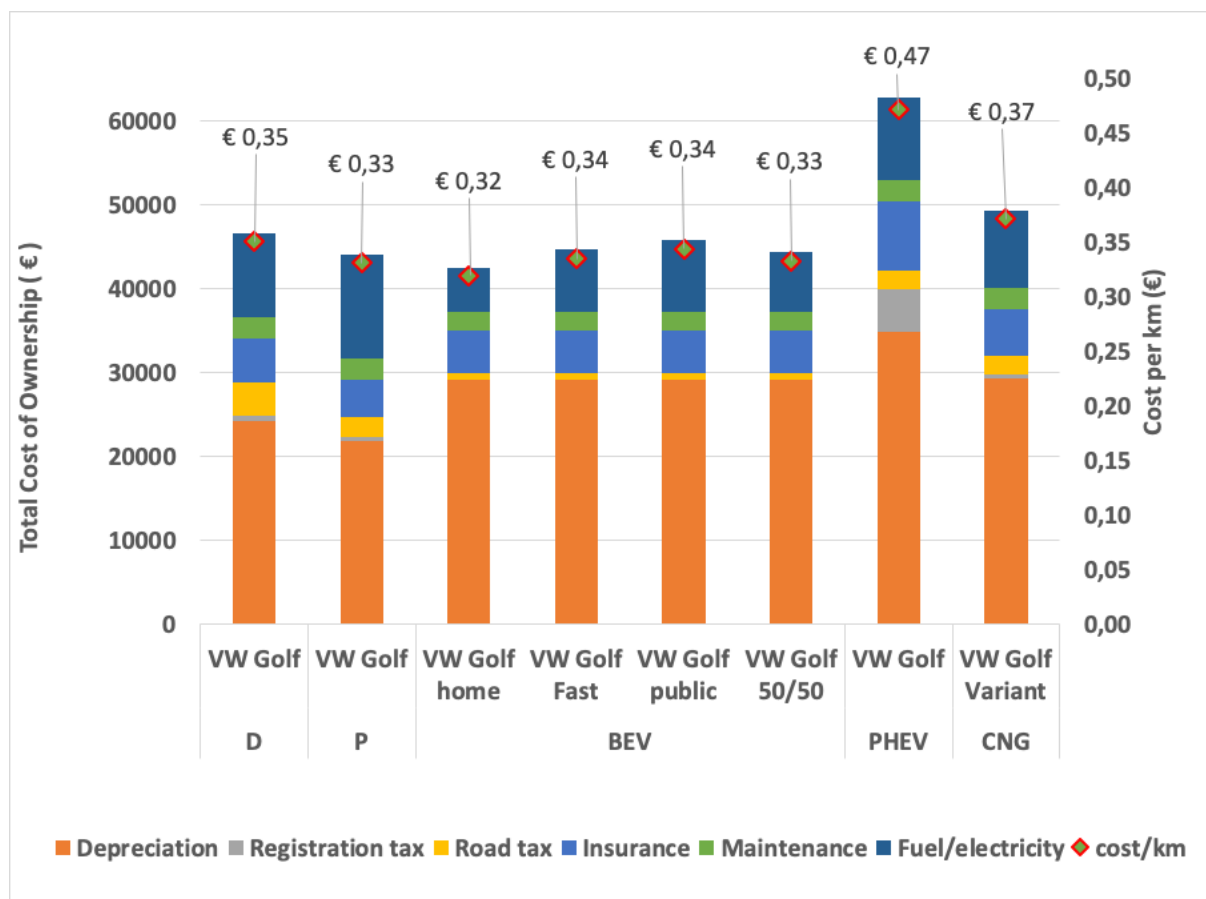
Een vergelijking van de verschillende modellen van de Volkswagen Golf wordt weergegeven in Figuur 41. In deze figuur worden ook verschillende laadprofielen bestudeerd om de sensitiviteit van de elektriciteitskost waar te nemen. De verschillende profielen zijn:

- VW Golf home: 100% van de tijd thuis laden
- VW Golf Fast: 20% van de tijd snel laden en 80% van de tijd thuis laden.
- VW Golf publiek laden: 100% van de tijd publiek laden
- VW Golf 50/50: 50% van de tijd publiek laden en 50% van de tijd thuis laden

Voor thuisladen wordt dezelfde prijs gehanteerd als in vorige analyses. De tarieven voor publiek laden zijn gebaseerd op de Fan abonnement, aangeboden door BlueCorner (2020). Er wordt jaarlijks een abonnement van € 59 betaald en de prijs per kWh zijn gelijk aan € 0,35 voor normaal laden (AC) en € 0,60 voor snel laden (DC). Er werden geen connectietarieven aangenomen bij deze berekeningen. Connectietarieven zijn additionele tarieven die afhankelijk zijn van de duurt dat een voertuig geconnecteerd is aan een laadpaal eens volledig opgeladen (bijvoorbeeld € 0,01 per minuut).

Deze vergelijking toont aan dat het BEV model het goedkoopst is met een TCO van 0,32 €/km indien er uitsluitend thuis geladen wordt. De andere laadprofielen tonen aan dat indien er publiek laadinfrastructuur gebruikt wordt, de TCO niet drastisch stijgt. De TCO per km ligt voor die profielen tussen de 0,33 €/km en 0,34 €/km wat overeenstemt met het gebruik van een benzine VW Golf (0,33 €/km) en iets minder duur dan een diesel VW Golf (0,35 €/km). De TCO per km van het CNG-model van de VW Golf is in deze vergelijking hoger dan de conventionele voertuigen en batterij elektrische voertuigen met een TCO van 0,37 €/km, al kan opgemerkt worden dat het model niet volledig hetzelfde

is, maar wel een gelijkaardig model. De hoogste TCO in deze vergelijking is de plug-in hybride VW Golf met een TCO van 0,47 €/km. Deze TCO komt voornamelijk door de hogere aankoopkost en de hogere vermogen, wat als gevolg heeft dat men voor dit voertuig meer taken en grotere verzekeringspremies moet betalen. Deze vergelijking toont duidelijk aan dat volledig elektrisch rijden, al een voordelige alternatief is, zelf indien publiek geladen wordt.



Figuur 41: TCO van verschillende VW Golf modellen en laadpatronen

4.2.4. METHODOLOGIE VOOR EEN TWEEDEHANDSWAGEN

Om de TCO voor een tweedehandswagen te berekenen wordt ervan uitgegaan dat de tweedehandswagen een leeftijd van 5 jaar heeft bij aankoop van het voertuig. Het eigenaarschap zal ook 9 jaren duren. De totale levensduur van het voertuig zal dus 14 jaar bedragen. Dit is één jaar minder dan de gemiddelde leeftijd van een passagierswagen (Hooftman, Messagie, Van Mierlo, & Coosemans, 2018) en 32% van de Belgische voertuigen zijn ouder dan 10 jaar (ACEA, 2018). Hierdoor lijkt deze assumptie niet onrealistisch te zijn.

Het herinschrijven van een tweedehandsvoertuig, die 5 jaar oud is, door een andere bestuurder heeft verschillende implicaties op de totale kostenberekeningen. Ten eerste, de aankoopprijs van het voertuig is een tweedehands aankoopprijs. Deze prijzen werden bepaald aan de hand van de simulator op de website ("AutoGids," 2020). Indien een model 5 jaar geleden niet te koop was, werd een gelijkaardig

model gekozen van hetzelfde merk ter indicatie van de tweedehandswaarde die het model zou hebben binnen 5 jaar. Ten tweede, de belasting op inverkeerstelling is degressief met de jaren. In andere woorden, een oudere wagen zal bij registratie minder belasting moeten betalen dan een nieuwe wagen. De inschrijvingskost voor voertuigen met een leeftijd van 5 jaar werd als referentie genomen voor de tweedehandswagens. Ten derde, wordt er geen omniumverzekering meer betaald tijdens de eerste 3 jaren van het bezit van het voertuig. Er wordt tijdens het volledige eigenaarschap een jaarlijkse burgerlijk aansprakelijkheidsverzekering betaald. Ten laatste, de jaarlijkse technische controle vindt onmiddellijk plaats en niet meer na 4 jaar. De andere algemene assumpties en berekeningen blijven gelden.

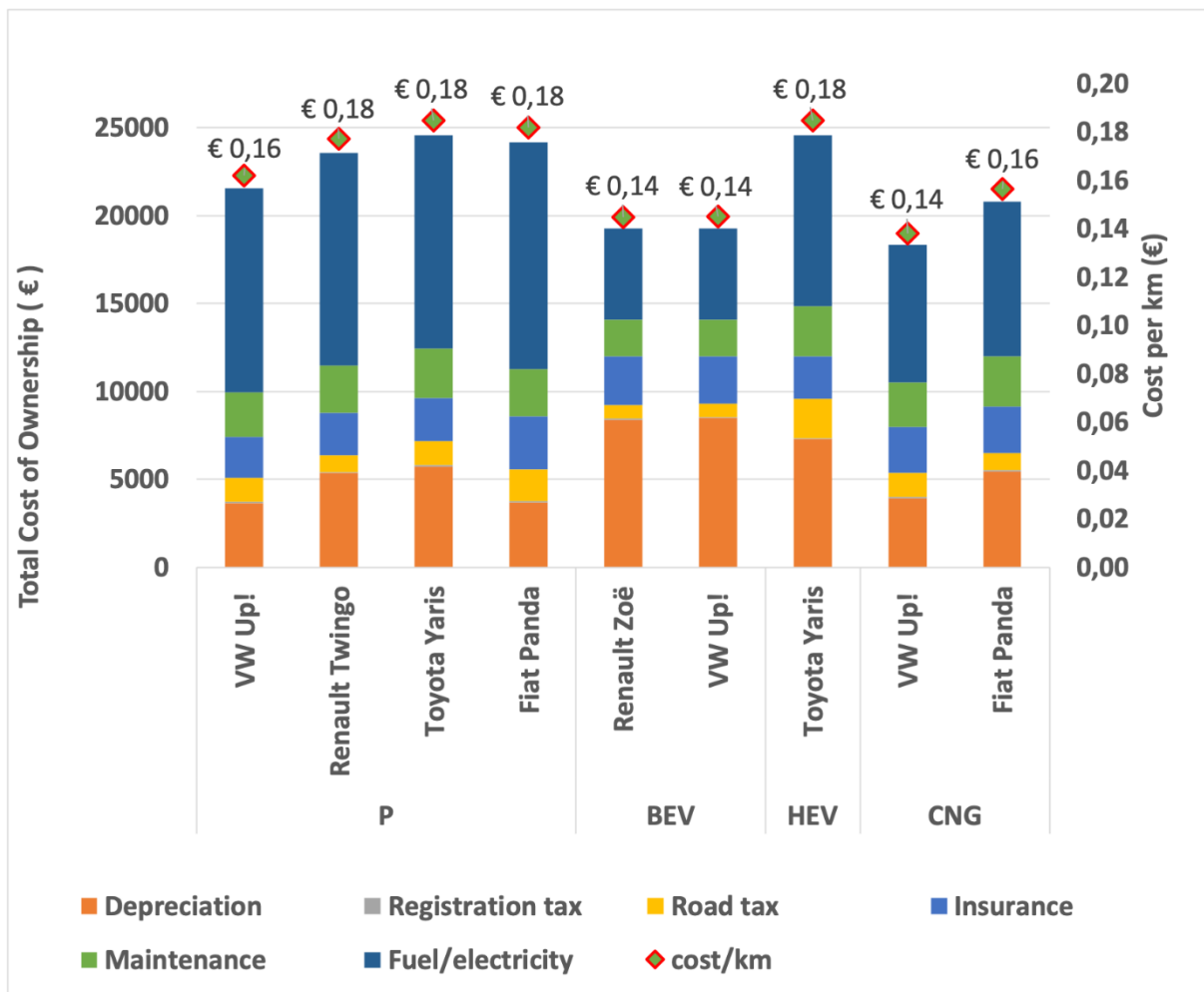
4.2.5. RESULTATEN VOOR EEN TWEEDHANDSWAGEN

In deze sectie worden de resultaten van de TCO voor tweedehandswagens per voertuigsegment gepresenteerd. De voertuigsegmenten die besproken worden zijn de stadswagens en medium wagens.

4.2.5.A. STADSWAGEN SEGMENT

Figuur 42 toont het resultaat van de TCO-analyse voor het stadswagen segment. In deze analyse zijn de BEV's de goedkoopste voertuigtechnologie. De BEV's hebben nog steeds een hogere depreciatiekost, maar deze kost is minder dominant dan bij het aankopen van een nieuw (42% van de TCO voor tweedehandswagen tegenover 65% voor een nieuwe wagen). Doordat de depreciatiekost bijna 3 keer kleiner is dan bij het aankopen van een nieuw BEV (€8.500 ipv €24.000) en dat de operationele kosten het laagst zijn van alle voertuigtechnologieën, hebben BEV's een zeer competitieve TCO als tweedehandswagens. De CNG-voertuigen zijn ook goedkopere alternatieven dan benzinevoertuigen. Dit kan verklaard worden door hun depreciatiekost die ter hoogte is van deze van de benzinevoertuigen en hun lagere operationele kosten, al zijn deze o.a. veroorzaakt door het gebrek aan accijnzen op de brandstofprijzen van CNG.

De gemiddelde TCO's voor de verschillende technologieën zijn 0,14 €/km voor batterij elektrische voertuigen, 0,15 €/km voor CNG-voertuigen, 0,18 €/km voor benzinevoertuigen en hybride elektrische voertuigen. Het verschil in TCO tussen de technologieën is dus veel kleiner dan in het geval van een nieuwe aankoop. Het verschil tussen de duurste en goedkoopste voertuigtechnologie in het tweedehands stadswagen segment is iets kleiner en bedraagt 0,04 €/km terwijl dit verschil bij de nieuwe voertuigen gelijk is aan 0,05 €/km. Het verschil tussen de gelijkaardige modellen is ook kleiner voor de tweedehandsvoertuigen. Er is geen verschil tussen het CNG model van de Volkswagen up! en het BEV model en 0,02 €/km verschil met het benzine model.

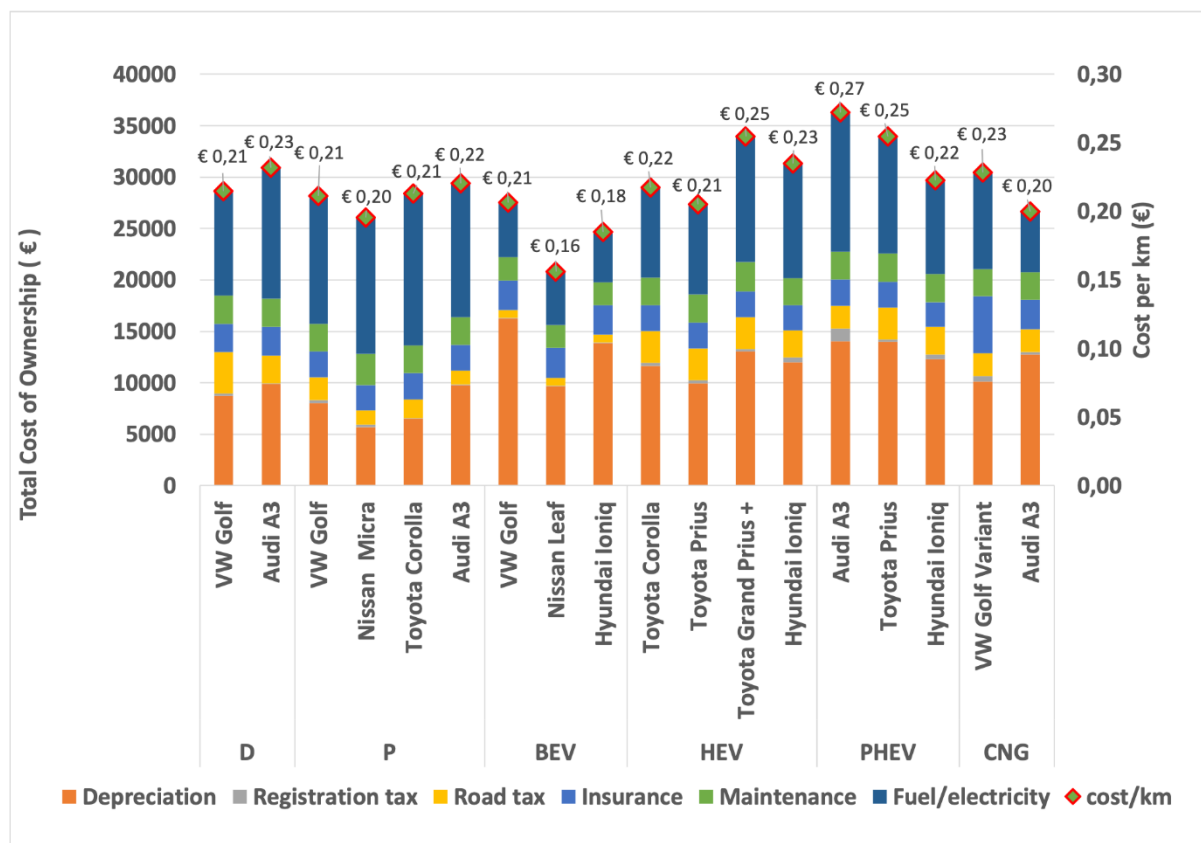


Figuur 42: TCO van het stadswagen segment voor tweedehandswagens

4.2.5.B. MIDDELGROTE WAGEN SEGMENT

Het resultaat van de TCO-analyse voor het aankopen van een tweedehandswagen van het middelgrote wagen segment wordt weergegeven in Figuur 43. Ook in dit segment hebben BEV's de laagste TCO van alle voertuigtechnologieën. De gemiddelde TCO van een BEV bedraagt 0,18 €/km. CNG-voertuigen hebben een iets hogere TCO van 0,20 €/km. Benzinevoertuigen hebben een TCO van 0,21 €/km, dieselveertuigen van 0,22 €/km en hybride elektrische voertuigen van 0,23 €/km. Ten slotte is de PHEV voertuigtechnologie nog steeds duurder met een TCO van 0,25 €/km. De daling in TCO t.o.v. het aankopen van een nieuw voertuig is het grootst voor alternatieve voertuigtechnologieën. Tweedehands BEV's hebben een TCO dat half zo duur is dan bij het aankopen van een nieuw BEV. Tweedehands CNG-voertuigen en PHEV hebben een TCO die 40% kleiner is dan voor een nieuw voertuig. De andere tweedehands voertuigtechnologieën hebben een TCO die ongeveer 35% kleiner is dan voor een nieuw voertuig (HEV, benzine en diesel). Het verschil tussen de duurste en goedkoopste voertuigtechnologie is opnieuw kleiner voor een tweedehands aankoop. Dit verschil bedraagt 0,07 €/km bij de aankoop van een tweedehandswagen en 0,10 €/km bij de aankoop van een nieuwe wagen.

Met een TCO van 0,16 €/km is de Nissan Leaf in deze analyse de goedkoopste wagen. De depreciatiekost van een tweedehands Nissan Leaf zit ter hoogte van de kost voor tweedehandse voertuigen zoals de Audi A3 (zowel diesel als benzine). De Nissan Leaf is ook goedkoper dan zijn gelijkaardige benzine model, de Nissan Micra, die een TCO heeft van 0,20 €/km. Het BEV model van de Volkswagen Golf heeft in deze analyse een TCO die gelijk is aan die van de benzine en diesel modellen. Het CNG-model van de Volkswagen Golf Variant is iets duurder (0,02 €/km), met een TCO van 0,23 €/km.



Figuur 43: TCO van het middelgrote wagen segment voor tweedehandswagens

4.2.6. METHODOLOGIE VOOR BEDRIJFSWAGENS

In deze analyse worden er 3 verschillende motorvarianten van de Volkswagen Golf VII vergeleken. Deze keuze is gemotiveerd door de populariteit van de Volkswagen Golf in België en dat het vergelijkbare voertuigen zijn met verschillende motorisaties. De analyse werd uitgevoerd voor zowel het perspectief van het aankopen van een nieuw voertuig door een bedrijf als het leasen van een nieuw voertuig door een bedrijf.

De algemene assumpties veranderen ten opzichte van voorgaande analyse. Men bezit een voertuig gedurende 4 jaar en de jaarlijkse afgelegde afstand is gelijk aan 28.094 km, wat het gemiddelde is voor bedrijfswagens in België (Kwanten, 2018). Het bedrijf is gebaseerd in Brussel en schrijft zijn voertuigen in het gewest in.

4.2.6.A. METHODOLOGISCHE AANPASSINGEN T.O.V. BEZIT DOOR PARTICULIER

In dit deel werd dezelfde methodologie gehanteerd voor bedrijfswagens als voor de personenwagens op enkele details na. Bij het aankopen van een bedrijfswagen zijn er bedrijfsgerelateerde belastingen die in rekening gebracht worden, alsook BTW en fiscale aftrek. Voor leasevoertuigen worden de aankoopkosten, belastingen, verzekeringskosten en onderhoudskosten gebundeld in een leaseprijs. De brandstof- en elektriciteitskosten worden naast deze leasekost nog opgeteld. De leaseprijzen (zonder korting) van de website van LeasePlan werden in deze analyse gehanteerd (LeasePlan, 2019). In de analyse voor de leasewagens, werd de CNG versie van de VW Golf niet opgenomen aangezien die op de website niet aangeboden wordt (dit gold voor alle versies van de VW Golf). De brandstofprijzen zijn dezelfde als voor de personenwagen in bezit van een particulier met een korting van 0,10 €/l voor benzine en diesel wegens het gebruik van een tankkaart. De assumpties i.v.m. de tankkaart zijn gebaseerd op de condities die Touring aan zijn leden met een tankkaart gunt (Touring, 2020). De elektriciteitskost bedraagt 0,20 €/kWh en is het gemiddelde van de prijs tussen het goedkoopste en duurste elektriciteitscontract in het gewest voor een bedrijf met een verbruik van 20.000 kWh (Brugel, 2019).

Bedrijfsvoertuigen zijn onderhevig aan aanvullende belastingen. In België moet er een CO₂ taks betaald worden indien er met de bedrijfswagen persoonlijke trips toegelaten zijn (Belgisch Staatsblad, 2006). De waarde van de taks is afhankelijk van de CO₂ uitstoot van het voertuig. Elektrische voertuigen betalen een minimum taks per jaar van €26,97.

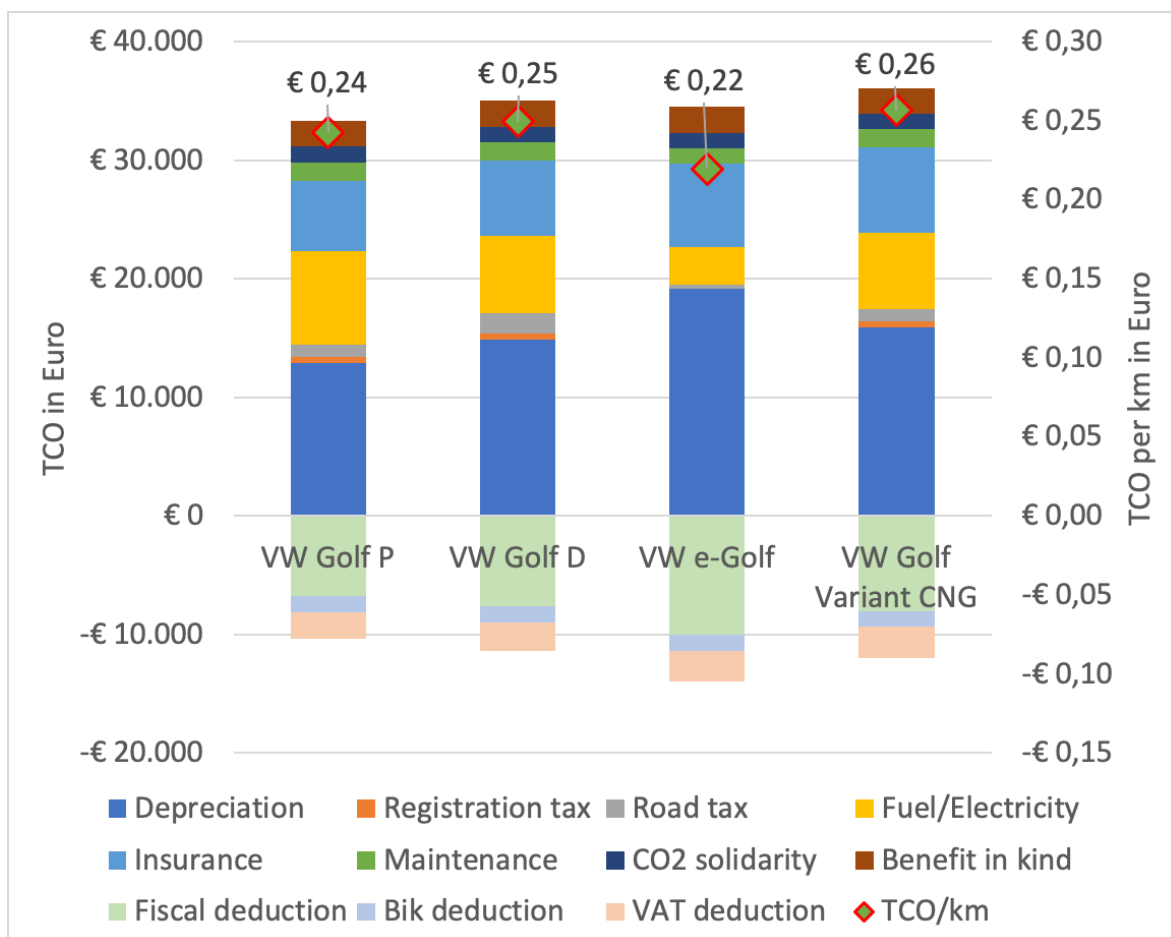
Een andere taks die de bedrijf moet betalen is het “voordeel alle aard”. Deze taks moet betaald worden doordat het bedrijf een niet-monetaire vergoeding aan de werknemer toekent (Belgisch Staatsblad, 2011). Het “voordeel alle aard” is sinds 2012 gebaseerd op de catalogusprijs van het voertuig (in dit geval de aankoopprijs), een coëfficiënt gebaseerd op de CO₂ uitstoot van het voertuig en een coëfficiënt gebaseerd op de leeftijd van het voertuig (100% in het eerste jaar, dalende met 6% per jaar). Deze taks moet samen betaald worden door de werknemer en werkgever. Het bedrijf's aandeel in de taks is van 40% indien een tankkaart bezorgd wordt aan de werknemer (Belgisch Staatsblad, 2016), waar in deze analyse vanuit gegaan wordt.

Naast bovenstaande bedrijfstakingen kunnen ook kosten afgetrokken worden. Een BTW aftrekbaarheid kan toegepast worden op de kosten gerelateerd aan de aankoop en het gebruik van de bedrijfswagen (FOD Financiën, 2015). Verschillende berekeningswijzen bestaan (op basis van het professioneel gebruik van het voertuig), maar de meest gebruikte methode is om een vast percentage van 35% te gebruiken voor het professioneel aandeel in het gebruik van het voertuig. Deze 35% wordt gelijkgesteld aan het percentage van de af te trekken BTW voor gerelateerde aankoop- en gebruikskosten.

Aanvullend, kan een bedrijf een voertuig fiscaal aftrekken van de belasting op de winst van het bedrijf (belasting van 25% vanaf 2020). Deze fiscale aftrekbaarheid bedraagt tussen 50% en 100% afhankelijk van de CO₂ uitstoot van het voertuig (Belgisch Staatsblad, 2017). Hierdoor zijn de voertuigkosten en elektriciteitskosten voor BEV's 100% aftrekbaar. Ten slotte, voertuig gerelateerde kosten mogen ook nog afgetrokken worden ter waarde van 100% van de waarde van het “voordeel alle aard” (FOD Financiën, 2014).

4.2.6.B. RESULTATEN BEDRIJFSWAGENS

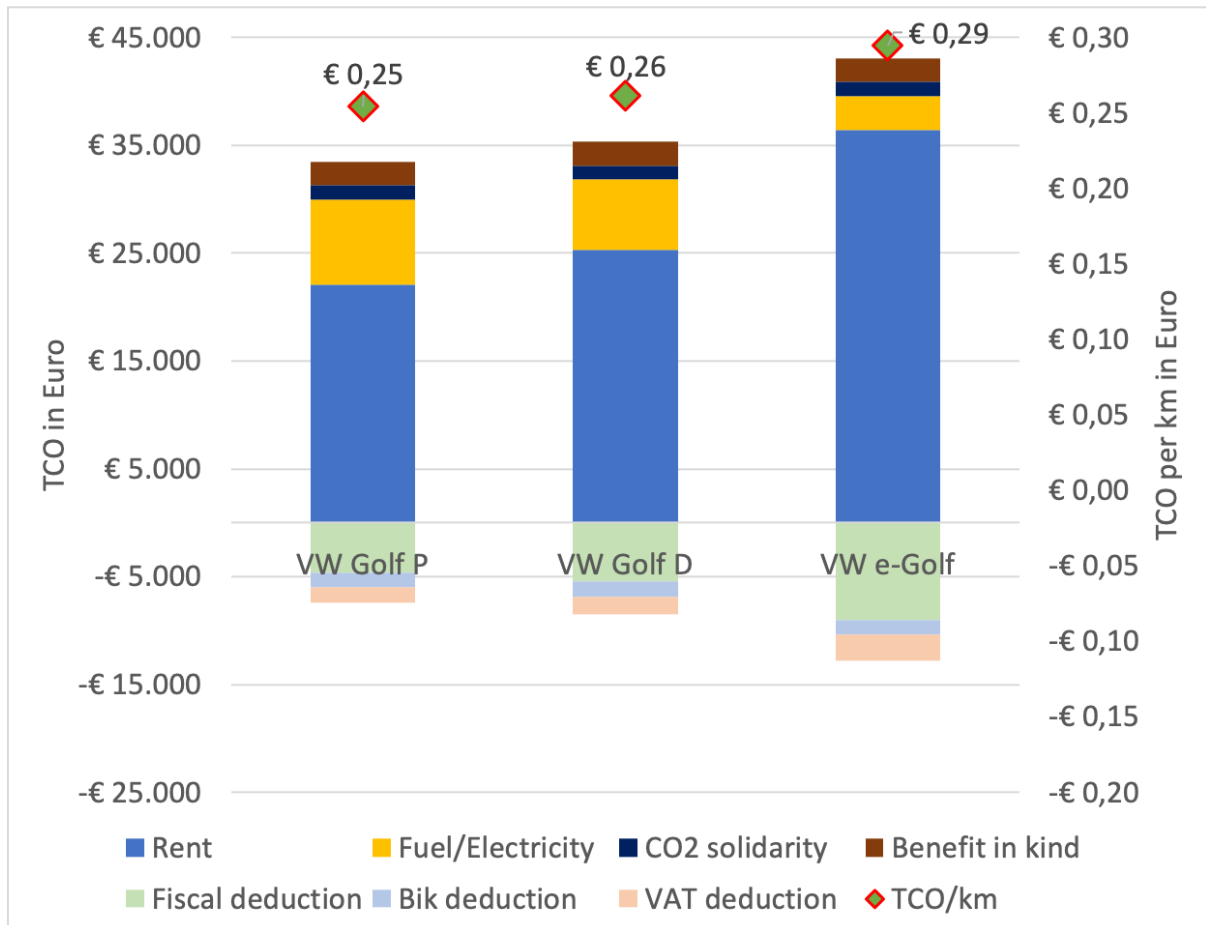
Figuur 44 toont het resultaat voor de aankoop van de voertuigen door een bedrijf. De laagste TCO per km is die van de e-Golf met een kost gelijk aan 0,22 €/km. Dit resultaat wordt veroorzaakt door de hoge aankoopprijs waarvan een groot aandeel fiscaal afgetrokken wordt (door de 100% aftrekbaarheid voor batterij elektrische voertuigen) en lagere operationele kosten. De TCO per km voor de andere voertuigen is gelijk aan 0,24 €/km voor het benzinemodel van de VW Golf, 0,25 €/km voor het dieselmodel en 0,26 €/km voor het CNG model van de VW Golf Variant.



Figuur 44: TCO voor de aankoop van een bedrijfswagen

De resultaten voor het leasen van bedrijfswagens, afgebeeld in Figuur 45, toont dat de TCO per km voor het leasen van bedrijfswagen duurder uitkomt dan het aankopen van de voertuigen. Het duurste voertuig is het BEV model van de VW Golf met een kost gelijk aan 0,29 €/km. Dit staat in tegenstelling met het aankopen van een e-Golf, waar de e-Golf het goedkoopste voertuig is. De diesel VW Golf heeft een TCO per km gelijk aan 0,26 €/km. Tenslotte, de goedkoopste optie is het benzinevoertuig, met een TCO per km gelijk aan 0,25 €/km. Uit de resultaten is duidelijk dat de leasekost het hardst doorweegt. Deze kost ligt 65% hoger voor de VW e-Golf ten opzichte van het benzine model van de VW Golf en bedraagt 85% van alle kosten die gepaard gaan bij het leasen van een elektrisch model van de VW Golf. Ter vergelijking, is het aandeel van de lease kost gelijk aan 66% en 72% van alle kosten voor de benzine en diesel modellen van de VW Golf. Anderzijds, de e-Golf is voor 100% fiscaal aftrekbaar. Dit

resulteert, in combinatie met de hoge kosten, in een bedrag dat afgetrokken kan worden die ongeveer twee keer zo groot is voor het elektrische model van de VW Golf ten opzichte van de benzine en diesel modellen. De hogere leasekost voor elektrische voertuigen zal in de toekomst waarschijnlijk dalen in functie van de dalende aankooprijzen.



Figuur 45: TCO voor het leasen van een bedrijfswagen

4.2.7. METHODOLOGIE VOOR EEN NIEUWE WAGEN IN 2030

In deze analyse blijven de algemene assumpties gelden en wordt ervanuit gegaan dat het voertuig aangekocht wordt door een particulier. Er wordt echter met hypothetische voertuigen gewerkt, aangezien de wagenmodellen van 2030, hun kenmerken en kosten moeilijk voorspelbaar zijn. Werken met hypothetische voertuigen laat toe om hypothetische, maar plausibele, kenmerken toe te kennen aan de voertuigen. Er zal dus enkel een onderscheid zijn tussen de kosten die onderhevig zijn aan de technologische evolutie van de voertuigen. Deze kosten zijn de aankoopprijs en de operationele kosten. Andere kosten, zoals verzekering, banden, enz..., zijn gelijk aan het gemiddelde van die kost voor de technologie in 2020, maar uitgedrukt in hun contante waarde van 2030. Er wordt geen rekening gehouden met eventuele prijsstrategieën van autofabrikanten, noch met extra functionaliteiten die de voertuigen zouden kunnen bezitten tegen 2030 of nog met potentiële evoluties in de mobiliteit die een invloed zouden kunnen uitoefenen op de voertuigprijzen.

4.2.7.A. AANKOOPKOSTEN

De aankoopprijs van batterij elektrische voertuigen is hard gelinkt aan de kost per kWh van de batterij. Deze prijzen worden voorspeld sterk te dalen tegen 2030. Bloomberg voorspelt zelfs een daling tot een kost per kWh van 61 \$/kWh, of 54,23 €/kWh (datum wisselkoers: 15/06/2020) (McKerracher et al., 2020). Voor meer details, zie sectie 1.5.1 in Appendix. De aankoopprijs van de hypothetische BEV wordt berekend vertrekkend van de assumptie dat de kost per kWh in 2020 gelijk is aan €150. Om de aankoopprijs van een BEV in 2030 te bepalen, wordt de gemiddelde aankoopprijs van de BEV's in 2020 per segment als referentie genomen voor de berekeningen. Voor het stadswagen segment bedraagt deze €27.775 en voor het middelgrote segment is de gemiddelde aankoopprijs €36.416. De Tesla Model 3 werd buiten beschouwing gehouden voor de gemiddelde aankoopprijs van het middelgrote wagensegment. Gegeven de gemiddelde grootte van de batterij en de kost per kWh, wordt de gemiddelde kost van de huidige batterijpacks voor beide segmenten geschat. Deze kost zal afgetrokken worden van de gemiddelde aankoopprijs en vervangen worden door de geschatte kost van een batterijpack in 2030. In deze analyse zullen er voor 2030 twee verschillende kosten per kWh gehanteerd worden. Deze verschillende kosten zullen dienen om de sensitiviteit van het resultaat aan te tonen. De gekozen kosten zijn €55 per kWh, wat in lijn is met de voorspellingen van Bloomberg voor 2030, en €75 per kWh, wat een conservatievere voorspelling is.

Aangezien schaafeffecten ook een verlaging van de aankoopprijs van BEV's teweeg zullen brengen, wordt ook dit effect in de analyse opgenomen. Indirecte kosten die gepaard gaan met het produceren van batterij elektrische voertuigen (investeringen, O&O, ...) zullen in de toekomst beter opgevangen worden door het stijgend aantal BEV's die geproduceerd worden. Lutsey & Nicholas (2019) berekenen een verlaging in de indirecte kosten van BEV's, als gevolg van de schaafeffecten, van ongeveer €7.000. Dit bedrag wordt ook afgetrokken van de gemiddelde aankoopprijs van een BEV.

Samenvattend, zal de kost van een BEV in 2030 (excl. BTW) berekend worden door de gemiddelde aankoopprijs van een BEV in 2020 (in hetzelfde segment, excl BTW) te verminderen met de batterijkosten van 2020 én met de verlaging in indirecte kosten tegen 2030. Eens deze kosten afgetrokken, worden de geschatte batterijkosten in 2030 (afhankelijk van het aantal kWh van de batterij en de kost per kWh) erbij opgeteld.

$$BEV_{2030} = BEV_{2020} - \text{batterij}_{2020} - \text{verlaging indirecte kosten} + \text{batterij}_{2030}$$

Wat de evolutie van de aankoopprijs van benzine en dieselveertuigen betreft, wordt er verwacht dat de kosten van deze technologieën stijgen om aan de toekomstige emissienormen te voldoen. Lutsey & Nicholas (2019) schatten een stijging in de aankoopprijs rond de 2,5% tegen 2030 ten opzichte van 2018. Compostella, Fulton, De Kleine, Kim, & Wallington (2020) schatten dit hoger in, met een stijging

tot 7% van de aankoopprijs in 2020. Deze analyse zal gebruikmaken van een percentage dat zich tussen deze twee schattingen bevindt, namelijk een stijging van 4% van de aankoopprijs van brandstof voertuigen (International Transport Forum, 2019). Ook voor deze voertuigen wordt de gemiddelde aankoopprijs per technologie (benzine of diesel) en per segment als referentiewaarde genomen. Eens de stijging in prijs van 4% toegepast, zijn de aankoopprijzen in hun contante waarde van 2030 gelijk aan: €14.900 voor benzinevoertuigen in het stadswagen segment, €30.472 voor diesellovoertuigen in het middelgrote wagen segment en €26.158 voor benzinevoertuigen in het middelgrote wagen segment. Deze voorspelling komt overeen met de geschatte aankoopprijs voor een conventioneel brandstof voertuig in Frankrijk in 2030, die bedraagt €29.400 (International Transport Forum, 2019). Aangezien CNG-voertuigen ook thermische voertuigen zijn, stellen we dat hun aankoopprijs in 2030 gelijk zal zijn aan die van de benzinevoertuigen.

Men stelt dat alle technologieën dezelfde depreciatiepercentages zullen hebben in 2030. Tegen 2030 zal de tweedehandsmarkt van alternatieve voertuigen meer ontwikkeld zijn, waardoor de depreciatie van deze voertuigtechnologieën als equivalent beschouwd kan worden. Al zullen de conventionele brandstoftechnologieën tegen 2030 minder waard zijn op de tweedehandsmarkt, door de aangekondigde thermische ban en de huidige LEZ, wordt het depreciatiepercentage van die technologieën niet verlaagd. De reden hiervoor is om het resultaat vergelijkbaar te houden door het effect van de ban te neutraliseren.

4.2.7.B. OPERATIONELE KOSTEN

De energie-efficiëntie van de verschillende motoren zal verbeteren tegen 2030. Voor brandstofmotoren wordt een vermindering van ongeveer 20% van het verbruik voorspeld volgens Compostella et al. (2020), Lutsey & Nicholas (2019) en de International Transport Forum (ITF) (2019). Dezelfde auteurs voorspellen een verbeterde efficiëntie van elektromotoren van respectievelijk 24%, 10% en 16%. In deze analyse zullen de waarden van ITF gebruikt worden, namelijk een verbetering van de efficiëntie voor brandstofmotoren van 20% en voor elektromotoren van 16%.

De energieprijzen worden voorgesteld in hun contante waarde van 2030, zoals uitgedrukt in Tabel 10. Deze contante waarden werden berekend aan de hand van de huidige waarde methode.

Tabel 10: Hypothetische prijzen energiebronnen in 2030

Energiebronnen	Prijzen
Benzine	1,5195 €/l
Diesel	1,5869 €/l
Elektriciteit	0,2405 €/kWh
CNG	0,9595 €/kg

4.2.7.C. DE HYPOTHETISCHE WAGENS VAN 2030

Hieronder, worden in Tabel 11 samenvattend de waarden voor de voertuigen in 2030 weergegeven, gebaseerd op bovenstaande beschrijving. Aangezien er onzekerheid bestaat over de kost per kWh in 2030, werden een aantal verschillende hypothetische BEV's geformuleerd met verschillende waarden voor de parameters kWh en kost per kWh. Het verbruik van de voertuigen zijn de gemiddelden van het verbruik van de voertuigen in de analyse van sectie 4.2.3, gecorrigeerd met de verwachte

efficiëntiewinst volgens de literatuur. Opmerkelijk is dat het verbruik van de stadswagen iets hoger ligt voor batterij elektrische voertuigen dan voor de middelgrote wagen. Dit komt doordat de batterij elektrische voertuigen die opgenomen worden in het stadswagen segment voor 2020 een iets hoger gemiddelde reële energieverbruik hebben dan de voertuigen in het middelgrote wagen segment volgens de EV Database (EV Database, 2020) namelijk, 16,55 kWh/100km vs 15,95 kWh/100km. Dit verschil kan veroorzaakt worden door verschillende factoren, waaronder het verbruik van de ondersteunende componenten van de voertuigen, de ontwikkelingsperiode van de voertuigen en hun motoren (recentere motoren zijn energie-efficiënter) of nog door hun aërodynamische eigenschappen (vooral bij snelheden hoger dan 50 km/h).

Tabel 11: Hypothetische voertuigen per segment en hun kenmerken

Technologie	Aankoopprijs (incl. BTW)	Kost per kWh (€)	kWh	Verbruik
Stadswagen segment				
P	€14.900	-	-	4,92 l/100km
BEV (30 kWh I)	€14.237	55	30	13,90 kWh/100km
BEV (30 kWh II)	€14.994	75	30	13,90 kWh/100km
BEV (40 kWh I)	€14.930	55	40	13,90 kWh/100km
BEV (40 kWh II)	€15.940	75	40	13,90 kWh/100km
CNG	€14.900	-	-	4,47 kg/100km
Middelgrote wagen segment				
D	€30.472	-	-	4,39 l/100km
P	€26.158	-	-	5,37 l/100km
BEV (40 kWh I)	€24.962	55	40	13,40 kWh/100km
BEV (40 kWh II)	€25.971	75	40	13,40 kWh/100km
BEV (60 kWh I)	€26.350	55	60	13,40 kWh/100km
BEV (60 kWh II)	€27.864	75	60	13,40 kWh/100km
CNG	€26.158	-	-	4,84 kg/100km

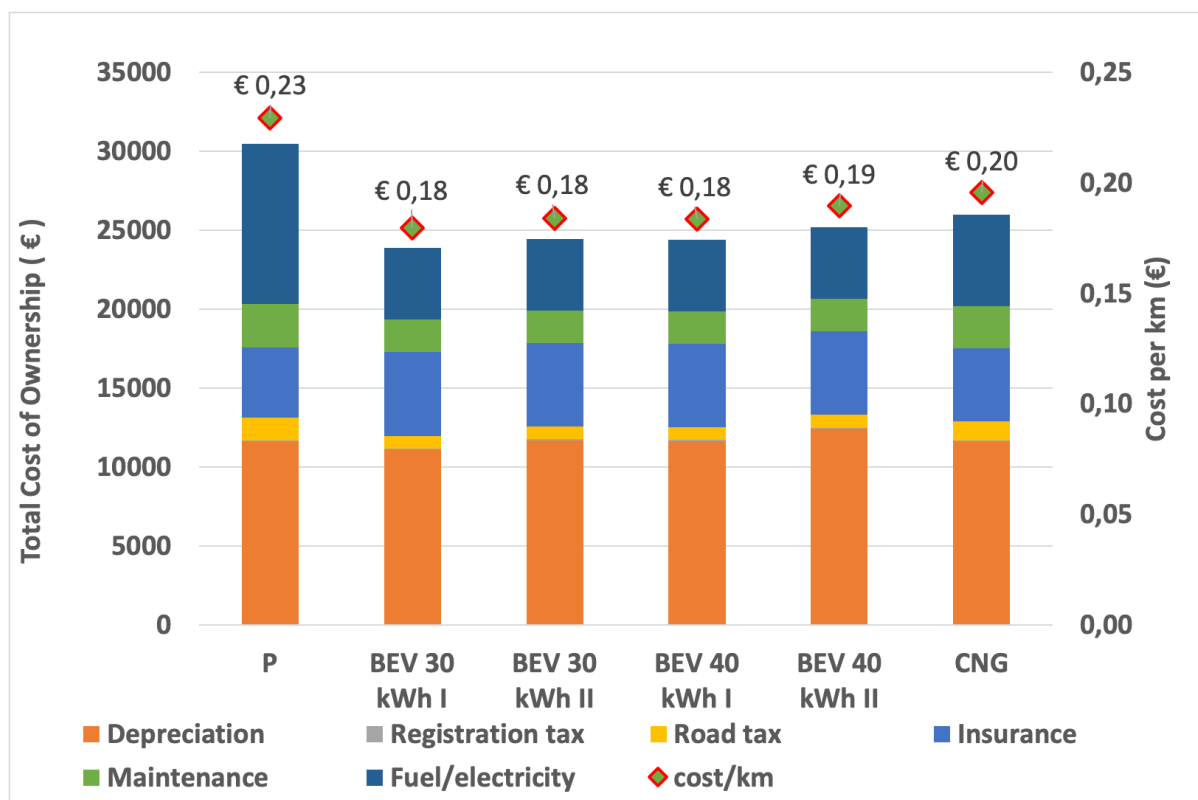
4.2.8. RESULTATEN VOOR EEN NIEUWE WAGEN IN 2030

In deze sectie worden de resultaten van de TCO voor nieuwe wagens in 2030 per voertuigsegment gepresenteerd. De voertuigsegmenten die besproken worden zijn de stadswagens en medium wagens. Deze resultaten zijn een poging om een antwoord te formuleren voor de verwachte TCO in 2030, maar zijn onderhevig aan veel onzekerheden waardoor de conclusies voorzichtig behandeld moeten worden.

4.2.8.A. STADSWAGEN SEGMENT

De TCO-resultaten voor de hypothetische stadswagens in 2030 worden weergegeven in Figuur 46. Het grootste verschil ten opzichte van de TCO-resultaten voor een nieuwe aankoop in 2020 is de verlaging van de depreciatiekost bij BEV's en CNG-voertuigen. Deze kost is nu gelijk tussen de verschillende technologieën. Dit impliceert ook dat het verschil in TCO nu vooral door de operationele kosten veroorzaakt wordt. De TCO's van de verschillende varianten van de hypothetische BEV's bedragen 0,18 €/km tot 0,19 €/km. Deze TCO waarden zijn het laagst in dit segment, gevolgd door de TCO van het hypothetische CNG-voertuig die 0,20 €/km bedraagt. Door de technische evolutie en de lage CNG-prijs

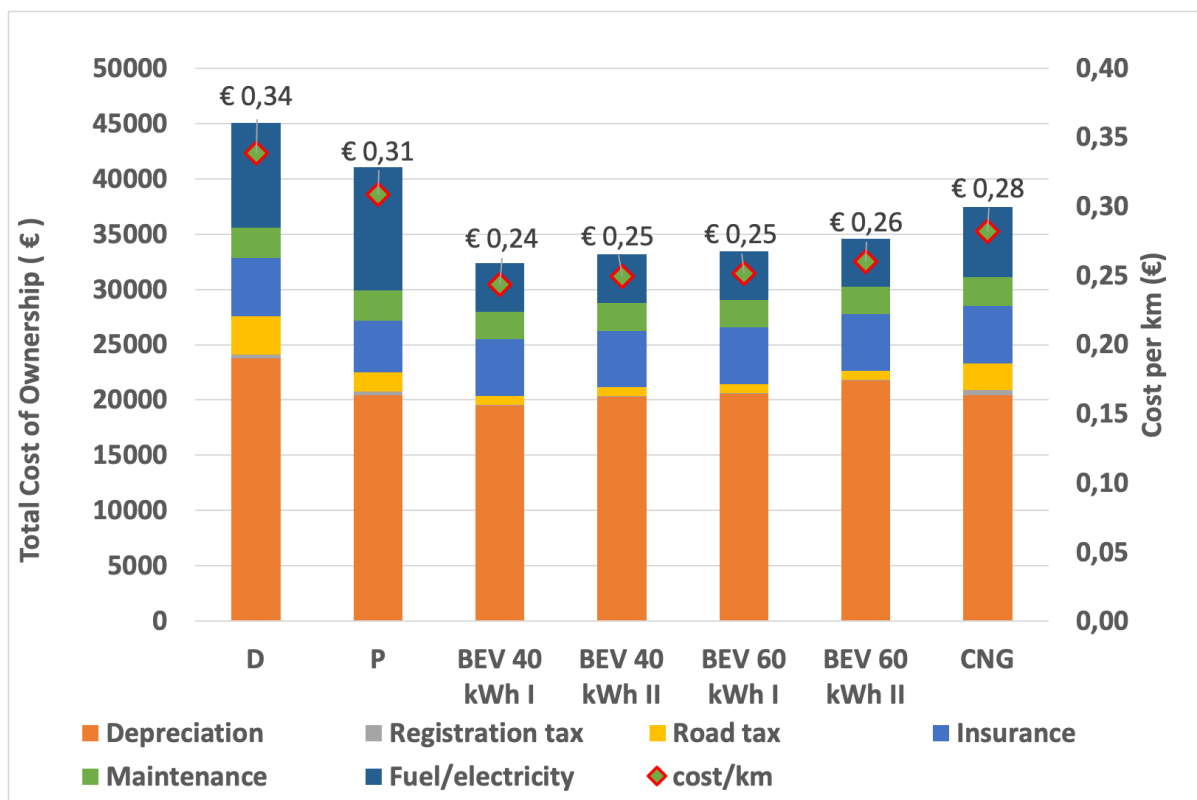
die beschouwd wordt, blijven de operationele kosten voor de hypothetische CNG voertuigen laag. Deze kosten zijn echter zonder accijnzen inbegrepen en zouden hard stijgen indien dit zou veranderen. Dit zou als gevolg hebben dat de hypothetische CNG voertuigen ongeveer dezelfde kosten zouden hebben als het hypothetische benzinevoertuig. Het benzinevoertuig zou de grootste TCO hebben in dit segment, namelijk, 0,23 €/km.



Figuur 46: TCO van het stadswagen segment voor nieuwe particulierswagens in 2030

4.2.8.B. MIDDELGROTE WAGEN SEGMENT

Zoals voor het stadswagen segment, zijn de resultaten voor de TCO in 2030 positief voor de alternatieve voertuigtechnologieën. De resultaten worden weergegeven in Figuur 47. In tegenstelling tot het stadswagen segment zijn de hypothetische BEV's de goedkoopste voertuigtechnologie in 2030 op vlak van TCO, dit voor alle varianten qua batterijgrootte en prijs per kWh. De depreciatiekost van BEV's is in dit segment op hetzelfde niveau als de depreciatiekost van benzine- en CNG-voertuigen en zelfs lager dan dat van dieselveertuigen. Net als voor stadswagens, is in deze figuur de kostpariteit duidelijk (zoals beschreven in sectie 2.2.7). Vervolgens zou de prijs geen rem meer moeten zijn voor het aankopen van die voertuigtechnologie. Het verschil in TCO tussen de varianten blijft ook klein, namelijk 0,02 €/km tussen de goedkoopste variant (0,24 €/km voor BEV 40 kWh I) en de duurste variant (0,26 €/km voor BEV 60 kWh II). CNG-voertuigen hebben een TCO van 0,28 €/km. Hier ook geldt dat de TCO van CNG-voertuigen ongeveer gelijk zal zijn aan die van benzinevoertuigen indien er accijnzen op CNG in de toekomst betaald moeten worden. Diesel- en benzinevoertuigen hebben een TCO van respectievelijk 0,31 €/km en 0,34 €/km en zijn de hypothetische voertuigtechnologieën van 2030 die het duurst zouden zijn.



Figuur 47: TCO van het middelgrote wagen segment voor nieuwe particulierswagens in 2030

4.3. Autodelen

Autodelen heeft een groot potentieel om autobezit te doen dalen. Volgens de resultaten van een *stated preference* studie uitgevoerd door Liao, Molin, Timmermans, & van Wee (2020) in Nederland, zouden tot 40% van de ondervraagden sommige van hun verplaatsingen met een deelwagen willen uitvoeren om operationele kosten te drukken en 20% hun wagen vervangen door een deelwagenabonnement indien een autodeelsysteem in hun nabijheid beschikbaar wordt. De respondenten werden in drie groepen geclassificeerd die steeds aanduiden dat de inschrijvingskost en de toegangstijd tot het systeem belangrijke attributen zijn, zowel voor *one-way* als *round-trip* carsharing. De kostenattributen zijn vooral belangrijk voor de respondenten die hard geörienteerd zijn naar het bezit van een eigen wagen, wanneer enkel de inschrijvingskost belangrijk is voor de andere respondenten (potentiële of enthousiaste autodelers). Aangezien de personen die meer geörienteerd zijn naar eigen bezit de nadruk leggen op kosten, is het belangrijk om hen het financieel voordeel van autodelen duidelijk te maken. Dit systeem is volgens Duncan (2011) vooral voor personen die niet dagelijks hun wagen nodig hebben. Autodelen is ook een aanvullend systeem voor personen die al een wagen bezitten en geen tweede wagen dagelijks nodig hebben. Gegeven de berekende kost per rit, zijn personen die baat hebben bij een autodeeldienst de personen die één tot twee keer per week de deelwagen nemen om naar hun werk te gaan of meermaals per week de deelwagen nemen voor shopping of recreatieve doeleinden. Bij een frequenter gebruik van het voertuig, is het financieel interessanter om zelf een wagen te bezitten. De afstand en tijd van een rit zijn ook bepalend voor de kost, al kan de tijdsparameter meer doorwegen aangezien dit ook afhankelijk is van de verblijftijd aan de bestemming (bij *round-trip* autodelen).

Een andere conclusie van Liao et al. (2020) is dat personen die een duurdere wagen bezitten minder geneigd zullen zijn om hun wagen om te ruilen voor een gedeelde wagen. Met andere woorden, personen met een minder dure wagen, zullen sneller de overgang maken naar deelwagens. Aangezien het Brussels Hoofdstedelijk Gewest een groot aantal inwoners heeft die een tweedehandsvoertuig aankopen, zouden deze personen potentiële deelwagengebruikers kunnen worden en het deelwagensysteem helpen uitbreiden en hierdoor het voertuigbezit in het gewest doen dalen.

Het onderzoek van Liao et al. (2020) geeft ook aan dat er potentieel is voor het gebruik van elektrische voertuigen in de deelwagenvloot. Het introduceren van EV's zou een positieve impact kunnen hebben op het gebruik van carsharing, aangezien de respondenten licht positief staan ten opzichte van de technologie. Deze bevinding komt overeen met het onderzoek van Carteni, Cascetta, & de Luca (2016), Paundra, Rook, van Dalen, & Ketter (2017) en Burghard & Dütschke (2019) die stellen dat de gebruikers geïnteresseerd zijn om deze voertuigtechnologie uit te proberen en zich ook minder beperkt voelen door bijvoorbeeld de actieradius van het BEV. Het elektrificeren van de deelwagenvloot is duidelijk een opportuniteit om personen meer in contact te laten komen met elektrische voertuigen. Eens ze de technologie geprobeerd hebben, herevalueren ze hun preferenties voor zowel EV's als voor conventionele voertuigen (Jensen, Cherchi, & Mabit, 2013), wat kan leiden tot het verminderen van de twijfels die een deel van de bevolking nog heeft ivm EV's (Zoepf & Keith, 2016). Een aanvullend effect zal ook zijn dat er meer elektrische voertuigen verkocht worden, wat een extra invloed kan hebben op de prijzen van elektrische voertuigen dankzij schaaleffecten (Liao et al., 2020).

4.4. Lichte bedrijfswagens

Dit deel is gebaseerd op de onderzoeken Lebeau et al. (2019a) en Lebeau et al. (2019b) en bestudeert de TCO's van lichte bedrijfswagen waaronder 2 vierwielers en 18 lichte bedrijfswagens van N1 categorie (bestelwagens), zie Tabel 4. De tabel verduidelijkt de aandrijving van de voertuigen, de volume die ze kunnen laden en het maximaal brutogewicht van de voertuigen (gross-vehicle weight of GVW). De uitgangspunten van deze studies waren het verduurzamen van de stedelijke distributie in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest. De onderzoeksvragen van deze studies zijn het identificeren van de opportuniteiten om lichte bedrijfswagens rijdend op fossiele brandstoffen te vervangen door nulmissie voertuigen, aangezien deze type voertuigen de enige duurzame alternatieven zijn voor de stedelijke distributie. Hierdoor werden geen CNG voertuigen in de toenmalige analyse toegevoegd. Echter, zullen deze kort besproken worden in deze sectie.

Tabel 12: Lichte bedrijfswagens voor de TCO-analyse. Eigen opmaak volgens gegevens uit (Lebeau, Macharis, & Mierlo, 2019a; Lebeau et al., 2019b).

Merk	Type	Volume (m ³)	GVW (kg)
Categorie vierwieler (L6e-BU)			
Aixam D-truck	D	2,87	842
Aixam E-truck	BEV	2,8	857
Categorie N1			
Goupil e-G4	BEV	3,7	2100
Goupil e-G5	BEV	3,85	2000
Alke ATX 340e	BEV	3,7	2150
Peugeot Partner	D	3,3	1980
Peugeot Partner	P	3,3	1940
Peugeot Partner	BEV	3,3	2175
Renault Kangoo	D	3	1950
Renault Kangoo ZE-buy	BEV	3	2126
Renault Kangoo ZE-rent	BEV	3	2126
Nissan NV-300	D	5,2	2780
Nissan e-NV-200	BEV	4,2	2240
Volkswagen Crafter	D	10,7	3500
Volkswagen Crafter	BEV	10,7	3500
Renault Master	D	7,75	2800
Renault Master	D	12,48	3500
Renault Master ZE	BEV	8	3100
Renault Master ZE	BEV	13	3100
Maxus EV80	BEV	11,5	3500

4.4.1. METHODOLOGISCHE AANPASSINGEN T.O.V. BEZIT DOOR PARTICULIER

Assumptiegewijs zijn de grootste veranderingen in het aantal jaar dat een voertuig in bezit blijft van één bedrijf en hoeveel kilometers een voertuig per jaar aflegt. De analyse werd ook uitgevoerd met het Brussels Hoofdstedelijk gewest als scope. Tabel 13 geeft een overzicht van de belangrijkste assumpties.

Tabel 13: Algemene assumpties voor de TCO-analyse van lichte bedrijfswagens (Lebeau et al., 2019a).

Assumptie	Waarde
Aantal jaren bezit voertuig	8 jaar
Jaarlijks kilometerafstand	16.000 km/jaar
Totale kilometerafstand	128.000 km
Disconteringsvoet	-1,29%
Aantal eigenaars	1

Wat de energieprijzen betreft zijn de prijzen per liter voor benzine en diesel respectievelijk 1,2 €/l en 1,3 €/l excl. BTW en de prijs voor elektriciteit is gelijk aan 0,19 €/kWh excl. BTW. Deze cijfers komen grotendeels overeen met de energieprijzen die gehanteerd werden voor personenwagens.

De twee grootste methodologische verschillen in deze analyse zijn het fiscaal stelsel en de opsplitsing van de aankoopkost in twee afzonderlijke kosten. In tegenstelling tot bedrijfsvoertuigen, zijn lichte bedrijfswagens altijd voor 100% fiscaal aftrekbaar, ongeacht de voertuigtechnologie (Belgium.be, 2019).

Lebeau et al. (2019a) splitst de aankoopprijs in twee afzonderlijke kostencategorieën, namelijk de aankoopprijs van het voertuig zonder de batterijkost en de kost van de batterij. Dit laat toe om het aandeel van de batterijkost in het voertuig waar te nemen. De methodologische benadering van de TCO berekening is grotendeels hetzelfde voor de andere kosten.

Meer informatie omtrent de berekeningen zijn te vinden in Lebeau et al. (2019a).

4.4.2. RESULTATEN LICHTE BEDRIJFSWAGEN

In Figuur 48 wordt het TCO-resultaat voor lichte bedrijfswagens weergegeven. Deze figuur kan op dezelfde manier gelezen worden als de vorige TCO-figures, met op de linker y-as de TCO in eurocents per km. Onderaan de figuur, wordt er per categorie de kost in eurocent per km uitgedrukt.

De resultaten voor de twee vierwielers, beide Aixam trucks die men zonder rijbewijs mag besturen, zijn afkomstig van een andere studie van Lebeau et al. (2019b) en zijn hierdoor niet opgenomen in Figuur 48. De TCO van de Aixam e-Truck is de voordeligste met een TCO die 0,195 €/km bedraagt tov van de diesel versie die een TCO per km heeft van 0,225 €/km. Al is de aankoopkost hoger voor de elektrische versie (0,118 €/km t.o.v. 0,087 €/km), deze kost wordt gecompenseerd door de lagere onderhouds- en operationele kosten (0,033 €/km t.o.v. 0,103 €/km). De batterijkost is ook zeer klein (0,008 €/km) vanwege een GVW dat relatief laag blijft (minder dan 1 ton), waardoor een grote batterij niet nodig is om een voldoende rijbereik te garanderen (130 km).

De voertuigen van de N1-categorie die in Figuur 48 afgebeeld zijn, zijn representatief voor verschillende gewichtscategorieën met een GVW gaande van 2.000 kg tot 3.500 kg en zijn geordend volgens laadvermogen (3m³, 4m³ en > 8m³).

De eerste drie voertuigen behoren echter tot een specifieke categorie aangezien hun snelheid en rijbereik gelimiteerd zijn. Echter, hebben deze voertuigen het voordeel om veelzijdig te zijn en inzetbaar voor een brede waaier aan toepassingen zoals, gebruikt door lokale overheden, last mile delivery of nog op industriële sites. De constructeurs van deze voertuigen, Goupil en Alke, bieden ook geen fossiele

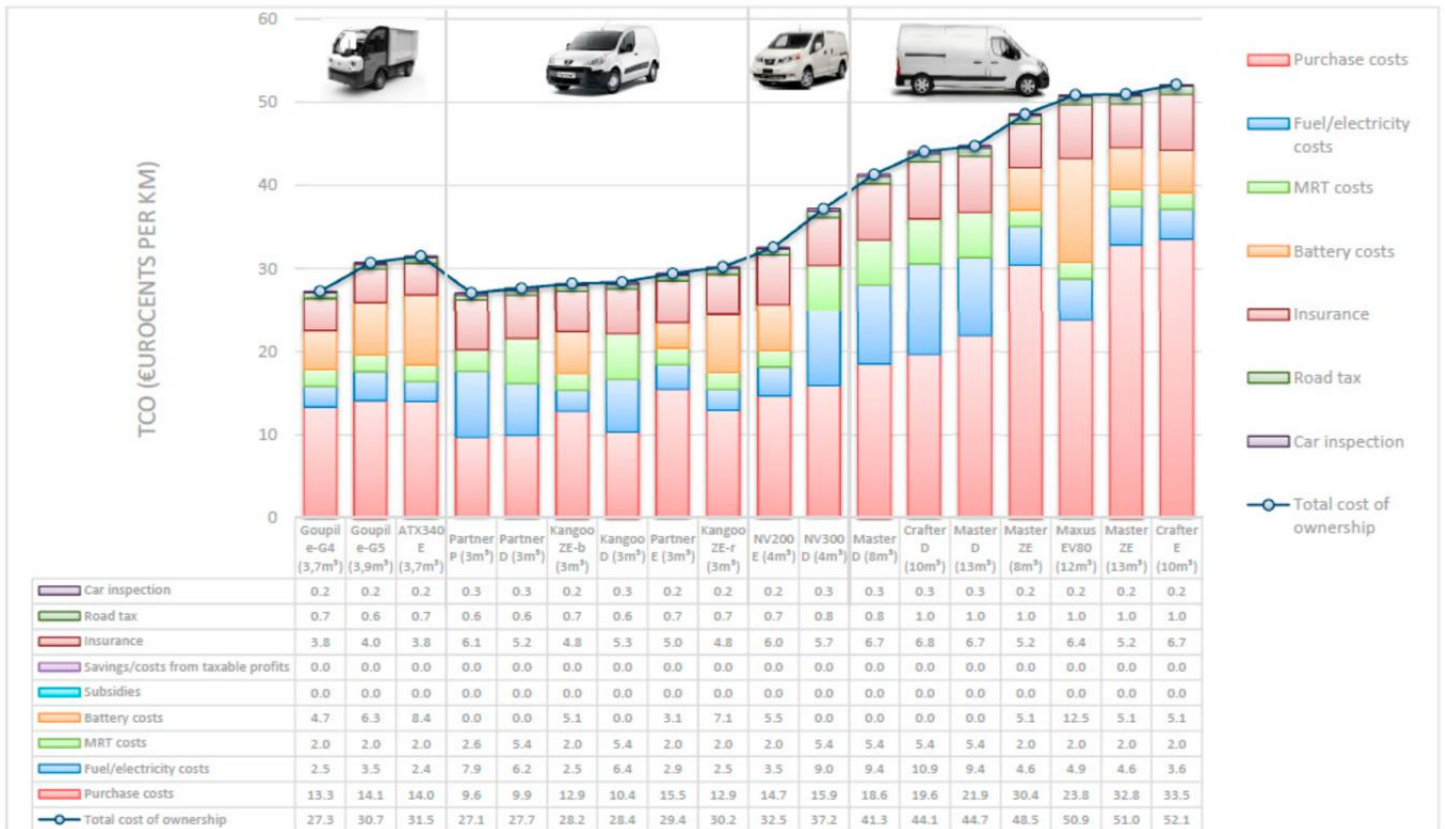
brandstofalternatieven voor hun voertuigen aan. Dit toont aan dat elektrische voertuigen meer geschikt zijn volgens hen voor deze type voertuigen. De TCO van de Goupil e-G4 is gelijk aan 0,273 €/km, die van de Goupil e-G5 is gelijk aan 0,307 €/km en tenslotte, de Alke heeft een kost van 0,315 €/km.

In het segment van de kleinere lichte bedrijfswagens, heeft de benzineversie van de Peugeot Partner de laagste TCO met een kost van 0,271 €/km en is dus iets goedkoper dan de diesel versie met een TCO van 0,277 €/km. Het elektrische alternatief is competitief met een TCO gelijk aan 0,294 €/km. Voor de Renault Kangoo is de elektrische versie zelfs iets goedkoper dan de dieselvesie, met een TCO gelijk aan 0,282 €/km tegenover 0,284 €/km. De elektrische versie waar de batterij geleast wordt komt iets duurder uit met een TCO van 0,302 €/km. In deze categorie voertuigen is het duidelijk dat de elektrische varianten van de voertuigen competitief zijn met de conventionele brandstof voertuigen. Al is de kostenstructuur van de elektrische voertuigen volledig anders (hogere aankoopprijs, batterijkosten, lagere onderhoudskosten en operationele kosten).

Twee voertuigen worden in de analyse als middelgrote lichte bedrijfswagens opgenomen, namelijk de elektrische Nissan e-NV200 en de diesel Nissan NV300. De Nissan NV300 is een nieuwe generatie voertuigen die de Nissan NV200 vervangen heeft. Het verschil ligt in een hogere aankoopprijs dan de diesel NV200, maar een lagere verbruikskost. Het verschil in TCO tussen de e-NV200 en de nieuwe NV300 is bijna gelijk aan 15% (0,325 €/km t.o.v. 0,372 €/km). Het elektrische alternatief komt in deze vergelijking goedkoper uit, al beschikt de NV300 over een iets groter laadvermogen.

De laatste lichte bedrijfswagens beschikken over een groter laadvermogen tussen de 8m³ en 13m³. Dit heeft als impact dat de batterij voor die voertuigen groter moet zijn, waardoor de competitieve positie van BEV's minder voor de hand liggend is. De lagere onderhoudskosten en operationele kosten kunnen hier het verschil niet compenseren door de hogere aankoopkost en batterijkost van de BEV's. De TCO van de dieselveoertuigen is in dit segment ongeveer 15% lager dan die van de elektrische voertuigen. Het dieselmodel van de Renault Master met een laadvermogen van 8m³ heeft een TCO van 0,413 €/km tegenover een TCO van 0,485 €/km voor de elektrische versie. De TCO's van de Renault Master met een 13m³ laadvermogen, bedragen respectievelijk, 0,447 €/km en 0,510 €/ km voor de diesel- en elektrische modellen. Het verschil is nog groter tussen de diesel- en elektrische modellen van de VW Crafter (0,441€/km t.o.v. 0,521 €/km). Gezien de lage verkoopcijfers van BEV's in dit segment lichte bedrijfswagens, veroorzaakt dit ook gelimiteerde schaafeffecten waardoor de aankooprijzen van de elektrische voertuigen veel hoger liggen ten opzichte van de aankooprijzen van de dieselveoertuigen. In tegenstelling tot de andere BEV's, heeft de Maxus EV80 een gelijkaardige aankoopprijs aan de diesel Renault Master, maar de grote batterijkost zorgt toch nog voor een TCO die hoger blijft (0,509 €/km). Die batterijkost is groter dan bij andere BEV's aangezien de batterijcapaciteit ook veel groter is bij de Maxus EV80 dan bij de andere elektrische voertuigen in dat segment. De Maxus EV80 heeft een

batterijcapaciteit van 56,4 kWh en de andere BEV's hebben batterijcapaciteiten van 33 kWh voor de Renault Masters en 35,8 kWh voor de VW Crafter.



Figuur 48: TCO voor lichte bedrijfswagens (Lebeau et al., 2019a)

Wat CNG-voertuigen betreft, is hun aankooprijns momenteel nog iets hoger dan voor dieselveertuigen. Enkel een paar merken bieden CNG-bestelwagens in hun catalogus aan (Gas.be, 2020), waaronder Fiat de enige merk is die zowel modellen voorziet voor lichtere als voor zwaardere bestelwagens. De Fiat Doblo Cargo CNG is een voertuig dat qua volume en GVW vergelijkbaar is met de Volkswagen Partner en Renault Kangoo. De Fiat Doblo Cargo Maxi CNG is vergelijkbaar met de Nissan e-NV200. De aankooprijns van de Fiat Doblo modellen zijn €17.200 voor het standaard model en €18.200 voor het Maxi CNG model (excl. BTW). Deze aankooprijns zijn niet veel groter dan die van de benzine en diesel versies van de VW Partner en Renault Kangoo (€15.000 - €15.790, excl. BTW). Echter, de aankooprijns exclusief BTW van de elektrische versies zijn een stuk hoger, €28.950 voor de Renault Kangoo ZE, €30.970 voor de elektrische Volkswagen Partner en €32.620 voor de Nissan e-NV200. In het zwaardere segment bestelwagens, biedt Fiat de Ducato aan. De aankooprijns van een Ducato, die over een opslagvolume van 13m³ beschikt, is gelijk aan €35.000 (excl. BTW). Deze aankooprijns is net iets duurder dan die van de diesel Renault Master 13m³ (€33.150, excl. BTW), maar beduidend goedkoper dan de aankooprijns van de elektrische versie van de Renault Master 13m³ (€63.800, excl. BTW).

In een TCO perspectief, kan er verwacht worden dat de CNG-bestelwagens goed presteren aangezien er geen accijnzen betaald moeten worden op deze brandstof en hierdoor het voertuig lage operationele kosten zal hebben. Er kan verwacht worden dat de TCO van CNG-bestelwagens eerder dezelfde zou

zijn als die van conventionele bestelwagens indien CNG-voertuigen ook accijnzen zouden moeten betalen. In de toekomst wordt verwacht dat de batterijprijzen zullen dalen, waardoor BEVs de interessantste optie zal worden op vlak van TCO. Zoals voor personenwagens, wordt er niet verwacht dat CNG-bestelwagens een grote rol zullen spelen, wat ook merkbaar is aan het beperkte huidige aanbod.

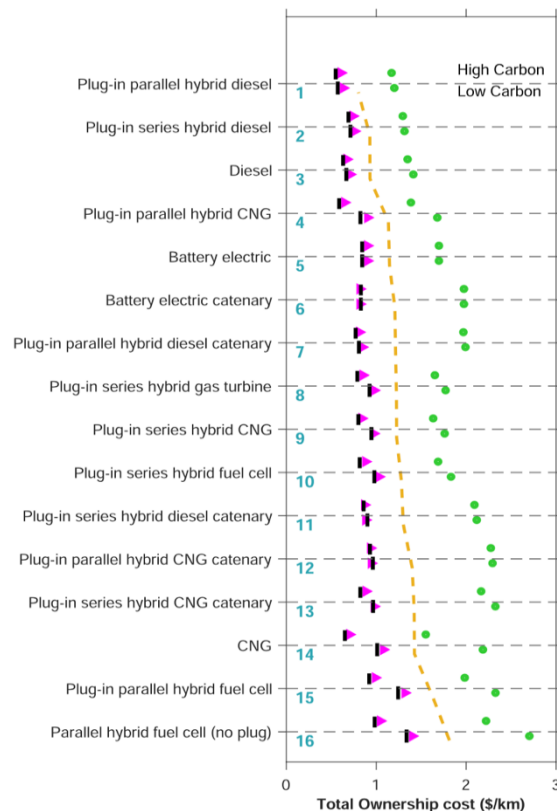
4.5. Middelgrote en zware vrachtwagens

Zhou, Roorda, MacLean, & Luk (2017) hebben een TCO-analyse uitgevoerd voor middelgrote vrachtwagens in Canada (GVW tussen 6.351 kg 11.793 kg). In hun analyse vergelijken ze dieselve vrachtwagens met BEV-vrachtwagens. Ze concluderen dat BEV-vrachtwagens duurder uitkomen op vlak van TCO vooral door hun hogere aankoopprijs en kosten voor het vervangen van de batterij. De lage operationele kosten zorgen ervoor dat de kloof tussen de twee technologieën niet te groot wordt. In tegenstelling tot de literatuur voor personenwagens, wordt het vervangen van de batterij tijdens het bezit doorgaans meegerekend in de TCO (Lee & Thomas, 2017; Yang, Hao, & Chai, 2018; Zhou et al., 2017). Dit is een belangrijk verschil voor het berekenen van de TCO voor dit type voertuigen, gezien de grote batterijen die deze voertuigen nodig hebben. Het is een conservatieve praktijk om in TCO studies deze kost toe te voegen, vooral in de beginfase van de adoptie van BEV's voor een specifieke voertuigcategorie. In recentere TCO studies voor personenwagens wordt deze kost niet meer opgenomen (De Clerck et al., 2018), doordat de BEV technologie voor deze categorie voertuigen nu beter gekend is en dat de nood aan een batterijvervanging zelden voorkomt. De mogelijkheid bestaat dat tegen 2030/2035 deze kost ook voor vrachtwagens niet meer opgenomen zal worden gegeven dezelfde redenering. Een ander belangrijk verschil, is dat de infrastructuurkosten vaak toegevoegd worden aan de TCO, zelf al is die kost niet noodzakelijk voor de eigenaar van het voertuig. Dit komt vooral omdat de meeste van deze studies ook de externe kosten of LCA opnemen en trachten op die manier een zo volledig mogelijk impact te berekenen.

In omstandigheden waarbij start/stops frequent zijn (bijv. in een stedelijke context), kan de BEV vrachtwagen echter goedkoper uitkomen volgens Zhou et al. (2017). Deze bevinding komt overeen met het resultaat van de studie van Lee & Thomas (2017) die aangeeft dat in een stedelijke omgeving, de totale Life Cycle Cost (TCO + externe kosten gerelateerd aan luchtvervuiling) 6-15% voordeliger is voor middelgrote BEV-vrachtwagens dan voor diesel-hybride vrachtwagens of dieselve vrachtwagens uitgerust met *idle reduction* technologie (technologieën die het stationair gebruik van de motor reduceren) . Om voordeliger te zijn in alle omstandigheden op vlak van totale Life Cycle Cost (zowel stedelijk als niet stedelijk), moet de aankoopkost van een middelgrote BEV-vrachtwagen met 30-50% dalen volgens Lee & Thomas (2017).

In een recenter wetenschappelijk artikel, hebben Lajevardi, Axsen, & Crawford (2019) een TCO analyse uitgevoerd op een brede waaier aan zware vrachtwagen technologieën voor Brits-Columbia, Canada. Hun resultaten worden op Figuur 49 weergegeven. De TCO wordt weergegeven in functie van korte en lange afstandsritten, waarop de x-as de TCO per km aanduidt en de y-as de technologieën. Per technologie is er nog een onderscheid tussen het gebruik van goedkopere conventionele brandstof met

een hoge concentratie aan koolstof (boven de stippellijn) en een duurdere, milieuvriendelijkere brandstof met een lagere concentratie aan koolstof (onder de stippellijn). Voor elektriciteit is er geen onderscheid en wordt er dezelfde prijs gehanteerd. Het groene punt duidt de TCO aan voor korte afstandsritten, de roze driehoek duidt deze aan voor lange afstandsritten en het zwarte lijntje duidt de TCO aan voor ritten op de regionale autosnelweg in Brits-Columbia. De gele lijn geeft de gemiddelde TCO per technologie weer, voor korte en lange afstandsritten, gebruikmakend van brandstof met een lage concentratie aan koolstof.



Figuur 49: TCO voor verschillende voertuigtechnologieën (Lajevardi et al., 2019).

Zware plug-in parallelle hybride-dieselvrachtwagens hebben een 4-13% kleinere TCO dan dieselvrachtwagens dankzij een goedkopere laadinfrastructuur en tot 46% besparingen op brandstofkosten (Lajevardi et al., 2019). CNG-vrachtwagens hebben, bij gebruik van conventionele brandstoffen, een 15% hogere TCO dan dieselveertuigen op korte afstandsritten, maar op langere afstandsritten wordt er tot 8% bespaard (Lajevardi et al., 2019). BEV-vrachtwagens hebben vaak een hogere TCO dan dieselveertuigen, maar gemiddeld is hun TCO interessanter dan andere hybride technologieën. Ook in dit artikel worden de hoge investeringskosten als reden gegeven voor de hogere TCO van BEV's. Deze kosten bestaan uit de grote batterijen en de snellaadinfrastructuur, al zijn die infrastructuurinvesteringen kleiner dan voor CNG- of waterstofvrachtwagens. Deze kost, met o.a. een duurdere aankoopkost, zorgt ervoor dat de waterstofvrachtwagens het duurste alternatief zijn. Een andere overeenkomst met de andere studies is dat elektrische vrachtwagens het ook goed doen ten

opzichte van andere technologieën op korte afstanden, waar op lange afstanden de TCO's veel dichter bij elkaar liggen. Indien de infrastructuurkosten niet in rekening genomen worden, zijn de resultaten lichtjes anders (Lajevardi et al., 2019). Een overzicht van de TCO's van een selectie van de door Lajevardi et al. (2019) bestudeerde voertuigtechnologieën wordt in Tabel 14 weergegeven. Dit overzicht toont het verschil tussen de TCO met en zonder tank- en laadinfrastructuurkosten. De gemiddelde TCO van een elektrische vrachtwagen met een bovenleiding is dan het interessantste (0,56 €/km). Deze is 16% kleiner dan de TCO voor een dieselvrachtwagen (0,64 €/km) doordat de batterij van het voertuig niet groot hoeft te zijn. De plug-in parallelle hybride-dieselvrachtwagens zijn nog ook zeer interessant, met een TCO die 12% lager is dan die van dieselvrachtwagens (0,56 €/km). De BEV- en CNG-vrachtwagens hebben dan respectievelijk een TCO die 6% en 8% hoger is dan dieselvrachtwagens (0,68 €/km en 0,69 €/km). De waterstofvrachtwagens blijven de duurste optie met een TCO die tot 40% hoger is dan die van een dieselvrachtwagen (0,89 €/km).

Tabel 14: TCO voor een selectie voertuigtechnologieën, met en zonder infrastructuurkosten (Lajevardi et al., 2019)

Voertuigtechnologie	TCO in €/km	
	Met infrastructuurkosten	Zonder infrastructuurkosten
Plug-in parallelle hybride-diesel	0,57	0,56
Diesel	0,64	0,64
CNG	0,81	0,69
Batterij elektrisch	0,88	0,68
Batterij elektrisch met bovenleiding	1,03	0,54
Parallelle hybride brandstofcel	1,13	0,89

De resultaten van een Duitse studie uitgevoerd door Arnd (2020) tonen dat *long-haul* waterstofvrachtwagens in 2025 nog veel duurder zouden zijn dan de andere voertuigtechnologieën. De TCO's van diesel en BEV *long-haul* vrachtwagens zouden dan ongeveer gelijk zijn, maar de TCO van BEV *long-haul* vrachtwagens zou licht voordeliger kunnen evolueren tegen 2030 ten opzichte diesel *long-haul* vrachtwagens. Tegen 2030 zal de waterstoftechnologie nog niet competitief zijn met deze twee technologieën, maar zal de kloof sterk verkleinen. Pantografen kunnen de kosten drukken door de mogelijkheid te bieden om BEV *long-haul* vrachtwagens uit te rusten met kleinere batterijen, waardoor er een duidelijk kostenvoordeel ontstaat ten opzichte van de dieselvrachtwagens. Echter, houdt deze analyse geen rekening met de uitrol van de infrastructuur. Indien deze kost opgenomen wordt in de TCO's van waterstof en BEV *long-haul* vrachtwagens, dan blijft de dieseltechnologie de meest competitieve alternatief in 2030.

4.6. Bussen

Quarles, Kockelman, & Mohamed (2020) vergelijken BEV en dieselbussen in Texas, Verenigde Staten. Ze berekenen dat een BEV bus (aankoopprijs: \$550.000 + \$100.000 batterijkost) een positief verschil in TCO heeft van \$172.907 (ongeveer €145.000) ten opzichte van een dieselbus (aankoopprijs:

\$400.000) over een periode van 12 jaar en 652.836 miles (1.050.637 km). Indien de sociale kosten, externe kosten voor de gezondheid van de bewoners, toegevoegd worden, loopt dit verschil zelf op tot \$700.000 dollar (bijna €600.000) volgens Quarles et al. (2020). Hooftman, Messagie, & Coosemans (2018) concluderen voor de Europese markt dat een BEV bus nu al competitief is ten opzichte van een dieselbus (zelfde TCO) en 3% goedkoper is dan een CNG-bus. PHEV-bussen zijn 4% duurder dan BEV- en dieselbussen. Een andere bevinding is dat het aankopen voordeliger is dan het leasen van de batterij. Ook bepalen ze dat indien cost-pariteit bereikt wordt tussen de verschillende technologieën, de TCO van een elektrische bus 30-35% lager zou zijn dan voor diesel- en CNG bussen. Sheth & Sarkar (2019) concluderen ook dat de TCO voor BEV bussen 5-10% kleiner is dan voor dieselbussen na 25 jaar, echter is de context zeer anders (Indië) en de levensduur van het voertuig is in deze studie minstens 2 keer zo groot als in de andere studies (Grauers, Borén, & Enerbäck, 2020; Hooftman, Messagie, & Coosemans, 2018; Lajunen, 2018; Quarles et al., 2020; Topal & Nakir, 2018). In tegenstelling tot deze positieve resultaten, komt de auteur van een Finse studie tot de conclusie dat BEV-bussen gemiddeld een 7% hogere TCO hebben dan dieselbussen voor een levensduur van 12 jaar (Lajunen, 2018). Ten slotte vergelijken Grauers, Borén, & Enerbäck (2020) de TCO van meerdere bussen die uitgerust zijn van alternatieve voertuigtechnologieën in de Zweedse context. De technologieën waarmee ze rekening hielden zijn BEV, gecombineerd biomethaangas (CBG) en biodiesel. Het resultaat van hun studie toont dat de huidige TCO van de BEV bus gelijkaardig is aan de TCO van de CBG-bus maar hoger is dan voor een biodieselbus. Volgens de auteurs zouden de dalende batterijprijzen de TCO van BEV-bussen in de toekomst voordeliger maken dan die van deze andere twee technologieën.

Wat de terugbetaling van de bussen betreft, vergelijken Topal & Nakir (2018) BEV-, CNG- en dieselbussen voor een lijn in de stad van Istanbul in Turkije. Ze concluderen dat een dieselbus na 2,84 jaar terugbetaald is, een CNG bus na 3,8 jaar en een BEV bus na 5,66 jaar. Dit resultaat wordt vooral veroorzaakt door de hogere aankooprijzen van de alternatieve voertuigtechnologieën.

Er zijn een aantal verschillen tussen de TCO's voor bussen en personenwagens. Gelijkaardig aan vrachtwagens worden de batterijen van de bussen ook vervangen in de TCO studies. Er kan ook rekening gehouden worden met het loon van de buschauffeur, echter wordt deze kost in de TCO vergelijkingen nooit opgenomen aangezien deze gelijk is voor de verschillende voertuigtechnologieën en enkel van belang indien de bussen autonoom zouden rijden. Een ander belangrijk verschil met de TCO voor een personenwagen is het gebruik van het voertuig. Bussen rijden meer kilometers dan personenwagens, wat gunstig is voor een BEV die lage operationele kosten heeft. Een bus wordt ook voor de meeste toepassingen volgens een specifiek patroon gebruikt, tegenover personenwagens die op een veel flexibelere wijze gebruikt worden. Voor deze reden benadrukt Ribau, Silva, & Sousa (2014) dat waterstof- en PHEV-bussen voordeel kunnen hebben bij de vaste ritten die ze moeten afleggen om volgens een geoptimaliseerd schema te laden en dus de laad- en tankinfrastructuur maximaal te benutten. Deze opmerking geldt ook voor BEV bussen. Hierdoor wordt de investering in laad- en tankinfrastructuur ook maximaal benut. De optimalisatie van het laadschema kan aan de hand van laadstrategieën. Grauers et al. (2020) stellen dat het hierdoor belangrijk is om te kijken welke laadstrategieën best toegepast kunnen worden. Voorbeelden van laadstrategieën zijn, 's nachts laden, gelegheidsladen, aan het

depot laden, aan het einde van de lijn laden of nog enkel laden tijdens daluren en voldoende batterijcapaciteit hebben voor de piekuren (Grauers et al., 2020; Lajunen, 2018). Afhankelijk van de strategie, zal een grotere of een kleinere batterij nodig zijn wat een impact zal hebben op de aankoop prijs van de bus en op het aantal bussen die nodig zijn op de lijn (Grauers et al., 2020). Alle laadstrategieën hebben een impact op de TCO van een bus, waardoor er rekening mee gehouden moet worden om de kosten te minimaliseren. De voordelen van zo'n optimalisatie zijn duidelijk uit de resultaten van Lajunen (2018) die BEV- en dieselbussen vergelijkt. In hun voorbeeld, kunnen BEV bussen een kleinere TCO bereiken dan dieselbussen indien er aan het einde van de lijn geladen wordt, anders is de TCO van de BEV bussen 7% hoger dan voor dieselbussen. Uit dezelfde studie blijkt ook dat er per lijn geoptimaliseerd kan worden in functie van de batterijgrootte van de bussen. Op dezelfde lijnen is de TCO van een bus met een batterijgrootte van 100 kWh 6-9% hoger dan die van een bus met een 60 kWh batterij.

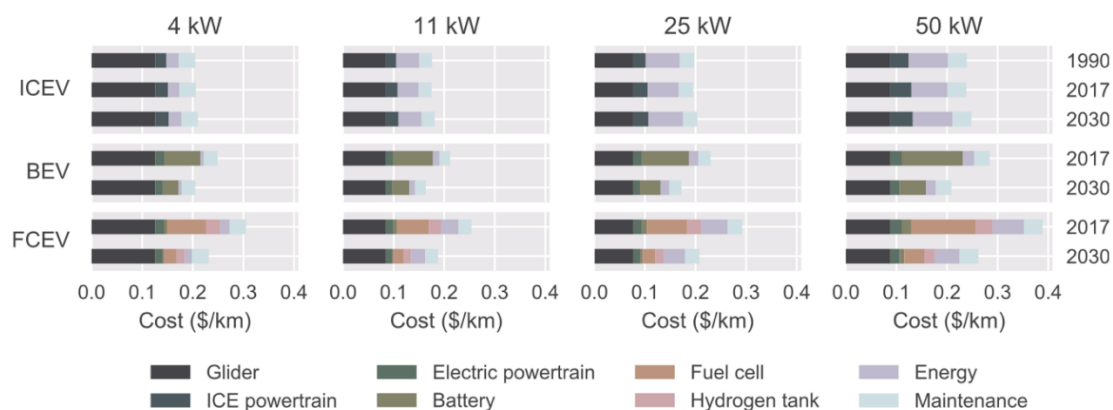
4.7. Gemotoriseerde tweewielers

4.7.1. KLASSIEKE BROM- EN MOTORFIETSEN

Cox & Mutel (2018) vergelijken de TCO voor benzine-, BEV- en waterstofmotorvoertuigen op tweewielen in West Europa, zowel voor de 2017 als voor 2030. Deze voertuigen worden in 4 verschillende categorieën geordend in functie van hun vermogen. De assumpties van de TCO zijn ook afhankelijk van deze categorieën. De duur van het eigenaarschap is respectievelijk, 12, 15, 20 en 25 jaar voor 4kW, 11kW, 25kW en 50kW motorvoertuigen. Analooq zijn de jaarlijkse afgelegde afstanden respectievelijk, 2.400km, 4.600km, 5.700km en 5.800km. Graag verwijzen we naar Cox & Mutel (2018) voor een uitgebreide uitleg over de methodologie.

De resultaten van Cox & Mutel (2018) worden weergegeven in Figuur 50. De TCO van een klassieke 4kW bromfiets wordt vooral bepaald door de aankoop prijs. Gezien de afstanden en het bezit korter zijn dan voor motorvoertuigen met een hoger vermogen, weegt de aankoop prijs zwaar door en is de TCO voor een 4kW klassieke BEV bromfiets hoger dan voor een klassieke benzine bromfiets. De motorvoertuigen met de laagste TCO zijn die van 11kW en 25kW. Deze bedraagt 0,15 €/km voor een 11kW benzine motorvoertuig en 0,18 €/km voor een 11kW batterij elektrische motorvoertuig. Voor 25 motorvoertuigen zijn de TCO's gelijk aan 0,17 €/km en 0,20 €/km voor respectievelijk benzine en batterij elektrische motorvoertuigen. Wat verschillen tussen de voertuigtechnologieën betreft, geldt dat in 2017 benzine motorfietsen goedkoper zijn, al zijn de BEV-motorfietsen niet veel duurder en kunnen deze voertuigen nu al als competitief beschouwd worden, zeker indien ze grotere afstanden per jaar afleggen. Daarentegen zijn de waterstofmotorfietsen duidelijk duurder dan de andere voertuigtechnologieën (0,22 €/km voor 11kW en 0,25 €/km voor 25kW). Volgens de resultaten van Cox & Mutel (2018), zal de TCO van waterstofmotorvoertuigen in 2030 competitief worden met deze van benzinemotorvoertuigen. Echter wordt deze technologie eerder verwacht voor zwaardere toepassingen, zie sectie 5.1. Tegen 2030 zal de TCO van BEV motorvoertuigen het kleinste zijn van deze drie voertuigtechnologieën,

dankzij een grote daling in de batterijkosten. De batterijkosten voor BEV motorvoertuigen worden voor 2030 berekend op basis van een conservatieve verwachting van \$150 per kWh. Gezien de huidige verwachtingen lager liggen (61 \$/kWh volgens Bloomberg (McKerracher et al., 2020)), kan gesteld worden dat de TCO van BEV motorvoertuigen zelfs positiever kan evolueren.



Figuur 50: TCO voor motorfietsen (Cox & Mutel, 2018)

Dit resultaat verschilt lichtjes met de conclusie van Walker & Roser (2015). Ze geven aan dat de TCO's voor BEV- en benzinemotorvoertuigen met een lage kW (4-9kW) gelijk zijn. Echter zijn hun assumpties voor het aantal afgelegde kilometers dubbel zo groot. Door deze hoge operationele kosten hebben beide technologieën eenzelfde TCO. Dit effect benadrukt de conclusie van Cox & Mutel (2018) voor klassieke 4kW bromfietsen.

4.7.2. ELEKTRISCHE FIETSEN EN SPEED PEDELECS

Rotthier, Stevens, Huyck, Motoasca, & Cappelle (2017) ondervraagden gebruikers van elektrische fietsen en speed pedelecs om inzicht te verkrijgen in de kosten die ze uitgeven voor hun fietsen. De respondenten gaven aan een aankoopkost tussen de €1.000 en €3.000 te hebben betaald voor een elektrische fiets en tussen €3.000 en €7.000 voor een speed pedelec. Al zijn de speed pedelecs duurder en wordt er vermoed dat deze fietsen gemiddeld grotere afstanden afleggen, kwamen Rotthier et al. (2017) tot de bevinding dat er geen extra onderhoudskosten zijn aan het gebruiken van een speed pedelec ten opzichte van een elektrische fiets.

Als speed pedelecs vergeleken worden met elektrische fietsen op TCO-basis, dan is de speed pedelec het duurdere voertuig. Er wordt dan ook rekening gehouden met onderhoud, elektriciteitsverbruik en jaarlijkse verzekeringen (enkel voor speed pedelecs). In de vergelijking gemaakt door Stevens, Rotthier, Roetynck, Coosemans, & Cappelle (2017), zijn de belangrijkste aannames het bezit van het voertuig gedurende 6 jaar en een jaarlijks afgelegde afstand van 6.600 km. Dit vertaalt zich naar een TCO van ongeveer €3.000 euro voor een elektrische fiets. De aankoopprijs heeft hier het grootste aandeel van de kost (ongeveer 90%). De TCO voor speed pedelecs ligt tussen €6.000 en €9.500.

4.8. Autonome voertuigen

In de literatuur zijn er verschillende kosten terug te vinden over zelfrijdende voertuigen. De meerkost om personenwagens met autonome technologie uit te rusten wordt volgens verschillende bronnen geschat rond de \$10.000 (Compostella et al., 2020; Mosquet et al., 2015; Sperling, 2018). Deze meerkost zou volgens Mosquet et al. (2015) dalen tot \$3.000 in 2035. Wadud (2017) schat deze kosten iets hoger (tussen £9.400 en £15.000) met toenemende kosten voor vrachtvervoer door de extra benodigde sensoren (tussen £11.500 en £18.000). Quarles et al. (2020) schatten deze kost voor een zelfrijdende bus aan \$100.000, maar geven toe dat dit een conservatief cijfer is. Bansal & Kockelman (2017) geven aan dat een autonoom basissysteem ongeveer \$15.000 zou kosten en een geavanceerd systeem rond de \$40.000. Volgens Compostella et al. (2020) zal de extra apparatuur niet beduidend meer energie vereisen, waardoor er geen zichtbare stijging in energieverbruik zal zijn tegenover een voertuig zonder autonome technologie.

Wadud (2017) heeft een TCO-analyse uitgevoerd voor autonome voertuigen. De meerkost van de technologie wordt in deze analyse verminderd met de winst die gepaard gaat met de gewonnen tijd gezien een persoon niet aan het rijden is dankzij het autonome karakter van het voertuig.

De opsplitsing in verschillende inkomensklassen toont aan dat de huishoudens met de hoogste inkomens meer baat hebben bij autonome voertuigen. Dit wordt verklaard doordat deze huishoudens degene zijn die het meest tijd verliezen door grotere afstanden af te leggen en vaker het voertuig te gebruiken in het kader van hun werk. Het volledig autonoom maken van een voertuig leidt tot een TCO stijging van 16% voor de huishoudens waarvan de inkomens zich in het laagste kwintiel bevinden. Daarentegen treedt er een reductie van 6% op voor de huishoudens waarvan het inkomen zich in het hoogste kwintiel bevindt.

De business case voor autonome taxi's of vrachtwagens is interessanter dan voor huishoudelijk gebruik (Wadud, 2017). Volledige autonome taxi's en vrachtwagens ondervinden een relatieve daling in TCO van respectievelijk 30% en 15%. Deze bevinding komt overeen met die van Compostella et al. (2020). Ze concluderen in hun onderzoek dat autonome elektrische voertuigen die gebruikt worden voor ridesourcing (bijv. Uber of Lyft) 30% goedkoper zullen zijn dan voor eigen gebruik.

De studie van Quarles et al. (2020) geeft aan dat een grote winst bereikt kan worden indien bussen autonoom zouden worden doordat de busmaatschappij het loon van de bestuurder niet meer zal moeten betalen. In de praktijk zal de bestuurder, in vele gevallen, eerder een rol als toezichter opnemen waardoor die kost van de lonen niet noodzakelijk wegvalt.

4.9. Conclusie

De kosten werden aan de hand van TCO-analyses in kaart gebracht voor nieuwe privé personenwagens, tweedehands privé personenwagens en nieuwe bedrijfswagens en bestelwagens. De kosten van een voertuig in 2030 werden ook met deze methode geschat. Deze analyses werden

toegepast voor de stadswagen en middelgrote wagensegmenten. De overige voertuigcategorieën werden aan de hand van literatuur besproken. Gezien de aard van de TCO-analyse, die gebeurt met specifieke voertuigen en assumpties, zijn de concrete cijfers indicaties voor algemene tendensen en kunnen andere TCO-analyses tot verschillende cijfers komen, maar dezelfde conclusies trekken.

De resultaten van de TCO-analyses voor personenwagens in privé-bezit tonen aan dat CNG-, HEV- en BEV-voertuigen competitief kunnen zijn in het middelgrote wagen segment. Daarentegen, waterstof en PHEV-voertuigen blijven duurdere opties. Al is de aankoopkost van een BEV beduidend hoger, zijn deze voertuigen al een interessant alternatief voor conventionele brandstofvoertuigen. Dit is vooral te wijten aan de lagere operationele kosten die gepaard gaan met BEV's. De analyse toont ook aan dat het effect van de verschillende realistische laadpatronen (thuis, publiek, snel,...) op de operationele kosten beperkt blijft. Ook CNG voertuigen hebben lagere operationele kosten, maar deze worden vooral veroorzaakt doordat er geen accijnzen betaald worden voor deze brandstof. Zouden er accijnzen moeten betaald worden, dan zouden deze voertuigen niet even interessant zijn als BEV's. In het stadswagen segment zijn CNG-voertuigen competitief met benzinevoertuigen en BEV's kunnen, indien de batterij niet te groot is, een TCO hebben die dicht ligt bij deze twee voertuigtechnologieën. Alternatieve voertuigtechnologieën zijn dus nu al interessant, maar hun aankoopprijs blijft wel een mogelijke drempel. Autodelen kan een alternatief zijn voor personen met weinig financiële middelen en die zich weinig met de auto hoeven te verplaatsen. Elektrisch autodelen zou als voordeel hebben om die personen in aanraking te laten komen met BEV's en ze mogelijk te stimuleren naar het gebruiken van milieuvriendelijkere alternatieven.

Voor sommige specifieke gevallen zijn de TCO's van alternatieve voertuigtechnologieën veel interessanter dan die van conventionele voertuigtechnologieën. Het aankopen van een tweedehandsvoertuig is zo'n geval. Al blijft de aankoopprijs van een conventioneel tweedehandsvoertuig lager, hier wegen de operationele kosten voor tweedehandsvoertuigen zwaarder door dankzij de lagere aankooprijzen. De TCO's van CNG-voertuigen zijn lager in het stadswagen segment en op hetzelfde niveau in het middelgrote-wagensegment dan conventionele brandstofvoertuigen. Daarentegen, zijn de TCO's van BEV's de laagste van alle voertuigtechnologieën voor beide wagensegmenten voor tweedehandsvoertuigen. Een ander specifiek geval waar alternatieve voertuigtechnologieën competitief zijn is voor bedrijfswagens. Het fiscaal regime voor bedrijfswagens is voordelig bij het aankopen of leasen van een milieuvriendelijke voertuig. Dit heeft als gevolg dat het aankopen van een BEV het goedkoopste alternatief is op vlak van TCO. Het leasen van een BEV is nog niet even voordelig als het aankopen van het voertuig, doordat de leaseprijs nog hoog stond in 2019. De resultaten wezen aan dat het nog voordeliger is om een benzine voertuig te leasen als bedrijfswagen. De leaseprijzen van BEV's zullen in de toekomst dalen, waardoor de TCO ook voor BEV leasewagens goedkoper zal zijn dan voor andere voertuigtechnologieën. Deze trend kan gelinkt worden aan de verwachte daling in aankooprijzen van BEV's. De daling in aankoopprijs kan het gevolg zijn van de strengere emissienormen voor constructeurs die de aankooprijzen van brandstofvoertuigen zouden doen stijgen, de daling in kost van de batterijen en de schaalvoordelen veroorzaakt door het toenemend aantal verkochte elektrische voertuigen. Indien deze verwachtingen realiteit worden, kan er verwacht worden dat de prijzen van de elektrische voertuigen tussen 2022-2025 naar hetzelfde niveau zullen

dalen als die van conventionele brandstof voertuigen. Indien er aankooprijspareit is, zouden de TCO's van een BEV lager kunnen zijn dan voor een diesel of benzinevoertuig.

Voor personenwagens zijn elektrische voertuigen duidelijk een optie die nu al financieel interessant is en in de toekomst nog interessanter zal worden. Echter, geldt deze conclusie niet voor alle voertuigcategorieën. Voor licht commerciële toepassingen kan elektrificatie in sommige gevallen een oplossing vormen. BEV's zijn een interessant alternatief t.o.v. conventionele brandstof voertuigen in de kleine en middelgrote segmenten van de bestelwagens. Eens het laadvermogen groter wordt (8m³+), wordt de impact van de batterijkost groter en is de competitieve positie van BEV's minder voor de hand liggend en zijn conventionele voertuigtechnologieën en vooral dieselvoertuigen veruit interessanter. Voor zwaardere toepassingen zijn waterstof- en BEV-vrachtwagens momenteel nog niet interessant. De hoge aankoopkost kan niet volledig terugverdiend worden door de lagere operationele kosten. In een stedelijke context zoals Brussel, kan in sommige gevallen een BEV-vrachtwagen wel een interessant alternatief vormen. Een tussenoplossing voor diesel zou de plug-in hybride dieselvrachtwagens kunnen zijn. Deze zijn vooral interessant door de besparingen op brandstofkosten. Er wordt verwacht dat BEV-vrachtwagens in de toekomst financieel interessante alternatieven worden voor dieselvrachtwagens door de dalende batterijkosten, maar momenteel is deze technologie nog niet rijp genoeg of is deze technologie voordelig in zeer specifieke omstandigheden, zoals in een stedelijke context.

Voor stadsbussen kan er geconcludeerd worden dat zelfs al hebben BEV's hoge aankooprijzen, ze ook nu al interessante alternatieven zijn dankzij de lage operationele kosten. Deze conclusie geldt ook voor CNG-bussen, al zouden ze op TCO vlak iets duurder zijn dan BEV-bussen, maar met het voordeel dat ze sneller terugbetaald zijn dan BEV's. Er wordt verwacht dat de dalende batterijkost als gevolg zal hebben dat de BEV-technologie in de toekomst het goedkoopste zal zijn op vlak van TCO. Er kan ook slim omgegaan worden met de batterijgrootte en laadstrategieën om de kosten extra te drukken door rekening te houden met de topografie van de lijnen en optimalisatie van laadstrategieën en batterijgrootte.

Bij gemotoriseerde tweewielers is elektrificatie al een bekende optie voor fietsen. De speed pedelec, daarentegen, is een vervoersmiddel die stilaan bekender wordt. De TCO van een speed pedelec ligt tussen de €6.000 en €9.500, wat 2-3 keer meer is dan voor een elektrische fiets (€3.000). Elektrische motorvoertuigen met een vermogen tussen 4kW en 50kW zijn nog niet zeer interessant t.o.v. benzine motorvoertuigen, behalve indien zeer veel gereden wordt. Tegen 2030 zullen deze voertuigen ook lagere aankoopkosten hebben, waardoor hun TCO lager zal zijn dan voor conventionele motorvoertuigen.

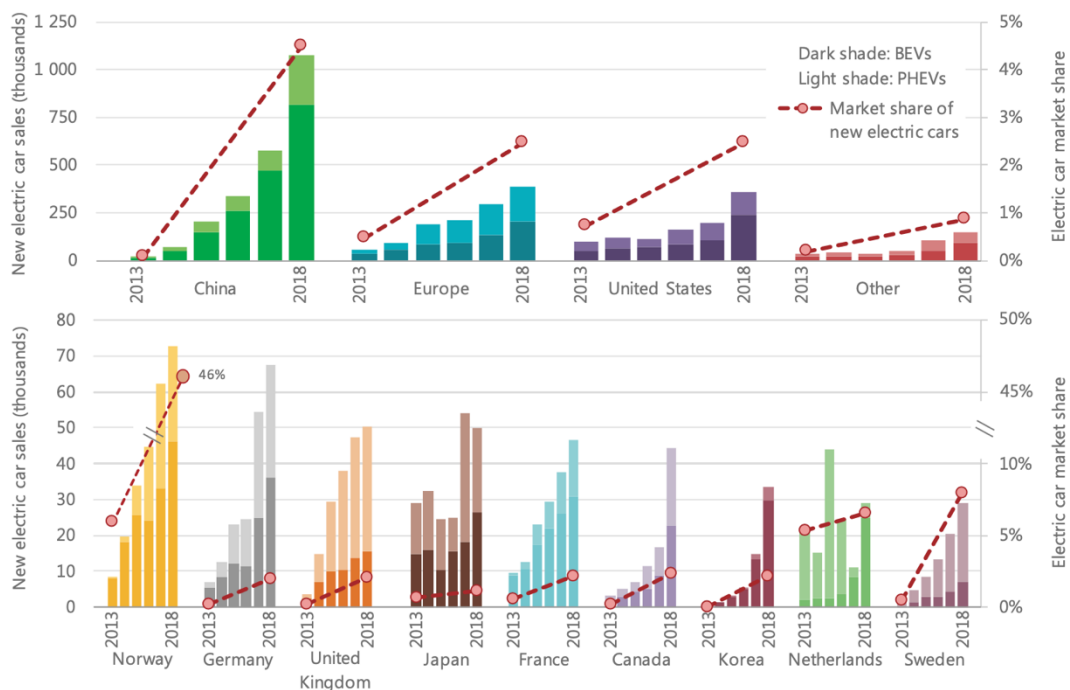
Aangezien autonome voertuigen als één van de belangrijkste innovaties gezien wordt in de toekomst van de mobiliteit, werd er ook aandacht besteed aan autonome systemen en de kosten die hiermee gepaard gaan. Deze kosten zullen waarschijnlijk zeer hoog zijn in het beginfase van de adoptie van deze technologie. De autonome voertuigen zullen in eerste instantie interessanter zijn voor commerciële toepassingen en afhankelijk van de context kan deze technologie een financieel interessante oplossing vormen voor welgestelde huishoudens met private personenwagens.

In het algemeen kan er geconcludeerd worden dat de kosten voor sommige alternatieve voertuigtechnologieën, meer bepaald BEV's en CNG-voertuigen, voor meerdere toepassingen al interessant en competitief zijn. Voorbeelden hiervan zijn de middelgrote personenwagens (zowel nieuw, tweedehands of als bedrijfswagen), kleine of middelgrote bestelwagens en stadsbussen. In de toekomst zal de kost van de batterijen dalen en zullen o.a. hierdoor de momenteel hoge aankooprijzen van BEV's hard dalen. Dit zal als gevolg hebben dat deze technologie de goedkoopste wordt op vlak van TCO voor vele voertuigcategorieën en op zijn minst een interessante alternatief voor andere voertuigcategorieën, waar hybridisatie ook een tussenoplossing kan vormen.

5. MARKTEVOLUTIES

5.1. Groei wereldwijde EV-markt

De laatste jaren kennen zowel BEV's als PHEV's een grote groei. In 2018 steeg het wereldwijde elektrische wagenpark tot een aantal van 5,1 miljoen, een toename van 2 miljoen ten opzichte van 2017 en bijna een verdubbeling van het aantal verkopen van nieuwe elektrische wagens (Bunsen et al., 2019). China blijft de grootste markt voor EV's, gevolgd door Europa. In termen van marktaandeel is Noorwegen de globale leider (met 46% in termen van nieuwe registraties) (Bunsen et al., 2019). Dit wordt links onderaan Figuur 51 weergegeven.



Figuur 51: Wereldwijd marktaandeel van elektrische voertuigen tussen 2013 en 2018 (Bunsen et al., 2019). Analyse gebaseerd op aantallen inschrijvingen per land, aangevuld met ACEA (2019); EAFO (2019); EV Volumes (2019); Marklines (2019); OICA (2019).

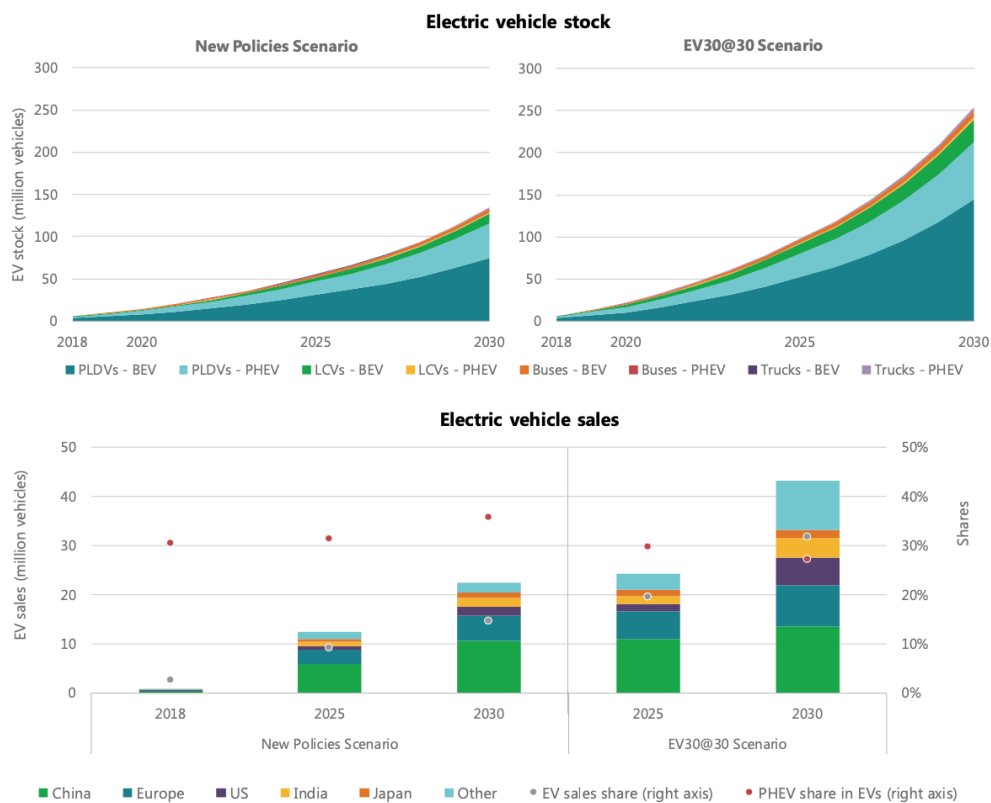
Het rapport van Bunsen et al. (2019) geeft twee projecties weer voor 2030, (1) deze onder die huidige aangepaste policies en (2) de Electric Vehicle Initiative's projectie genaamd EV30@30.

De eerste projectie omvat overheidsmaatregelen omtrent o.a. brandstofverbruiksnormen, restricties op de bouw van ICE productiefabrieken, uitstootklassen en het opnemen van laadinfrastructuur bij de bouw van nieuwe kantoorgebouwen (Bunsen et al., 2019).

In projectie 2 worden voorstellen gedaan wat zou bijdragen tot de verwachting dat de EV's tegen 2030 een wereldwijd marktaandeel van 30%, waar ruim 70% BEV's moeten zijn, zal bereiken voor EV's in alle voertuigcategorieën (behalve voor tweewielers). Deze projectie steunt op een proactieve deelname

van de particuliere sector, veelbelovende technologische vooruitgang en wereldwijde betrokkenheid bij de ondersteuning van het EV-beleid (Bunsen et al., 2019).

Figuur 52 geeft de resultaten van de projecties weer. In projectie 1 zou China tegen 2030 nog steeds het grootste aandeel bezitten (57% van alle EV's), gevolgd door Europa (26%) en Japan (21%). Projectie 2 voorspelt dat tegen 2030 70% van de nieuwe Chinese wagens EV's zullen zijn, alsook ruim de helft van de nieuwe Europese wagens. Voorspeld wordt dat, met de huidige maatregelen, het wereldwijde marktaandeel van de EV's in 2030 gelijk zal zijn aan ongeveer 15%. Indien additionele maatregelen genomen worden tegen 2030, zoals gedefinieerd in projectie 2, wordt een verdubbeling van het wereldwijde marktaandeel van EV's verwacht tegen 2030 (in totaal 30%). Dit wordt onderaan Figuur 52 afgebeeld aan de hand van de grijze punten in de staafdiagrammen.

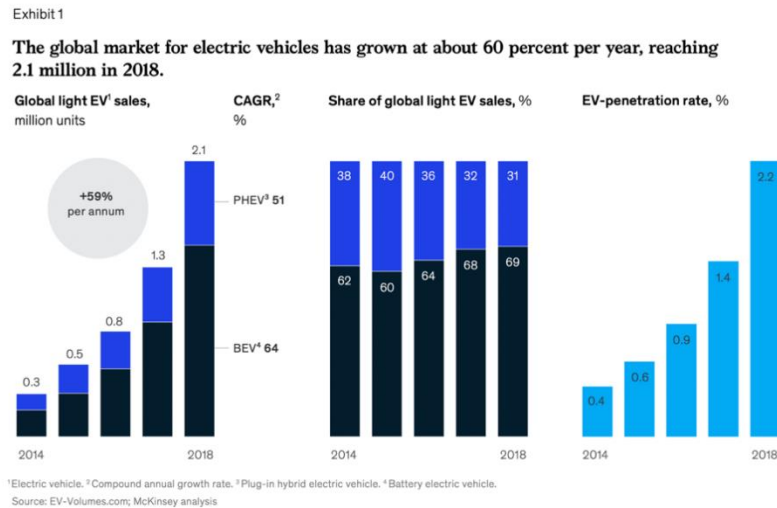


Figuur 52: Globale EV overzicht: IEA analyse ontwikkeld met het IEA Mobility Model (Bunsen et al., 2019).

Voorspellingen van Deloitte (2019) zien een hoogtepunt in 2022, waarin de *cost of ownership* van een batterij elektrische voertuig gelijk wordt gesteld aan die van een wagens met een verbrandingsmotor. Zoals in sectie 2.2.7 beschreven, is 2024 de richtdatum voor lagere productiekosten van BEV's t.o.v. een gelijkwaardige benzinevoertuig. Deloitte gaat er dus van uit dat de lagere bezitskosten al een positief invloed zullen hebben op de aankopen. Aangezien de aankoop prijs nog een grote barriere is, zal de gelijkstelling ervoor zorgen dat een BEV een haalbare optie wordt voor elke consument. De daling van de aankoop prijs zal als gevolg hebben dat het wereldwijde marktaandeel in 2030 van PHEV's en BEV's ongeveer 20% zou bedragen voor personenwagens en lichte bedrijfsvoertuigen (21 miljoen EV's

verkocht in 2030). In secties 4.2 en 4.4 worden de kosten en evolutie besproken voor personenwagens en lichte bedrijfswagen in het context van het Brussels Hoofdstedelijk Gewest.

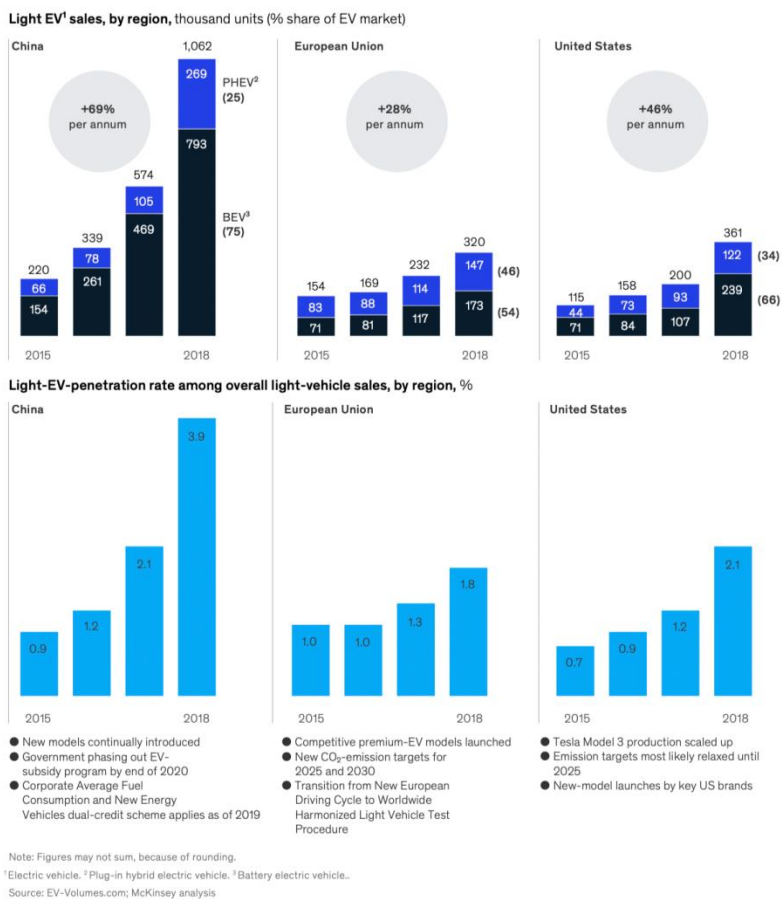
Volgens de cijfers van McKinsey in Figuur 53, ligt het aantal lichte elektrische voertuigen beduidend lager, maar is een sterke groei van ruim 60% duidelijk zichtbaar (Hertzke, Müller, Schaufuss, Schenk, & Wu, 2019)



Figuur 53: Wereldwijde groei EV's (Hertzke et al., 2019)

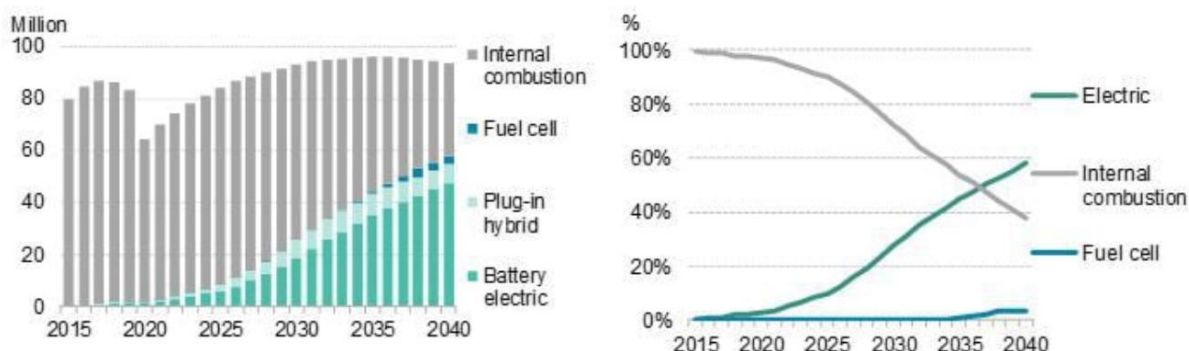
De volgorde van verdeling in de studie van McKinsey omtrent EV-aandeel situeert zich gelijkaardig aan het rapport van Bunsen et al. (2019), waar het grootste aandeel EV's gesitueerd is in China met een aandeel dat 3 maal zo groot is als de Europese en Amerikaanse markt. In deze voorspelling wordt de jaarlijkse groei voor China op 69% geschat, voor Europa op 28% en voor Amerika op 46% Figuur 54.

China's electric-vehicle market is three times the size of that of Europe or the United States.



Figuur 54: Jaarlijkse groei EV-markt per regio (Hertzke et al., 2019)

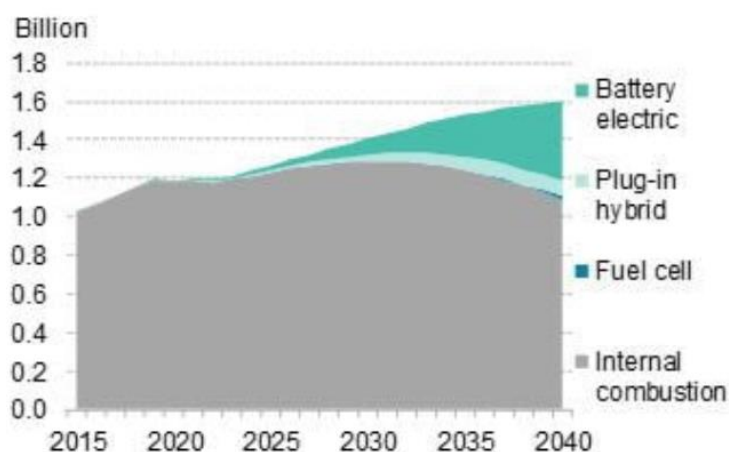
In Figuur 55 wordt de evolutie van het aantal verkochte personenauto's en de marktaandeel per voertuigtechnologie weergegeven. Deze figuur van Bloomberg toont dat EV's in 2030 ongeveer 28% marktaandeel zouden hebben. Dezelfde voorspelling schat dat er rond 2036 ongeveer evenveel EV's verkocht zullen worden als ICE's en dat er in 2040 bijna 60% van het totaal aantal verkochte personenwagens EV's zullen zijn (McKerracher et al., 2019).



Figuur 55: Langetermijn project van het verkoop van personenwagens (McKerracher et al., 2020).

In de voorspellingen van Figuur 56 wordt het aandeel van EV's in de globale vloot personenwagens tegen 2030 op bijna 10% geschat en voor 2040 op 31% (McKerracher et al., 2020). Dit percentage

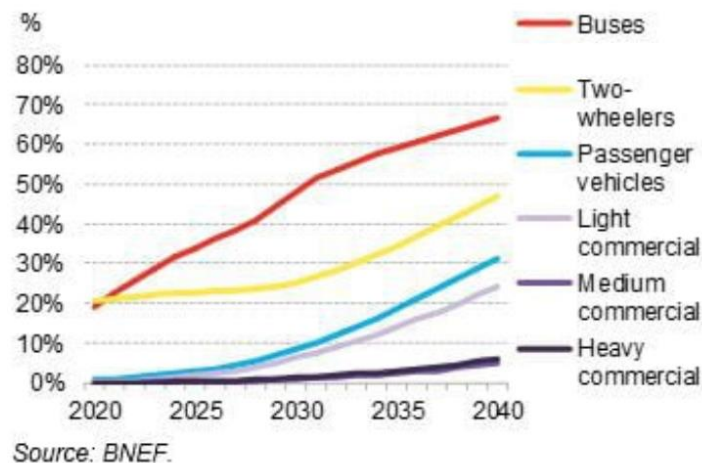
wordt wereldwijd berekend maar wordt verwacht hoger te liggen in China of Europa. Echter worden de absolute aantallen voertuigen die jaarlijks verkocht worden kleiner ingeschat door Bloomberg dan in de voorspellingen van bijvoorbeeld IEA. Volgens McKerracher et al., (2019) is dit te wijten aan autodelen, verstedelijking, demografie en automatisering van het vervoer. Dit zou ervoor zorgen dat de vraag naar wagens zal afnemen. Ook wordt de invloed van het coronavirus opgenomen in deze berekeningen, wat merkbaar is in Figuur 55 en Figuur 56 voor 2020. Deze korte termijn effecten zullen volgens Bloomberg geen langdurig effect hebben op de elektrificatie van de vloeten.



Figuur 56: Globale lange termijn vloot personenwagens (McKerracher et al., 2020).

Figuur 57 geeft de verwachte evolutie weer van de elektrificatie (BEV en PHEV) van globale vloeten voor andere voertuigsegmenten (McKerracher et al., 2020). De vloeten van de bussen en tweewielers zijn wereldwijd al redelijk ontwikkeld met een aandeel van ongeveer 20% van de vloot. Het aandeel van elektrische bussen zal sneller stijgen en zou al in 2030 een aandeel van 50% van de globale vloot voorstellen en een aandeel van 67% in 2040 bereiken. De adoptie van tweewielers zal een tragere ontwikkeling kennen tussen 2020 en 2030. In 2035 zullen elektrische tweewielers 25% van de tweewielers vloot voorstellen. Na 2030 zal dit aandeel echter sneller beginnen groeien tot bijna 50% van de tweewielers vloot in 2040. De elektrificatie van het commercieel voertuigensegment zal pas na 2025 beginnen groeien voor lichtere toepassingen en na 2030 voor middelgrote en zwaardere toepassingen. Voor middelgrote en zware vracht, zal elektrificatie zich niet zeer hard ontwikkelen met een penetratie van 5% van de vloot tegen 2040 (met een marktaandeel tussen de 10-20%) t.o.v. 25% voor licht commerciële voertuigen (ongeveer 30% marktaandeel). In die zwaardere voertuigsegmenten zullen andere technologieën een grotere rol spelen (zoals bijvoorbeeld CNG), al wordt er verwacht dat conventionele brandstoftechnologieën nog het grootste aandeel van de vloot zal vertegenwoordigen (tussen 70% en 80% van de vloot). Volgens McKerracher et al. (2020) zullen in 2040 1,5% middelgrote vrachtwagen, 3,9% zware vrachtwagen en 6,5% bussen waterstofvoertuigen zijn.

Zoals hierboven vermeld, zijn de evoluties die weergegeven worden in Figuur 57 op een globaal niveau. Deze evoluties zullen verschillen op basis van de verstedelijkingsgraad en continent (McKerracher et al., 2020). Er kan verwacht worden dat in een Europese, stedelijke context zoals het Brussels Hoofdstedelijk Gewest, sneller hogere marktaandelen en penetratiegraden behaald zullen worden voor de verschillende voertuigcategorieën.



Figuur 57: Evolutie EV vloot in verschillende voertuigsegmenten (McKerracher et al., 2020)

Gegeven de verschillende studies, kan men concluderen dat het wereldwijde marktaandeel in 2030 van EV's voor personenwagens en lichte bedrijfsvoertuigen tussen ongeveer 15 en 30% geschat wordt. Tabel 15 geeft een overzicht van het marktaandeel van de elektrische voertuigen in 2030 volgens de verschillende geraadpleegde studies. Behalve Bloomberg, schatten de studies het marktaandeel voor personenwagens én lichte bedrijfsvoertuigen samen.

Tabel 15: Marktaandeel EV's in 2030

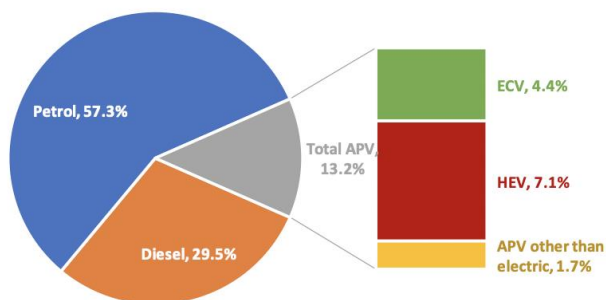
Studie	Type voertuig	Marktaandeel EV	Referentie
IEA (projectie 1)	Personenwagens en lichte bedrijfsvoertuigen	15%	(Bunsen et al., 2019)
IEA (projectie 2)	Personenwagens en lichte bedrijfsvoertuigen	30%	(Bunsen et al., 2019)
Deloitte	Personenwagens en lichte bedrijfsvoertuigen	20%	(Deloitte, 2019)
Bloomberg	Personenwagens	28%	(McKerracher et al., 2020)

5.2. Groei Europese Unie EV-markt

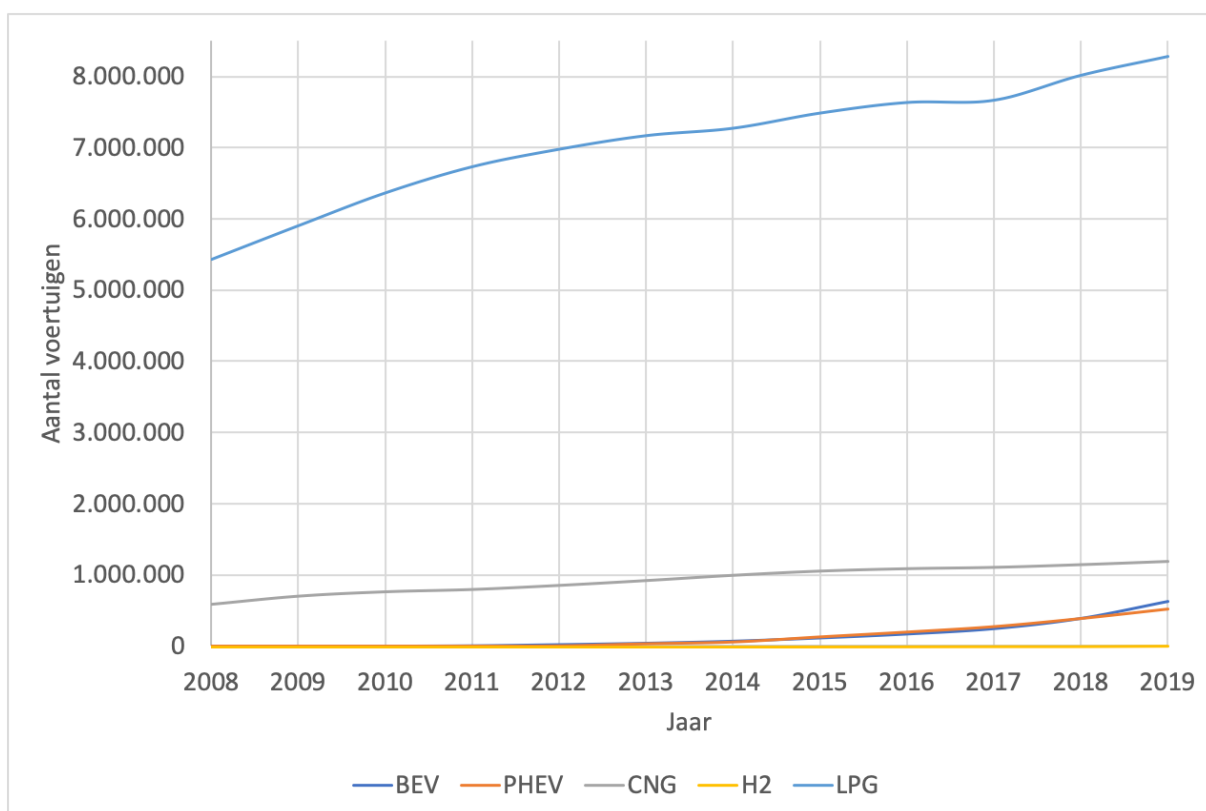
De groei van het EV-marktaandeel is ook aanwezig in de Europese Unie. Figuur 58 toont de aandelen van de nieuwe geregistreerde voertuigen in Europa per voertuigtechnologieën. Het aandeel van voertuigen op alternatieve brandstof (*alternatively-powered vehicles* of APV) in het vierde kwartaal van 2019 omvat ruim 13% van de nieuw geregistreerde voertuigen. Deze categorie omvat hybride, niet plug-

in, elektrische voertuigen (HEV), ECV (*Electrically-Chargeable Vehicles*) waaronder PHEV's en BEV's vallen en andere niet elektrische voertuigen (ethanol E85, CNG en LPG). De nieuwe geregistreerde PHEV's en BEV's boekten in het laatste kwartaal in 2019 een aandeel dat ruim 80,5% hoger ligt dan het laatste kwartaal in 2018, met een aandeel van 4,4% t.o.v. het totaal nieuw geregistreerde wagens. HEV's kennen ook een grote groei van 69,8% voor een aandeel van 7,1% van de nieuwe geregistreerde voertuigen. Andere alternatieve brandstoftechnologieën kennen een lagere groei van 28,9% met het kleinste aandeel van het aantal nieuw geregistreerde voertuigen, namelijk, 1,7% (Piazza, 2019).

Fuel types of new cars: petrol +11.9%, diesel -3.7%, electric +80.5% in fourth quarter of 2019



Figuur 58: Aandeel nieuw ingeschreven voertuigen Q4 2019 (Piazza, 2019).

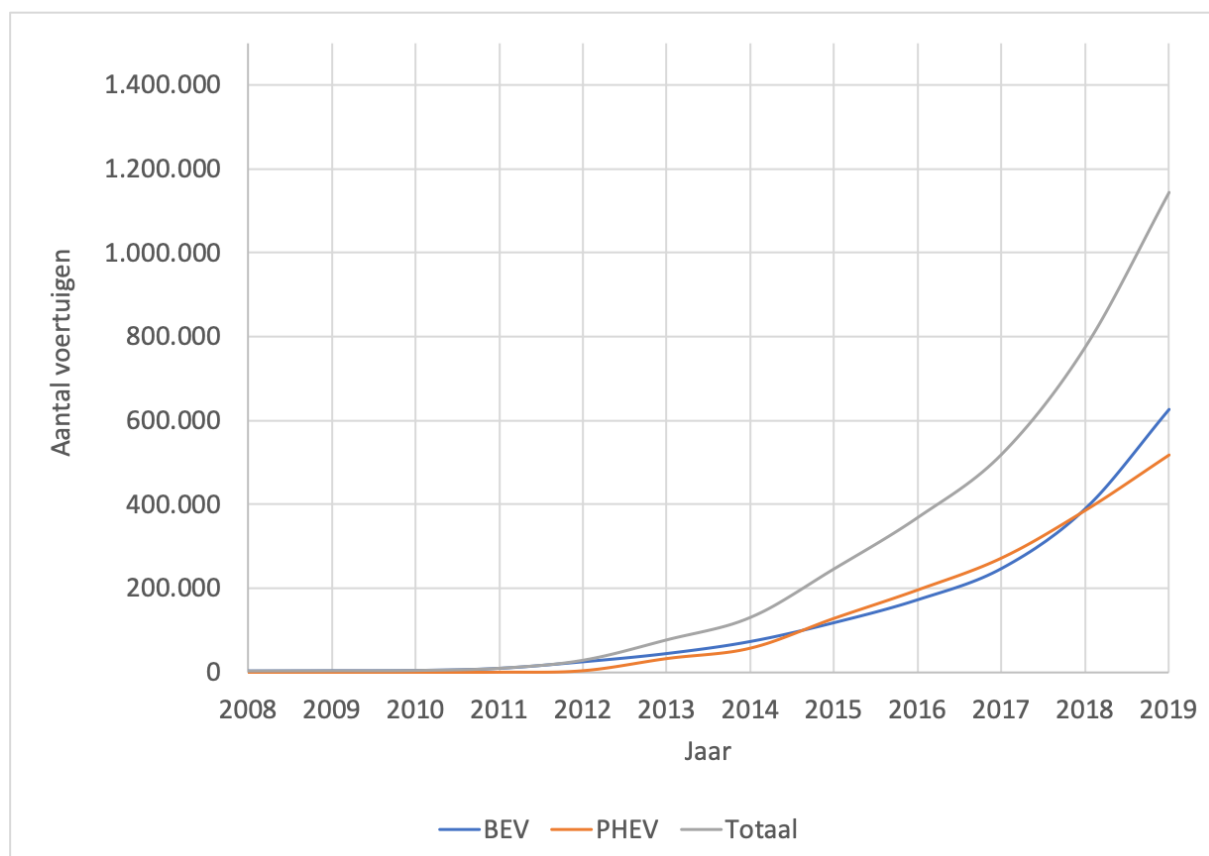


Figuur 59: Aantallen APV in EU. Bron: Visualisatie van MOBI gebaseerd op data van (EAFO, 2019b).

De cijfers van het EAFO in Figuur 59, geven een duidelijke groei aan in het segment van alle APVs. LPG is reeds jaren ruim vertegenwoordigd maar de laatste jaren stagneert de groei rond de 1 %. Dit merken we ook in het aandeel CNG dat tussen de periode 2015-2019 een gemiddelde groei van 2,5% behaalde.

Dit is in schril contrast met de Europese groei in EV's. Indien er dieper wordt ingegaan op cijfers omtrent deze EV's (EAFO, 2019b), kan men op 10 jaar tijd een sterke groei opmerken van ruim 3.266 EV's in 2009 naar momenteel iets meer dan 1,3 miljoen EV's in het begin van 2020 (BEV: 718.477; PHEV: 582.216). Deze groei wordt in detail weergegeven in Figuur 60. Dit verklaart het sterke aandeel van EV's in het vierde kwartaal uit 2019 (Piazza, 2019). Vandaag de dag weegt de verdeling BEV/PHEV in Europa ongeveer tegen elkaar op met een licht voordeel van de BEV's.

In Figuur 60 is, na enkele jaren van overmacht van de PHEV, de opmars van het aandeel BEV's in Europa duidelijk zichtbaar. Dit effect is ook zichtbaar in Figuur 51. In Nederland verkocht men tot 2016 vooral PHEV's maar in 2018 werden vooral BEV's verkocht. Er zijn ook verschillen tussen de landen zoals in Noorwegen en Frankrijk worden er meer BEV's verkocht en in Zweden meer PHEV's. Bij de andere voorbeelden op de Figuur 51 kopen die landen bijna evenveel PHEV's als BEV's. Hierdoor heeft het BEV op Europees vlak het meeste marktaandeel. De groei van de marktaandelen van PHEV's en BEV's is vooral de laatste jaren enorm, met een gemiddelde groei van 49% voor PHEV en een groei van 60% voor de BEV tussen 2018-2019.



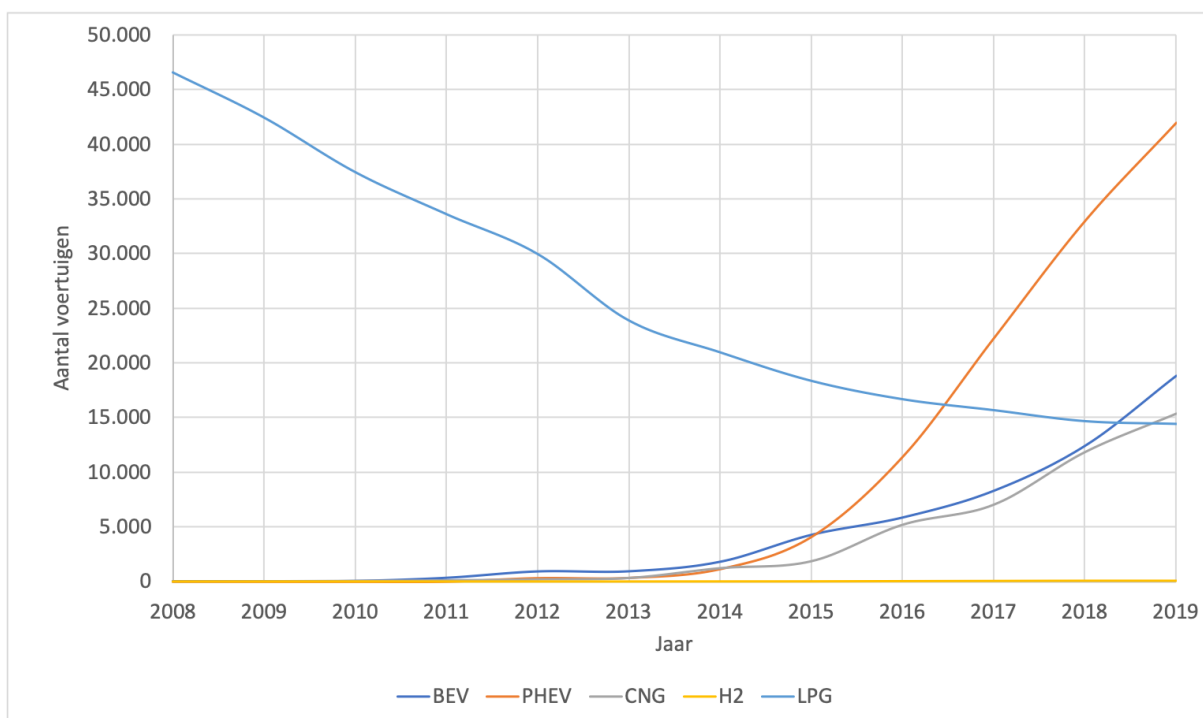
Figuur 60: Europees aantal EV's. Bron: Visualisatie van MOBI gebaseerd op data van (EAFO, 2019b).

5.3. Groei Belgische EV-markt

5.3.1. PERSONENWAGENS

Het aandeel van de Belgische APV's wint, na een periode van enorme afname, terug aan belang. Dit effect is waarneembaar in Figuur 61 aan de daling van LPG en de opmars van elektrische voertuigen (BEV en PHEV) en CNG voertuigen. Dit komt voornamelijk door de sterke jaarlijkse groei in PHEV's van gemiddeld 57% in de laatste 3 jaar (van 22.273 in 2017 tot 41.987 in 2019). Het tweede grootste aandeel van APV's in 2019 staat op naam van de BEV's (18.827), gevolgd door CNG (15.356). Beide technologieën kenden de laatste drie jaar een gemiddelde groei van respectievelijk 48% en 44%. De grotere groei van de PHEV's in België toont een verschillende trend dan de trend die zichtbaar is in Europa en besproken werd in sectie 5.2.

Tabel 16 geeft een gedetailleerd overzicht van de groei van de verschillende alternatieve voertuigtechnologieën sinds 2009.



Figuur 61: Evolutie Belgische APV-markt. Bron: Visualisatie van MOBI gebaseerd op data van EAFO (2019a).

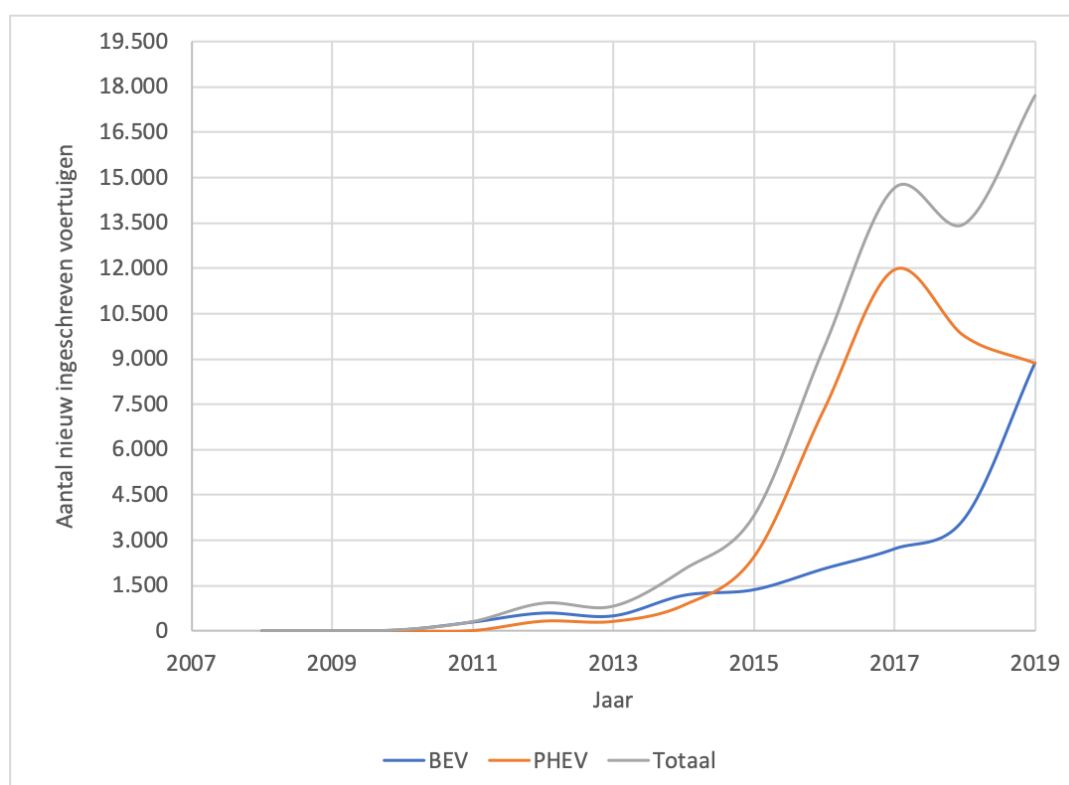
Tabel 16: Groei totale vloot APV's in België. Bron: Opmaak door MOBI op basis van data van EAFO (2019a) en "Ecoscore" (2020).

Jaar	BEV	PHEV	CNG	H2	LPG	Totaal
2009	44%	0%	65%	/	-9%	-9%
2010	162%	0%	54%	/	-12%	-12%
2011	847%	0%	52%	0%	-10%	-9%

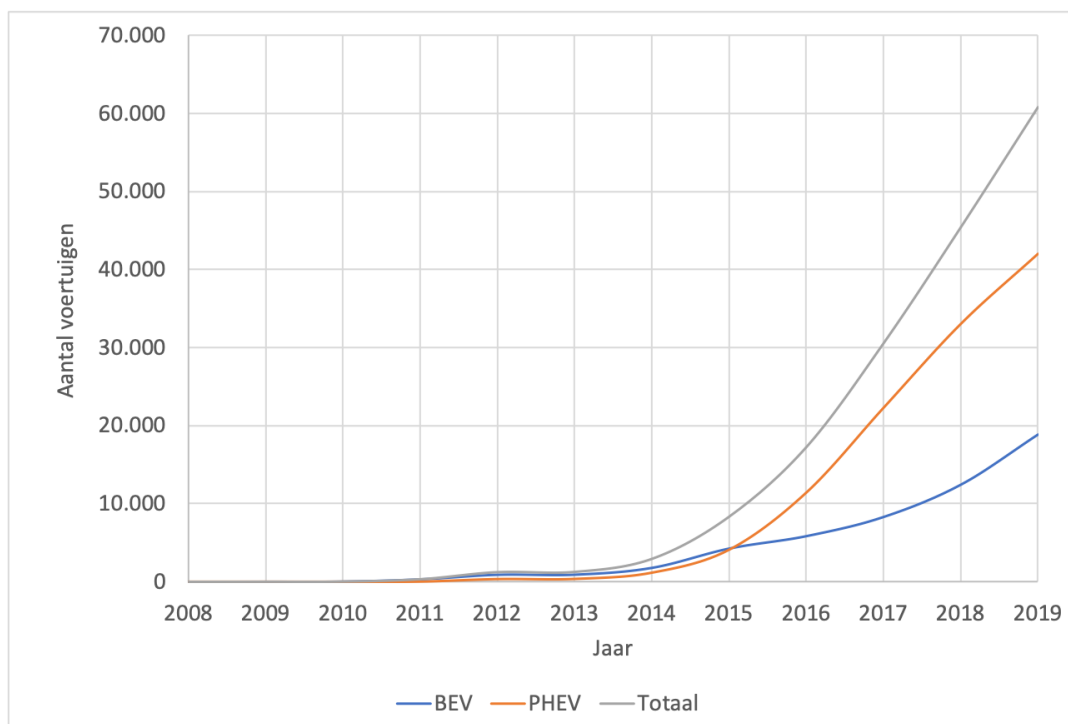
2012	182%	2013%	59%	0%	-11%	-8%
2013	1%	6%	58%	0%	-20%	-19%
2014	95%	223%	249%	300%	-12%	-1%
2015	138%	254%	51%	100%	-12%	14%
2016	37%	179%	176%	150%	-9%	37%
2017	42%	95%	35%	55%	-6%	36%
2018	50%	48%	68%	32%	-6%	35%
2019	52%	27%	30%	0%	-2%	26%

België telt momenteel ongeveer 61.000 EV's. De verdeling BEV/PHEV ligt hier ongeveer op 30/70 (BEV: 18.827; PHEV: 41.987). De EV nam in 2019 ongeveer 3% van nieuw geregistreerde voertuigen in (EAFO, 2019a).

Dat de BEV aantrekkelijk begint te worden is duidelijk zichtbaar in Figuur 62 en Figuur 63, waar in 2017 de PHEV aan aandeel verloor en de BEV sindsdien een exponentiële groei kent. De daling van het aantal nieuw geregistreerde PHEV zorgde tussen 2017 en 2018 voor een neergang, wat door het aantal nieuw geregistreerde BEV's werd rechtgetrokken.



Figuur 62: Groei van het aantal nieuwe registraties EV's in België. Bron: Visualisatie van MOBI gebaseerd op data van EAFO(2019a).



Figuur 63: Totaal aantal EV's in België. Bron: Visualisatie van MOBI gebaseerd op data van EAF0 (2019a).

Indien er gekeken wordt naar de tweedehandsmarkt, zien we dat elektrische voertuigen daar ook in trek zijn. In 2018 kenden voornamelijk de PHEV's een sterke totale groei van 32,6%, waarvan een groei van 41,3% voor de Diesel PHEV's en 31,7% voor de Benzine PHEV's. De verkoop van BEV's op de tweedehandsmarkt kende in 2018 een groei van 11,9% (Tabel 17).

Tabel 17: Groei tweedehandsmarkt EV's in België. Bron: Opmaak door MOBI op basis van data van en "Ecoscore" (2020).

Jaar	Diesel PHEV	Groei diesel PHEV	Petrol PHEV	Groei petrol PHEV	BEV	Groei BEV
2017	189		1.796		772	
2018	267	41,3%	2.365	31,7%	864	11,9%

5.3.2. GOEDERENVERVOER

Voor de groei van de goederenvoertuigenvloot per aandrijving zijn een paar parameters belangrijk. Enerzijds is er de transportvraag die zich zal vertalen in een snellere of minder snelle vernieuwing van de transportvloot. Dat kan op zijn beurt de overschakeling naar nieuwe voertuigaandrijvingen versnellen. Anderzijds zijn er natuurlijk de ontwikkeling van de voertuigtechnologieën zelf. Hieronder vallen laadvermogen, bereik, veiligheid en natuurlijk de kostprijs – de Total Cost of Ownership. Momenteel zijn nog niet alle technologieën marktwaardig en concurrentieel, zeker wat grotere vrachtvoertuigen betreft, vrachtwagens met name. De ontwikkeling zal mee de toekomstige samenstelling van de nieuwverkopen bepalen.

Via Brussel Leefmilieu werd een geconsolideerd voertuigenpark voor het perspectief 2025/2030 bekomen dat opgemaakt werd in 2018. Deze vloot werd opgemaakt in het kader van de emissie-inventaris. Deze aandelen houden reeds rekening met de bestaande maatregelen, zijnde de lage emissie zone in Brussel en de kilometerheffing op nationaal niveau met de verschillen per Gewest. Daarnaast zijn er de prognoses opgemaakt voor het Vlaams Gewest in het Clean Power for Transport document met als scope 2030. Beide vormen de input voor Tabel 18.

Tabel 18: Marktaandeel in 2035 per voertuigtype en aandrijvingstechnologie voor goederenvervoer

Voertuigtype	Aandrijvings-technologie	Marktaandeel (CPT 2030) ¹⁸	Marktaandeel Brussel Leefmilieu (2025/2030)	Marktaandeelstudie (2035) ¹⁹
Bestelwagen (< 3,5 ton)	Diesel	63,5%	94,5%	69,4%
	Benzine	12,1%	3,7%	3,7%
	BEV (+hybride)	10% (+ 5,4%)	1,8%	10% (+ 5,4%)
	Waterstof	0%	0%	2,5%
	LNG	0,4%	0%	0,4%
	CNG	8,6%	0%	8,6%
	CBM	0%	0%	0%
Lichte vrachtwagen (3,5-12 ton)	Diesel	91,8%	-	85,8%
	Benzine	0,7%	-	0,7%
	BEV (+hybride)	4,1%	-	4,1%
	Waterstof	0%	-	6%
	LNG	0%	-	0%
	CNG	3,4%	-	3,4%
	CBM	0%	-	0%
Zware vrachtwagen (>12 ton)	Diesel	83,6%	-	74%
	Benzine	0%	-	0%
	BEV (+hybride)	0,6%	-	0,6%
	Waterstof	0%	-	6%
	LNG	8,6%	-	8,6%
	CNG	1,3%	-	1,3%
	CBM	9,5%	-	9,5%

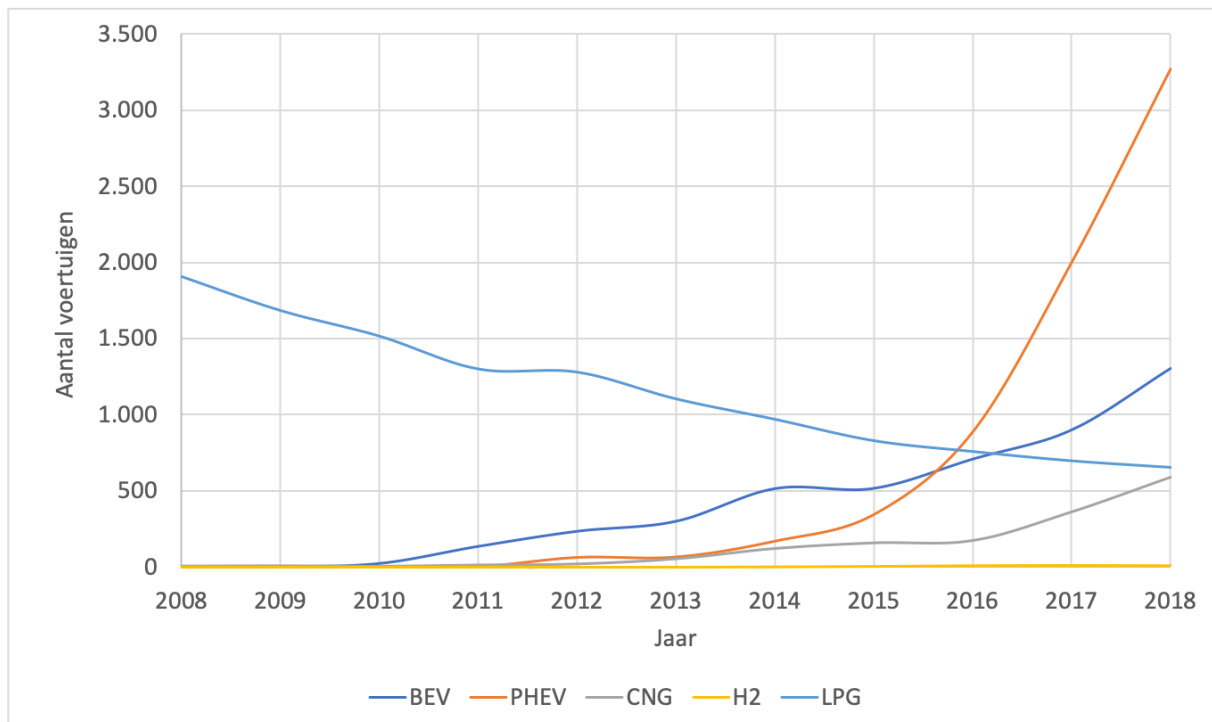
Deze cijfers komen grotendeels overeen met de voorspellingen van Bloomberg die in sectie 5.1 besproken werden (McKerracher et al., 2020). Tegen 2035 zal de BEV technologie een grotere penetratie kennen bij lichte bedrijfsvoertuigen dan bij vrachtvervoer. In die zwaardere voertuigcategorieën zullen andere technologieën een grotere rol spelen zoals CNG/LNG of nog waterstof. Waterstof voertuigen zullen dan ook volgens deze voorspelling een penetratie van 6% van het marktaandeel kennen. CNG/LNG voertuigen zullen dan vooral een rol spelen waar andere alternatieven minder ontwikkeld of minder voor de hand liggend zijn, zoals bij zware vrachtwagens met bijna 10% van het marktaandeel. Dieselveertuigen zullen in België nog steeds de meest gebruikte voertuigtechnologie zijn voor goederenvervoer tegen 2030-2035.

¹⁸ CPT: Clean Power for Transport prognose voor Vlaanderen – waterstof is in deze studie niet beschouwd. Op basis van Hydrogen Council (2017) wordt waterstof een aandeel van 6% toegedicht voor lichte vrachtoertuigen tegen 2030, en 2,5% voor zware vrachtoertuigen tegen 2030.

¹⁹ Samenstelling gebaseerd op CPT, prognose Brussel Leefmilieu en Hydrogen Council (2017): er werd telkens uitgegaan van het meest ambitieuze percentage voor alternatieve aandrijvingen (= niet diesel of benzine). Het aandeeloverschot (hoofdzakelijk door het negeren van waterstof in CPT) werd afgetrokken van het aandeel diesel voor lichte en zware vrachtwagens. Voor bestelwagens is de discrepantie tussen de aandelen diesel en benzine van CPT en Brussel Leefmilieu groot. Daarom werd hier voorkeur gegeven aan het gelijkstellen van het aandeel benzine bestelwagens aan Brussel Leefmilieu, waarna het rest aandeel afgetrokken werd van diesel.

5.4. Groei Brusselse EV-markt

Figuur 64 toont gelijkaardige trends voor APV's in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest. LPG is in constante afname terwijl het aantal andere APV's sinds 2015 stijgen. Vooral PHEV's kennen een exponentiële stijging (jaarlijkse verdubbeling). BEV's hebben een constante sterke groei sinds 2010 en tussen 2016 en 2018 een gemiddelde groei van 36%. CNG groeide gemiddeld met 54% over dezelfde periode, al blijven de aantallen CNG-voertuigen lager.



Figuur 64: Evolutie aantal APV's in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest. Bron: Visualisatie van MOBI gebaseerd op data van "Ecoscore" (2020).

Er moet wel opgemerkt worden dat deze figuur enkel de ingeschreven voertuigen in het gewest toont en dat deze voertuigen niet noodzakelijk in het bezit zijn van Brusselaars, maar bijvoorbeeld bedrijfswagens kunnen zijn van ondernemingen met een hoofdzetel in Brussel, maar met kantoren in andere regio's waar de wagens dan ook effectief rondrijden. Tabel 19 geeft een overzicht van het aantal voertuigen in het BHG per categorie, voertuigtechnologie en soort bezit (FOD Mobiliteit, 2019). De cijfers voor personenwagens en lichte bedrijfsvoertuigen tonen duidelijk aan dat het merendeel van de ingeschreven APV's in het bezit zijn van bedrijven. Het aantal PHEV personenwagens is zowel voor particulieren als voor bedrijven groter dan het aantal BEV's. Uit deze tabel blijkt ook dat de CNG voertuigen in Brussel ook vooral in het bezit zijn van bedrijven en dat het vooral om personenwagens en lichte bedrijfsvoertuigen gaat. Andere voertuigencategorieën die in de tabel opgenomen zijn, zijn 2-, 3-, 4-wielers, bussen en vrachtwagens. Uit deze cijfers blijkt dat de adoptie voor deze categorieën nog maar pas begint.

Tabel 19: Aantal voertuigen per voertuigcategorie, type bezit en voertuigtechnologie in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest (FOD Mobiliteit, 2019).

Categorie	Bezit	BEV	PHEV	CNG
Personenwagens	Privé	103	234	158
	Bedrijf	1.209	3.005	439
Lichte bedrijfswagen	Privé	5	0	13
	Bedrijf	269	0	209
2-, 3- en 4- wielers	Privé	64	0	0
	Bedrijf	143	0	0
Bussen	Bedrijf	12	0	4
Vrachtwagens	Bedrijf	5	0	11

5.5. Conclusie

De geraadpleegde studies geven aan dat het marktaandeel in 2030 van EV's (BEV's en PHEV's) voor personenwagens ongeveer tussen 15 en 30% geschat wordt en dat het aandeel EV's in de volledige vloot personenwagens bijna 10% zal bereiken. Wat andere categorieën voertuigen betreft, zal de elektrificatie van de vloten vooral sterk zijn voor bussen en tweewielers. Voor licht commerciële voertuigen zal de adoptie niet zeer hard verschillen ten opzichte van personenwagens. Er wordt niet verwacht dat alternatieve voertuigtechnologieën een zeer belangrijke rol zullen spelen voor zwaardere toepassingen tegen 2030. Deze taken zouden in 2040 nog voornamelijk vervuld worden door conventionele brandstof voertuigen (70-80%). Dit wilt zeggen dat deze vloot tegen dan uit 20-30% alternatieve voertuigen zal bestaan, wat aanduidt dat de opportuniteiten voor deze technologieën pas na 2030 groter zullen worden.

In België groeien de aantallen verkochte alternatieve voertuigen voor alle technologieën uitgezonderd LPG en waterstof. De laatste drie jaar kenden PHEV's een gemiddelde groei van 57%, BEV's van 48% en CNG van 44%. Ook op de Belgische tweedehandsmarkt kennen elektrische voertuigen een groei. Zo groeide in 2018 de tweedehandsmarkt van PHEV's met 32,6% en die van BEV's met 11,9%. De Belgische markt volgt de adoptie die wereldwijd geobserveerd wordt, waardoor er verwacht kan worden dat de adoptie ook in ons land sterk zal toenemen in de komende jaren.

In het Brussels Hoofdstedelijk Gewest zijn elektrische personenwagens het grootste aantal ingeschreven alternatieve voertuigen, met een nadruk op plug-in hybride voertuigen. De adoptie van deze technologieën is duidelijk aan het opstarten en momenteel zijn deze voertuigen voornamelijk ingeschreven door bedrijven.

6. CONCLUSIE

De klimaatuitdaging treft alle sectoren die ertoe bijdragen, niet in het minst de transportsector waarvoor we de laatste zes jaar een gestage stijging in totale CO₂-bijdrage noteren (EEA, 2019). Zo ook voor het wegtransport, dat gedomineerd wordt door personen- en vrachtwagens. In haar ambitie om tegen 2050 klimaatneutraal te zijn, streeft de Europese Commissie naar strenge tussentijdse CO₂-limieten. Zogenaamde *zero and low emission* voertuigen (ZEV) krijgen hierin een prominente rol, al sluit de Commissie geen technologieën uit om doelstellingen te kunnen halen.

De technologische evoluties in de transportsector worden dus hoofdzakelijk bepaald door het regelgevend kader van de EU, maar ook door de historische ontwikkelingen in de sector. Zo legt de EU ook emissielimieten op voor de verschillende types voertuigen. Doordat Europa een ICE-dominante industrie heeft, worden biobrandstoffen naar voren geschoven, maar zo blijft de lokale uitstoot veelal op hetzelfde niveau. Afhankelijk van het type biobrandstof (gebaseerd op voedselgewassen of afvalstromen) varieert de *well-to-tank* (WTT)-impact sterk. Voor de duurzamere biobrandstoffen kan deze impact negatief zijn, waardoor de *well-to-wheel* (WTW)-impact gunstiger kan uitvallen dan voor conventionele brandstoffen. Voertuigen op waterstofgas en synthetische brandstoffen opgewekt door hernieuwbare energiebronnen zijn minder energie-efficiënt dan elektrische voertuigen die via die energiebron rechtstreeks geladen worden.

De batterijtechnologie wordt momenteel verder geoptimaliseerd door de samenstelling van de batterijen te wijzigen zodat de hoeveelheden kobalt gereduceerd worden en om hun energie- en vermogendichtheid te vergroten. *Solid-state* batterijen zouden binnen een aantal jaar een grote stap in deze richting zijn. Gezien deze voortgang en de forse daling in batterijprijzen tijdens de laatste decennia, wordt er verwacht dat elektrische voertuigen snel betaalbaarder zullen worden. Elektrische voertuigen hebben momenteel ook al een behoorlijk aanbod aan modellen dat in de komende vijf jaar zou verviervoudigen. De combinatie van het opdrijven van de productie met de daling van de batterijkosten zou ervoor zorgen dat de productiekost van elektrische voertuigen in 2024 op hetzelfde niveau zou komen als voor een gelijkwaardig benzinevoertuig.

Afhankelijk van de alternatieve voertuigtechnologie zijn er andere aanpassingen aan de infrastructuur nodig. Voor bio- of synthetische brandstoffen zijn er geen belangrijke aanpassingen aan het netwerk nodig. Voor aardgas moeten de stations aan het nationale aardgasnetwerk verbonden worden en voor waterstof moet zo'n gelijkaardig netwerk aangemaakt worden wat zeer grote investeringen zou vereisen. Elektrische voertuigen zijn flexibeler op dat vlak. Er kan zowel publiek als residentieel geladen worden. Eén derde van de Belgische EV bezitters laadt voornamelijk thuis en 40% laadt nooit publiek. Echter blijft het belangrijk voor netwerkbeheerders om punten te identificeren die van strategisch belang zijn voor het publiek laadinfrastructuur netwerk gezien de impact die infrastructuur kan hebben op het stroomnet. *Smart charging* en *vehicle-to-grid* technologie zullen de impact op het energiesysteem beheersbaar houden, hoewel gradueel een versterking van het electriciteitsnet nodig is. Naast het conductief laden (via kabel) wordt er voor bussen en vrachtwagens momenteel ingezet op laden via

pantograaf. Inductief (contactloos) laden bevindt zich momenteel nog in de onderzoeksfase en blijkt ook duur.

De grootste kostencomponent in de verkoopprijs van een EV is de batterij. Gezien de kosten van batterijen dalen, is dat ook gunstig voor de evolutie van de aankooprijzen. De resultaten van de Total Cost of Ownership (TCO)-analyses tonen aan dat CNG, HEV en BEV voertuigen al competitief kunnen zijn in het middelgrote wagensegment. Daarentegen, waterstof- en PHEV voertuigen blijven duurdere opties. Al is de aankoopkost van een BEV beduidend hoger, deze voertuigen zijn al een interessant alternatief voor conventionele brandstofvoertuigen. Voor tweedehandswagens is op vlak van TCO een BEV interessanter dan benzine of diesel. Door het fiscaal regime is ook voor de aankoop van een bedrijfswagen de keuze voor een BEV dikwijls het goedkoopste alternatief op vlak van TCO; door hoge leasingprijzen zet zich dit nog niet door op de leasingmarkt. Wat lichte bedrijfsvoertuigen betreft, is de competitieve positie van BEV's minder voor de hand liggend en zijn vooral dieselveertuigen veruit interessanter wanneer het om voertuigen met een groter laadvermogen gaan. Voor zwaardere vrachtvervoer is het kostenplaatje van BEV en waterstof nog niet interessant; voor stadsbussen is de huidige trade-off op vlak van TCO reeds interessanter voor BEV en de verwachting is dat deze trend in de toekomst nog uitgesprokener wordt.

In het algemeen kan er geconcludeerd worden dat de kosten voor sommige alternatieve voertuigtechnologieën, meer bepaald BEV's en CNG-voertuigen (indien er geen accijnzen bijkomen), voor meerdere toepassingen al competitief zijn. Voorbeelden hiervan zijn de middelgrote personenwagens (zowel nieuw, tweedehands of als bedrijfswagen), kleine of middelgrote lichte bedrijfsvoertuigen en stadsbussen. In de toekomst zal de kost van de batterijen dalen en zullen o.a. hierdoor de momenteel hoge aankooprijzen van BEV's dalen. Dit zal als gevolg hebben dat deze technologie de goedkoopste wordt op vlak van TCO voor vele voertuigcategorieën en op zijn minst een interessant alternatief voor andere voertuigcategorieën, waar hybridisatie ook een tussenoplossing kan vormen.

Vooruitzichten wat het marktaandeel betreft variëren. De geraadpleegde studies geven aan dat het marktaandeel in 2030 van EV's voor personenwagens ongeveer tussen 15 en 30% geschat worden en dat het aandeel EV's in de personenwagensvloot bijna 10% zal bereiken. Wat andere categorieën voertuigen betreft, zal de elektrificatie van de vloeten vooral sterk zijn voor bussen en tweewielers. Voor licht commerciële toepassingen zal de adoptie niet zeer hard verschillen ten opzichte van personenwagens. Er wordt niet verwacht dat alternatieve voertuigtechnologieën een zeer belangrijke rol zullen spelen voor zwaardere toepassingen tegen 2030. Deze taken zouden in 2040 nog voornamelijk vervuld worden door conventionele brandstof voertuigen (70-80%). Dit wilt zeggen dat de vloot tegen dan uit 20-30% alternatieve voertuigtechnologieën zal bestaan, wat aanduidt dat de opportuniteiten voor deze technologieën pas na 2030 groter zullen worden.

BIBLIOGRAFIE

- ACEA. (2017). Trends in fuel type of new cars between 2015 and 2016, by country | ACEA - European Automobile Manufacturers' Association.
- ACEA. (2018). *ACEA Report Vehicles in use Europe 2018*. European Automobile Manufacturers Association. Retrieved from https://www.acea.be/uploads/statistic_documents/ACEA_Report_Vehicles_in_use-Europe_2017.pdf
- Alvarez, R. A., Zavala-Araiza, D., Lyon, D. R., Allen, D. T., Barkley, Z. R., Brandt, A. R., ... Hamburg, S. P. (2018). Assessment of methane emissions from the U.S. oil and gas supply chain. *Science*, 361(6398), 186–188. <https://doi.org/10.1126/science.aar7204>
- Arnd, S. (2020). *Perspectives for Electric Road Traffic*.
- Autocontrole. (2019). Welk vergoeding betaalt u voor de keuring van uw voertuig? Retrieved September 17, 2019, from <https://www.autocontrole.be/nl/tarieven-autokeuring>
- AutoGids. (2020). Retrieved February 17, 2020, from <https://www.autogids.be/home.html>
- Baes, K., Carlot, F., Ito, Y., Kolk, M., & Merhaba, A. (2018). *Future of Batteries - Winner takes all?* Luxembourg.
- Bansal, P., & Kockelman, K. M. (2017). Forecasting Americans' long-term adoption of connected and autonomous vehicle technologies. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 95, 49–63. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.10.013>
- Belgisch Petroleum Federatie. (2020a). Databank.
- Belgisch Petroleum Federatie. (2020b). Décomposition du prix maximum de l'essence 95 E10 et du diesel en Belgique au 31 décembre 2019 (€/litre). Retrieved June 16, 2020, from [https://www.petrofed.be/sites/default/files/editor/2-20 Décomposition du prix maximum de l'essence 95 E10 et du diesel.pdf](https://www.petrofed.be/sites/default/files/editor/2-20_Décomposition%20du%20prix%20maximum%20de%20l'essence%2095%20E10%20et%20du%20diesel.pdf)
- Belgisch Staatsblad. (2006). Omzendbrief van de Minister van Sociale Zaken: Solidariteitsbijdrage - bedrijfsvoertuigen [C – 2006/22339].
- Belgisch Staatsblad. (2011). Wet houdende diverse bepalingen (1) [C – 2011/21115].
- Belgisch Staatsblad. (2016). Programmawet (1) [C – 2016/21100].
- Belgisch Staatsblad. (2017). Wet tot hervorming van de vennootschapsbelasting (1) [C – 2017/14414].
- Belgium.be. (2019). Taux de L'impôt des Sociétés. Retrieved from https://www.belgium.be/fr/impots/impot_sur_les_revenus/societes/declaration/imposition
- Bernard, Y., Tietge, U., German, J., Muncrief, R., Foundation, F. I. A., Transportation, I. C. on C., ...

- Cities, C. (2018). *Determination of Real-World Emissions from Passenger Vehicles using Remote Sensing Data*. Retrieved from https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/TRUE_Remote_sensing_data_20180606.pdf
df%0Ahttps://trid.trb.org/view/1516266
- BlueCorner. (2020). Onderweg opladen. Retrieved June 16, 2020, from <https://www.bluecorner.be/nl/onderweg-opladen/>
- Brugel. (2019). *Observatorium van de gas - en elektriciteitsprijzen in het Brussels Hoofdstedelijk gewest*. Brussel Fiscaliteit. (2020). Verkeersbelastingen.
- Bryant, L. (1067). The Origin of the Automobile Engine. *Scientific American*, 216(3), 102–113.
- Bunsen, T., Cazzola, P., D'Amore, L., Gorner, M., Scheffer, S., Schuitmaker, R., ... Teter, J. (2019). *Global EV Outlook 2019: Scaling-up the transition to electric mobility*.
- Burghard, U., & Dütschke, E. (2019). Who wants shared mobility? Lessons from early adopters and mainstream drivers on electric carsharing in Germany. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 71, 96–109. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.11.011>
- Carteni, A., Cascetta, E., & de Luca, S. (2016). A random utility model for park & carsharing services and the pure preference for electric vehicles. *Transport Policy*, 48, 49–59. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2016.02.012>
- Christensen, A., & Petrenko, C. (2017). *CO₂-Based Synthetic Fuel: Assessment of Potential European Capacity and Environmental Performance*. Berlin.
- CNG Europe. (2020). Belgium. Retrieved February 17, 2020, from <http://cngeurope.com>
- Collins, J. M., & McLarty, D. (2020). All-electric commercial aviation with solid oxide fuel cell-gas turbine-battery hybrids. *Applied Energy*, 265, 114787. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114787>
- Compostella, J., Fulton, L. M., De Kleine, R., Kim, H. C., & Wallington, T. J. (2020). Near- (2020) and long-term (2030–2035) costs of automated, electrified, and shared mobility in the United States. *Transport Policy*, 85(December 2018), 54–66. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2019.10.001>
- CONCAWE. (2020). *JEC Well-to-Tank report v5 - Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context*.
- Corbelli, P. (2011). *Hybrid e-CVT Power Split Drivelines*. Bologna: Faculty of Engineering - Department of Electrical Engineering.
- Coren, M. (2016). Tesla has maxed out what its current batteries can do.
- Cox, B. L., & Mutel, C. L. (2018). The environmental and cost performance of current and future motorcycles. *Applied Energy*, 212, 1013–1024. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.100>
- CREG. (2020). Hoe is de energieprijis opgebouwd? Retrieved June 16, 2020, from <https://www.creg.be/nl/consumenten/prijzen-en-tarieven/hoedeenergieprijis-opgebouwd>
- Curry, C. (2017). Lithium-ion Battery Costs: Squeezed Margins and New Business Models | Bloomberg

New Energy Finance.

Danielis, R., Giansoldati, M., & Rotaris, L. (2018). A probabilistic total cost of ownership model to evaluate the current and future prospects of electric cars uptake in Italy. *Energy Policy*, 119(January), 268–281. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.04.024>

De Clerck, Q., van Lier, T., Messagie, M., Macharis, C., Van Mierlo, J., & Vanhaverbeke, L. (2018). Total Cost for Society: A persona-based analysis of electric and conventional vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 64(March), 90–110. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.02.017>

Delft, T. (n.d.). Charging modes.

Delgado, O., & Rodriguez, F. (2018). *CO2 emissions and fuel consumption standards for heavy-duty vehicles in the European Union. The ICCT Briefing Paper*. Berlin.

Deloitte. (2019). *New market. New entrants. New challenges. Battery Electric Vehicles*.

DERİCİOĞLU, Ç., YİRİK, E., ÜNAL, E., CUMA, M. U., ONUR, B., & TÜMAY, M. (2018). A REVIEW OF CHARGING TECHNOLOGIES FOR COMMERCIAL ELECTRIC VEHICLES. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCES ON AUTOMOTIVE AND TECHNOLOGY*. <https://doi.org/10.15659/ijaat.18.01.892>

Dings, J. (2016). Biodiesel's impact: emissions of an extra 12m cars on our roads, latest figures show | Transport & Environment.

Dornoff, J., Miller, J., Mock, P., & Tietge, U. (2018). *The European Commission regulatory proposal for post-2020 CO2 targets for cars and vans: A summary and evaluation*. Berlin.

Duncan, M. (2011). The cost saving potential of carsharing in a US context. *Transportation*, 38(2), 363–382. <https://doi.org/10.1007/s11116-010-9304-y>

EAFO. (2019a). *Belgium: Af Market Share New Registrations M1*.

EAFO. (2019b). *Europe: Af Market Share New Registrations M1*.

EAFO. (2020). Alternative fuels (hydrogen) filling stations stats.

Earl, T. (2018). *Roadmap to decarbonising European cars*. Brussels.

Ecoscore. (2020). Retrieved from <https://ecoscore.be/en/home>

EEA. (2019). EEA greenhouse gas - Data viewer.

eGear.be. (2019). WATERSTOFAUTO'S. Retrieved February 17, 2020, from <https://www.egear.be/waterstofauto/>

Ehring, M., & Witteveen, J. (2017). *Breakthrough of electric vehicle threatens European car industry*. Amsterdam.

EMIRI. (2017). Advanced Materials for energy storage in Li-ion batteries. In *European Innovation Summit 2017*.

- Energy for transport: 7.6% from renewable sources - Product - Eurostat. (2019, February).
- ERTRAC. (2016). *Future light and heavy duty ICE powertrain technologies*. Brussels.
- European Central Bank. (2020). Yield curve spot rate, 9-year maturity - Government bond, nominal, all issuers whose rating is triple A - Euro area (changing composition). Retrieved February 17, 2020, from http://sdw.ecb.europa.eu/quickview.do?SERIES_KEY=165.YC.B.U2.EUR.4F.G_N_A.SV_C_YM.SR_9Y
- European Commission for Standardization. (2009). ISO 14040:2009 - Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. <https://doi.org/10.1136/bmj.332.7550.1107>
- European Commission. (2016). *COM(2016) 501 final - A European Strategy for Low-Emission Mobility*. Brussels.
- European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability. (2010). *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: General guide for Life Cycle Assessment - Provisions and Action Steps. Eur 24378 en - 2010. European Commission.* <https://doi.org/10.2788/94987>
- European Environment Agency. (2020). CO2 Intensity of Electricity Generation .
- EV Database. (2020). Elektrische voertuigen database. Retrieved June 16, 2020, from <https://ev-database.nl/>
- FEBIAC. (2020). Evolutie van de gemiddelde leeftijd van het wagenpark. Retrieved February 17, 2020, from <http://www.febiac.be/public/statistics.aspx?FID=23&lang=NL>
- FEV Consulting GmbH. (2019). *LOW CARBON PATHWAYS DEEP DIVE ON HEAVY-DUTY TRANSPORTATION SECTOR*.
- Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., ... Suh, S. (2009, October). Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018>
- FOD Financiën. (2014). Circulaire AAFisc Nr. 30/2014 (nr. Ci.RH.243/633.725).
- FOD Financiën. (2015). Circulaire AAFisc nr. 36/2015 (nr. E.T.119.650).
- FOD Mobiliteit. (2019). Aantal inschrijvingen van alternatieve voertuigtechnologieën in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest.
- Gas.be. (2020). Ieder zijn auto op aardgas! Retrieved October 8, 2020, from <https://www.gas.be/nl/aanbod-wagens-op-cng>
- Gegg, P., & Wells, V. (2017). UK Macro-Algae Biofuels: A Strategic Management Review and Future Research Agenda. *Journal of Marine Science and Engineering*, 5(3), 32. <https://doi.org/10.3390/jmse5030032>
- Goedecke, M., Therdthianwong, S., & Gheewala, S. H. (2007). Life cycle cost analysis of alternative

- vehicles and fuels in Thailand. *Energy Policy*, 35(6), 3236–3246. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.11.015>
- Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J., & Van Zelm, R. (2009). *ReCiPe 2008 - A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level - First edition Report I: Characterisation*. Amersfoort.
- Gopalakrishnan, R., Goutam, S., Oliveira, L. M., Timmermans, J. M., Omar, N., Messagie, M., ... Van Mierlo, J. (2016, November). A comprehensive study on rechargeable energy storage technologies. *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage*. American Society of Mechanical Engineers (ASME). <https://doi.org/10.1115/1.4036000>
- Gorguinpour, C. (2013). Department of Defense Plug-in electric vehicle program. In *Drive Oregon*.
- Grauers, A., Borén, S., & Enerbäck, O. (2020). Total Cost of Ownership Model and Significant Cost Parameters for the Design of Electric Bus Systems. *Energies*, 13(12), 3262. <https://doi.org/10.3390/en13123262>
- Greenhouse Gas Protocol. (2016). Global warming potential values.
- Hallobanden.be. (2020). No Title.
- Henze, V. (2019, December). Battery Pack Prices Fall As Market Ramps Up With Market Average At \$156/kWh In 2019 | BloombergNEF.
- Hertzke, P., Müller, N., Schaufuss, P., Schenk, S., & Wu, T. (2019). *Expanding electric- vehicle adoption despite early growing pains*. McKinsey Center for Future Mobility.
- Hirtenstein, A. (2017). Move Over Tesla, Europe's Building Its Own Battery Gigafactories - Bloomberg.
- Hooftman, N. (2018). *The road towards a zero-carbon transportation system by 2050 - A comprehensive study for Belgium in a European context*. Vrije Universiteit Brussel.
- Hooftman, N., Messagie, M., & Coosemans, T. (2018). *Analysis of the potential for electric buses*. Retrieved from <https://leonardo-energy.pl/wp-content/uploads/2019/02/Analysis-of-the-potential-for-electric-buses.pdf>
- Hooftman, N., Messagie, M., Coosemans, T., & Van Mierlo, J. (2017). *Indicators for the 2016 new and second-hand car fleet in Belgium and the regions*. Brussels.
- Hooftman, N., Messagie, M., Joint, F., Segard, J. B., & Coosemans, T. (2018). In-life range modularity for electric vehicles: The environmental impact of a range-extender trailer system. *Applied Sciences*, 8(7). <https://doi.org/10.3390/app8071016>
- Hooftman, N., Messagie, M., Van Mierlo, J., & Coosemans, T. (2018). A review of the European passenger car regulations – Real driving emissions vs local air quality. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 86(January), 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.01.012>
- Hooftman, N., Oliveira, L., Messagie, M., Coosemans, T., & Van Mierlo, J. (2016). Environmental Analysis of Petrol, Diesel and Electric Passenger Cars in a Belgian Urban Setting. *Energies*, 9(2,

- 84), 24. <https://doi.org/10.3390/en9020084>
- Høyer, K. G. (2008). The history of alternative fuels in transportation: The case of electric and hybrid cars. *Utilities Policy*, 16(2), 63–71. <https://doi.org/10.1016/J.JUP.2007.11.001>
- Hydrogen Council. (2017). *Hydrogen scaling up. A sustainable pathway for the global energy transition*.
- ICCT. (2019). *EUROPEAN VEHICLE MARKET STATISTICS*. Berlin.
- International Transport Forum. (2019). *Understanding Consumer Vehicle Choice - A New Car Fleet Model for France*. Retrieved from https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/consumer-vehicle-choice-france_3.pdf
- JEC. (2019). Decarbonising transport by 2030. In *EU Sustainable energy week - Shaping Europe's energy future*.
- Jensen, A. F., Cherchi, E., & Mabit, S. L. (2013). On the stability of preferences and attitudes before and after experiencing an electric vehicle. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 25, 24–32. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2013.07.006>
- Jones, J., Genovese, A., & Tob-Ogu, A. (2019). Hydrogen vehicles in urban logistics: A total cost of ownership analysis and some policy implications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (January), 109595. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109595>
- Kadijk, G., Vermeulen, R. J., Buskermolen, E., Elstgeest, M., van Heesen, D., Heijne, V., ... van der Mark, P. (2017). *NOx emissions of eighteen diesel Light Commercial Vehicles: Results of the Dutch Light-Duty road vehicle emission testing programme 2017*. The Hague.
- Keramydas, C., Papadopoulos, G., Ntziachristos, L., Lo, T.-S., Ng, K.-L., Wong, H.-L., & Wong, C. (2018). Real-World Measurement of Hybrid Buses' Fuel Consumption and Pollutant Emissions in a Metropolitan Urban Road Network. *Energies*, 11(10), 2569. <https://doi.org/10.3390/en11102569>
- Khaligh, A., & Dantonio, M. (2019). Global Trends in High-Power On-Board Chargers for Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(4), 3306–3324. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2897050>
- Klöpffer, W. (2006). The Hitch Hiker's Guide to LCA - An orientation in LCA methodology and application. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11(2), 142–142. <https://doi.org/10.1065/lca2006.02.008>
- Kochhan, R., Fuchs, S., Reuter, B., Burda, P., Matz, S., & Lienkamp, M. (2014). *An Overview of Costs for Vehicle Components, Fuels and Greenhouse Gas Emissions*. Garching.
- Kollamthodi, S., Norris, J., Dun, C., Brannigan, C., Twisse, F., Biedka, M., & Bates, J. (2016). *The role of natural gas and biomethane in the transport sector*. Didcot.
- Krukowska, E., & Starn, J. (2019). Europe Thinks Like China in Building Its Own Battery Industry - Bloomberg.
- Kwanten, M. (2018). *Kilometers afgelegd door Belgische voertuigen in 2017*. Retrieved from

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Kilometers+afgelegd+door+Belgische+voertuigen#0>

- 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(September), 19–55. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.08.031>
- Lajunen, A. (2018). Lifecycle costs and charging requirements of electric buses with different charging methods. *Journal of Cleaner Production*, 172, 56–67. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.066>
- Laurens, L., McMillan, J., Baxter, D., Cowie, A., Saddler, J., Barbosa, M., ... Bacovsky, D. (2017). *State of Technology Review – Algae Bioenergy An IEA Bioenergy Inter-Task Strategic Project*. Golden, Colorado.
- LeasePlan. (2019). Business lease - Our vehicles. Retrieved September 17, 2019, from <https://www.leaseplan.com/en-be/business/showroom/>
- Lebeau, P., Macharis, C., & Mierlo, J. Van. (2019a). How to improve the total cost of ownership of electric vehicles: An analysis of the light commercial vehicle segment. *World Electric Vehicle Journal*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/wevj10040090>
- Lebeau, P., Macharis, C., & Mierlo, J. Van. (2019b). Impact of increasing diesel prices : will electric vehicles become an economic solution for freight transport ? In *EVS32 Symposium* (pp. 1–12).
- Lee, D. Y., & Thomas, V. M. (2017). Parametric modeling approach for economic and environmental life cycle assessment of medium-duty truck electrification. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3300–3321. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.139>
- Liao, F., Molin, E., Timmermans, H., & van Wee, B. (2020). Carsharing: the impact of system characteristics on its potential to replace private car trips and reduce car ownership. *Transportation*, 47(2), 935–970. <https://doi.org/10.1007/s11116-018-9929-9>
- Ligterink, N. E., Van Gijlswijk, R. N., Kadijk, G., Vermeulen, R. J., Indrajana, A. P., Elstgeest, M., ... Traa, M. (2019). *Emissiefactoren wegverkeer-Actualisatie 2019*.
- Ligterink, N., & Smokers, R. (2016). *Monitoring van plug-in hybride voertuigen (PHEVs) april 2012 t/m maart 2016*. Den Haag.
- Lutsey, N., & Nicholas, M. (2019). *Update on electric vehicle costs in the United States through 2030*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25390.56646>
- Mahmassani, H. (2016). Chapter four: Technological innovation and the future of urban personal travel. In *Mobility 2050 - A vision for transportation infrastructure* (pp. 41–61).
- Mahmoudzadeh Andwari, A., Pesiridis, A., Rajoo, S., Martinez-Botas, R., & Esfahanian, V. (2017). A review of Battery Electric Vehicle technology and readiness levels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 414–430. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.138>
- Malikopoulos, A. A. (2014). Supervisory Power Management Control Algorithms for Hybrid Electric

- Vehicles: A Survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15(5), 1869–1885. <https://doi.org/10.1109/TITS.2014.2309674>
- McKerracher, C. (2017). The global EV market: where to next? In *EVS30, 9-11 October, Stuttgart*. Stuttgart: EVS30.
- McKerracher, C., Izadi-Najafabadi, A., O'Donovan, A., Albanese, N., Soulopoulos, N., Doherty, D., ... Grant, A. (2020). *Electric vehicle Outlook 2020*.
- McKerracher, C., Izadi-Najafabadi, A., Soulopoulos, N., Doherty, D., Frith, J. T., Albanese, N. R., ... Zamorano-Cadavid, A. (2019). Electric Vehicle Outlook 2019 | Bloomberg NEF. *Bloomberg New Energy Finance*.
- Message, M. (2017). *Life Cycle Analysis of the Climate Impact of Electric Vehicles*. Brussels.
- Midas. (2020). Onderhoudssimulator. Retrieved February 17, 2020, from <https://www.midas.be/nl/onderhoud/simulator/berekening/>
- Mock, P. (2019). *CO2 emission standards for passenger cars and light-commercial vehicles in the European Union*.
- Mosquet, X., Dauner, T., Lang, N., Rubmann, M., Mei-Pochtler, A., Agrawal, R., & Schmeig, F. (2015). Revolution in the Driver's Seat: the Road to Autonomous Vehicles. Retrieved July 17, 2020, from <https://www.bcg.com/publications/2015/automotive-consumer-insight-revolution-drivers-seat-road-autonomous-vehicles.aspx>
- Mouli, G. R. C., Kaptein, J., Bauer, P., & Zeman, M. (2016). Implementation of dynamic charging and V2G using Chademo and CCS/Combo DC charging standard. In *2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, ITEC 2016*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/ITEC.2016.7520271>
- Nassary, M., Orabi, M., Ghoneima, M., & El-Nemr, M. K. (2019). Single-Phase Isolated Bidirectional AC-DC Battery Charger for Electric Vehicle-Review. In *Proceedings of 2019 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering, ITCE 2019* (pp. 581–586). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/ITCE.2019.8646528>
- Nordelöf, A., Romare, M., & Tivander, J. (2019). Life cycle assessment of city buses powered by electricity, hydrogenated vegetable oil or diesel. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 75, 211–222. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.08.019>
- Paundra, J., Rook, L., van Dalen, J., & Ketter, W. (2017). Preferences for car sharing services: Effects of instrumental attributes and psychological ownership. *Journal of Environmental Psychology*, 53, 121–130. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2017.07.003>
- Piazza, F. (2019). *New Passenger Car Registrations By Alternative Fuel Type in the European Union*. *European automobile manufacturers association* (Vol. 2019).
- Politechnika Wroclaw. (2011). *Hybrid Electrical Vehicles*. Wroclaw.
- Powerdale/VUB. (2019). Meet the Belgian e-driver.

- Quarles, N., Kockelman, K. M., & Mohamed, M. (2020). Costs and benefits of electrifying and automating bus transit fleets. *Sustainability (Switzerland)*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/SU12103977>
- Ramachandran, S., & Stimming, U. (2015). Well to wheel analysis of low carbon alternatives for road traffic. *Energy Environ. Sci. Energy Environ. Sci*, 8(8), 3313–3324. <https://doi.org/10.1039/c5ee01512j>
- Rangaraju. (2018). *Environmental performance of battery electric vehicles – Implications for future integrated electricity and transport system*. Vrije Universiteit Brussel.
- Ribau, J. P., Silva, C. M., & Sousa, J. M. C. (2014). Efficiency, cost and life cycle CO₂ optimization of fuel cell hybrid and plug-in hybrid urban buses. *Applied Energy*, 129, 320–335. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.05.015>
- Riddick, S. N., Mauzerall, D. L., Celia, M., Harris, N. R. P., Allen, G., Pitt, J., ... Manning, A. J. (2019). Methane emissions from oil and gas platforms in the North Sea. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(15), 9787–9796. <https://doi.org/10.5194/acp-19-9787-2019>
- Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of innovations* (5th ed.). New York: Free Press.
- Rotthier, B., Stevens, G., Huyck, B., Motoasca, E., & Cappelle, J. (2017). *Is the speed pedelec the light electric vehicle that will achieve a modal shift?*
- SAE International. (2017). Fuel Cell Technology Showcase - History of Fuel Cells.
- Schmidt, O., Gambhir, A., Staffell, I., Hawkes, A., Nelson, J., & Few, S. (2017). Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(52), 30470–30492. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2017.10.045>
- Schmidt, P., & Weindorf, W. (2016). *Power-to-Liquids Potentials and Perspectives for the Future Supply of Renewable Aviation Fuel*. Dessau-Rosslau.
- Schmuck, R., Wagner, R., Hörpel, G., Placke, T., & Winter, M. (2018). Performance and cost of materials for lithium-based rechargeable automotive batteries. *Nature Energy*, 3(4), 267–278. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0107-2>
- Schmutzler, J., Andersen, C., & Wietfeld, C. (2013). Evaluation of OCPP and IEC 61850 for Smart Charging Electric Vehicles. *World Electric Vehicle Journal*, 6(4), 863–874. <https://doi.org/10.3390/wevj6040863>
- Sen, B., Ercan, T., & Tatari, O. (2017). Does a battery-electric truck make a difference? – Life cycle emissions, costs, and externality analysis of alternative fuel-powered Class 8 heavy-duty trucks in the United States. *Journal of Cleaner Production*, 141, 110–121. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.046>
- Serdoner, A., & Whiriskey, K. (2017). *The “power to liquids” trap*. Brussels.
- Sheth, A., & Sarkar, D. (2019). Life cycle cost analysis for electric vs diesel bus transit in an Indian scenario. *International Journal of Technology*, 10(1), 105–115.

<https://doi.org/10.14716/ijtech.v10i1.1958>

- Sihvonen, J. (2017). *A target for advanced biofuels*. Brussels.
- Smit, R., Whitehead, J., & Washington, S. (2018). WHERE ARE WE HEADING WITH ELECTRIC VEHICLES? *Air Quality and Climate Change*, 52(3), 18–27.
- Souloupoulos, N. (2017). When Will Electric Vehicles be Cheaper than Conventional Vehicles?
- Sperling, D. (2018). *Three revolutions - steering automated, shared and electric vehicles to a better future*. Washington: Island Press.
- Stevens, G., Rotthier, B., Roetynck, A., Coosemans, T., & Cappelle, J. (2017). *Het potentieel van lichte elektrische voertuigen in Vlaanderen*.
- Taiebat, M., & Xu, M. (2019). Synergies of four emerging technologies for accelerated adoption of electric vehicles: Shared mobility, wireless charging, vehicle-to-grid, and vehicle automation. *Journal of Cleaner Production*, 230, 794–797. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.142>
- Tan, K. M., Ramachandaramurthy, V. K., & Yong, J. Y. (2018). Latest Electric Vehicle Charging Technology for Smart Grid Application. In *2018 IEEE 7th International Conference on Power and Energy, PECon 2018* (pp. 366–371). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/PECON.2018.8684091>
- Tietge, U., Diaz, S., Mock, P., German, J., Bandivadekar, A., & Ligterink, N. (2016). *From laboratory to road - A 2016 update of official and “real-world” fuel consumption and CO2 values for passenger cars in Europe*.
- Tietge, U., Zacharof, N., Mock, P., Franco, V., German, J., Bandivadekar, A., ... Lambrecht, U. (2015). *From laboratory to road: A 2015 update of official and “real-world” fuel consumption From laboratory to road: A 2015 update of official and “real-world” fuel consumption and CO2 values for passenger cars in Europe*. Berlin.
- Topal, O., & Nakir, İ. (2018). Total cost of ownership based economic analysis of diesel, CNG and electric bus concepts for the public transport in Istanbul City. *Energies*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/en11092369>
- Touring. (2020). Touring tankkaarten voor onze leden. Retrieved June 16, 2020, from <https://www.touring.be/nl/ledenvoordelen/touring-tankkaarten>
- Toyota opens up its patents to boost FCEV industry collaboration. (2015). *Fuel Cells Bulletin*, 2015(1), 9–10. [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(15\)70021-0](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(15)70021-0)
- Valin, H., Peters, D., van den Berg, M., Frank, S., Havlik, P., Forsell, N., ... de Fulvio, F. (2015). *The land use change impact of biofuels consumed in the EU Quantification of area and greenhouse gas impacts*. Utrecht.
- Van Mierlo, J., Messagie, M., & Rangaraju, S. (2017). Comparative environmental assessment of alternative fueled vehicles using a life cycle assessment. In *Transportation Research Procedia* (Vol. 25, pp. 3435–3445). <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.244>

- Varone, A., & Ferrari, M. (2015). Power to liquid and power to gas: An option for the German Energiewende. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 207–218. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.01.049>
- Vermeulen, R., van Gijlswijk, R., van Heesen, D., Buskermolen, E., & van Goethem, S. (2019). *Dutch In-service emissions testing programme 2015-2018 for heavy-duty vehicles: status quo Euro VI NOx emissions*. The Hague.
- Verzekeringen.be. (2020). Autoverzekering vergelijken. Retrieved February 17, 2020, from <https://www.verzekeringen.be/autoverzekering-vergelijken>
- Wadud, Z. (2017). Fully automated vehicles: A cost of ownership analysis to inform early adoption. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 101, 163–176. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.05.005>
- Walker, P. D., & Roser, H. M. (2015). Energy consumption and cost analysis of hybrid electric powertrain configurations for two wheelers. *Applied Energy*, 146, 279–287. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.02.009>
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., & Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9), 1218–1230. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>
- Witkamp, B., van Gijlswijk, R., Bolech, M., Coosemans, T., & Hooftman, N. (2017). *The transition to a Zero Emission Vehicles fleet for cars in the EU by 2050*. Brussels.
- Wu, G., Zhang, X., & Dong, Z. (2015). Powertrain architectures of electrified vehicles: Review, classification and comparison. *Journal of the Franklin Institute*, 352(2), 425–448. <https://doi.org/10.1016/J.JFRANKLIN.2014.04.018>
- Yacovitch, T. I., Neining, B., Herndon, S. C., Van der Gon, H. D., Jonkers, S., Hulskotte, J., ... Zavala-Araiza, D. (2018). Methane emissions in the Netherlands: The Groningen field. *Elem Sci Anth*, 6(1), 57. <https://doi.org/10.1525/elementa.308>
- Yang, L., Hao, C., & Chai, Y. (2018). Life cycle assessment of commercial delivery trucks: Diesel, plug-in electric, and battery-swap electric. *Sustainability (Switzerland)*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/su10124547>
- Yilmaz, M., & Krein, P. T. (2013). Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2212917>
- Zhou, T., Roorda, M. J., MacLean, H. L., & Luk, J. (2017). Life cycle GHG emissions and lifetime costs of medium-duty diesel and battery electric trucks in Toronto, Canada. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 55, 91–98. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.06.019>
- Zoepf, S. M., & Keith, D. R. (2016). User decision-making and technology choices in the U.S. carsharing market. *Transport Policy*, 51, 150–157. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2016.01.010>

APPENDIX

Deze appendix omvat enerzijds een hoofdstuk overgenomen uit een Engelstalige MOBI doctoraatsdissertatie (Hooftman, 2018) en anderzijds uit een technologische *state-of-art* studie naar laadinfrastructuur voor elektrische voertuigen, namelijk OPTIBIDS. In de appendix wordt dieper ingegaan op de context rond voertuigtechnologieën en hun benodigde infrastructuur.

1. TECHNOLOGICAL OVERVIEW

Although nowadays the European car market remains dominated by conventional diesel and petrol cars, various alternatives are available as well. This chapter provides a technological overview of the different powertrains that are on the market, and those that have the potential to challenge the dominance of conventional ones in the future. Considering the imminent decarbonisation of transport, tank-to-wheel efficiencies regarding greenhouse gases (GHG) will be a significant determinant for the future application of the various powertrain technologies. Therefore, each powertrain technology's GHG potential is discussed. In the light of whichever reduction pathway Europe will set for its passenger car sector, well-to-tank emissions need to be accounted for as well, as only a well-to-wheel approach allows for encompassing the subsector's contribution to climate change.

1.1. Diversification from the very start

Various powertrain technologies have been developed since the very first automobiles were introduced in the 19th century. While many of these early inventions were further developed up to date, some concepts have been abandoned, e.g. steam-powered and wood gasification engines. As it goes with the inventions of 'game-changers', foundations for the modern engine were laid by different 'engineers' in a time span of nearly a millennium. Building on these different concepts, the internal combustion engine (ICE) saw the light in the mid-19th century: it was Nicklaus Otto (in collaboration with Gottlieb Daimler and Wilhelm Maybach) who patented the compressed charge four-stroke engine in 1876 (Bryant, 1067). As an alternative to the highly inefficient and labour-intensive steam engines used in industry, Rudolf Diesel patented the first compressed ignition, diesel engine in the 1890s. At that time, however, diesel engines were typically large and ran at low speeds. Ever since the end of the 19th century, the ICE underwent a myriad of innovations to become the highly sophisticated system on which today's road transportation sector is nearly entirely based. Ironically, electric vehicles (EV) were considered to have a big future in the early days of the automobile. In fact, between 1880 and 1900, a 'golden age' for major technological developments for electric propulsion took place, which still forms the basis of contemporary EVs (Høyer, 2008). Their early success was characterised by a 38% EV market share in the U.S., at the turn of the 20th century (Ehring & Witteveen, 2017). While EV developers at that time (...) struggled with the challenge of fast-charging and the expansion of the first charging stations, the distillation of crude oil got industrialised, and petrol fuel became a cheap combustible

product. Contrary to the limited amount of energy that could be stored in lead-acid batteries, fossil fuel derivatives like petrol and diesel were proven to have high energy contents, allowing longer ranges when applied in automobiles. Due to the straightforward storage requirements for liquid fuels, a network of refuelling stations was built in no time. This resulted in a boom in petrol car sales to the disadvantage for EVs. A claim on most petrol cars during the First World War (and the resulting shortage of fuel), however, left EVs as a viable solution for the transportation of both people and goods. After the war, EVs started losing ground again to petrol and diesel technology, and most EV producers went bankrupt during the 1929 stock market crash. Following yet another wartime shortage of petrol fuel, EVs remained an important substitute until the early 1950s. In the following decades, interest in electric/alternative powertrain systems followed the availability of crude oil products and – to a lesser extent – the worrying impact of transportation on air quality, as urban roads started reaching saturation (Høyer, 2008). Post-war awareness of fuel consumption by cars reached a first high when the Organisation of Petroleum Exporting Countries (OPEC) proclaimed an embargo against the West in 1973, inducing a global oil crisis. This forced Western car manufacturers to look eastwards towards Japan, where passenger cars were typically built smaller and ran more efficiently. Further improvements to the ICE over the decades to come would allow manufacturers to market cars with ever-improving fuel economies, although overall powertrain efficiencies remain dramatically low to date. As such, typical overall engine efficiencies ranging from about 13% to 20% are obtained for ICEs, with the higher end represented by diesel combustion. These efficiencies aren't to be confused with *peak* efficiencies that are often mentioned in research objectives and findings. In modern vehicles, however, engineers try to keep the engine running in its most optimal mode through electrification of the power train, which will be discussed further. An alternative for the historically low-efficient conventional cars was presented in the 1990s with General Motors' revival of the electric car in the form of the EV1. Although it provided an all-electric range of 160 km, this possible game-changer was denied its chance to thrive by both the U.S. federal government, the oil industry and the competing automotive industry. Therefore, it would not be until a decade later that Tesla would shake the automotive industry with its Roadster, announcing that EVs were back and this time to stay for good.

1.2. Conventional petrol and diesel cars

Knowing that the composition of the future passenger car fleet is not likely to consist of only one dominant technology, an overview of the different options is given in the following sub-chapters. Special attention is given to their tank-to-wheel CO₂ emissions in the light of their application potential towards 2050 and the Paris Agreement. Note that these TTW emission factors are derived from fleet averages and therefore show no margin indicating the best and worst performing vehicles within the specific technology group. Before the First World War, petrol engines were destined only for the lucky few who could afford them. Mass-production of Ford's Model T and the war changed this, as people got acquainted with the technology and recognised the benefits, compared to transportation per horse. In the 1930s, the once sturdy and low-speed diesel engines were re-designed and offered in cars as well, although they became a real competitor for petrol only two to three decades later. Both petrol and diesel

are applied in internal combustion engines to convert chemical energy (stored in the fuel) into mechanical energy. Both fuels require a different engine working principle:

- Diesel engines (Diesel cycle)
 - Rely on an auto-ignition of the air-fuel mixture
 - This mixture is characterised by an excessive amount of air; the mixture is *lean*
 - Typically have higher compression ratios than petrol variants, which is why diesel engines:
 - run at lower revolutions per minute (RPM);
 - have higher torque, and;
 - have a better thermal efficiency, resulting in better fuel economy and thus lower CO₂ emissions
 - Have direct injection
 - Fuel injection occurs at the end of the compression stroke
 - A stratified air-fuel mixture is created in the combustion chamber, which will auto-ignite due to the high pressure and high temperature
 - Where the mixture is rich, combustion will tend to be incomplete, resulting in carbonaceous soot and a volatile, extractable fraction that is categorised as exhaust particulate matter (PM)
 - Where it is lean, NO_x is typically formed, as combustion temperatures increase above the 1.900 Kelvin temperature threshold for the nitrogen in the combustion mixture's air to oxidise. Due to the principle of excessive air, diesel engines inherently produce far more NO_x than petrol engines
 - Were characterised by a trade-off between PM and NO_x reduction prior to Euro 6d technology, while pollution control compromises fuel economy, something that remains relevant for Euro 6d vehicles as well.

- Petrol engines (Otto cycle)
 - Require a spark ignition of the air-fuel mixture
 - Have two possible injection principles:
 - Direct: mimicking the diesel process (to become the reference for all petrol engines on the short term)
 - Indirect: fuel is injected into the intake port before the intake valve, which allows a more homogeneous mixture formation
 - Are limited in the maximum applicable compression ratio as higher pressures might lead to uncontrolled self-detonations, known as 'knocking.'
 - Resulting in a lower torque, but higher maximum engine power as higher RPMs are attainable
 - Ideally run at a lean mixture, but are calibrated to run at a stoichiometric air-fuel mixture, consisting of 1 part of air per 14,7 parts of fuel, to allow optimal functioning of the three-way catalyst (TWC)
 - At stoichiometry, the TWC can reduce regulated pollutants like CO, HC and NO_x to fractions of the engine-out concentrations

Automotive engineers continuously work to reach higher compression ratios for petrol cars to increase fuel economy, while for diesel engines the focus is now on reducing engine-out pollutant emissions as much as possible. This is far less the case for petrol cars as real-world driving emission (RDE) testing for the regulated pollutants has demonstrated. For both engine types, a trend of *downsizing* engines has taken place during the last decade, as higher compression ratios and more efficient turbocharging allowed for the same power output from smaller engines, resulting in lower fuel consumption. This trend has a shortcoming, as the most downsized engines are typically those showing the most extensive divergence between laboratory and real-world testing (Tietge et al., 2015). There are nonetheless limits

to both downsizing and increasing the pressures in combustion chambers, as material strength issues have called a halt to the on-going trends.

Over nearly the century-and-a-half since the ICE was patented, it has become the backbone of our entire economy as its versatility allowed us to implement the technology in a myriad of applications and this at low cost. Despite our seemingly automated reliance on the ICE, one seems to forget that it remains a desperately inefficient machine that is characterised by significant losses. These are mostly due to potential energy lost as heat, friction and losses for pumping air in and out the cylinders (ERTRAC, 2016). Overlooking the technological achievements for ICEs throughout history, efficiency only improved incrementally, except for the introduction of high-pressure, direct fuel injections and turbocharging. These innovations drastically changed the power and driveability characteristics of diesel engines, while bringing down fuel consumption for both diesel and petrol technology. To date, the *peak* thermal efficiency of petrol combustion in an ICE is about 38 per cent, while for diesel engines this typically lies higher, i.e. around 42 per cent (ERTRAC, 2016). The primary challenge for automotive engineers is to reach this peak efficiency over the broadest possible operational range of the engine. In reality, over 70% of the fuel's energy is lost as heat, due to the transient operation of engines that typically perform best at higher RPMs and engine loading. These latter two requirements are not reflected in contemporary driving situations, often characterised by low urban driving speeds and frequent standstills due to congestion. Moreover, the *overall* powertrain efficiency is further reduced due to the subsequent losses in the different energy conversions between the ICE and the wheels. Therefore, overall powertrain efficiencies often do not exceed the 13 - 20% range. To increase the overall efficiency of the conventional powertrain, the automotive industry's long-term target is (among other measures) to increase peak thermal efficiencies of both engine types to 50%. This requires radically new technologies and changes to the combustion management. According to the European Road Transport Research Advisory Council (ERTRAC) (ERTRAC, 2016), potential savings can still be made mainly in the field of:

- Air and exhaust gas management (efficiency improvement potential: approx. 2,5% points)
 - Improving turbocharging efficiency
 - Improving the gas exchange on the intake and exhaust side
- Fuel preparation and injection (efficiency improvement potential: approx. 1,5 - 3% points)
 - Precise metering to create an ideal oxidation
 - On-board fuel reforming using waste-heat recovery
- Thermodynamic combustion process improvements (efficiency improvement potential: approx. 3,5 - 6% points)
 - Maximising mechanical work generation (lower friction, lower heat losses)
 - Dedicated combustion processes for synthetic fuels
 - Innovative ignition
- Optimised powertrain control (efficiency improvement potential: approx. 2,5 - 5% points)
 - Advanced real-time emission control
 - Better physical modelling
- Recovering waste heat and optimising thermal management (improving fuel economy up to 5%)

As indicated, there are many domains for potential improvement, although manufacturers need to balance the economic feasibility as each per cent of efficiency gain comes at a great investment cost. Although the automotive industry predicts ICEs will still be an important technology by 2050, a 50% peak thermal efficiency might still translate to an overall efficiency of only 30%. As every sector is required to

cut its GHG emissions in the coming decades drastically, even a 50% efficient ICE will not suffice. Therefore, either a hybridisation of the ICE powertrain is pushed through, or the fossil fuels ICEs run on are replaced by low-carbon fuels (synthetic/biofuels). Figure 1 shows the priority the industry gives to these options.

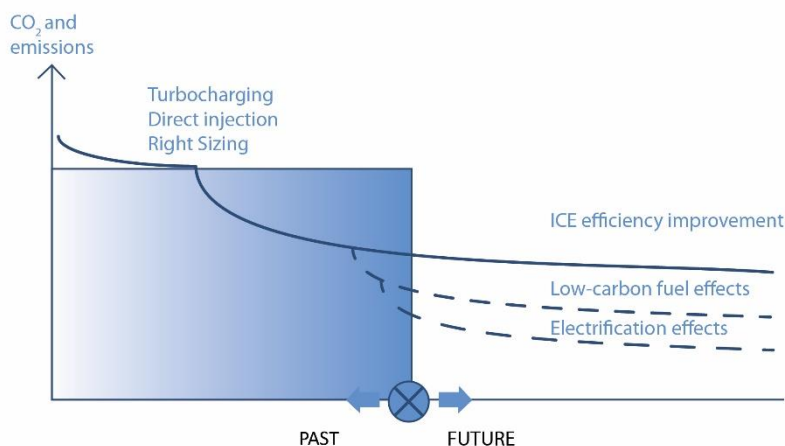


Figure 1: Measures to further reduce passenger car emissions according to the automotive industry (ERTRAC, 2016)

1.2.1.A. TANK-TO-WHEEL EMISSIONS PETROL AND DIESEL CARS

At the end of each subchapter, an overview will be given of the latest averages for TTW CO₂ emissions, according to type-approval data for vehicles sold in Belgium. This fleet is thus assumed to be representative of the European fleet for new registrations. In terms of the averages for petrol and diesel cars, the Belgian type-approval data are 124 g/km and 112 g/km, respectively. Based on the annual update of the discrepancy between type-approval and real-world data, provided by the ICCT in (Tietge et al., 2016), the latest report indicated a divergence of 142% for petrol and diesel combined. This brings the average tank-to-wheel emission factor for CO₂ to 176 g/km for petrol cars and 159 g/km for diesel cars.

1.2.1.B. INSIGHTS ON CONVENTIONAL TECHNOLOGIES APPLIED IN LIGHT-COMMERCIAL VEHICLES (LCV) AND HEAVY-DUTY VEHICLES (HDV)

Anno 2020, the majority of European LCVs relies on a diesel engine. The latest registration data by the ICCT shows that 94% of the EU LCVs was diesel-fuelled in 2018, whereas a few percentage represent alternatives (petrol 4%, natural gas 1%, battery electric 1%). For Belgium, we see a slightly reducing trend when it comes to diesel registrations, as in 2018 90% was diesel-based, falling back from 98% in 2012 (ICCT, 2019). For HDV, both in the EU as in Europe, the share of non-diesel vehicles is negligible.

1.3. Alternative fuels

1.3.1. BIOFUELS

Biofuels are not new. In fact, ICEVs originally ran on alternative fuels, as before mastering crude oil distillation and fracturing processes, engineers relied on biofuels to combust in their prototype engines. Back then, alcohols, fats and vegetable oils were the commonly available products to burn for light and heat. Although experiments with coal- and crude oil derivatives such as kerosene (paraffin) had started since the mid-19th century, the first engines automotive engineers produced ran on peanut oil (diesel engines) or alcohols (petrol engines). With the discovery of fossil oil reserves and techniques to produce petrol on an industrial scale – and thus: cheaply, interest in the less efficient combustion of biofuels in engines diminished in regions like Europe. In other parts of the world, they did not entirely leave the scene, though. In Brazil, for instance, bioethanol remained a worthy competitor for petrol fuel, as the latter was subject to heavy import taxes. During wartime shortages, biofuel revived in the EU as well (as did EVs), although cheap oil from the Middle East shortly after the Second World War triggered a fast-growing global oil consumption that would abruptly be called a halt by the OPEC, during the 1973 oil embargo, after which growth continued to date.

Due to their compatibility with conventional fuels, biofuels are nowadays seen in Europe as an attractive asset to tackle climate change. Using its renewable energy policy, the European Commission targets the transport sector via two Directives. One is the revised Renewable Energy Directive (RED II) (2018/2001/EU), which continues on a minimum target of 10% of renewable fuels by 2020 for each Member State. As such, RED II imposes a 14% minimum of renewables blended in the fuels for road and rail transport by 2030. Within this 14% target, there is a dedicated target for so-called ‘advanced’ biofuels., consisting of both liquids and biogases. This target increases from at least 0,2% in 2022 to 1% in 2025 and 3,5% in 2030. Next, RED II imposes a 32% renewables target for each Member State’s energy production by the same year, coming from a 20% target by 2020.

The other is the Fuel Quality Directive (2009/30/EC), requiring a 6% reduction in carbon intensity by fuel suppliers by 2020. Using these Directives, Member States have been free to choose between a variety of fuels and energy sources, ranging from crop-based and advanced biofuels to renewable electricity, biomethane, hydrogen and so-called ‘power-to-liquids’ (PtL). As such, 9,4% out of 10% is planned to be filled in by biofuels, given that they require the least modifications to the current transport system. Typically, Member States adopt the allowance for a 10% bio-derived oxygenates blend-in for petrol (often ethanol) and a 7% blend-in for diesel fuel (often biodiesel). A progress check for the latest data on Europe’s transport sector indicates a 7,6% share of renewables in 2017 and thus a somewhat slow progress towards the 2020 target (“Energy for transport: 7.6% from renewable sources - Product - Eurostat,” 2019). To date, there is no update of the Fuel Quality Directive that stipulates a path towards 2030 and beyond.

Biofuels have the advantage that they can potentially become climate-neutral if all CO₂ generated during the pathway from feedstock production to its combustion is recovered during the growth of the biomass. Therefore, they were considered as a quick win option for the Member States, rather than to invest in

R&D for alternative powertrains as we can seamlessly implement them in the existing petrol and diesel engines. We distinguish four generations of biofuels. First-generation biofuels are derived from crops like maize, rapeseed, soy or palms, while the second-generation targets non-food biomass like waste streams from agriculture, forestry and human activity, as combustible derivatives can be made from, e.g. used oils and fats. The third- and fourth generations are based on algae production and the production of synthetic fuels by using renewable electricity to create hydrogen through electrolysis and match this hydrogen with ambient carbon (Power-to-X). Algae need little more than UV light, water and CO₂ to thrive and to become a feedstock for algal oil, which can be burned as a biofuel. Despite their immense potential following the high photosynthetically efficiencies that are reached with algae, the International Energy Agency (IEA) estimates its cultivation cost to be a factor of 10 – 20 too high for commodity fuel production (Laurens et al., 2017). Therefore, its upscaling momentum currently depends on the prices for conventional fuels such as petrol, diesel and natural gas, while an increased carbon price is an important lever as well (Gegg & Wells, 2017). Power-to-liquid fuels will be discussed more in detail in the following section. Second-, third- and fourth-generation biofuels are commonly referred to as ‘advanced’, whereas first generation biofuels compete with the food and feed industry and are therefore not sustainable.

Concerning biofuels, biodiesel represented 78% of the 2016 biofuels share for Europe, while it is forecast to cover roughly 59% of the total European diesel market by 2020 (Dings, 2016). This trend is controversial as its share is represented by first generation biodiesel, which is found to *increase* Europe’s GHG emissions rather than to cause a reduction. These extra emissions are estimated to about 4%, equivalent to adding 12 million cars on Europe’s road in 2020. At the base of this statement are the increased GHG emissions linked to the indirect land-use change (ILUC) first generation biofuels induce, as croplands replace carbon sinks like forests and peatlands. By ignoring ILUC, the life-cycle emissions linked to biofuel feedstocks give a skewed representation as the Member States can then count them as ‘zero-emission’ and thus as a GHG reduction in the Emissions Trading System (ETS), the Effort Sharing Decision (ESD) and towards targets for the Paris Agreement. Due to ILUC, crop-based biodiesel causes on average 80% higher GHG emissions compared to fossil oil-based diesel, while soy- and palm oil biodiesel are found to be twice and thrice as GHG intensive as fossil diesel, respectively (Valin et al., 2015). In fact, the extra GHG emissions caused by the ILUC for soy and palm oil alone exceed the entire well-to-wheel impact of fossil fuel. Although bioethanol has a much smaller impact on climate change, crop-based biofuels generally have 50% higher Well-To-Wheel emissions compared to fossil fuels. Following the current trend, over 75% of biofuels are forecast to exceed the GHG emission from the conventional production of petrol and diesel in 2020 (Dings, 2016). Following a clause in RED I to investigate the potential impact of ILUC and to adjust the regulation if needed, the European Commission recognised this problem in 2012, by proposing a cap on crop-based biofuels of 5%. An agreement was reached only three years later to raise this cap to 7% for transportation fuels, while advanced biofuels were to be incentivised through national targets. An indicative level of 0,5% was proposed. Furthermore, the Commission backed the claims of various NGOs to phase-out both political and financial support for crop-based biofuels from 2020 onwards (European Commission,

2016). As such, the EU now defines crop-based biofuels as unsustainable and plans a phase-out by 2030, following an allowed annual equivalent of the 2019 consumption until 2023.

The reported trend seen over the last decade results from a European emphasis on quantity over quality, for which no differentiation was made between the various kinds of renewable energy sources in RED I. The rapid uptake of biodiesel from crops made European diesel drivers the world's number one when it comes to palm oil consumption, depleting more than half the amount of palm oil entering Europe in 2018. Measures to increase renewables in Europe's transport sector have merely shifted problems towards biofuel feedstock producing countries, for which a 7% cap translates to a conversion of land the size of Ireland (Valin et al., 2015). In an answer to reverse these adverse impacts, a recast Renewable Energy Directive (RED II) was proposed in 2016 to regulate the 2021-2030 period. With RED II, the 7% cap on first-generation biofuels in 2021 would first be reduced to 3,8% by 2030. Furthermore, fuel suppliers would be imposed to a minimum combined 'blending target' of 6,8% for biofuels, renewable energy and other advanced fuels, with a minimum 3,6% share of advanced biofuels. This proposal was perceived as a shortcoming, as a *ban* on first-generation biofuels was expected from 2020 onwards, following the Commission's earlier mentioned statement. In a first revision of the RED II proposal in October 2017, crop-based biodiesel was foreseen to be phased-out by 2030, with the exception of bioethanol and crops grown on marginal land. To diminish the import of palm oil, it was to be entirely removed from biodiesel as soon as by 2021. Also, the original blending target of 6,8% would be raised to 9% by 2030. An agreement on RED II was finally reached in June 2018. The most important outcome is an increased binding uptake of renewable energy across the EU for from 27% to 32% by 2030, with an upward review clause by 2023. For transport, a 2030 target of 14% non-crop renewables is set, rather than the earlier stated 9%. Of this 14% target, at least 3,5% should consist of advanced biofuels, to be further added with renewable electricity and other renewable fuels to a minimum share of 7%. The remaining 7% aims for crop-based fuels, for which a phased-out should be realised by 2030. Within the crop-fuels group, no exception is made for palm oil, hence abandoning the earlier mentioned phase-out by 2021.

Thus, competition between food production and land-use will be called to a halt over the next decade. Putting all the eggs in the basket for second-generation biofuels, however, is no sustainable solution either, as only a limited amount of waste streams is available. By targeting waste streams, a further competition between different stakeholders will take place. An example of the latter is the competition for forestry waste streams between wood pellet producers, paper producers and the board manufacturing industry, which eventually results in insufficient waste flows and the addressing of 'fresh' woods. Taking all possible waste streams into account, second-generation biofuels are estimated to cover only 2,3% of the renewables by 2030, instead of the projected 3,6% (Sihvonen, 2017)(Varone & Ferrari, 2015). Therefore, it is up to biofuel based on algae or power-to-liquid fuels to breakthrough, although commercialisation is not yet economically feasible. This leads us to renewable electricity to be applied in electric vehicles. The RED II's blending mandate aims to enhance the uptake of renewable electricity in transport, although it weakens its absolute implementation by assigning a multiplier of 4 in the calculation towards the minimum 3,5% blend for both renewable electricity as advanced biofuels. To avoid double-counting of these latter two fuels, they are only accounted for at the level of electricity

consumption. This approach, however, discriminates electric vehicles by ignoring the efficiency losses of converting renewable energy to hydrogen and synthetic fuels, characterised by well-to-tank losses of 48% and 56%, respectively. Also, it ignores the superior efficiency of the EV's tank-to-wheel process (about 73%) to that of FCEVs (22%-48%) and vehicles powered by synthetic fuels (13%-20%). Given that EVs are estimated to have a well-to-wheel impact which is 2,5 to 3 times smaller, as the available renewable electricity is directly charged, this factor should also be accounted for in RED II.

1.3.1.A. INSIGHTS ON BIOFUELS APPLIED IN CONVENTIONAL ENGINE TECHNOLOGIES IN LIGHT-COMMERCIAL VEHICLES (LCV) AND HEAVY-DUTY VEHICLES (HDV)

Biofuels blend-ins up to 10 vol.% for petrol fuel (with ethanol) and up to 7% for diesel fuel (with biodiesel of various origins) will have their (modest) environmental impact on every vehicle segment that makes use of the fuel. Due to the limited availability of advanced biofuels, it makes sense to prioritise their implementation for those road transport segments that currently have the most difficulties to electrify. This leaves out both passenger cars, vans (LCVs) and short-distance trucks (HDV).

1.3.2. POWER-TO-X

In countries where high shares of electricity originate from renewable sources such as wind turbines and solar power plants, situations occur where the intermittent nature of these sources creates an excess of electricity. This is often the case when baseload power is provided by inflexible sources like nuclear power plants. If this excess cannot be exported to neighbouring countries, this power will be curtailed by temporarily shutting down those renewable sources. One solution for storing this energy is to electrolyse water with it, generating hydrogen gas (H₂) and oxygen gas (O₂). Whereas hydrogen is an interesting energy vector due to its clean combustion, it remains a difficulty to store, transport and distribute it safely. Therefore, power-to-x, with the 'x' representing either gas or liquid fuels, offers an interesting solution for applying the sustainably generated hydrogen to create synthetic fuels. Given a steady CO₂ supply, liquid hydrocarbons can be synthesized when the carbon molecules are combined with hydrogen. Contrary to applying hydrogen directly in our transportation system, a drop-in or a complete substitution of fossil fuels by synthetic ones requires little or no changes to the existing ICE fleet or its refuelling infrastructure. An additional advantage of power-to-liquids (PtL) is that in an advanced stage of development, it can use CO₂ captured from the industrial waste gases and in a further extent even from the atmosphere.

PtL fuels can be made following two main pathways, i.e. the Fischer-Tropsch and the methanol pathway. The former process is commonly applied to generate synthetic fuels from biomass or organic waste streams but can use hydrogen as a feedstock as well. Thus, Fischer-Tropsch synthesis requires carbon monoxide – obtained from processing CO₂ or by a high-temperature electrolysis of steam and CO₂ – and hydrogen to synthesize crude hydrocarbons. These can be further upgraded through well understood refinery steps to obtain commercial-grade synthetic fuels. Alternatively, methanol could be formed as an intermediate product from hydrogen and CO₂, through an established process that has been applied in industry for decades. In a next step, methanol could then be converted and upgraded

to synthetic fuels. Such fuel could either be methanol itself, dimethyl ether (DME), petrol, diesel, kerosene and others (Varone & Ferrari, 2015)(P. Schmidt & Weindorf, 2016). Power-to-liquid fuels have the potential to become a more sustainable feedstock for internal combustion engines than fossil fuels, if the required hydrogen is produced in a renewable way, whereas this is not yet economically feasible to date (O. Schmidt et al., 2017). Instead, industries rely on an energy-intensive steam methane reforming of natural gas. Also, one must not forget that the amounts of excessive renewable power generated are limited, irregular and strongly depend on the geographical location of the renewables. Moreover, these excesses are due to be eliminated through, for instance, smart charging for electric vehicles or power-to-heat transformations, aiming for an increased flexibility on the demand-side. Therefore, making PtL plants dependent on (excesses of) renewable energy would not be economically feasible. The other way around, it is more realistic that once scaled-up to industrial size, PtL plants will require vast amount of (renewable) energy as input, which is likely to extend the use of fossil electricity in other industrial sectors, rather than spurring the uptake of renewables (Serdoner & Whiriskey, 2017).

In the light of decarbonising transport, power-to-liquid fuels cannot be considered sustainable solutions as they at best keep the emitted amount of CO₂ at a status quo. Since synthetic fuels can be easily applied in conventional engines, the latter's poor thermal efficiency would result in the same CO₂ emission as it would be the case for conventional fuels. If we include the energy needed to capture carbon from the atmosphere (or in the best case from industrial waste gases), the well-to-wheel assessment for PtL fuels gets closer to what is known for fossil fuels. An important risk mentioned by Serdoner et al. in (Serdoner & Whiriskey, 2017) is that industrial emissions could find a way out of the Emissions Trading System (ETS) by transferring CO₂ into synthetic fuels and so via the transport sector outside the ETS framework. Thus, CO₂ produced by one sector regulated through ETS would be emitted in a sector outside of it. Given that energetically it makes more sense to charge electric vehicles directly with renewable electricity rather than to apply it in an energy-intensive process to produce a combustible fuel, PtL fuels should be saved for those transport sectors where the current lack of efficiency improvements are overshadowed by substantial forecast growth in kilometres, like aviation and shipping. To a lesser extent, heavy-duty road transport could benefit from drop-in PtL to complete substitution of fossil diesel fuel, accompanied by improvements in aerodynamics and engine efficiencies. Nonetheless, advances in battery technologies may target heavy-duty road vehicles in the short- to middle term future, with the exception for long-range haulage. Thus, PtL should not distract policy makers and car manufacturers from transitioning to zero-emission technologies in those transport sectors where electrification is realistic today.

Although the production of electrofuels remains limited to date, policy measures in the form of subsidies can change this. In an extensive economic feasibility study on the topic by Christensen & Petrenko, several policy scenarios have been addressed (Christensen & Petrenko, 2017). Results indicate first and for all that CO₂-based fuels are not feasible without high policy (and financial) support. Next, there is the risk of double-counting, as several sectors would be eager to count the GHG benefits to their specific reduction targets. In the case of carbon capture from industrial waste streams to generate automotive fuels, both the industry sector and the transport sector would want to account the GHG benefit, and would thus lead to double counting. In this way, the overall GHG emission reductions will

be lower than initially projected. Therefore, in case the industry sector claims GHG reductions, the produced electrofuels cannot be regarded as low-carbon fuels in the transport sector, and vice versa. Even though upscaling production of PtL fuels would make the end-product more competitive with existing fuels, public subsidies should rather go to those technologies that effectively show the desired decarbonisation on the long-term.

1.3.2.A. TANK-TO-WHEEL EMISSIONS BIOFUEL/SYNTHETIC FUEL VEHICLES

Given that bio- or synthetic fuels are applied in conventional internal combustion engines, no difference with conventional cars is assumed when it comes to real-world CO₂ emissions.

1.3.2.B. INSIGHTS ON BIOFUELS APPLIED IN CONVENTIONAL ENGINE TECHNOLOGIES IN LIGHT-COMMERCIAL VEHICLES (LCV) AND HEAVY-DUTY VEHICLES (HDV)

For synthetic fuels the same reasoning is valid as what has been stated for biofuels. Thus, a prioritisation of their implementation should take place for those road transport segments that currently have the most difficulties to electrify. This leaves out both passenger cars, vans (LCVs) and short-distance trucks (HDV). Next to the long haulage industry, aviation and shipping might prove to be the largest market of synthetic fuels as their manoeuvring space to decarbonise in the light of the Paris Agreement is significantly smaller than that of the road transport sub-sectors.

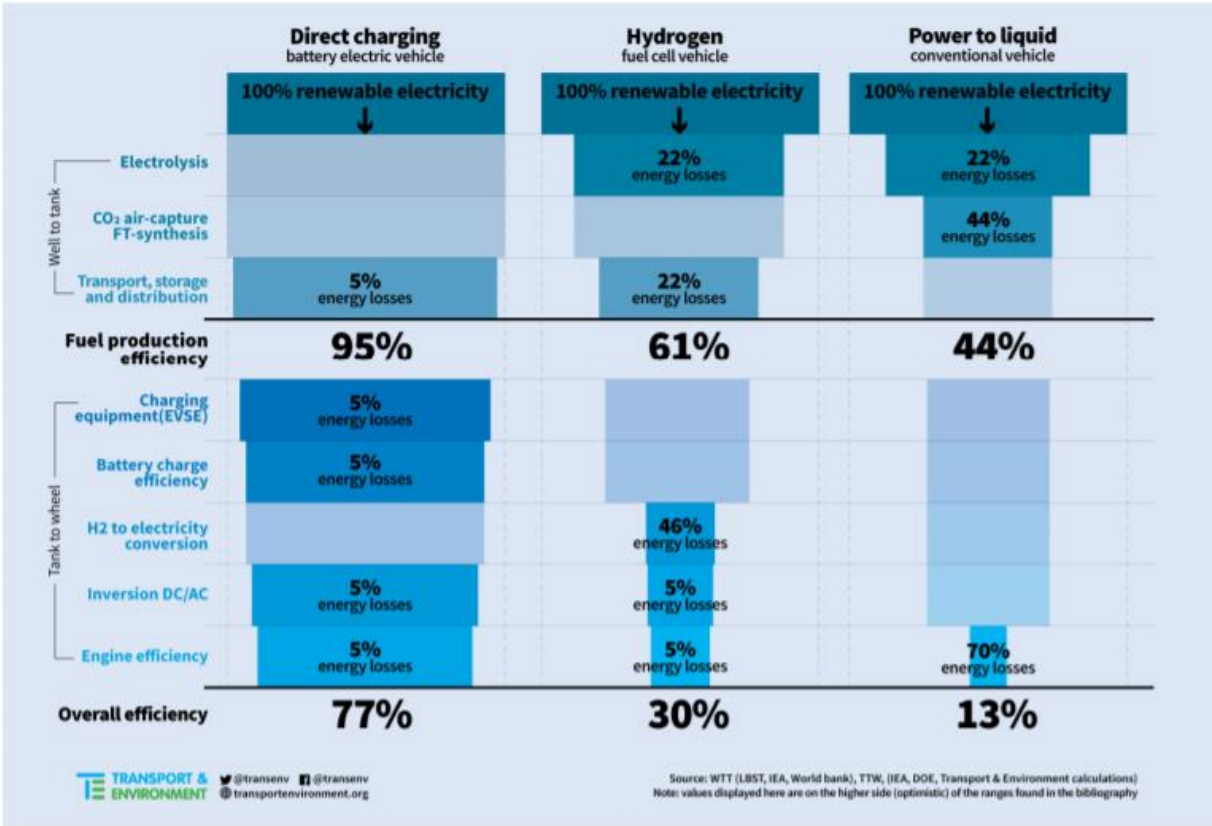


Figure 2: Well-to-wheel efficiencies for battery electric, fuel cell electric and synthetically fuelled vehicles (Earl, 2018)

1.3.3. NATURAL GAS AND LPG

Another alternative for oil-based fuels is to run the ICE on methane (CH₄), stored either as compressed natural gas (CNG) or as liquefied natural gas (LNG). The required methane could either be reclaimed from fossil reserves or from fermentation of food crops/waste products to biomethane. Natural gas powertrains for passenger cars are either dedicated to CNG only or *bi-fuel*, meaning they can run on petrol as well, given that CNG requires a spark ignition. CNG is stored in onboard tanks at high pressures up to 200 bars. Regarding fuel efficiency, natural gas vehicles (NGV) are found to emit 15 - 18% less CO₂ on a well-to-wheel basis, compared to petrol cars. Compared to diesel cars, they produce roughly 5 - 15% higher CO₂ emissions, indicating that concerning climate change it does not make sense to replace diesel with CNG (Kollamthodi et al., 2016).

Liquefied natural gas is typically used in heavy-duty applications such as long-haulage trucks and shipping. LNG has three times the energy content of CNG but requires an intensive liquefaction process and an energy-intensive storage system to keep the LNG from evaporating. Therefore, the liquid must be kept at a temperature below -160 °C. For heavy duty road transport, dual-fuel powertrains have been developed, allowing the engine to run on both LNG as diesel fuel. Concerning the impact on climate change, LNG is found to emit more CO₂ than conventional diesel trucks when seen on the well-to-wheel basis. In general, little or no net environmental benefit is achieved by switching over to fossil-based natural gas, as there are mostly no reductions in WTW greenhouse gas emissions and only limited reductions in pollutant emissions. The benefit CNG has over petrol can nonetheless be entirely offset by both methane leaks during both the well-to-tank as slips during the tank-to-wheel phase. Given the global warming potential of methane (GWP=28), such leaks could be detrimental for natural gas technology to outperform conventional powertrains. In case of biomethane, significant GHG reductions are possible, although only limited waste-streams are available to sustainably generate biomethane. This is discussed in section 3 of this report.

One significant issue with methane that recently gained the attention is its leakage in the process upstream of the gas' consumption, be it in a vehicle or in a domestic heating system. In a 2018 study published by Alvarez et al. in Science, an assessment of the CH₄ emissions in the US oil and gas supply chain shows that the real leakage rates are roughly 60% higher than reported by the US EPA (Alvarez et al., 2018). With methane being a strong climate forcing gas, characterised by a 'global warming potential' that is 28 times stronger than CO₂ (up to 80 times stronger in the first 20 years after its released in the atmosphere), this issue has far-reaching consequences for methane-based technologies when their well-to-tank emissions are concerned. As such, these extra emissions have comparable impact on climate change per unit of methane consumed as the CO₂ emissions released during the combustion of one such unit. A 2019 study by Riddick et al. in (Riddick et al., 2019) observed methane leakages on European oil and gas platforms located in the North Sea. Where typically the largest leakages occur during flaring and offshore loading of oil, characterised by an average leakage rate of 0,13%, this study resulted in an ambient leakage of 0,19% that was found in normal operation of the platforms, hence excluding the actions of flaring and off-shore oil loading. As such, the total methane emissions from offshore oil and gas production increase by approximately 50%, while the leakages in the North Sea

region are most likely lower than in other regions of the world. While these insights on US (shale) gas and North Sea methane leakages have important consequences for the natural gas that is used in Belgium, we still require similar insights from the other gas sources we rely on, e.g. from Russia, Algeria and Qatar. Overall, these findings indicate that replacing diesel or petrol vehicles with natural gas can actually be detrimental for climate if current leakage rates persist. Moreover, a limit to these leakages to less than 1,4% is required for natural gas vehicles to bring a climate benefit. These findings can prove to be a catalyst for swift revisions of national incentive programmes for natural gas vehicles, and to a further extent to domestic heating with natural gas.

Another gaseous fuel is liquefied petroleum gas (LPG), which is a by-product of the crude oil distillation process and natural gas extraction that can be applied in ICEs to power passenger cars. Where CNG is based on methane, LPG consists mainly of propane (C₃H₈) and butane (C₄H₁₀), which is kept liquefied under pressures of 4 bar. LPG application in Europe is centralised in Italy, Turkey and Poland, while the technology is less and less applied elsewhere. In these dedicated markets, several OEMs have marketed LPG bi-fuel vehicles, while the technology also exists as a retrofit option, where existing petrol cars are modified to run on LPG as well. The benefit of this technology is that the fuel has fewer carbon atoms relative to hydrogen atoms, resulting in lower CO₂ emissions despite a higher average fuel consumption than petrol cars. If well maintained, LPG cars emit similar levels of the regulated toxic pollutants like NO_x and PM compared to petrol cars. This nevertheless requires the most recent technology, which has a high upfront cost. The combined share of LPG, CNG and E85 (petrol fuel blended with 85% ethanol) represented only 1,2% of the total passenger car sales in Western Europe in 2016, although this share ignores retrofits (ACEA, 2017).

1.3.3.A. TANK-TO-WHEEL EMISSIONS NGVS

CNG cars were reported to emit 104 grams of CO₂ on average for the Belgian fleet in 2016. For determining how much they emit in real-world situations, CNG cars are assumed to be characterised by the same discrepancy factor of 142%, as for conventional petrol and diesel cars (Tietge et al., 2016). This brings the tank-to-wheel emission to 148 g/km.

1.3.3.B. INSIGHTS ON NATURAL GAS APPLIED IN CONVENTIONAL ENGINE TECHNOLOGIES IN LIGHT-COMMERCIAL VEHICLES (LCV) AND HEAVY-DUTY VEHICLES (HDV)

Dedicated natural gas vehicles exist on the passenger car market (mainly the VW group), while we see also a handful of natural gas LCVs. Manufacturers like FIAT are nonetheless cancelling further production of these LCVs (and passenger car models) for the Belgian market as they expect a brighter future for hybrids. In terms of sales share, natural gas LCVs represented 1% of the EU sales in 2018, a share that has remained more or less the same during the last decade. Concerning HDVs, several big manufacturers offer both compressed and liquefied natural gas (LNG) trucks. How long they will continue doing so, however, is uncertain. The biggest truck manufacturer, Daimler, recently decided to pull the plug from natural gas powertrains as they offer no answer for the ultimate decarbonisation by mid-century. Instead, it focuses on electrification and hydrogen technology.

1.4. Powertrain electrification

1.4.1. HYBRID ELECTRIC VEHICLES

The issue of an electric vehicle's (EV) limited range has haunted the technology from the very start. Therefore, Porsche introduced a petrol engine on an electric Lohner carriage, to deliver power to its wheel hub mounted electromotors. This vehicle was introduced in 1900 and went into history as the first hybrid electric vehicle (HEV). As such dual technology came at a significant cost, hybrids more or less disappeared since the First War, a situation that continued until the 1970s oil crisis. A breakthrough for HEVs, however, occurred two decades ago in Japan, as Toyota's Prius and Honda's Insight were introduced as flagship technologies to achieve CO₂ emission reductions in the framework of the Kyoto protocol. An overview of the different categorisations within the HEV market, according to the degree of electrification, is presented in Figure 3.

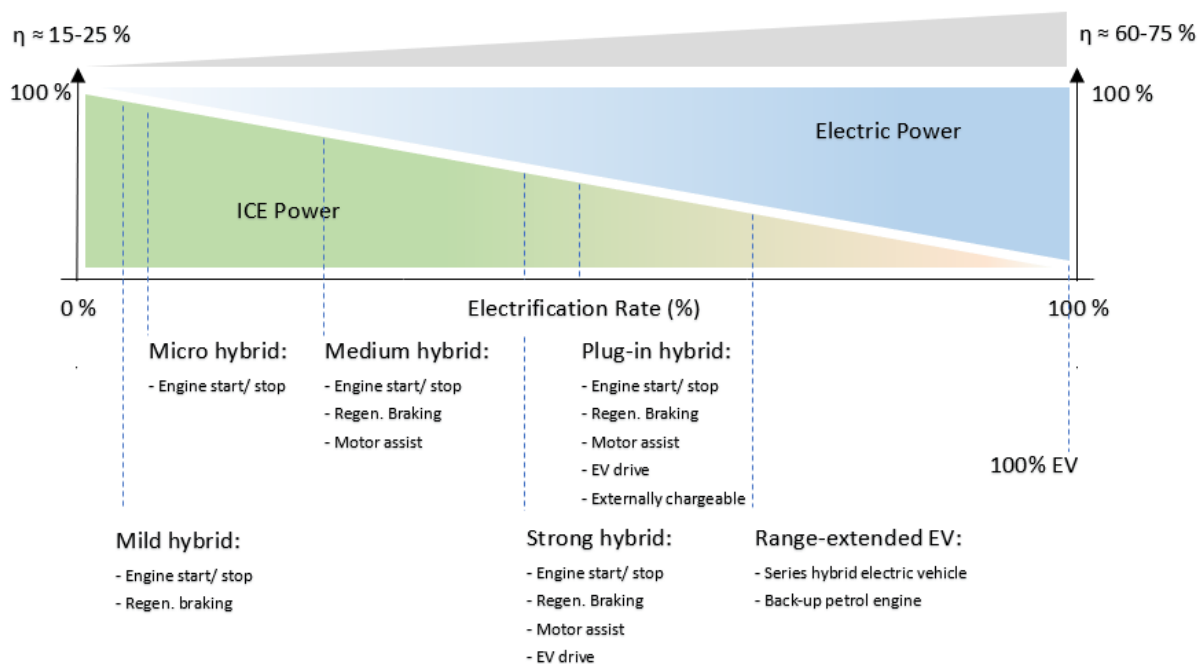


Figure 3: Overall powertrain efficiency as a function of the electrification rate for passenger cars (based on (Politechnika Wroclaw, 2011), (Wu, Zhang, & Dong, 2015))

In this graphical overview, the first Japanese hybrid models can be categorised somewhere between medium to strong hybrids. The latter typically have an all-electric range of just a few kilometres, while this range increases with the battery pack capacity. Many medium and strong hybrids sold in the EU predominantly originate from Japan and South Korea when petrol hybrids are concerned. In fact, both markets combined produce 21 out of the 22 models that were available in Europe in 2018. Given that interest in diesel technology never really took off in Japan, no diesel hybrids are produced there. South Korea, on the other hand, is the world's eighth biggest diesel market, although its automotive industry does not produce diesel hybrids either. In Europe, 6 such models are offered by 4 European OEMs in

2018 (“Ecoscore,” 2020). Anno 2018, micro and mild hybridisation became the reference for new vehicles, as any degree of electric assistance improves the overall powertrain efficiency and thus its fuel economy. What is indicated by Figure 3 is that the more electrification of the powertrain is pushed through, the higher the overall efficiency becomes. Different hybrid architectures have been introduced to serve this cause and will be discussed in the following subchapters.

1.4.2. SERIES HYBRIDS

A series hybrid architecture for passenger cars is shown in Figure 4. This layout is also applied in hybrid buses and trucks, as well as in specific non-road mobile machinery (NRMM). What characterises it is that power production primarily comes from the ICE, while the battery pack functions as a second power source. Power transmission is primarily electric, as an electric motor is coupled to the drive shaft, which can both function as a motor and a generator. The latter is of importance to generate part of the braking energy, which is otherwise lost as heat. The advantage of this layout is that series HEVs can run both in an all-electric mode, an all-ICE mode and in a hybrid mode. As there is no mechanical link between the driving wheels and the ICE, the latter can be operated in its favourable load region and thus at high efficiency. This allows an optimised fuel consumption as inefficiencies during partial loading of the engine are excluded. Series HEVs can be equipped with one or two electric motors; in the latter case each driven wheel can be powered separately (in case of a two-wheel driven car), thus mimicking the principle of a differential gear.

Controlling a series powertrain can be done relatively simply. A downside of this approach is the longer pathway between the engine and the power at the wheels, resulting in extra powertrain losses due to the various power conversions. This primarily impacts the efficiency at high speeds. Therefore, series hybrids perform best in urban driving situations. The electric part of the series powertrain is dimensioned to the maximum rated power the vehicle is to deliver, as it is the only device powering the wheels. Therefore, the powertrain is typically large, cumbersome and costly (Høyer, 2008; Wu et al., 2015). Fuel-cell electric vehicles (FCEV) apply the same principle of a series layout, with the difference that a fuel cell replaces the ICE. FCEVs will be discussed further on. Contemporary examples of a series hybrid are the Nissan Note e-Power (currently only for the Japanese market), the range-extended BMW i3 and the first-generation Opel Ampera/Chevrolet Volt.

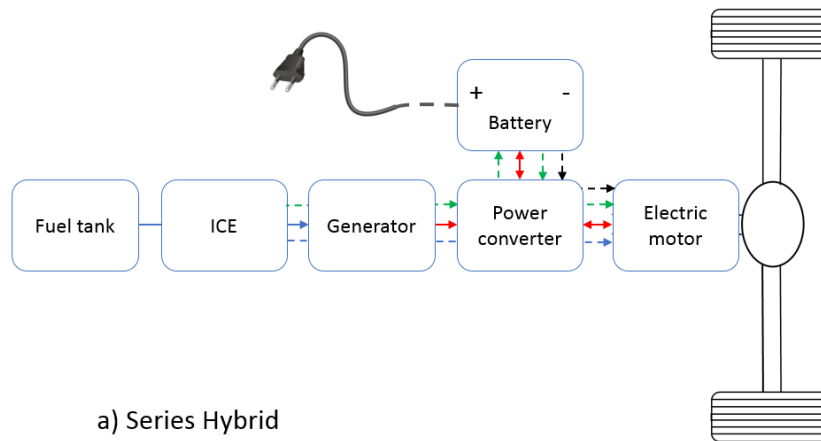


Figure 4: Schematic overview of a series (plug-in) hybrid architecture (based on (Malikopoulos, 2014),(Corbelli, 2011))

Figure 4 shows the different driving modes using the different colours. The all-electric mode is given by the dashed black lines; the ICE is in this case turned off and the required power is delivered by the battery. The all-ICE mode is shown with the dashed blue line; no power exchange takes place with the battery, the ICE is the only power source driving the electric motor. A hybrid mode combines both power sources, for which two modes exist; either there is the ICE powering the wheels indirectly while charging the battery, or both the ICE and the electric motor will provide in traction power and charge the battery. The red lines in the schematic represent electric connections, while the solid blue lines represent a mechanical connection. In between the battery pack and the generator and/or electric motor, a power converter functions to invert the battery's direct current (DC) to alternating current (AC) for the electric motor, and vice versa. Likewise, the generator's AC is inverted to the battery pack's DC.

1.4.3. PARALLEL HYBRIDS

In a parallel architecture, the transmission of power is primarily mechanical. Therefore, the wheels are driven by the ICE, as this is the case for a conventional car. The electric motor is connected mechanically to the transmission as well. This increases the complexity of the drivetrain but allows a higher efficiency during highway driving. Contrary to the series hybrid, the mechanical connection of the ICE to the driven axle hinders it from running in an optimal operating range. This would be possible if an additional clutch is placed between the ICE and the final transmission. Therefore, parallel hybrids can have different layouts, based on the location of the electromotor and/or the clutch(es) between the ICE, the transmission and the electromotor. Also, a two-axes approach can be applied, where one axle functions identically to a conventional car's driving axle, while the other axle is fitted with the electric motor. Such an architecture allows parallel hybrids to drive a limited number of kilometres purely electric, while others cannot. Typical for parallel hybrid layouts is that the battery pack cannot be charged when the vehicle is at a standstill, either due to the fixed connection of the electric motor with the transmission or in case of the two-axes approach. An example of an approach for which both the ICE and the electric motor are connected to the driven axle is shown schematically in Figure 5.

Parallel HEVs are usually categorised as mild hybrid powertrains (see Figure 3), for which the electric motor takes over the function of the conventional engine starter and alternator while providing power assistance to the ICE and taking care of energy recuperation in case of braking. Parallel HEVs often are a good solution for long-distance highway driving. Examples are the Honda Insight, Civic and Accord and the Volkswagen Jetta Hybrid. Examples from the plug-in segment are the Mercedes-Benz PHEVs

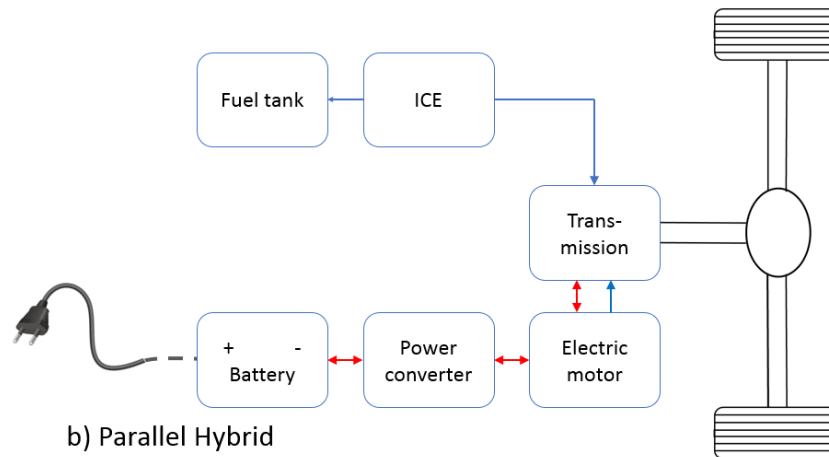


Figure 5 Schematic overview of a parallel (plug-in) hybrid architecture (based on (Malikopoulos, 2014),(Corbelli, 2011))

1.4.4. POWER-SPLIT HYBRIDS

A third HEV option combines an ICE, two electromotors and a power-split device (PSD). This complex architecture is managed by a planetary gearbox (PGB) and can compromise between the characteristics of series and parallel hybrids and thus combine their benefits. Different layouts for power-split hybrids are possible, of which the ‘input-split’ version is shown schematically in Figure 6. Here, both the ICE, the electric motor and the generator (in this case an electromotor as well) are connected to the PSD, which output shaft is connected to the transmission of the wheels. As both the ICE and the motor/generator provide the power input for the driven wheel axle, the former can work in a high efficiency operating range and can, therefore, be designed smaller. The electric motor, in turn, recovers energy during braking. The advantage of such a ‘power-split’ approach is that the ICE’s power can be decoupled from the driver’s demand; that the hybrid can run in an all-electric mode and that the combination of both the ICE and the motor/generator allows a more efficient process at higher speeds. Moreover, the planetary gearbox minimises the conversion losses which were described for the series hybrid. Examples of combined hybrids are the hybrid models from Toyota and Lexus.

c) Power-split Hybrid

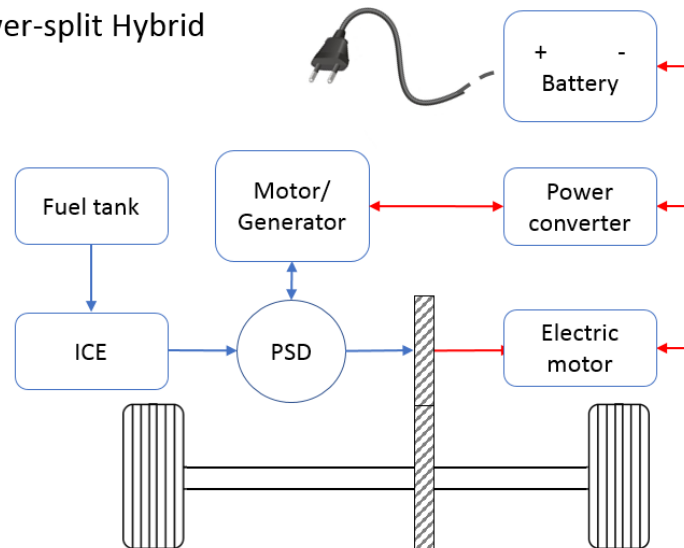


Figure 6: Schematic overview of a combined (plug-in) hybrid architecture (based on (Wu et al., 2015))

1.4.4.A. TANK-TO-WHEEL EMISSIONS HEVS

In 2016, the average sold HEV in Belgium emitted 95 g/km according to type-approval data (Hooftman, Messagie, Coosemans, & Van Mierlo, 2017). Real-world data from *Spritmonitor.de* indicated a discrepancy factor of 48%, revealing an average emission of 141 g/km (Tietge et al., 2016).

1.4.5. PLUG-IN HYBRIDS

Plug-in hybrid electric vehicles (PHEV) differ from the three architectures discussed before as they can be externally charged. Despite this asset, they can either have a series, a parallel, or a combined layout. PHEVs typically have all-electric ranges of about 50 km according to the NEDC type-approval procedure and were introduced on the European market since the range-extended BMW i3 was launched in 2013. Current PHEVs, tested according to the WLTP type-approval procedure, have average electric ranges that are similar to the older ones, with outliers from 35 km to 100 km. From a car maker's perspective, PHEVs are an interesting asset in the light of binding CO₂ targets and the super-credit factors that accompanied it in the European CO₂ calculation system per manufacturer. Thus, extra weight is given to vehicles with CO₂ emissions below 50 g/km in the calculation of a manufacturer's annual average fleet emissions. Although some petrol PHEV models effectively complemented small-size ICEs with an electrified powertrain, most models combine big engines with a modestly sized battery pack, as the lenient NEDC type-approval allowed it. This is also the case for the few PHEVs based on diesel. Altogether, 69 petrol and 8 diesel PHEV models were available on the Belgian market anno 2020 ("Ecoscore," 2020), while for the years to come, many manufacturers plan to market new models in an attempt to limit the financial sanctions that threaten them following the 95 g/km target laid down in Regulation (EU) nr.2009/443 and the further reductions by 2025 and 2030. PHEVs throughout the EU enjoy an increased popularity as more models are released. This popularity can be mainly explained by the consumer's benefit of artificially low CO₂ emissions and the resulting lower registration and annual car taxes. In this way, both consumers and manufacturers benefit from the dual technology.

1.4.5.A. TANK-TO-WHEEL EMISSIONS PHEVS

In the specific case for Belgium, the newly registered PHEVs in 2016 had an average type-approval CO₂ emission of 57 grams per kilometre, in contrast to the situation in the Netherlands where the average was 42 grams per kilometre. This difference is most likely due to the increased share of SUV PHEVs, which have become interesting regarding vehicle taxation in Belgium. Real-world driving data for the Dutch PHEV fleet counters these averages by a more realistic average of 123 grams per kilometre (N. Ligterink & Smokers, 2016).

1.4.5.B. INSIGHTS ON ELECTRIFICATION IN LIGHT-COMMERCIAL VEHICLES (LCV) AND HEAVY-DUTY VEHICLES (HDV)

Until recently, no electrification of LCV models was reported in the EU sales. Since 2016, however, about 1% of the new LCVs is either hybrid or plug-in hybrid. Given that there are no physical differences in the motorisation of LCVs and passenger cars, we can expect that plug-in hybrid technology will see a significant boost on the short-term. Knowing that manufacturers need to comply by 2021 to set CO₂ limits per kilometre, averaged out over their sold fleet, significant effort will be put in getting as many PHEV LCVs on the market as possible throughout 2020. Following the next round of CO₂ reductions by 2025 and 2030, further electrification of the LCV market will occur.

For HDVs, hybrid technology is still on the brink of commercialisation, although we cannot estimate too what extent (strong, non-plug-in) hybridisation will occur. The reason hereto is that where possible, manufacturers will opt for full electrification.

1.5. Electric vehicles

1.5.1. BATTERY ELECTRIC VEHICLES (BEV)

As mentioned in the introduction of this chapter, EVs have been around since the very start of the automobile. Contrary to ICE-based powertrains, characterised by about 1,400 moving parts, EVs excel in simplicity, as they require roughly six times fewer parts to offer the same function. This results in drivetrain efficiencies that are unmatched by any other technology. EVs can either be powered by energy stored in battery cells or in a fuel cell. In the early days of the EV, lead-acid batteries were applied to store energy electrochemically, albeit at a low energy density. During the 1990s, various battery chemistries were applied, ranging from nickel metal hydrides (NiMH) and nickel cadmium (NiCd) to high-temperature sodium sulphur (NaS). The first commercial BEV application of lithium chemistries was introduced with Tesla's Roadster. Whereas BEVs are at the brink of a breakthrough, battery research is a hot topic as chemistries are sought for that are characterised by both a high energy density and power density, while limiting the use of unethical/unsustainable materials like artisanal mined cobalt. An overview of the most common chemistries is given in the Ragone chart in Figure 7.

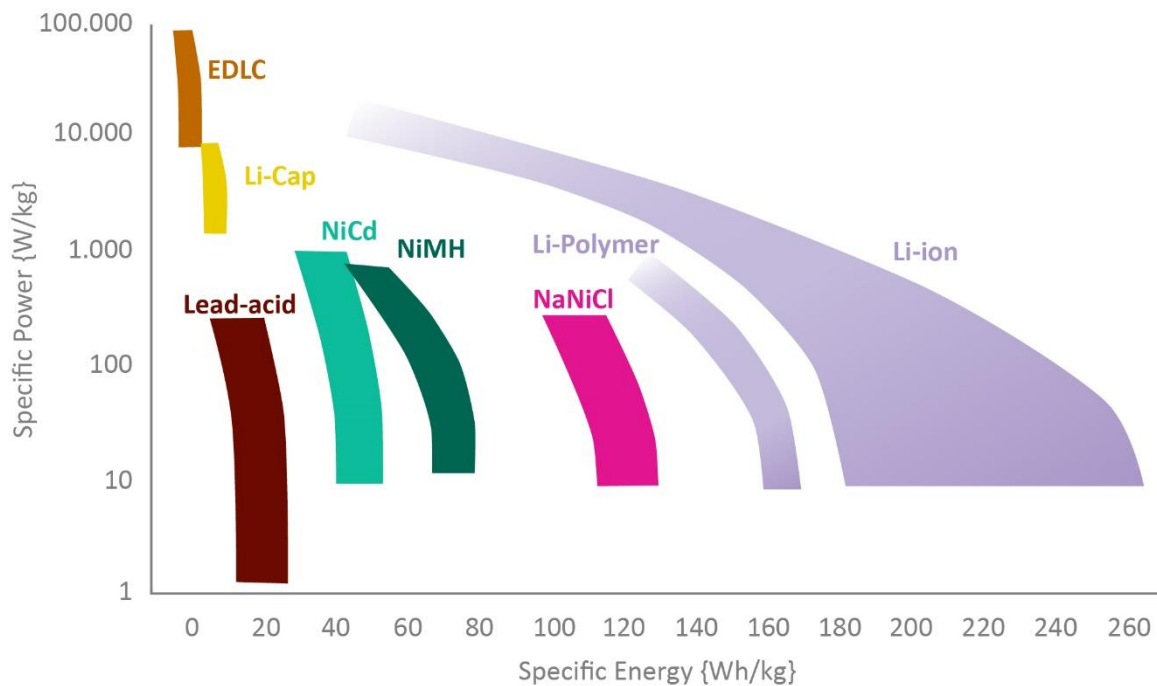


Figure 7: The Ragone chart (source: VUB-MOBI)

Regarding EVs, this chart reads as follows; the specific energy (x-axis) relates to the range potential, while the specific power (y-axis) relates to the acceleration potential; as well as the amount of energy that can be recovered by the battery. Several other parameters are crucial when comparing battery chemistries for application in EVs, such as cell voltage, internal resistance, cell behaviour at different temperatures, cell efficiency and the cycle life, just to name few. Lithium technology is widely applied for EV purposes today, given the wide range of energy and power densities, combined with favourable characteristics for the mentioned parameters.

Although vast amounts of research funding worldwide have been spent to improve the energy density of battery technologies, EV batteries remain a cost-intensive part of the EV nowadays, representing roughly one-third of the total vehicle price (Kochhan et al., 2014). Nonetheless, prices per kilowatt-hour (kWh) on a systems level (cell + pack) dropped from \$1000 in 2010 to roughly \$230 in 2017 and further to \$156 in 2019. Forecasts by Bloomberg's New Energy Finance indicate a further decrease to \$61/kWh by 2030 (McKerracher et al., 2020). This forecast considers a learning rate due to the economy of scales, as the more battery cells will be produced in the near-term future, the quicker prices are expected to decrease. Changes in the global battery manufacturing capacity are happening at a swift pace, and European brands are planning to take part of this opportunity, as factories are planned in Sweden, Hungary, Poland and Germany. Capacity is therefore expected to more than double from 116 gigawatt-hours in 2017 to 289 gigawatt-hours by 2021 (Hirtenstein, 2017; McKerracher, 2017). This will have significant consequences for the price parity between EVs and conventional cars. Expert forecasts considering when this milestone will be reached aim for the to 2022-2024 time frame (Witkamp, van Gijlswijk, Bolech, Coosemans, & Hooftman, 2017), or as soon as the cost on battery pack level becomes lower than \$125/kWh (Schmuck, Wagner, Hörpel, Placke, & Winter, 2018).

Battery performance is determined by the materials used for the anode (currently limiting charging), cathode (currently limiting power) and the electrolyte. Gopalakrishnan et al. provide a technical overview of current and future battery chemistries in (Gopalakrishnan et al., 2016). Lithium-ion batteries are typically categorised by their cathode chemistry. The most applied chemistries are (Baes, Carlot, Ito, Kolk, & Merhaba, 2018; Schmuck et al., 2018):

- LCO or lithium-cobalt oxide
 - o Used since the first commercialisation of Li-ion batteries
 - o Highest volumetric energy density vs low power density and cycling abilities
 - o Costly due to fully cobalt cathode
 - o Less safe
 - o Not applied in recent EVs

- LFP or lithium-iron phosphate
 - o Lesser energy density vs extremely high power and high cycle life
 - Heavier battery packs for a decent electric range
 - o Cheaper technology due to an iron phosphate cathode
 - o Near its maximum performance, hence on its return in the EV market
 - o Typically applied in buses

- NCA or lithium nickel cobalt aluminium oxide
 - o High energy density
 - o Applied by BMW, Tesla, Nissan and VW

- NCM or lithium nickel cobalt manganese oxide
 - o With an even ratio of the elements (called NCM 1-1-1) high power density is attainable
 - o Higher nickel (5-3-2 or 6-2-2) leads to higher energy density + reduces cobalt use
 - o Technology of choice for most manufacturers
 - o Applied by BMW and Renault

- LMO or lithium manganese oxide
 - o High power density vs low energy density
 - o Two to three times cheaper than LFP
 - o Low stability
 - o Applied in the first generation of Nissan Leafs







	Energy	Power	Safety	Life	Cost	
LCO lithium cobaltite LiCoO_2	+++	+++	+	++	+	
NCA lithium nickel aluminium cobalt oxide $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$	+++	++	-	++	-	
LMO lithium manganese oxide LiMn_2O_4	-	+++	++	-	++	
NMC nickel manganese cobalt $\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Co}_{1-x-y})\text{O}_2$	++	++	++	+++	+++	 
LFP lithium iron phosphate LiFePO_4	+	+++	+++	++	++	

Figure 8 – Overview of the most common battery chemistries today and their application, showing the best compromise offered by NMC technology (EMIRI, 2017)

On the anode side, carbon-based materials have remained in favour since Li-ion batteries were commercialised by Sony in the early 1990s. These are thought to remain widely applied until pure lithium and pure silica anodes become available on the mid-term. Lithium titanate oxide (LTO) is the most applied anode for now, given its ability to cope with extreme high charging currents (in fact allowing a battery cell to charge in a matter of minutes if all other materials would be able to handle such high currents). Although LTO has a low energy density, its high cycle life makes up for its high cost.

The electrolyte transports lithium ions from the anode to the cathode and is typically made of dissolved lithium salts. The electrodes in a battery cell are separated by a membrane that is crucial for the safety of it. Exemplary of what can go wrong if such membranes fail is the mass recall of the Samsung Note smartphone in 2016, which caught fire as a result of short-circuited electrodes.

Battery development for future EVs does not solely focus on lithium-ion technology, though, as it is thought to be close to reaching its limits (Coren, 2016). Manufacturers are therefore continuously investigating the next generation of batteries to allow higher specific energy and power densities, faster charging times and less risk of overheating (and thus fire). These might be solid state, lithium-sulphur, or lithium-air batteries. Several manufacturers are currently focussing on solid-state batteries. Other promising technologies that are currently being researched and developed include lithium sulfur, lithium manganese and metal air batteries, as well as redox flow and sodium-based batteries. While research particularly focuses on higher energy densities one is also looking for suitable successors of elements such as lithium and cobalt, for instance by substituting them with abundantly available elements like sulfur and magnesium. In addition, one tries to extend the cycle life of batteries, which now lie about 1,000 – 2,000 cycles or 250,000 – 500,000 km. Closest to commercialisation are probably solid-state batteries. Solid state batteries differ from the current lithium-ion batteries as the latter's liquid electrolyte is replaced with a solid one, making them less prone to overheating and decomposition, while increasing

the energy density significantly by allowing high voltage operation. The challenge for this novel battery chemistry, however, is its limited power density. Metal-air batteries, such as the lithium-air (Li-O₂ in Figure 9) are promising as well as they have a similar energy density as gasoline, and about 10 times the highest energy density that is reached today in prototype batteries. Lithium-air technology is in its infancy, though, and is not to be expected on the short term.

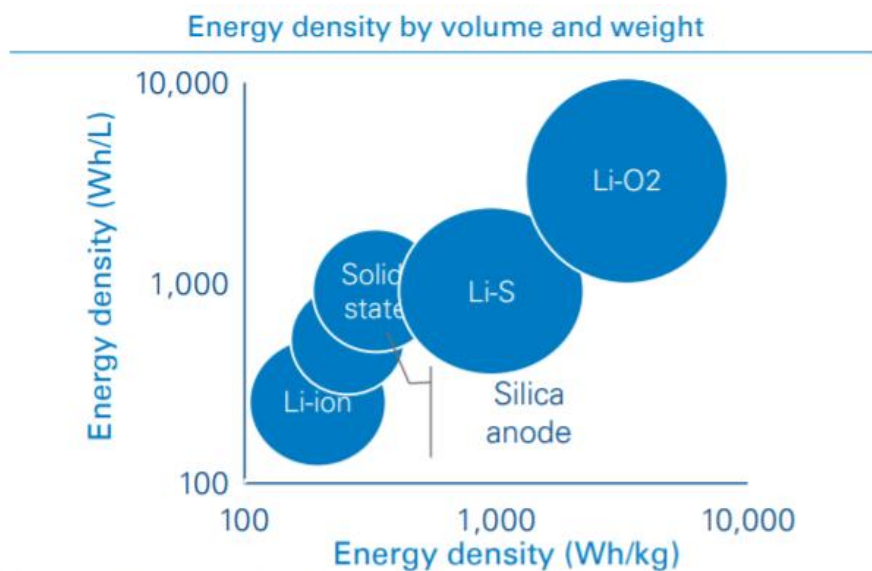


Figure 9 : An outlook for battery chemistries with higher energy and power densities (Baes et al., 2018)

1.5.1.A. TANK-TO-WHEEL EMISSIONS BEVS

BEVs produce no local emissions of CO₂, although emissions occur during the production of the electricity it relies on. These are covered in the well-to-tank emissions, for which the electricity consumption per kilometre is important. Depending on the size of BEV, the average electrical consumption ranges from 0,14 to 0,22 kWh/km.

1.5.2. FUEL CELL ELECTRIC VEHICLES (FCEV)

Another source for electric propulsion is the fuel cell, which performs a reversed electrolysis process by combining hydrogen gas (H₂) and oxygen (O₂) to generate electric power and water vapour as a by-product. Sir William Grove discovered this process in 1839, although it was not until 1889 that it was applied in a first, practical application using air and coal gas. Like the case for battery electric vehicles, fuel cell prototyping became obsolete in the early 1900s, as internal combustion engines broke through for a wide array of applications. It was not until Francis Bacon demonstrated a 5-kW fuel cell system in 1959, after decades of research, that the concept gained interest. Whereas NASA began to apply fuel cells for space missions from the late 1950s onwards, various car manufacturers soon began to experiment with it as well (SAE International, 2017). Testing limited numbers of FCEV prototypes started a decade ago with Honda's FCX Clarity for the U.S. market, while BMW applied a different approach by redesigning a petrol ICE to run on hydrogen gas with its 7-series Hydrogen model. Anno 2020, two fuel cell EVs are commercially available from Hyundai (ix35 FCEV) and Toyota (Mirai), indicating the technology readiness level. To induce other manufacturers to 'go FCEV', Toyota decided in 2015 to

share its 5.600 relevant patents (“Toyota opens up its patents to boost FCEV industry collaboration,” 2015). Despite the substantial cost to start developing fuel cell technology, most manufacturers are actively investigating the possibilities today, while waiting for the stars to align for scaling-up production. Given the virtually non-existing recharging infrastructure in Europe, its OEMs are seeing it instead as a long-term solution than a virtue for solving the issues related to road transport now and tomorrow. The most important virtue of FCEVs is that they cause no emissions during use, except for water vapour.

Despite significant research on the topic, the breakthrough for fuel cell/hydrogen propulsion for passenger cars remains hindered by the availability of the energy vector, characterised by the limited number of 124 hydrogen refuelling stations that are commercially available throughout the European Union anno 2020 (EAFO, 2020). Moreover, using hydrogen as an intermediary energy carrier for electric propulsion is not efficient, as it adds an extra industrial process in the well-to-tank phase and thus an additional inefficiency. Producing ‘grey’ hydrogen through reforming methane is an energy-intensive process, although economically it currently remains the best option. Therefore, H₂ production using electrolysis with excess renewable electricity from wind or solar power remains marginal to date. Without a substantial shift towards a renewable ‘green’ H₂ production, the well-to-wheel GHG balance for FCEVs remains a significant burden, especially compared to battery EVs.

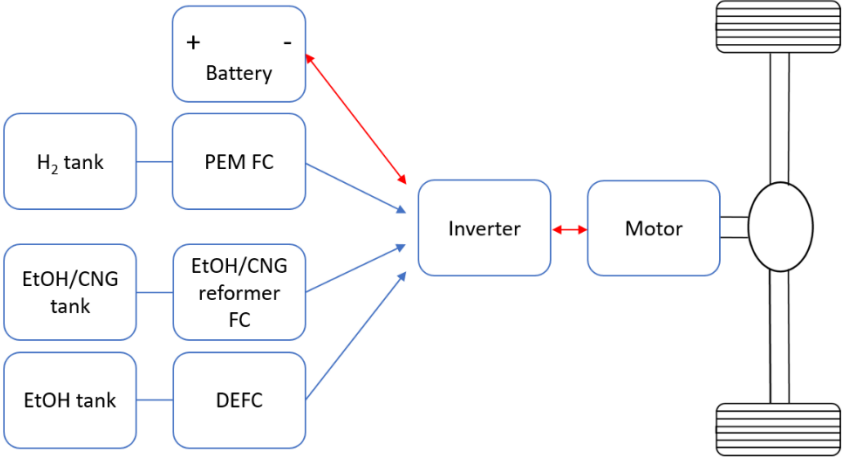


Figure 10: EV architectures according to the possible power sources shown on the left-hand side (based on (Ramachandran & Stimming, 2015))

An overview of possible EV architectures is given in Figure 10 and distinguishes battery storage from three prominent fuel cell systems. First, there is the H₂-polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cell, which is most commonly applied. Second, there is the layout with an onboard reformer of compressed natural gas (CNG) or bio-ethanol (EtOH), which are based on steam reforming. This principle mimics the industrial retraction of hydrogen gas from natural gas. Finally, a direct ethanol fuel cell (DEFC) is presented as an option, which directly converts EtOH into electricity without the need for a reformer. Similar to the DEFC, methanol can be used in fuel cells as well. In an extensive review of fuel cell systems, Ramachandran *et al.* conclude that tank-to-wheel efficiencies of BEVs are superior to FCEVs, given the efficiencies of the different subsystems, as described in Table 1 (Ramachandran & Stimming,

2015). These figures are not final, as they do not include the efficiencies upstream, i.e. from well-to-tank. Whether electricity is concerned or hydrogen, the way it is produced has an essential impact on the overall environmental potential of the powertrain technology. What can be concluded from Table 1 is nonetheless that fuel cell systems have overall efficiencies that cannot yet compete to those reached by BEV powertrains. Yet, they already prove to be significantly more efficient than powertrains based on internal combustion engines.

Table 1: Overview of tank-to-wheel efficiencies per EV powertrain type (based on (Ramachandran & Stimming, 2015))

	Li-ion battery ¹	PEM FC	CNG reformer	EtOH reformer	DEFC	Inverter	Motor + transmission	System efficiency
Component Efficiency	80%	55%	31%	41%	50%	97%	90%	/
BEV	X	-	-	-	-	X	X	70%
PEM FC	-	X	-	-	-	X	X	48%
EtOH reformer FC	-	-	-	X	-	X	X	35%
CNG reformer FC	-	-	X	-	-	X	X	27%
DEFC	-	-	-	-	X	X	X	44%

¹ including AC/DC + DC/DC conversion

1.5.2.A. TANK-TO-WHEEL EMISSIONS FCEVS

Like BEVs, FCEVs produce no local emissions of CO₂, although emissions occur during the production of the hydrogen gas it relies on. These are covered in the well-to-tank emissions, for which the hydrogen consumption per kilometre is important. The Toyota Mirai covers 106 km per kg of H₂ or consumes about 0,94 kg H₂/100 km.

1.5.2.B. INSIGHTS ON ELECTRIFICATION IN LIGHT-COMMERCIAL VEHICLES (LCV) AND HEAVY-DUTY VEHICLES (HDV)

Currently, we report a handful of fully electric LCVs on the market, although they offer very limited driving ranges and are, therefore, barely sold. Given the extra cost of current battery technology, we'll have to wait for further battery production optimisation and the economy of scales for long-range vans to become available and affordable. The same is true for the HDV market, where ranges of 150 km on average, combined with high purchase costs form the bottleneck for current electric trucks to be sold. Nonetheless, there is a definite future for both electric LCVs and short-distance trucks. By when we can expect a significant market uptake depends on the tipping point the battery cost (€/kWh) incurs. Assuming the same battery technology is used as in passenger car applications, this tipping point is expected to be reached by 2024.

2. STATE OF THE ART OF CHARGING INFRASTRUCTURE

2.1. Charging station types

Before entering in technical details of charging stations, it is important to distinguish four different categories of chargers.

- a) Residential charging stations: Allowing to recharge a (plug-in) electric vehicle at home. These chargers have a simple architecture since they do not require any identification/authorisation and no metering system to charge the car.
- b) Parking lot charging stations: There is the possibility to charge EVs at specific places (usually parking lots of shops or hotels) for a fee or sometimes free.
- c) Fast charging stations: Similar to a refuelling station for conventional cars, they are characterised by high-power charges for short durations, usually applied for long-range trips and, therefore, located near highways.
- d) Other kind of stations: Battery switching stations, pantograph chargers, inductive (wireless) charging, etc.

Each type of charging station will use different types of charging methods, depending on the purpose of the EV owner. Sometimes the same technology can be used in several types of stations.

2.2. Uni- and bi-directional power flows

Another way to differentiate chargers is to distinguish them according to the power flows. Two direction of power flow exist; unidirectional chargers and bidirectional chargers (Khaligh & Dantonio, 2019).

Unidirectional chargers represent the traditional method of charging where it is only possible to charge in the direction from the grid to the electric vehicle (G2V). Consequently, these chargers are less complex, while they are cheaper because they have limited hardware due to their straightforward architecture. Unidirectional chargers are currently the only ones that are available on the European market.

Bidirectional chargers are under research and development, predominantly in Japan. They have the same possibilities as unidirectional chargers but can also transfer active power from the vehicle to the grid (V2G). This new technology enlarges the possibilities of EV charging, such as using EVs as peak load shifting, as frequency control, as support (storage) to renewable energy sources, acting as a 'spinning reserve' for back-up power in case of an unplanned demand of power that isn't covered by the base load, etc. This is shown graphically in Figure 11. On the other hand, the complexity of the system increases, which has its impact on the product's the cost. Furthermore, bidirectional chargers must overcome battery degradation due to increased cycling, meaning that the battery will be charged and discharged more and will hence suffer more from deterioration on the long run, compared to when it's solely used for mobility purposes.

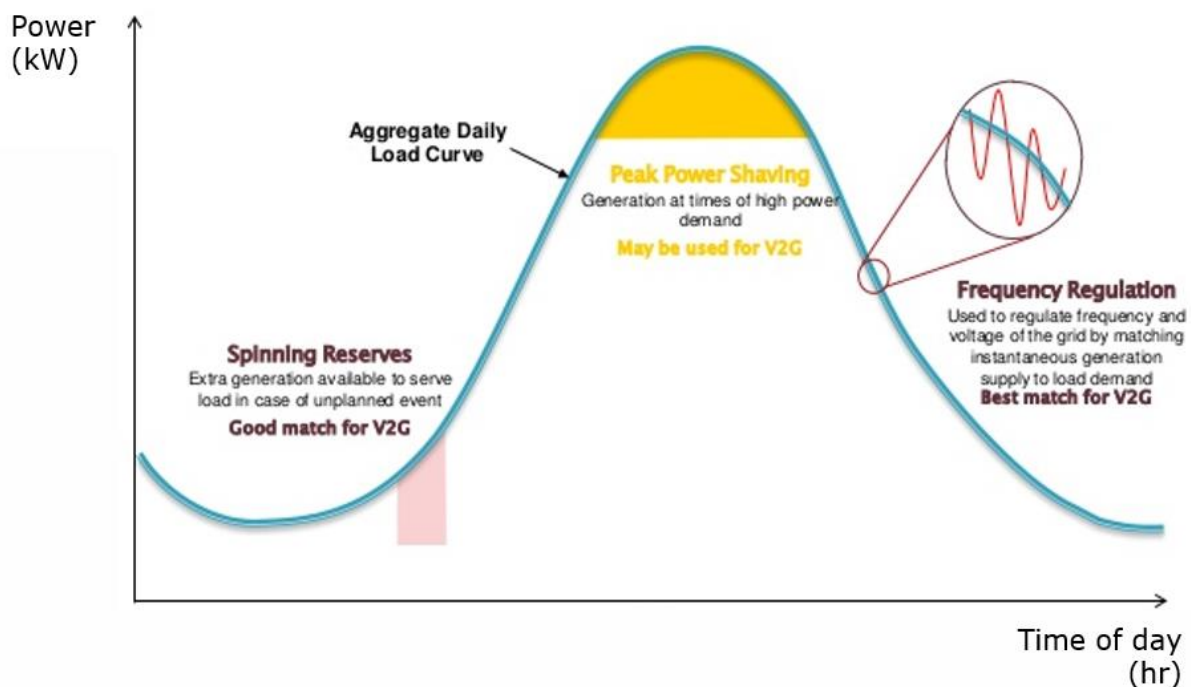


Figure 11 – Graphical overview of the power demand during a whole day, together with the potential for vehicle-to-grid (Gorguinpour, 2013)

2.3. (Un)coordinated charging

Another differentiation for charging refers to how it takes place. We distinguish uncoordinated charging and coordinated charging (Khaligh & Dantonio, 2019).

Anno 2020, charging of electric vehicles is conventionally done in a very basic way called **uncoordinated charging**. EV owners charge their car at any moment in a day without taking into account important aspects such as the load voltage or frequency of the electric grid. The owners simply plug their EV and the charging begins. While this is convenient for EV owners, this could have an adverse impact on the electricity grid if large masses of EVs would be charged in this way. The more there are EVs on the grid, the more uncoordinated charging will become an issue for overloading reasons. For Belgium, the electricity and natural gas regulator CREG estimated that one million EVs would cause a 4% additional load to the national grid, which is not seen as a hurdle. Moreover, the national grid would be able to handle two million EVs without major changes. Five million EVs, however, equalling nearly the entire Belgian fleet, would result in a 20% extra load if their charging wouldn't take place in an uncoordinated way.

This is the reason why research is done for **coordinated, 'smart' charging**. Utility providers are, in this case, able to decide when and how EVs are charged considering several aspects of the grid stability. It can also be desirable for EV owners if the charging is done in a smarter way by charging in off-peak hours for instance, or in other words, when the price of electricity is lower. In case of bi-directional

charging, the EV owner could even generate revenues from its connection to the grid, as the EV battery could *sell* electricity when prices are high.

2.4. Conductive chargers

Conductive chargers are chargers characterised by a physical electrical connection with the EV, usually with cables, plugs and sockets. These chargers are currently the common ones on the market and are detailed in this section. Alternative chargers will be discussed in section 2.7.

2.4.1. AC OR DC? THE WAR BETWEEN TWO DIFFERENT WAYS TO CHARGE

Batteries in EVs work in direct current (DC), whereas the grid works in alternative current (AC). This means that an AC/DC convert is necessary to charge the EV. The positioning of the converter will define if the charger is an AC charger or DC charger. AC chargers inject AC current in the EV so the converter is inside it, whereas DC chargers inject DC current in the EV thanks to a converter inside of the charger. Currently, most charging stations use AC chargers, although DC chargers become more and more relevant (Enyedi, 2018). The pros and cons are summarized in Table 2. (Murat Yilmaz and Philip T. Krein, 2013) (A Aswin and S Senthilmurugan2, 2018) (María Garcés Quílez, Mohamed Abdel-Monem, Mohamed El Baghdadi, Yang Yang, Joeri Van Mierlo and Omar Hegazy, 2018)

Table 2: Pros and cons of AC and DC chargers

	Advantages	Drawbacks
AC chargers	<ul style="list-style-type: none"> • Easy charging from AC outlets (120-230V) and thus better for house application • Chargers are cheaper; no need of AC/DC converters 	<ul style="list-style-type: none"> • EV needs an AC/DC converter • Power is limited because of the size, weight and cost of the power electronics inside the car • Consequence of the previous point is a longer charging time which can be an issue for some EV owners
DC chargers	<ul style="list-style-type: none"> • Better for high power charging because huge powers require big power electronics and coolant systems which are not feasible inside an EV. • No need of AC/DC convert in the EV 	<ul style="list-style-type: none"> • Expensive • More complex (sometimes cooling systems are added) • Always outside of the EV, thus land use, possibility of vandalism, etc

AC chargers are often called on-board chargers, and DC chargers are often called off-board chargers. However, in the literature, there is no clear definition and differentiation between on/off-board chargers and AC/DC chargers.

2.4.2. CHARGING MODES

The charging modes describe the safety communication and charging between EV and electric vehicle supply equipment (EVSE). There exist four different possibilities, hence four different modes, each detailed in Table 3 (DERİCİOĞLU et al., 2018). Those modes are defined in the standard series IEC 61851-1 (Schmutzler, Andersen, & Wietfeld, 2013).

Table 3: Four different charging modes with addition description and comments

Modes	Description	Comments
Mode 2 charging	Domestic socket and cable with a protection device	Most basic charging mode making use of a standard power outlet and a protection device placed between the car and the power source. The cable has an 'In-Cable Control Box' (ICCB) consisting of a circuit-breaker and a ground fault circuit interrupter to ensure safety. This the slowest way of charging given the low currents available in domestic situations (often limited to 10A). Mode 2 charging allows a charging speed of 2,3 kW per hour.
Mode 3 charging	Specific socket on a dedicated circuit	Mode 3 allows an increased charging power, ranging from 3,7 kW to 22 kW, depending on the available power network. It uses a charging station or wall box in which all kind of protection devices are installed. Moreover, there is a control pilot signal between the EV and the charging station. Mode 3 charging stations have conventionalised connection plug, i.e. the 'Mennekes Type 2'
Mode 4 charging	Direct current connection for fast charging	This is fastest mode for charging and is used in off-board chargers that can reach powers of 50 kW and higher. Depending on an EVs battery size, it can be recharged in relatively little time (starting from half an hour). Charging at the highest power rate requires a ChaDeMo or CCS2 connector (to be discussed further on)

The input from Table 3 is presented graphically in Figure 12 to further clarify the difference between the four different modes. Note that research is on-going to increase the charging power during mode 4 charging. As such, rates up to 350 kW are being tested for future generations of EVs. This is needed for those EVs with >80 kW batteries to limit the overall charging time. Note that not all battery chemistries can take such high powers, while these also adversely affect the battery's life-time, although researchers focus on battery chemistries that suffer less from this impact. Moreover, 350 kW charging results in a significant impact on the local electric grid, and one might question the sustainability of such high power

demands if they are addressed with fast-response power sources such as gas turbines (or worse: oil/coal-based electricity generation).

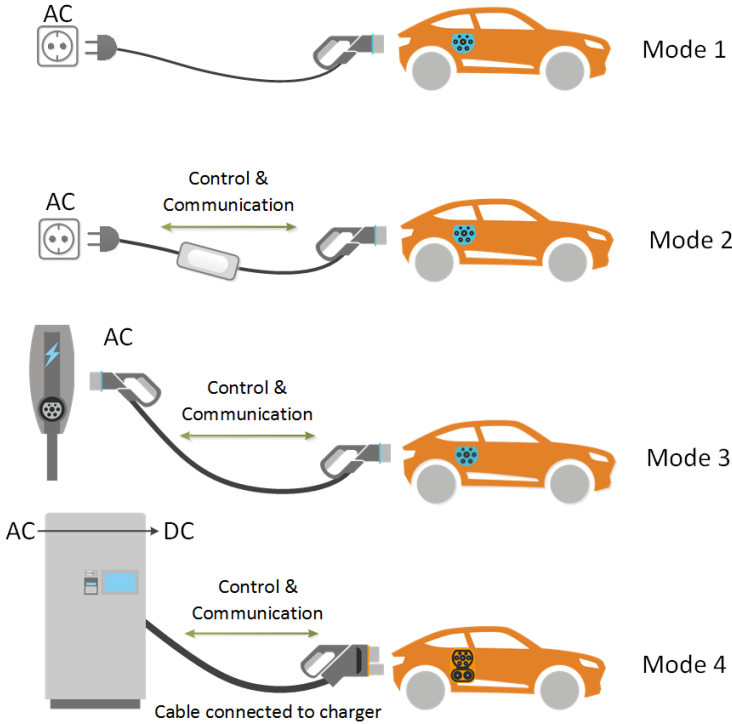


Figure 12: Schematic representation of four different charging modes (Delft, n.d.)

2.4.3. PLUG/SOCKET TYPES

One important aspect is the physical connection between the EV and the EVSE. For conductive chargers, several plugs/sockets exist on the market and are divided into standard types. Each type is detailed in Table 4 and summarized by the IEC 62196 standard. Type 1, 2, 3 are AC connectors described in IEC 62196-2, whereas the other types are DC connectors described in IEC 62196-3. Each charger is illustrated schematically in Figure 13 with the corresponding letter (Khaligh & Dantonio, 2019).

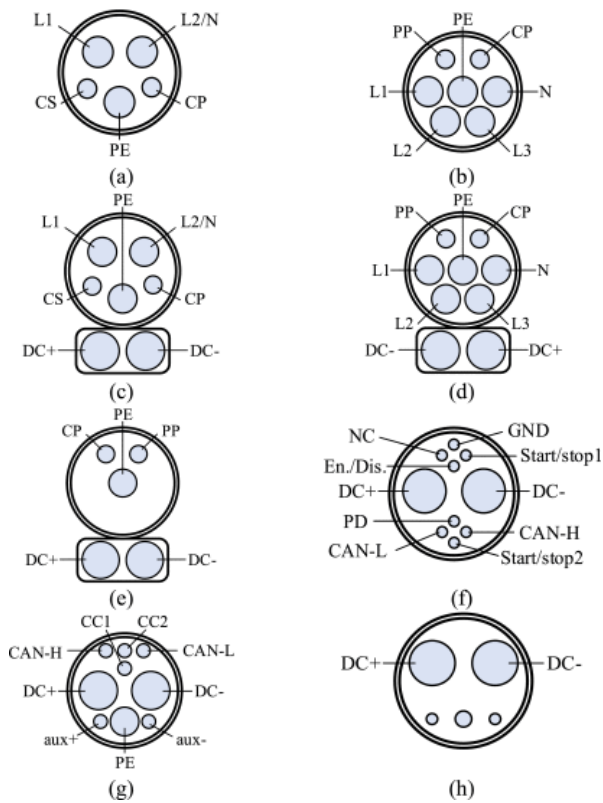


Figure 13: Standard male plugs (Khaligh & Dantonio, 2019)

Table 4: Four different types of connectors with additional information (DERİCİOĞLU et al., 2018)

Connector types	Name(s)	Country	Electrical configuration MAX voltage and current	Position in Figure 13
Type 1	Yazaki	US Japan	Single-phase at 250V and 32A	(a)
Type 2	Mennekes	Europe	Single-phase at 250V and 70A Three-phase at 480V and 63A	(b)
Type 3	Scame	France Italy	Single-phase at 250V and 16/32A Three-phase 480V and 63A	Not on figure
Type AA	CHAdeMO	Japan Europe	DC at 400A and 1kV	(f)
Type EE Type FF	CCS/Combo	US/Japan Europe DC	DC at 500A and 1kV	(d) (e) (c)
Type BB	GB/T 20234-3	China	DC at 250A and 1kV	(g)
Type 2 Combo2	Tesla	US	AC or DC, up to 250 kW	(h)

The nomenclature of Figure 13 identifies the connection ports. The basic port can be easily identified such as L1/L2/L3 for the three-phase AC lines, N the neutral, PE the protected earth, GND the ground and NC the not connected ports. The less understandable ports are summarized in Table 5 with the

complete name and a small description (Mouli, Kaptein, Bauer, & Zeman, 2016). Across the EU, the type 2 'Mennekes' connector is adopted as the standard.

Table 5: Specific connection ports nomenclature

Abbreviation	Complete name	Description
CS	Connection switches	
CP	Control pilot Post-insertion signalling	Communication line carrying the PWM signal.
PP	Proximity pilot Pre-insertion signalling	Communication pin that keep track of physical connection and communicates the maximum current
CAN	Controller area	
Aux	Auxiliary power supply	
PD	Proximity detection	Prevent car to move when connected to a charger

Combined charging system (CCS) technology uses two additional connectors in DC. For instance, the only difference between charger on Figure 13)a and Figure 13)c is the lower part. This technology is thus used to inject much more power. The extension of the type 1 connector is called 'Combo 1' and the extension of the type 2 connector is called 'Combo 2'.

The control pilot function is used to monitor and control the interaction between the EV and the electric vehicle supply equipment (EVSE). It includes continuous continuity checking of the protective conductor, verification that the EV is properly connected, (de-)energisation of the power supply to the EV and communication of the allowable current. This is the official definition of IEC 61851.

2.4.4. POWER LEVELS

Chargers can be classified from low to high powers according to the SAE J1772 standards. Four different power levels were introduced which are listed in Table 6 (DERİCİOĞLU et al., 2018; Tan, Ramachandaramurthy, & Yong, 2018; Yilmaz & Krein, 2013). Voltage and current levels depend on which country is considered. Consequently, only the power rating is given.

Table 6: Four different power levels with electrical specifications and characteristics

Power level	Other names	Power (kW)	Characteristics	Types from Table 4
Level 1	Slow level Opportunity Home charging	3.7	On-board charger	Type 1
Level 2	Medium level Primary Fast AC charging	3.7-22 kW	On-board charger Specific EVSE (wall box)	Type 1 Type 2 Tesla GB/T AC
Level 3 AC	Fast level	22-43.5 kW	On-board/off-board Often three-phase	Type 2 SAE J3068 GB/T AC
Level 4 DC	Superfast level Level 4	50 kW or more	Expensive off-board chargers	CCS Combo1 and 2 Tesla superchargers CHAdeMO GB/T DC

2.5. Different possible structural configuration

The authors in (Tan et al., 2018) suggest differentiating chargers according to whether they are isolated and if they are integrated. The two possible structures are explained hereunder.

2.5.1. INTEGRATED CHARGERS

The electricity grid works in AC, whereas batteries work in DC. Consequently, converters are necessary to charge the battery. Additionally, the propulsion system of the EV also has converters because the electric motors need AC current from the DC battery. The goal of integrated chargers is to avoid using “duplicated” converters by using power electronics of the propulsion system for the charging of the EV. A schematic overview of a propulsion system with an integrated charger is shown in Figure 14.

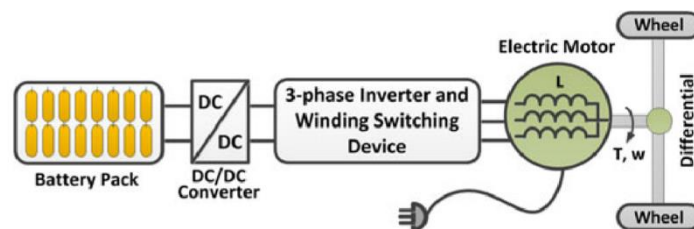


Figure 14: Schematic overview of an integrated charger (Yilmaz & Krein, 2013)

In an integrated charger, electric motor windings are used as filter inductors and/or as an isolated transformer. Then the inverter for the motor is used as a rectifier to charge the battery thanks to a bidirectional AC/DC converter. The authors in (Yilmaz & Krein, 2013) classified integrated chargers as a function of the number of electric motors and if those motors use permanent magnets or induction.

The advantage of an integrated charger is to decrease the amount of components, hence reduce the weight, the volume and the cost. Moreover, less volume of power electronics means that there is more space for the battery, and so an increase of the capacity. Those kinds of chargers are classified as on-board chargers. An additional advantage is the possibility to increase the charging power for on-board chargers and thus to compete with off-board high power chargers (Khaligh & Dantonio, 2019). Nonetheless, there are several drawbacks to this approach. The first one is the high complexity of controlling such chargers. Moreover, using the propulsion system can increase the stress on it and consequently increase the degradation of it.

2.5.2. ISOLATED CHARGERS

EVs and the electricity grid are two separated electrical circuits that require appropriate communication and energy transfer during charging/discharging. Connections between two electrical circuits can be problematic and sometimes harmful for one (or both) circuit. For instance, when the ground connection is not at the same potential. To avoid such issues, isolated chargers are developed.

Isolated chargers are chargers with no physical connection between the AC grid and the battery. Inductive coupling (e.g. by using a transformer) is usually used at a certain stage in the power conversions (Nassary, Orabi, Ghoneima, & El-Nemr, 2019). A good example of isolated chargers is the wireless power transfer (WPT).

2.6. Pantograph chargers

There exists another conductive charger technology which is called a pantograph charger. This kind of charger are made for urban heavy-duty electric vehicles such as electric buses. When implemented for public transport, they need to stop at each bus stop. The idea of pantograph chargers is to charge the batteries at these specific moments. To avoid the chauffeur to go out of the bus and plug the cables to charge the battery at each stop, pantograph chargers are the solution to charge automatically the batteries with an automated conductive charger.

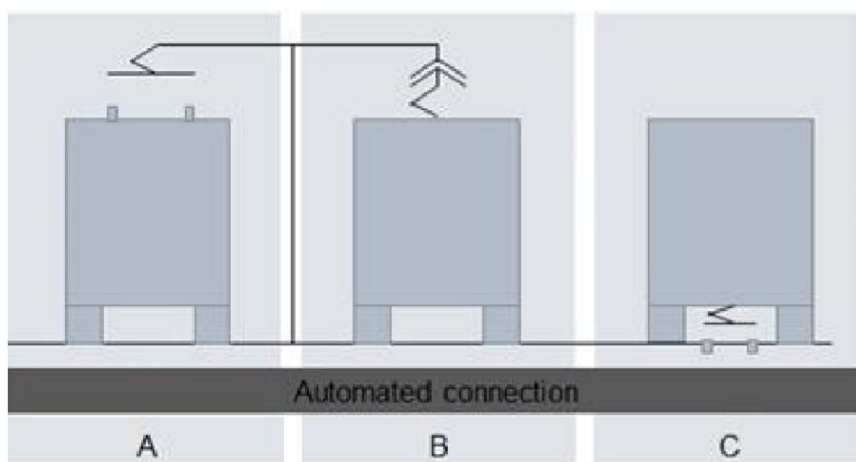


Figure 15 Standards referenced in ASSURED project

According to the European project *ASSURED*, there are three different standards for such chargers; type A, type B and type C. Figure 15 illustrates the difference between the three types. Type A is also called 'on-board' and type B is also called 'off-board', however it has not the same meaning than on/off-board chargers introduced before. Electrical implantation and control pilot communication are based on the IEC 61851-23-1 CD3 standard. These kinds of chargers are based on the CCS Mode 4 chargers, with minor updates.

2.7. Alternatives to conductive chargers

Conductive chargers are not the only methods to "refuel" a battery. In this section, two main different technologies will be discussed, which are wireless charging and battery switching.

2.7.1. WIRELESS CHARGING OF ELECTRIC VEHICLES

One important alternative to conductive chargers is the wireless power transfer (WPT), also called wireless electric vehicle charging (WEVC) or partially on-board battery chargers (Taiebat & Xu, 2019). There exist two types of WPT technologies: capacitive WPT and inductive WPT. The capacitive one is less developed because of its complex elaboration. This is the reason why this section will focus on inductive WPT.

Inductive Coupling Power Transfer (ICPT) is a technology that uses magnetic induction between conducting coils to transfer power through air. There are two possible ways to use it, either by using a kind of plug where there is a magnetic connection but no electrical connection, or either by charging below the car via coils on the ground. The second option is more often mentioned in the literature.

The main benefits of such technology are the ease of use and the safety. No need of cables to trip over, no heavy plugs, no inadvertent disconnection and no fear of forgetting to plugin-in are reasons that make WPT more convenient to use (Mahmoudzadeh Andwari, Pesiridis, Rajoo, Martinez-Botas, & Esfahanian, 2017). As there is no physical connection, hazard issues are avoided, increasing the safety. Another positive aspect is the possibility to charge the battery while it is driving, i.e. the so-called dynamic charging or online electric vehicle (OLEV).

On the other hand, ICPT has several drawbacks. The efficiency of charging is lower than conductive chargers. It is below 90% and it is highly depending on the position of the car. Moreover, the capital cost is higher than for conductive methods. Still, this cost could decrease through research and development, like what we have seen for the road towards wireless chargers for smartphones. For now, this technology is not commercially developed, although this can change in the course of a few years.

2.7.2. BATTERY SWITCHING STATIONS

A completely different way to recharge a battery is battery switching. Here, the aim is to swap the battery when its depleted for a charged one. This is probably the quickest solution available as there is no need to wait for the battery to charge. However, there are several technical difficulties.

The first difficulty is that high voltage and high energetic connections must be opened each time the battery is swapped. It could be possible to build a good swapping method, but still there is always a risk of sparks, or contacts wear. The second difficulty is the complex infrastructure necessary for the station. It needs the system to swap the batteries, to charge the batteries and to store (many) of them. The third difficulty is associated to the fact that the EVs must allow a system to swap their batteries. This is, currently, not the case in commercial EVs. Lastly, the fourth difficulty is that a good standardization is vital to have the possibility to use this technology (Mahmoudzadeh Andwari et al., 2017). Currently, car manufacturer uses differently sized batteries with possibly different chemistries. Consequently, that the switching station should have all kind of batteries available and ready to be used.