Vlaanderen
is omgeving

# Emissiereductiepotentieel van hybride voertuigen bestemd voor de weg

Eindrapport

DEPARTEMENT
OMGEVING

omgevingvlaanderen.be

**EMISSIEREDUCTIEPOTENTIEEL VAN HYBRIDE VOERTUIGEN BESTEMD VOOR DE WEG**

Deze studie beschrijft de resultaten van een herziening voor de emissiefactoren voor plug-in hybride elektrische voertuigen (PHEV) bestemd voor de weg. Hiervoor zijn we op drie vlakken te werk gegaan; eerst is via een literatuuronderzoek nagegaan wat er geleerd kan worden uit wetenschappelijk onderzoek dat elders werd gevoerd naar dit onderwerp. Daarnaast hebben we via een eigen monitoringscampagne PHEV's geanalyseerd tijdens hun dagelijks gebruik en dit gedurende een periode van bijna twee maanden. Aan de hand van de inzichten die hieruit voortvloeiden werden tot slot virtuele PHEV's gemodelleerd met het oog op het in kaart brengen van realistische emissiefactoren en op potentiële technologische optimalisaties op korte tot middellange termijn. Op basis van deze drie deelonderzoeken werden nieuwe emissiefactoren berekend voor zowel koolstofdioxide ($CO_2$) als de polluenten stikstofoxiden ($NO_x$), koolstofmonoxide (CO), vluchtige organische stoffen (VOS) en fijnstof (PM). Ook biedt dit rapport een update van de emissiefactoren voor de nieuwste conventionele personenwagens en inzichten in de energetische consumptie van conventionele en plug-in personenwagens, op basis van COPERT versie 5.3.

Naast een focus op de personenwagenvloot werd er eveneens een simulatiemodel gebouwd voor een seriële plug-in hybride elektrische stadsbus, welke tot op heden elders nog niet werd ontwikkeld. Dit laat ons toe om belangrijke inzichten te verwerven in het potentieel van de inzet van dit type stadsbussen.

Dit rapport bevat de mening van de auteur(s) en niet noodzakelijk die van de Vlaamse Overheid.

## COLOFON

**Verantwoordelijke uitgever**
Peter Cabus
Departement Omgeving
Vlaams Planbureau voor Omgeving
Koning Albert II-laan 20 bus 8, 1000 Brussel
vpo.omgeving@vlaanderen.be
www.omgevingvlaanderen.be

**Projectleider**
Natacha Claeys

**Auteurs**
Nils Hooftman – Vrije Universiteit Brussel
Norbert Ligterink – TNO
Mieke Paalvast – TNO
René van Gijlswijk – TNO
Eef Voogd – TNO
Giorgos Mellios – Emisia
Mamarikas Sokrates – Emisia
Kapetanios Nikos – Emisia
Zacharias Samos – Emisia
Wim Verhoeve – Emisia

**Wijze van citeren**
Hooftman N., Ligterink N., Paalvast M., van Gijlswijk R., Voogd E., Mellios G., Mamarikas S., Kapetanios N., Samos Z., Verhoeve W., (2020), Emissiereductiepotentieel voor hybride voertuigen bestemd voor de weg, uitgevoerd in opdracht van *Vlaams Overheid – Departement Omgeving – Afdeling Energie, Klimaat en Groene Economie.*

## PARTNERS

# INHOUDSTAFEL


Managementsamenvatting ..... 6
1 Inleiding ..... 8
1.1 Europese $CO_2$ doelstellingen stimuleren vloot-elektrificatie 8
1.2 Extra maatregelen om aan de doelstellingen te voldoen 12
1.3 Plug-in hybride elektrische voertuigen in Vlaanderen 12
2 Literatuuronderzoek ..... 16
2.1 Rapport 1: Emission performance of a diesel PHEV (TNO, 2015) 17
2.1.1 Introductie 17
2.1.2 Methodiek 17
2.1.3 Resultaten 17
2.1.4 Conclusie 20
2.1.5 NOx emissiefactoren 21
2.3 Rapport 2: Monitoring van PHEV's april 2012 t/m maart 2016 (TNO, 2016) 22
2.3.1 Introductie 22
2.3.2 Methodiek 22
2.3.3 Resultaten 23
2.3.4 Conclusies 25
2.3.5 NOx emissiefactoren 26
2.4 Rapport 3: Evaluation of exhaust emissions from three diesel-hybrid cars and simulation of after-treatment systems for Ultralow Real-World NOx emissions (Franco et al., 2016) 27
2.4.1 Introductie 27
2.4.2 Methodologie 27
2.4.3 Resultaten: 28
2.4.4 Conclusies 29
2.4.5 NOx emissiefactoren 29
2.6 Rapport 4: Transformers (TNO, 2017) 30
2.6.1 Introductie 30
2.6.2 Methodiek 30
2.6.3 Resultaten 32
2.6.4 Conclusies 33
2.6.5 Emissiefactoren 33
2.8 Rapport 5: Assessment on emission factors of HDV over mission profiles (TNO, 2018) 34
2.8.1 Introductie 34
2.8.2 Methodiek 34
2.8.3 Resultaten 35
2.8.4 Conclusies 37
2.8.5 NOx emissiefactoren 37
2.9 Rapport 6: Real-world measurement of hybrid buses' fuel consumption and pollutant emissions in a metropolitan urban road network (Keramydas et al. (Emisia), 2018) 38
2.9.1 Introductie 38
2.9.2 Methodiek 38
2.9.3 Resultaten 39
2.9.4 Conclusies 40
2.9.5 NOx emissiefactoren 40
2.10 Rapport 7: Analysis of tail-pipe emissions of a plug-in hybrid electric vehicle and its average emissions for different test cycles (Ehrenberger et al., 2018) 41
2.10.1 Introductie 41
2.10.2 Methodiek 41
2.10.3 Resultaten 41
2.10.4 Conclusies 44
2.10.5 Emissiefactoren 44
2.11 Algemene conclusies van het literatuuronderzoek 45
3 Vlaamse meetcampagne ..... 47
3.1 Omschrijving SEMS monitoring 47

3.2 Resultaten 48
3.2.1 Utiliteitsfactoren 48
3.2.2 Laad-/ontlaadgedrag 50
3.2.3 Emissie van polluenten 53
3.3 Conclusies 57
4 Modelleringsonderzoek 58
4.1 Emissie- en energieverbruiksfactoren voor PHEV personenwagens 58
4.1.1 Doelstellingen 58
4.2 Huidige PHEV's 58
4.2.1 Methodologie 58
4.2.2 Resultaten 64
4.2.3 Validatie met SEMS-data 69
4.2.4 Volvo V60 vergelijking 74
4.3 Toekomstige PHEV's 76
4.3.1 Bestudeerde parameters 76
4.3.2 Simulaties 78
4.3.3 Resultaten 80
4.4 Energieverbruiksfactoren voor een plug-in serie-hybride elektrische bus 83
4.4.1 Introductie 83
4.4.2 Methodologie 83
4.4.3 Simulatieproces 84
4.4.4 Resultaten 87
5 Impactanalyse 95
5.1 Koolstofdioxide ($CO_2$) 96
5.2 Stikstofoxiden ($NO_x$) 98
5.3 Koolstofmonoxide (CO) 100
5.4 Vluchtige organische stoffen (VOS) 101
5.5 Uitlaat-Fijnstof (PM) 102
5.6 Energieconsumptie 103
5.7 Vlootreductie $CO_2$ 104
5.8 Vlootreductie $NO_x$ 111
5.9 Conclusie impactanalyse 113
6 Conclusies 114
7 Aanbevelingen voor toekomstig werk 116
8 Referenties 117
9 Appendix 119

# MANAGEMENTSAMENVATTING

Wegtransport heeft door haar uitstoot van broeikasgassen een aanzienlijk aandeel in de wijziging van het klimaat die we steeds duidelijker ondergaan. Dit is een globaal probleem, dat ook regionale oplossingen vraagt. Naast een invloed op het klimaat draagt wegtransport ook bij tot de ondermaatse lokale luchtkwaliteit, in het bijzonder in dichtbevolkte gebieden. Elektrificatie van voertuigen wordt om deze reden gestimuleerd door de Europese Commissie. Op regionaal niveau stippelt Vlaanderen een beleid uit om onder meer het aantal voertuigkilometers terug te dringen en de technologische mix van aandrijvingsmogelijkheden binnen de transportsector in een bepaalde richting uit te sturen, om zo tot de gewenste broeikasgas- en polluentenreducties te komen. Het is echter van belang om na te gaan in welke mate nieuwe technologieën in werkelijkheid geschikt zijn om voorgedragen te worden als een *duurzamer* alternatief. Om de impact van plug-in hybride elektrische voertuigen (PHEV) na te gaan op Vlaamse schaal, wordt in deze studie een overzicht gegeven van welk onderzoek reeds naar hun werkelijke emissies werd gevoerd en dit zowel voor personenwagens, lichte vracht als vrachtwagens en bussen. Hiaten in de vakliteratuur worden geadresseerd met een eigen meetcampagne en simulaties die (onder meer) op basis van de campagne inzicht geven in de technologische evoluties die we vanuit het consortium haalbaar achten voor Vlaanderen om significante stappen te zetten in een stelselmatige $CO_2$-reductie van haar vloot. Plug-in hybride voertuigen hebben immers de mogelijkheid om op elektriciteit uit het lichtnet te rijden, zodat er lokaal geen uitstoot van $CO_2$ of schadelijke stoffen plaatsvindt.

Uit de relevante vakliteratuur blijkt dat er wereldwijd verrassend weinig aandacht wordt geschonken aan de werkelijke uitstoot van PHEV's. Wat kon worden teruggevonden gaat voornamelijk over personenwagens. Voor de sector van het zwaar vervoer is er tot heden weinig onderzoek gedaan naar alternatieven voor de dieselmotor, al tonen de beschikbare simulaties wel aan dat er een behoorlijke optimalisatie mogelijk is via (gedeeltelijke) elektrificatie van de aandrijflijn (tot 8% efficiëntiewinst per tonkilometer). Bovendien kan men in de nabije toekomst voor deze specifieke sector nog grote stappen naar een hogere efficiëntie (met een tot 30% lager energieverbruik) zetten via een doorgedreven optimalisatie van de aerodynamica en belading.

Via SEMS-meetapparatuur werd gedurende anderhalve maand de emissies van stikstofoxiden ($NO_x$) en $CO_2$ per seconde geregistreerd voor drie PHEV's, alsook de energiebalansen om zo het laadgedrag (*charging behaviour)* van de eigenaars na te kunnen gaan. Een belangrijke parameter die we uit deze data afgeleiden is de utiliteitsfactor, welke de verhouding is tussen het rijden in *charge-depleting* (CD) en *charge-sustaining* (CS) modus tussen twee laadbeurten. Waar eerder onderzoek aantoonde dat de Nederlandse zakelijke PHEV-gebruiker gemiddeld 30% van de tijd in CD modus (dus elektrisch) rijdt, bleek uit de gepresenteerde meetcampagne dat de gemiddelde utiliteitsfactor in Vlaanderen slechts 25% bedraagt. Wanneer we per wegtype gaan kijken, dan bedragen de gemiddelde utiliteitsfactoren 50%, 50% en 20% voor respectievelijk stedelijke, rurale en snelwegtrips. Deze factoren zijn belangrijk voor de simulaties die volgden op de meetcampagne, om de emissiefactoren van representatieve PHEV's van het kleine, medium en grote voertuigsegment te kunnen bepalen. Deze toont voor $CO_2$ voornamelijk aan dat de nieuwe emissiefactoren voor benzine plug-ins beduidend lager liggen dan oorspronkelijk voor deze voertuigtechnologie werd aangenomen in het Vlaamse FASTRACE model. Algemeen gezien verbruiken PHEV's volgens de nieuwste inzichten zo'n 30% minder, terwijl er nog een behoorlijke marge is indien de utiliteitsfactoren verder kunnen worden opgekrikt. Dit vereist een beleid dat inzet op kleinere/lichtere PHEV's met een grote batterijcapaciteit, maar even goed op de beschikbaarheid en het gebruik van laadinfrastructuur. Ook het soort trips is bepalend voor het $CO_2$-reductiepotentieel van PHEV's, gezien ze het beste scoren op kortere ritten met een volgeladen batterijenpakket. Wanneer ze onvoldoende geladen worden, gaan dit type wagens veelal hogere concentraties aan $CO_2$ en polluenten uitstoten

gezien ze zwaarder dan hun conventionele varianten. PHEV-gebruikers stimuleren om frequenter hun voertuig op te laden is echter geen sinecure, al zou de invoering van een $CO_2$-taks een belangrijke drijfveer kunnen zijn.

In deze studie werden enkel emissiefactoren berekend voor grote diesel-PHEV's, gezien we weinig potentieel zien voor een toepassing van de dure technologie in de andere segmenten. Qua energetische efficiëntie scoren kleine en medium benzine PHEV's uiteindelijk het beste, al zijn deze voertuigtypes begin 2020 amper vertegenwoordigd op de Vlaamse automarkt.

Bij het doorrekenen van de nieuwe emissiefactoren in het kader van de Vlaamse vlootemissies van $CO_2$ door personenwagens kwam het potentieel van PHEV's duidelijk naar voren. Voor 'conventionele' hybrides was dit ook het geval, maar in mindere mate (ongeveer 24% voor een gewogen gemiddelde van stedelijk, ruraal en snelwegtrips). De sterke $CO_2$-reducties die dankzij PHEV's mogelijk worden onderstrepen het feit dat beleid er goed aan doet om, naast het stimuleren van de *modal shift* en puur elektrische voertuigen, ook in te zetten op PHEV's. Indien Vlaanderen dit doet om luchtkwaliteits- en klimaatvoordelen te halen is het belangrijk om het elektrisch gebruik te monitoren en zo na te gaan of er tijdig en voldoende wordt geladen. Het brandstofverbruik is een goede manier om het gemiddelde verbruik te monitoren, maar een SEMS of een aparte OBD monitor is noodzakelijk om het elektrisch rijden binnenstedelijk te controleren. Tot dusverre is niet gebleken dan voor PHEV's aandrijflijnen de elektromotor de standaard aandrijving is. Wat verder blijkt uit de Vlaamse vlootemissies is een gecontroleerde uitfasering van alle verbrandingsmotoren voor personenwagens tegen 2035 een cruciale factor is om tegen 2050 de totale $CO_2$-emissie binnen deze sector (zo goed als) naar nul te herleiden.

Naast personenwagens werd ook gekeken naar hybride bussen. Waar het voorgestelde model voor een plug-in hybride bus belangrijke inzichten geeft in het potentieel van de technologie voor een inzet in Vlaanderen, hebben we doorheen dit rapport echter amper geschreven over bestelwagens en vrachtwagens. Voor bestelwagens verwachten we eigenlijk een gelijklopende impact als bij het elektrificeren van personenwagens, gezien ze in feite over dezelfde motorisatie beschikken. Hier blijft het echter koffiedik kijken of plug-in hybride bestelwagens de markt zullen overrompelen of ook hier volledige elektrificatie meteen aan de orde zal zijn. Voor vrachtwagens liggen de kaarten echter anders, gezien de grote vraag naar vermogen. In deze sector is er echter nog een grote marge voor $CO_2$-reducties wanneer ingezet wordt op elektrificatie van de aandrijflijn en optimalisatie van de aerodynamica. Hierdoor krijgt de sector nog enige tijd respijt alvorens ook hier batterijtechnologie op grote schaal kan worden ingezet.

# 1 INLEIDING

De wegtransport draagt aanzienlijk bij tot uitstoot van broeikasgassen. Om de klimaatdoelstellingen te bereiken dient ook deze sector serieuze inspanningen te leveren in de (nabije) toekomst om te voorkomen dat ons klimaat in negatieve zin evolueert. Dit is een globaal probleem, dat mede ook regionale oplossingen vraagt. Om die reden legt de Europese Commissie haar lidstaten doelstellingen op om vóór 2050 naar een klimaat-neutrale samenleving te evolueren. Naast een invloed op het klimaat draagt wegtransport ook bij tot de ondermaatse luchtkwaliteit, in het bijzonder in dichtbevolkte gebieden. Ook hiervoor wordt op Europees niveau bepaald in welke mate nieuwe voertuigen schadelijke polluenten mogen uitstoten, met name door emissienormen op te leggen aan constructeurs. Op het lokale, Vlaamse niveau stippelt men vervolgens een beleid uitgestippeld om de technologische mix van aandrijvingsmogelijkheden binnen de transportsector en voertuigvolumes in een bepaalde richting te sturen om zo tot de gewenste broeikasgas- en polluentenreducties te komen. Het is echter van belang om na te gaan in welke mate nieuwe technologieën in werkelijkheid geschikt zijn om voorgedragen te worden als een duurzamer alternatief.
Om de impact van plug-in hybride elektrische voertuigen (PHEV) na te gaan op Vlaamse schaal, wordt in deze studie een overzicht gegeven van welk onderzoek reeds naar hun werkelijke emissiefactoren werd gevoerd en dit zowel voor personenwagens, lichte vracht als vrachtwagens en bussen. Hiaten in de vakliteratuur worden geadresseerd met een eigen meetcampagne en simulaties die (onder meer) op basis van de campagne inzicht geven in de technologische evoluties die we vanuit het consortium haalbaar achten om in Vlaanderen significante stappen te zetten in een stelselmatige decarbonisatie van haar vloot. Plug-in hybride voertuigen hebben de mogelijkheid om op elektriciteit uit het lichtnet te rijden, zodat er lokaal geen uitstoot van $CO_2$ of schadelijke stoffen plaatsvindt. Ook worden deze voertuigen gezien als de wegbereider voor de elektrificatie van transport en mobiliteit. Met deze studie onderzoeken we het potentieel van deze technologie en in welke mate Vlaanderen hierop moet inzetten op korte en middellange termijn.

## 1.1 EUROPESE $CO_2$ DOELSTELLINGEN STIMULEREN VLOOT-ELEKTRIFICATIE

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 $CO_2$ uitstoot van hun verkochte voertuigen. Dit is relevant gezien ze voor zowel het jaar 2015 als 2021 $CO_2$ doelstellingen moeten halen, zijnde:

- Gemiddeld 130 g/km voor personenwagens tegen 2015 en 95 g/km tegen 2021, waarvan 95% reeds met ingang van 2020 (zie Verordening (EG) 443/2009), en;
- Gemiddeld 175 g/km voor lichte bedrijfswagens tegen 2017 en 147 g/km vanaf 2020 (zie Verordening (EU) 510/2011)

Deze waarden worden gecorrigeerd voor het gemiddelde gewicht van de geregistreerde voertuigen per fabrikant. Die correctie is echter beperkt om perverse stimulansen voor zwaardere voertuigen te voorkomen. Voor de jaren 2025 en 2030 worden er eveneens doelen vooropgesteld die verwijzen naar de referentiesituatie in 2021. Dit nieuwe startpunt is nodig vanwege de overgang naar de nieuwe WLTP test voor $CO_2$ 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 $CO_2$-reductie voor de gehele Europese vloot wordt volgens volgende formule bepaald:

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

Ook volgens Verordening (EU) 2019/631 worden per constructeur specifieke emissiedoelstellingen worden opgelegd, gebaseerd op de gemiddelde massa van hun voertuigen. Hierdoor mogen constructeurs met zwaardere modellen méér $CO_2$ 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 SUV's zijn gaan ontwikkelen, die mede dankzij een scherpe prijszetting sterk aan populariteit hebben gewonnen de laatste twee-drie jaar. De referentiewaarde van het jaar 2021 waarop men de reducties tegen 2025 en 2030 bepaald wordt als volgt berekend:

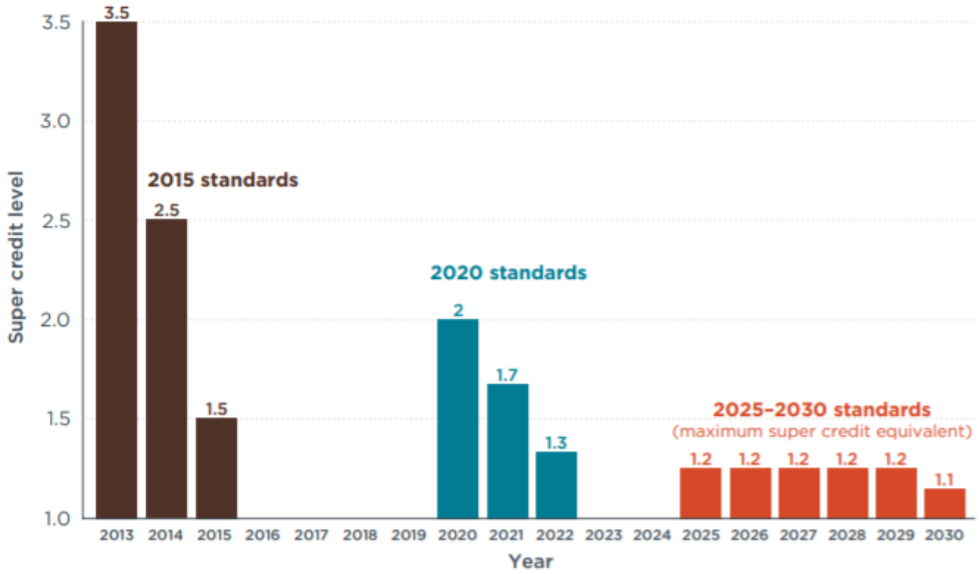
$$CO_{2,EU\ ref\ 2021} = WLTP_{CO2,gemeten} \times \left(\frac{NEDC_{2020\ EU\ vloot}}{NEDC_{CO2}}\right) + a\left(M_{ø2021} - M_{0,2021}\right)$$

Met $WLTP_{CO2,\ gemeten}$ als het gemeten gemiddelde over alle nieuwe modellen geregistreerd in 2020; $NEDC_{2020\ EU\text{-}vloot}$ zijnde de 95 g/km limiet; $NEDC_{CO2}$ de gemiddelde specifieke emissies in 2020 (zonder toekenning van eco-innovaties of superkredieten); $M_{ø2021}$ 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.

Een streefwaarde voor de gemiddelde $CO_2$ waarde per constructeur is het belangrijkste mechanisme om $CO_2$ te reduceren, maar daar bovenop zijn er regelingen om nieuwe, duurzame voertuigtechnologieën 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 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 *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 1 het toegekende 'gewicht' voor personenwagens die voldoen aan de vereisten om tot de ZLEV-categorie te behoren. Dit betekent dat hun $CO_2$-emissie lager ligt dan 50 g/km en verklaart waarom er zoveel PHEV-modellen op de markt zijn gekomen doorheen de jaren die om volgens de NEDC-cyclus nét onder deze grens uitkwamen. Tegelijkertijd verklaart dit waarom zoveel van deze modellen enige tijd van de radar verdwenen sinds de introductie van de WLTC-cyclus, gezien men deze opnieuw moest kalibreren om alsnog in aanmerking te komen voor deze 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, waardoor deze krediettoekenning niet van toepassing is/was. Het is echter niet ondenkbaar dat hier snel verandering in komt, gezien batterijtechnologie snel goedkoper wordt.




Figuur 1: Overzicht van het krediet dat wordt toegewezen aan een '*zero and low emission electric vehicle'* t.e.m. 2030 (Dornoff et al. 2018)

Zoals blijkt uit Figuur 1 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 $CO_2$-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:

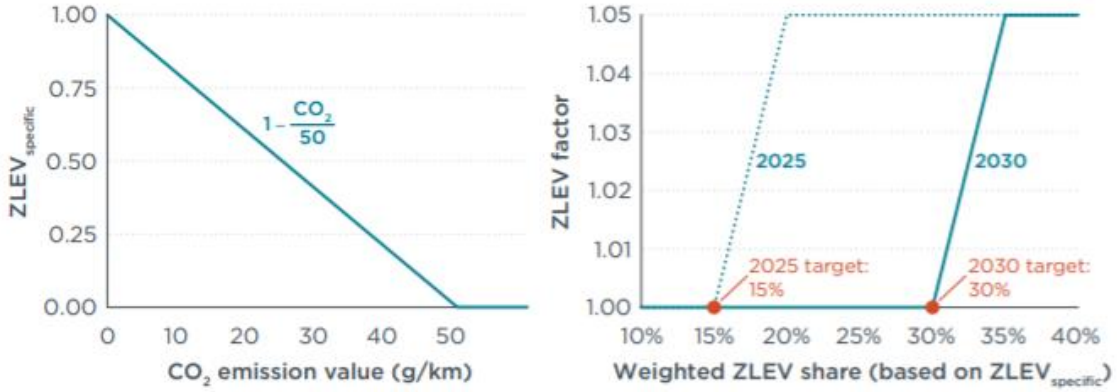
$$CO_{2\ doelstelling\ fabrikant} = \left(CO_{2,doelstelling\ 2025/2030}\right) \times ZLEV\ factor$$

$$\text{Met de } ZLEV\ factor = (1 + y - x)$$

Hierin is factor *x* de ZLEV verkoopsdoelstelling van 15% tegen 2025 en 35% tegen 2030, en factor *y* het aandeel van verkochte ZLEV-voertuigen per fabrikant. Dit nieuwe mechanisme kadert in de niet-bindende aanpak van de Commissie om via verkoopsdoelstellingen de constructeurs te stimuleren om meer ZLEV-modellen op de markt te brengen. Zo geldt volgens Verordening (EU) 2019/631 voor de periode 2025-2029 dus een ZLEV verkoopsdoelstelling van 15%, welke tegen 2030 30% bedraagt. Worden deze percentages gehaald, dan hangt er voor de constructeur in kwestie een versoepeling van de $CO_2$ limiet aan vast via de ZLEV factor. Deze varieert tussen een factor 1 en 1,05, en wordt bepaald door de specifieke $CO_2$-emissie van een ZLEV-model. In deze oefening zal een zero-emissievoertuig tellen voor een volledig voertuig, terwijl de $CO_2$-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 $CO_2$-uitstoot tussen de 0 – 49 g/km een gewicht krijgen volgens een lineaire functie tussen deze twee waarden. Dit is te zien in de linkerhelft van Figuur 2. Op deze manier wordt het gewogen aandeel ZLEV's t.o.v. de totale verkochte vloot per constructeurs bepaald in de jaren 2025 en 2030.

Het is mogelijk dat de streefwaarde van 2021 door sommige constructeurs gehaald wordt mits de verkoop een substantieel aandeel elektrische voertuigen. Hierdoor zal voor de streefwaarden van 2025 en 2030 het effect van zulke voertuigen in hun vlootgemiddelde afzwakken, 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 $CO_2$ limiet (=krediet) voor diens conventionele vloot, afhankelijk

van het al dan niet halen van de ZLEV verkoopsdoelstelling. 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 '$CO_2$ krediet' worden ingewonnen indien de verkoopsdoelstelling met 5% of meer overschreden wordt. Dit wil zeggen dat de conventionele vloot dan 5% extra $CO_2$ mag uitstoten. Dit zien we grafisch weergegeven in de rechterhelft van Figuur 2.




Figuur 2: 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)**

Deze aanpak verschilt van wat bijvoorbeeld in China of in Californië gebeurt, gezien men daar met *bindende* quota werkt en dus niet met *vrijblijvende* doelen. Of dit een gemiste kans is om méér uit de kan te halen moet nog blijken, hoewel de grootste constructeurs in de laatste maanden alvast hogere 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 ZEV's, dan zal het aantal PHEV's sterk hoger moeten liggen omdat 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 $CO_2$-emissie hadden die net de bovengrens van 50 g/km respecteerden. Het feit dat het te verwerven krediet in de vorm van $CO_2$ 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 $CO_2$-reductie met 37,5% tegen 2030 voor personenwagens en 31% voor lichte bedrijfswagens. Desalniettemin is er geen sanctie ingebouwd voor constructeurs die de ZLEV verkoopsdoelen missen, en dit ten gevolge van de niet-bindende aard van de maatregel. Dit kunnen we beschouwen als een gemiste kans.

Tot slot blijft er een verschil tussen de $CO_2$ 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 $CO_2$-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 $CO_2$-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 $CO_2$ 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).

## 1.2 EXTRA MAATREGELEN OM AAN DE DOELSTELLINGEN TE VOLDOEN

Autofabrikanten hebben nog andere mogelijkheden om aan de $CO_2$-regelgeving te voldoen. Enerzijds vaardigt de Commissie emissiekredieten uit voor technologische innovaties die $CO_2$-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 diens warmte beter vast te houden en zo de efficiëntie te verhogen, led-technologie of efficiëntere alternatorsystemen. Vereisten voor zulke systemen zijn dat ze verifieerbare en reproduceerbare resultaten moeten opleveren. De toekenning van $CO_2$-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 $CO_2$-streefwaarde wordt beperkt uitgebreid met procedures voor airconditioning. De procedures zijn echter complex en specifiek.

Een bijkomstig alternatief is dat fabrikanten aan groepsvorming (*pooling*) gaan doen. Deze maatregel is echter beperkt in de tijd, namelijk tot maximum vijf jaar. Een voorbeeld van zulke groepsvorming is het samengaan van Fiat Chrysler (de slechtste leerling van de klas anno 2019 inzake haar vlootgemiddelde $CO_2$ 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.

## 1.3 PLUG-IN HYBRIDE ELEKTRISCHE VOERTUIGEN IN VLAANDEREN

Plug-in hybride voertuigen worden dus voorgedragen door het Europees beleid, zij het onder strengere voorwaarden dan voordien. Het potentiële succes van deze technologie als geschikt alternatief voor de conventionele verbrandingsmotor zal echter moeten blijken uit een aantal aspecten. Voor overheden rijst vooral de vraag of plug-ins wel zo 'groen' zijn als ze worden geafficheerd, terwijl bij de consument vooral een afweging zal gemaakt worden of de meerprijs t.o.v. een conventioneel model, dan wel de minprijs t.o.v. een volledig elektrisch model, gerechtvaardigd is. De drie belangrijkste redenen die genoemd worden om de plug-in hybride in Europa te stimuleren zijn:

1. Als een wegbereider (gangmaker) voor volledige elektrificatie van wegverkeer en rendabel maken van laadinfrastructuur door hogere bezetting.
2. Als een alternatief voor waar het grootste deel van de ritten elektrisch gereden kunnen worden, zonder het zware gewicht van de batterij van een 100% elektrisch voertuig, die nodig is om *alle* ritten elektrisch te kunnen rijden.
3. Een aandrijflijn waarmee de verbrandingsmotor op een efficiëntere manier draait, met een lager verbruik en $CO_2$ uitstoot.

In dit rapport wordt enerzijds een overzicht gegeven van wat de vakliteratuur ons leert aangaande de uitstoot van schadelijke polluenten door hybride voertuigen die bestemd zijn voor de weg, terwijl we anderzijds met eigen veldwerk en simulaties de gaten opvullen die we in de literatuur vaststellen. De inzichten die we hiermee verwerven zijn belangrijk voor de opmaak van het Vlaamse Emissie-inventaris voor wegvoertuigen, die passen in het groter geheel van de transportsector, welke jaarlijks dient te worden gerapporteerd in het kader van de Europese NEC-richtlijn (of de *National Emission Ceilings Directive*) (VMM 2018). Hiernaast dienen de Europese lidstaten ook op jaarbasis hun totale emissie van $CO_2$ te rapporteren in het kader van klimaatdoelstellingen. Zo wordt voor elke sector een jaarbalans opgemaakt, alsook voor het wegverkeer. In tegenstelling tot de industrie valt het wegtransport niet onder de regelgeving van emissiehandel (ETS) maar onder de non-ETS regelgeving.

Waar er een grote verscheidenheid aan emissietests staat beschreven voor personenwagens – en in beperktere mate voor vrachtwagens, dienen we eveneens te vermelden dat de nadruk ligt op *conventionele* voertuigen. Onder deze categorie vallen alle soorten voertuigen die door één krachtbron worden aangedreven, zijnde een verbrandingsmotor die draait op benzine, CNG, LPG of diesel. De reden hiertoe is enerzijds het feit dat conventionele voertuigen vandaag nog steeds het gros van de Europese voertuigenvloot vertegenwoordigen (in Vlaanderen >98% in 2018 (Ecoscore 2017)), terwijl anderzijds de problematiek rond schadelijke emissies zich voornamelijk afspeelt bij personenwagens (N. Hooftman et al. 2018). Getuige hiervan het dieselschandaal dat losbrak midden 2015. Als reactie hierop worden in Europa sinds 2017 tijdens typegoedkeuringsprocedures voor nieuwe modellen van personenwagens niet enkel metingen uitgevoerd via geijkte procedures onder gecontroleerde laboratoriumomstandigheden, maar gaat men complementair hieraan ook nagaan hoe de testvoertuigen zich op vlak van hun uitstoot gaan gedragen in reëel verkeer. Hiervoor hanteert men draagbare emissiemeetapparatuur, waarbij we een onderscheid maken tussen PEMS *(portable emissions measurement system)* apparatuur dat wordt ingezet bij typegoedkeuring van nieuwe voertuigmodellen, en SEMS *(smart emissions measurement systems).* Deze laatste techniek is een vereenvoudigde versie van de dure PEMS, welke werd ontwikkeld door het projectpartner TNO en zich toespitst op de emissie van stikstofoxiden ($NO_x$) en kooldioxide ($CO_2$), terwijl het ook het energiebeheer in (plug-in) hybride architecturen registreert. Bij vrachtverkeer kunnen we stellen dat goed functionerende voertuigen ook in de praktijk lage emissies aan $NO_x$ laten optekenen. Toch moeten we erop wijzen dat er sinds de laatste jaren steeds meer gevallen van emissiefraude in deze tak van het wegverkeer aan het licht komen. De motieven van de individuen die overgaan tot de illegale manipulatie van de nazuiveringssystemen van dieselvrachtwagens zijn meestal van economische aard. Dit omdat men door de uitschakeling van het selectieve katalytische reductiesysteem (SCR) zowel AdBlue verbruikskosten uitspaart als onderhoudskosten.

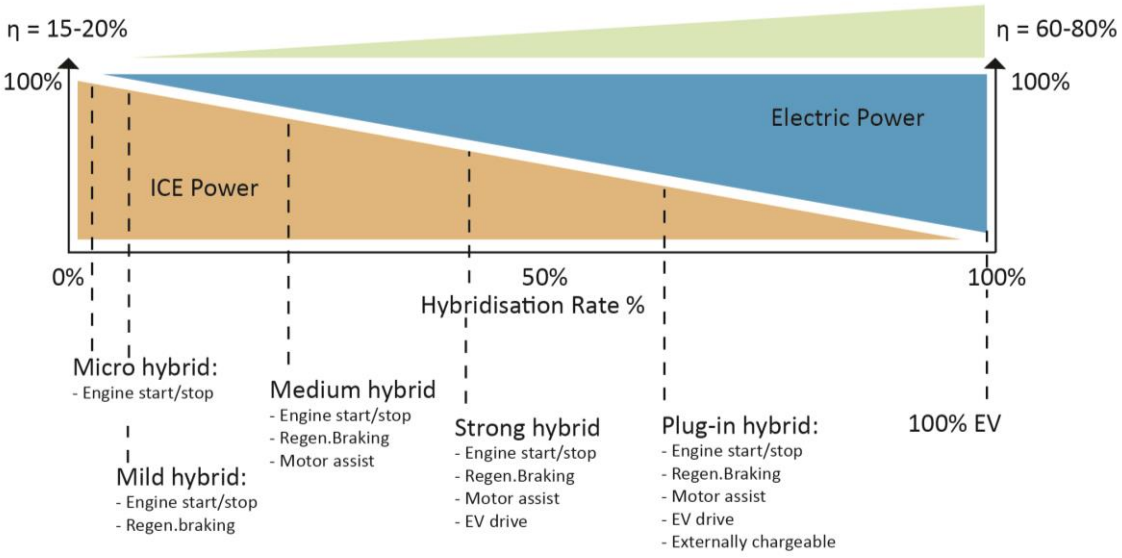
De inzichten die verworven worden tijdens zulke praktijktests zijn cruciaal voor een overheid om hun dataset aan emissiefactoren op punt te kunnen stellen om de werkelijke uitstoot van haar vloot zo goed mogelijk te kunnen weerspiegelen in haar inventaris. In dit opzicht is het ook belangrijk dat niet alleen de emissiefactoren van conventionele technologieën worden scherp gesteld, maar ook die van alternatieve aandrijflijnen. Voor deze studie, die specifiek gericht is op de werkelijke bijdrage door hybride voertuigen, onderscheiden we volgende subcategorieën:

1. 'Niet-stekker hybride' elektrische voertuigen, welke een (heel) beperkte puur elektrische actieradius hebben en voornamelijk milieuwinsten mogelijk maken door de energie uit de batterij toe te passen ter assistentie van de verbrandingsmotor bij hogere motorbelasting. Deze voertuigen hebben niet/nauwelijks de mogelijkheid om in een *charge-depleting* (CD) modus te rijden, waarbij de aandrijving van de wielen puur elektrisch plaatsvindt. Ze zullen dus veelal in een *charge-sustaining* (CS) modus werken. Een plug-in hybride die niet frequent opgeladen wordt, zal veelal in CS-modus opereren.
2. *Plug-in* hybride elektrische voertuigen (PHEV) of stekkerhybrides, welke over een grotere batterijcapaciteit beschikken en zo meer kilometers in een puur-elektrische modus kunnen afleggen. Rijden op de batterij, die daarna weer opgeladen wordt, bijvoorbeeld van het lichtnet, gebeurt dus in een *charge-depleting* (CD) modus.

Binnen deze twee hoofdcategorieën zijn er nog meerdere verschillende modes. Grote en zware voertuigen, met een sportief karakter, kunnen de combinatie van verbrandingsmotor en elektromotor gebruiken om harder te accelereren dan op één van deze motoren alleen. Dit kan een soort 'sportmodus' zijn. Bovendien moeten we stellen dat de officiële $CO_2$ uitstoot van een PHEV – en hierbij het voordeel dat een constructeur eruit kan halen voor haar $CO_2$ streefwaarde – sterk afhangt van de onderliggende assumptie van het aandeel elektrisch rijden (CD-modus) tijdens de typegoedkeuring. Dit aandeel ligt tijdens deze test hoog, waardoor de $CO_2$ uitstoot laag is. Het verschil tussen de test en de werkelijkheid

wordt bovendien grotendeels veroorzaakt door de veronderstelde laadfrequentie tussen trips. Dit laatste wordt ook aangegeven met de utiliteitsfactor, welke de verhouding is van de elektrisch gereden kilometers tot de totale afstand van de trip. Een bijkomende, maar kleinere, oorzaak van het verschil de grote actieradius in de WLTP CD modus en realistische actieradius is bijvoorbeeld de omgevingstemperatuur. Tijdens de WLTP test wordt immers een constante temperatuur van 23°C gehanteerd, terwijl de gemiddelde jaartemperatuur in Europe amper 9°C bedraagt.

Figuur 3 geeft een grafische voorstelling van de elektrificatiegraad van voertuigen, waarbij naarmate de verhouding van elektrische aandrijving tot het rijden op de verbrandingsmotor groter wordt, de totale efficiëntie van de aandrijflijn stijgt. Belangrijk om weten is dat de aangegeven elektrificatiegraad per subcategorie *indicatief* is voor het potentieel van de technologie. De hierboven vermelde 'niet-stekker' hybride omvat in deze figuur zowel de *micro, medium, mild* als *strong* hybridemodellen.




Figuur 3: Indicatie van het effect van de elektrificatie op de totale efficiëntie van een aandrijflijn. Uiterst links op de x-as levert een verbrandingsmotor de gehele aandrijving, naarmate de hybridisatie toeneemt stijgt het aandeel elektrische aandrijving tot het punt uiterst rechts, waar de volledige aandrijving elektrisch plaatsvindt **(Bron: Nils Hooftman 2018)**

Hoewel de nadruk van dit werk ligt op de inzichten die tot op heden verworven zijn voor stekkerhybrides, wordt er voor andere voertuigen dan personenwagens ook gekeken naar de 'niet-stekker' hybridevormen, die voornamelijk in *charge sustaining* (CS) modus rijden. In de impactanalyse van de nieuwe kerndataset voor emissiefactoren voor hybride voertuigen (zie hoofdstuk 5 Impactanalyse) wordt daarom ook een update gegeven van de 'niet-stekker' hybridetechnologie voor personenwagens. De reden waarom we deze subcategorie in dit rapport niet verder in detail behandelen voor personenwagens is dat niet-stekkerhybrides intussen ook 'conventioneel' worden als gevolg van de strenge $CO_2$-eisen die de Europese Commissie aan de voertuig-constructeurs oplegt (zie eerder).

Voor plug-in hybride architecturen zijn we op zoek gegaan naar betrouwbare testdata in de literatuur voor zowel personenwagens, (lichte) vrachtwagens als vrachtwagens en bussen. Om onvolledigheden en/of hiaten in de literatuur te kunnen adresseren wordt dit literatuuronderzoek aangevuld met een SEMS-meetcampagne door projectpartner TNO, waarbij drie PHEV-modellen gedurende een periode van bijna twee maanden lang werden gemonitord voor hun werkelijke uitstoot aan $NO_x$ en $CO_2$, terwijl hun energieverbruik ook in kaart wordt gebracht. Dit laatste is een belangrijke input voor de simulaties die tot slot worden beschreven door partner EMISIA om in te kunnen schatten hoe PHEV-modellen zouden kunnen evolueren in de (nabije) toekomst, op basis van ons eigen deskundig inzicht. Hiernaast wordt ook

een hybride bus gemodelleerd om voor realistische verkeerssituaties na te kunnen gaan in welke mate zij kunnen bijdragen aan een reductie van schadelijke polluenten d.m.v. hun mogelijkheid tot rijden in *zero-emissiemodus*. In geval van zwaar vervoer, zoals voor vrachtwagens en bussen, is de simulatie van hun werking een belangrijke stap in het ontwikkelingsproces, gezien de hoge productiekosten die gepaard gaan met deze voertuigen.

# 2 LITERATUURONDERZOEK

Dit hoofdstuk schetst een overzicht van de geconsulteerde wetenschappelijke rapporten en vat de gehanteerde methodologie en de belangrijkste bevindingen samen, gevolgd door een bespreking van de emissiefactoren die hieruit voortvloeien. Wat betreft de literatuur deelde partner TNO haar reeds opgedane ervaringen met de werkgroep, terwijl daarnaast een zoekactie werd ingezet in de wetenschappelijke databank '*Web of Science*'. Via een zogenaamde 'sneeuwbalzoektocht' werd gekeken naar welke publicaties we konden vinden via verschillende combinaties van de trefwoorden '*(plug-in) hybrid electric vehicles*', *'pollutants', 'emissions', 'PEMS', 'RDE'*, en '*real-world emissions*'. Verder werd er gekeken naar zowel resultaten voor personenwagens als voor (lichte) vrachtwagens en bussen. Wat al snel duidelijk werd is dat het beperkte aantal commercieel beschikbare plug-in hybridemodellen voor personenwagens, en het quasi uitblijven ervan voor (lichte) vrachtvervoer, zich vertaalt in een zéér beperkte verscheidenheid aan publicaties anno 2019. Dit benadrukt het belang van ons project, gezien de hiaten in de literatuur worden opgevangen met eigen data via metingen en de simulaties. De volgende rapporten en publicaties werden geschikt bevonden:

1. **Emission performance of a diesel plug-in hybrid vehicle (TNO ref. R10858, 2015)**
    a. Analyse van een dieselhybride personenauto
2. **Monitoring van plug-in hybride voertuigen 2012-2016 (TNO ref. R10938, 2016)**
    a. Analyse van 11 plug-in-hybridevoertuigen voor hun verbruik en aandeel elektrisch gereden kilometers
3. **Evaluation of exhaust emissions from three diesel-hybrid cars and simulation of after-treatment systems for Ultralow Real-World NOx emissions (Franco et al., 2016)**
    a. Analyse van drie vroege PHEV-modellen volgens verschillende RDE testroutes
4. **TRANSFORMERS D6.4 (EU H2020 Project, 2017)**
    a. Model voor voorspelling besparing brandstofverbruik door hybridesysteem voor een N3-trekker-opleggercombinatie in vlak en heuvelachtig gebied
5. **Internship Vignesh Gowrisankar (TNO, 2018)**
    a. Emissiefactoren HD plug-in hybriden over inzetprofielen
6. **Analysis of Pollutant Emissions of three Plug-in Hybrid Electric Vehicles (Ehrenberger et al., 2018)**
    a. *Real-world driving emissions* (RDE) – PEMS metingen volgens typegoedkeurings-procedure (dus géén metingen buiten deze testcondities)
7. **Real-world measurement of hybrid buses' fuel consumption and pollutant emissions in a metropolitan urban road network (Keramydes et al., 2018)**
    a. EMISIA-studie naar de werkelijke uitstoot van hybride bussen in Hongkong, gebruik makend van PEMS

## 2.1 RAPPORT 1: EMISSION PERFORMANCE OF A DIESEL PHEV (TNO, 2015)

### 2.1.1 Introductie

In het kader van een verbetering van de luchtkwaliteit en de toedracht daarvoor door personenwagens onderzocht TNO in 2015 de praktijkemissies van een diesel PHEV personenwagen. Het enige commercieel beschikbare model dat toen voorhanden was, een Euro 5 genormeerde Volvo V60 PHEV, werd daarom gemonitord in reëel gebruik door middel van SEMS apparatuur. De aanzet tot dit onderzoek, dat vóór het dieselschandaal werd gevoerd, was het feit dat moderne dieselmotoren (toen Euro 5) in de praktijk tot wel 30 keer hogere $NO_x$ emissies lieten optekenen dan benzinemotoren. Om te toetsen of diesel PHEV's een effectief een verbetering/verslechtering zouden teweeg brengen inzake de uitstoot van $NO_x$, werd deze studie gestart. Naast $NO_x$ werd er ook gekeken naar de werkelijke uitstoot van $CO_2$, waardoor de studie aansluit op SEMS onderzoek op benzine PHEV's in 2014 (Ligterink and Eijk 2014).

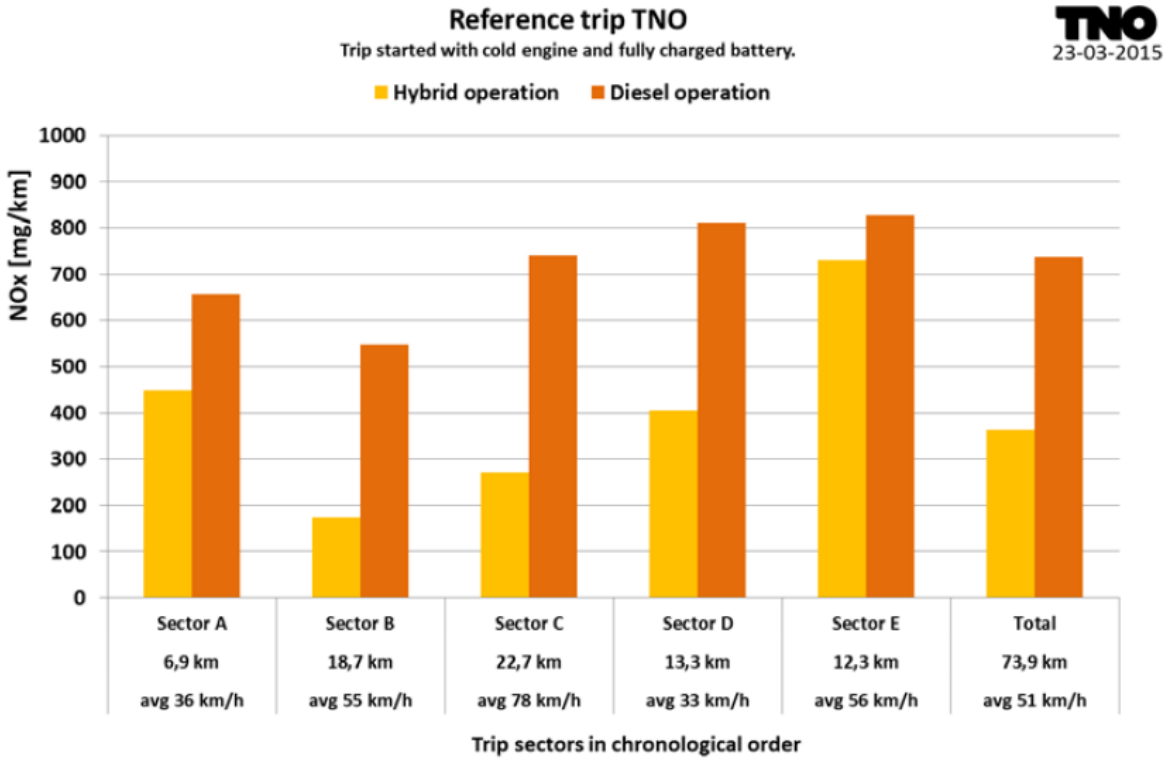
### 2.1.2 Methodiek

Eerst werd het voertuig uitgerust met de SEMS apparatuur, hetgeen voornamelijk bestaat uit een $NO_x$–$O_2$ sensor en een thermokoppel die in de uitlaat van het voertuig gemonteerd worden. Het thermokoppel meet de uitlaatgastemperatuur, terwijl de andere sensor de concentraties van de twee chemische moleculen meet. Hiernaast registreert de SEMS via het *Controller Area Network* (CAN) of ook de boordcomputer van het voertuig het luchtmassadebiet dat in de cilinders wordt gezogen, om zo uiteindelijk een berekening te kunnen maken van de momentane uitstoot van $CO_2$ en $NO_x$. Via een ingebouwde GPS wordt nagegaan waar en wanneer men met het voertuig rijdt. De accuratie van SEMS alsook de methode werden bewezen in voorafgaande studies (Vermeulen, Van Goethem, et al. 2014).
Drie routes werden uitgestippeld voor de test, bestaande uit een stedelijke rit, een referentieroute waarover verschillende voertuigen worden getest door TNO, en een snelwegtest in Duitsland. De referentietrip omvat zowel een koude als een warme start, alsook stedelijk, ruraal en snelweg rijden. In totaal werd er vijf dagen getest, waarbij de batterij enkel werd opgeladen vóór de allereerste testrit en erna niet meer. Aangaande de aandrijfmodi werd er zowel in de eco-, hybride- als in de powermodus gereden. Tot slot werd er een onderscheid gemaakt tussen een economische, gewone en sportieve rijstijl.

### 2.1.3 Resultaten

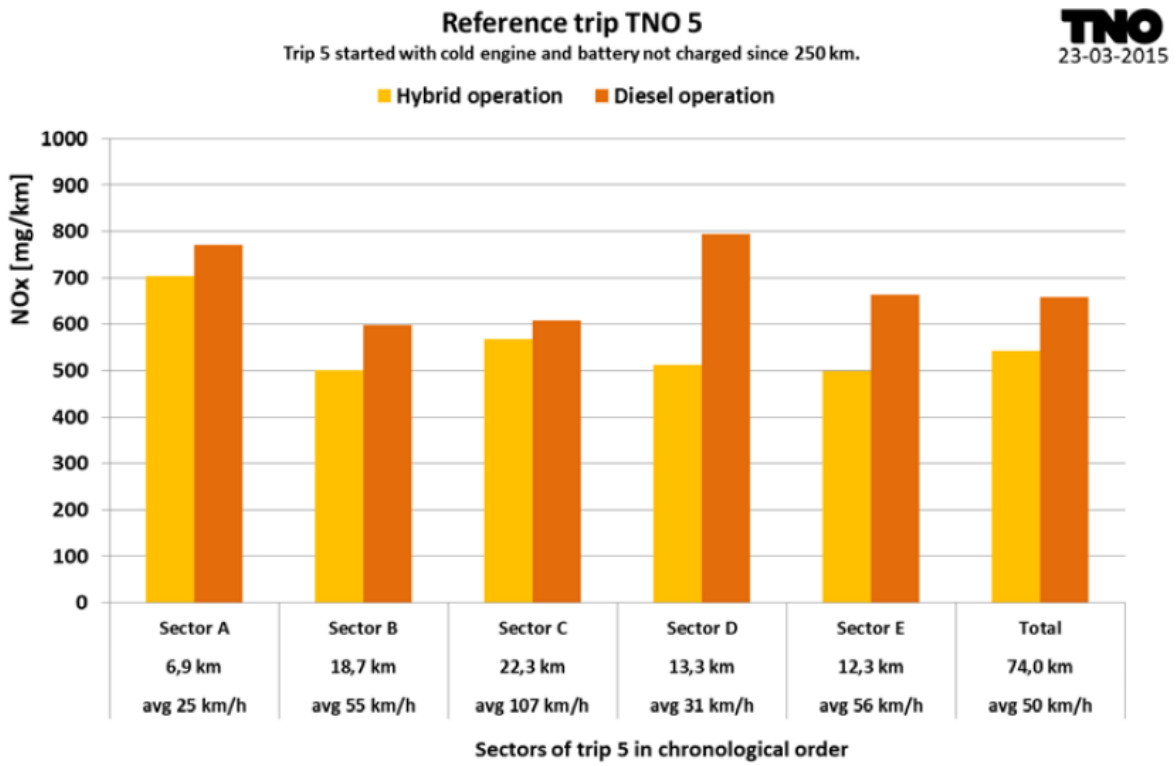
Voor wat betreft de uitstoot van $NO_x$ kunnen we concluderen dat ook plug-in dieselvoertuigen (uiteindelijk komt er naast dit model enkel nog een Audi Q7 diesel PHEV op de markt) de uitstoot vele malen hoger ligt dan dat dit het geval is voor hun benzinevarianten. Zo werd er een gemiddelde uitstoot van 350-600 mg/km opgemeten voor de diesel PHEV, vergeleken met gemiddeld 20 mg/km voor de benzinevarianten uit een eerdere monitoringsstudie (Ligterink and Eijk 2014). Zo volgen ook dit PHEV dieselvoertuig de algemene trend van Euro 5 dieselwagens om de limietwaarde (Euro 5 = 180 mg/km) met een factor 3–5 te overschrijden. Opvallend blijkt dat de momentane emissies erg kunnen variëren en sterk afhangen van het oplaadgedrag van de gebruiker. Zo zou het frequenter opladen van dit PHEV model $NO_x$ reducties tot 30% kunnen teweeg brengen.
In de referentietrip, waarbij het voertuig startte met een volle batterij en een stedelijke trip in 'ecomodus', werd de laagste gemiddelde uitstoot (350 mg/km) genoteerd. Bovendien zien we dat de duur van een trip, het laadniveau van de batterij en de rijstijl doorslaggevend zijn om de $NO_x$ emissies zo laag mogelijk te houden. Hoe korter de trip, hoe groter het aandeel elektrisch rijden kan zijn, indien de batterij voldoende opgeladen is. Dit betekent dat de limietwaarde van 180 mg/km in realiteit ook gehaald kan worden, al is dit eerder uitzondering dan regel. In dit opzicht is het duidelijk dat een vergroting van de batterijcapaciteit ervoor kan zorgen dat de reële emissies omlaag kunnen.

De referentietrip wordt grafisch weergegeven in Figuur 4, zij het opgedeeld in vijf delen (sectoren). Per sector wordt de gemiddelde uitstoot gegeven voor zowel de hybridemodus als de gemiddelde feitelijke uitstoot van de verbrandingsmotor per sector. In sector A zien we het effect op de $NO_x$ uitstoot in hybridemodus van de verbrandingsmotor die aan het opwarmen is, waarna deze wordt uitgeschakeld (sectoren B en C). We zien dat de emissielimiet van 180 mg/km ook in de praktijk mogelijk is (sector B, hybridemodus). Eens de batterij leeg geraakt (sectoren D en E) merken we op dat ook in hybridemodus de uitstoot toeneemt, gezien het aandeel rijden op verbrandingsmotor stijgt. De gemiddelde uitstoot over alle sectoren ligt op 380 mg/km in hybridemodus, met als uitersten 180 tot 720 mg/km. Wat betreft de effectieve uitstoot van de dieselmotor, zien we een emissiespreiding tussen de 550 en 820 mg/km.



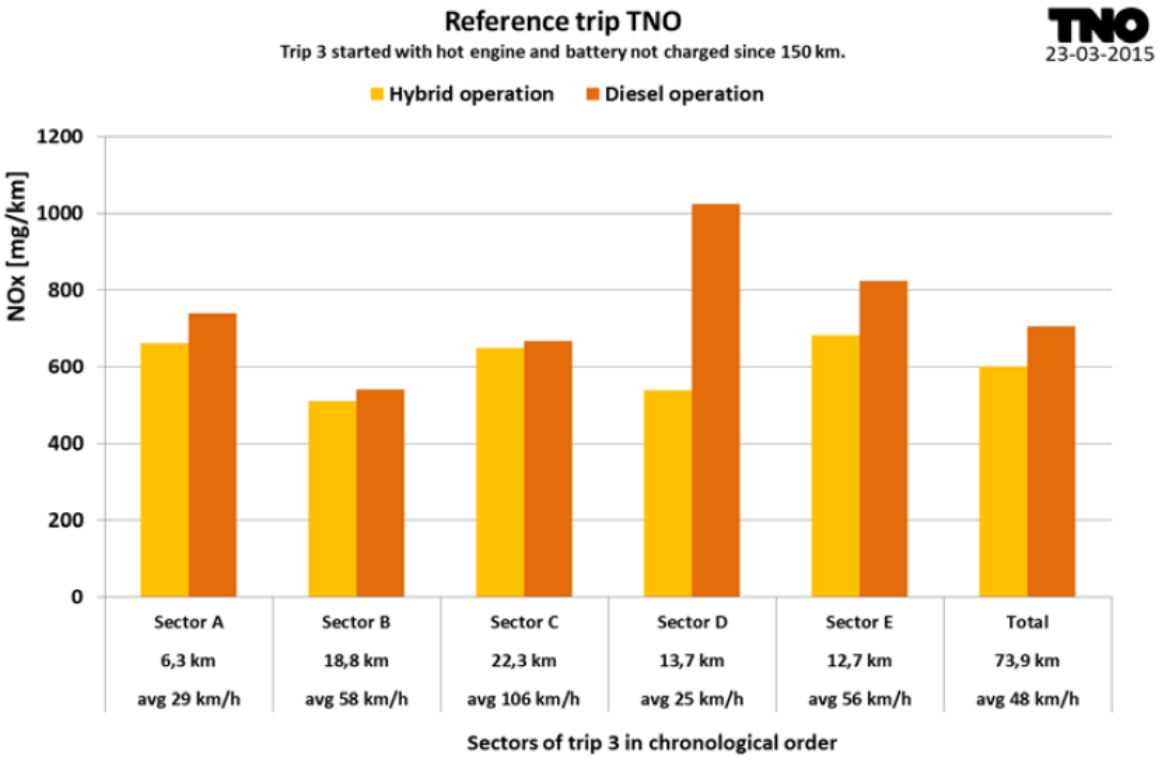

Figuur 4: $NO_x$ uitstoot tijdens de referentietrip na koude start met een opgeladen batterij, opgedeeld in 5 sectoren. Een onderscheid wordt gemaakt tussen de uitstoot in hybridemodus en de effectieve uitstoot van de dieselmotor **(Bron: Kadijk, Buskermolen, and Spreen 2015)**

Figuur 5 toont de impact van een ontladen batterij en een koude start op de emissie van $NO_x$ tijdens de referentietrip. Hier ligt het gemiddelde in hybridemodus op 530 mg/km, gezien de verbrandingsmotor nagenoeg constant moet werken. De spreiding ligt hier tussen de 500 mg/km en 700 mg/km in hybridemodus. Kijken we naar de effectieve uitstoot van de dieselmotor, dan zien we een spreiding tussen 600 en 800 mg/km.




Figuur 5: $NO_x$ uitstoot tijdens de referentietrip na koude start met een ontladen batterij, opgedeeld in 5 sectoren. Een onderscheid wordt gemaakt tussen de uitstoot in hybridemodus en de effectieve uitstoot van de dieselmotor **(Bron: Kadijk, Buskermolen, and Spreen 2015)**

Tot slot toont Figuur 6 de invloed van een referentietrip met warme start, die eveneens werd uitgevoerd met een ontladen batterij. Ook hier werkt de verbrandingsmotor nagenoeg constant, hetgeen resulteert in een effectieve uitstoot tussen de 500 mg/km en 1030 mg/km. Gemiddeld tekenen we 600 mg/km op in de hybridemodus. Gezien de verschillen tussen een warme en koude start gering zijn, kan er uitgegaan worden van een stabiele $NO_x$ emissiecontrolestrategie, onafhankelijk van de uitlaatgastemperatuur.




Figuur 6: $NO_x$ uitstoot tijdens de referentietrip na warme start met een opgeladen batterij, opgedeeld in 5 sectoren. Een onderscheid wordt gemaakt tussen de uitstoot in hybridemodus en de effectieve uitstoot van de dieselmotor **(Bron: Kadijk, Buskermolen, and Spreen 2015)**

De resultaten voor de uitstoot van $CO_2$ tonen aan dat het 'ecologisch' rijden (of in Ecomodus) in een stedelijke context kan leiden tot reducties tot 30% t.o.v. de hybridemodus, terwijl de powermodus voor een meerverbruik van zo'n 10% zorgt in dezelfde situatie. Hiernaast wordt bevestigd dat hoe groter het aandeel elektrisch rijden is, hoe lager de $CO_2$ uitstoot kom te liggen. Voor dit testvoertuig noteren we dat de dieselmotor gedurende de referentietrip ca. 45% van de tijd werkt in de eerste sector (A), welke een stedelijke trip met opgeladen batterij voorstelt. Dit percentage stijgt naar gemiddeld 62% tot 65% voor de hierop volgende tests. Vergeleken met de typegoedkeuringswaarde van 48 $gCO_2$/km gaf deze meetcampagne een gemiddelde tussen de 100 – 240 g/km. Dit toont aan dat er in de (toenmalige NEDC) typegoedkeuringsprocedure meer elektrisch wordt gereden dan in werkelijkheid (het aandeel elektrisch rijden tijdens de NEDC test kwam neer op zo'n 67%). Desalniettemin kunnen we ook hier stellen dat de typegoedkeuringswaarde van 48 g/km in de praktijk ook kan gehaald worden, indien de batterij geladen is en de trip kort wordt gehouden.

### 2.1.4 Conclusie

Deze PHEV scoort goed op kortere ritten met lagere snelheden bij een volgeladen batterij. Daarbuiten draait de motor quasi constant en stoot die 2-5 keer meer $NO_x$ uit dan de limiet van 180 mg/km. Gemiddeld werd een $CO_2$ uitstoot van 100-240 g/km gemeten of een factor 2 – 5 meer dan tijdens typegoedkeuring. Vergeleken met een conventionele dieselwagen zien we een veel grotere spreiding van de resultaten gezien er ook een gedeelte puur elektrisch wordt gereden. De emissies hangen sterk af van het rijgedrag van de chauffeur en hoe dikwijls de accu wordt geladen:

- In realiteit wordt 70-85% van de gereden afstanden gedekt door een motoraandrijving. Door het aandeel elektrisch rijden naar 75% te brengen zou de limiet van 180 mg/km $NO_x$ gehaald kunnen worden
- Ook de powertrainmodus (eco, hybride, sport) is een sterke determinant

- 48 g/km zou enkel en alleen kunnen bij 100% geladen voertuigen, in ecostand, aan lage snelheden, bij korte trips en indien er na elke trip wordt geladen
- Emissies zijn ofwel nul ofwel aan een constant hoog niveau
    - Gemiddelden omlaag halen kan dus enkel door aandeel EV mode te verhogen
- Oplaad- en rijgedrag
    - Bij correct laden en rijden kan PHEV-technologie wel degelijk voor zuinigere en schonere technologie zorgen

### 2.1.5 NOx emissiefactoren

Over de verschillende trips heen werd een gemiddelde uitstoot van 350-700 mg/km gemeten in hybridemodus. De laagste concentratie meten we op bij geladen batterij tijdens stedelijke trip en *ecodriving*, de hoogste waarde tijdens DPF regeneratie en tijdens power mode, niet noodzakelijk bij de hoogste snelheden. Bij kortere trips dan de referentietrip van 90 min (bv. 20 min) en een lagere gemiddelde snelheid zal er aanzienlijk meer elektrisch gereden worden en is het aannemelijk dat de Euro 5 emissielimiet van 180 mg/km niet overschreden wordt.

Tabel 1: Gemiddelde emissiefactoren gemeten over de referentietrip tijdens hybridemodus

| mgNOx/km | Stedelijk | Ruraal | Snelweg | Gewogen gemiddelde |
|---|---|---|---|---|
| **Koude start volle accu** | 450 | 180 - 360 | 400 - 720 | 360 |
| **Koude start lege accu** | 700 | 500 – 550 | 500 | 540 |
| **Warme start lege accu** | 650 | 500 - 620 | 560 - 640 | 600 |

## 2.3 RAPPORT 2: MONITORING VAN PHEV'S APRIL 2012 T/M MAART 2016 (TNO, 2016)

### 2.3.1 Introductie

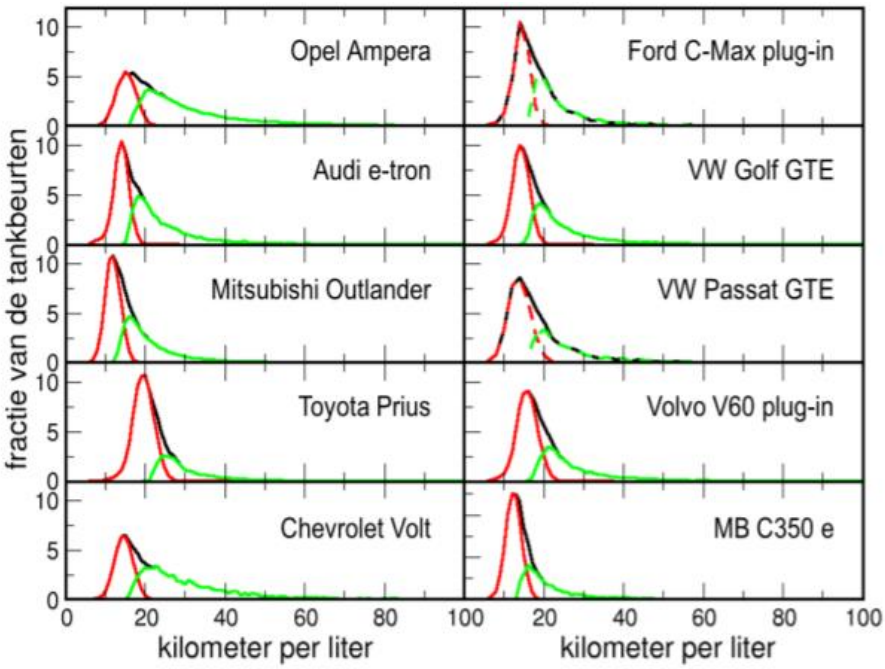
In dit rapport vat TNO de situatie samen van een monitoringscampagne waarbij over verschillende jaren heen wordt gekeken naar de evolutie van het aantal elektrisch gereden kilometers met Nederlandse PHEV bedrijfswagens. Deze studie werd uitgeschreven door het Nederlandse Ministerie van Infrastructuur en Milieu om na te gaan of het fiscaal voordeel dat PHEV gebruikers genieten dankzij de lage $CO_2$ emissies volgens hun typegoedkeuringsattest gerechtvaardigd is. Op die manier wou men staven of een eventueel meerverbruik door PHEV's in de praktijk geen ondergraving vormde van het fiscale stimuleringsbeleid dat in Nederland werd gevoerd voor de technologie, hetgeen tot het hoogste aantal PHEV registraties in Europa leidde tot aanpassing van het gunstregime in 2015 (Nils Hooftman 2018).
De doelstellingen die werden opgesteld voorafgaand aan dit onderzoek zijn:

1. Het percentage in kaart brengen van PHEV's waarvoor minstens één laadpunt op het werk of thuis voorhanden is;
2. Het percentage PHEV gebruikers aantonen dat minstens gemiddeld één keer per dag het voertuig oplaadt;
3. Het aandeel elektrische kilometers aantonen, in vergelijking met de norm
4. De hieruit resulterende $CO_2$ uitstoot becijferen als de procentuele afwijking t.o.v. het normverbruik volgens typegoedkeuring

Wat voor deze studie naar emissiefactoren belangrijk is, zijn voornamelijk de bevindingen uit de derde doelstelling gezien deze mee bepalend zijn voor de zogenaamde utiliteitsfactor van PHEV's, waarmee wordt aangetoond hoeveel ze werkelijk als *zero-emissie* voertuig worden ingezet.

### 2.3.2 Methodiek

Op basis van de tank- en laadpasdata die werd vrijgegeven door bedrijven MTC en Travelcard Nederland BV wordt nagegaan wanneer er werd getankt en hoeveel liter. Via laadpasdata wordt dan weer gekeken naar hoeveel kWh er werd geladen en wanneer. Door deze data samen te voegen voor een vloot van 26.000 voertuigen, waarvan er 19.000 overbleven na kwaliteitscontrole van de laad-/tankpasdata.
Voor wat betreft de bepaling van het praktijkverbruik volstaat in principe de tankpasdata en het gekende verbruik van de conventionele tegenhanger van de PHEV modellen. Er is echter niet van elke PHEV zulke tegenhanger voorhanden, denk bijvoorbeeld aan de Opel Ampera. Daarom wordt een inschatting gemaakt op basis van de spreiding in het gemonitorde brandstofverbruik. Via het geschatte verbruik kan dan een bepaling worden gedaan van het gemiddeld aandeel elektrisch rijden. Figuur 7 geeft weer hoe dit in zijn werk gaat. Zo zien we een zwarte curve die de verdeling van alle tankbeurten weergeeft, op basis van het gemiddelde verbruik per tankbeurt. Het linkerdeel van de verdeling toont de inschatting van het gemiddeld verbruik van de verbrandingsmotor, zo zal bij PHEV's die voornamelijk thermisch worden aangedreven in de praktijk het aantal km/l laag zijn. Dit zien we bijvoorbeeld voor de Mitsubishi Outlander. De rode curves geven een symmetrische variatie in het verbruik van de verbrandingsmotor weer, welke ontstaat door omgevingsomstandigheden, het type gebruiker en het type voertuig. Wanneer we de rode curve aftrekken van de totale populatie tankbeurten, dan resteren waarbij er deels elektrisch werd gereden tussen twee tankbeurten (groene curves). Hoe lager het gemiddeld verbruik per km, hoe meer er elektrisch werd gereden.




Figuur 7: Verdeling van de tankbeurten volgens het gemiddeld verbruik/tankbeurt, uitgedrukt in km/l, en het gemiddeld verbruik van de verbrandingsmotor. De onderbroken lijnen tonen aan dat voor bepaalde modellen het aantal voertuigen in de testpopulatie nog te laag was om een nauwkeurige schatting te kunnen maken van het praktijkverbruik **(Bron: Ligterink and Smokers 2016)**

Vervolgens wordt er gekeken naar de evolutie van het aantal elektrisch gereden kilometers over de steekjaren 2012-2016 heen. Hier kijkt men op twee manieren naar de trends:

1. Bepaling van trends in aandeel EV km volgens **vlootperspectief**:
- Per voertuig o.b.v. totaal getankte brandstof gedeeld door totaal aantal km
    - Per model o.b.v. een weging per voertuig over aantal km, waarbij de resultaten over de jaren heen nagenoeg constant blijven
- Per PHEV vloot o.b.v. weging van de resultaten per model over aantal gereden km
    - Hier weegt het praktijkverbruik van auto's die veel km rijden zwaarder door
2. Bepaling van trends in aandeel EV km volgens **gebruikersperspectief**:
- Verbruik en elektrische km per model door voertuigresultaten te middelen over alle andere voertuigen van hetzelfde model
- Gemiddelden van alle gebruikers door resultaten per model te middelen over totaal n voertuigen
    - Even zwaar 'gewicht' per gebruiker, ongeacht het aantal km

### 2.3.3 Resultaten

In Tabel 2 wordt de evolutie weergegeven van het aantal elektrisch gereden kilometers volgens het vlootperspectief. Links in de tabel staat dit aandeel volgens de typegoedkeuring aangegeven, terwijl in de kolommen die hierop volgen de praktijkwaarden per voertuigmodel staan opgelijst in de tijdspanne Q2 2013 – Q1 2016. De waarden in het grijs zijn indicatief gezien er ten tijde van het opstellen van dit rapport nog geen jaarcijfers bekend waren. Wat opvalt is dat het jaargemiddelde over alle modellen heen beduidend afnam in deze tijdspanne, tot een gemiddelde van 30%. Wat het rapport nog weergeeft is hoe de 'slechtste' 25% van de PHEV gebruikers scoren. Hun jaargemiddelde komt neer op een aandeel van slechts 7% elektrisch rijden.

Tabel 2: Het aandeel elektrisch gereden kilometers volgens het vlootperspectief **(Bron: Ligterink and Smokers 2016)**

| | | Voortschrijdend jaargemiddelde (op basis van jaar voorafgaand aan einde kwartaal) | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Gemiddelden op basis van weging over kilometers* | Type-keuring | 2013 Q2 | 2013 Q3 | 2013 Q4 | 2014 Q1 | 2014 Q2 | 2014 Q3 | 2014 Q4 | 2015 Q1 | 2015 Q2 | 2015 Q3 | 2015 Q4 | 2016 Q1 |
| Opel Ampera | 77% | 45% | 46% | 46% | 46% | 46% | 46% | 46% | 45% | 45% | 44% | 44% | 44% |
| Chevrolet Volt | 77% | 40% | 43% | 43% | 43% | 44% | 45% | 45% | 45% | 45% | 43% | 42% | 44% |
| Toyota Prius Plug-in | 50% | 14% | 17% | 16% | 16% | 17% | 17% | 17% | 17% | 17% | 16% | 16% | 17% |
| Volvo V60 PHEV | 67% | 28% | 25% | 24% | 23% | 24% | 25% | 25% | 24% | 24% | 24% | 24% | 26% |
| Mitsubishi Outlander PHEV | 68% | | | 23% | 27% | 32% | 34% | 33% | 31% | 30% | 31% | 30% | 32% |
| Audi e-tron | 67% | | | | | | | | 21% | 30% | 32% | 30% | 31% |
| VW Golf GTE | 66% | | | | | | | | 19% | 26% | 28% | 27% | 29% |
| Ford C-Max plug-in hybride | 64% | | | | | | | | | | 32% | 31% | 27% |
| Mercedes-Benz C350 e | 55% | | | | | | | | | | 25% | 22% | 25% |
| VW Passat GTE | 67% | | | | | | | | | | | 26% | 30% |
| BMW i3 | 86% | | | | | | | 87% | 83% | 83% | 83% | 83% | 82% |
| Gemiddeld (jaargemiddelden) | | 44% | 37% | 36% | 33% | 32% | 32% | 32% | 30% | 30% | 30% | 29% | 30% |
| Gemiddeld (alle data) | | 36% | 36% | 34% | 32% | 32% | 32% | 32% | 30% | 30% | 30% | 29% | 30% |

Volgens het gebruikersperspectief zien we een lichte toename van het aandeel EV rijden. Deze toename kunnen we wijten aan de gelijke behandeling van gebruikers waarbij het praktijkverbruik van PHEV-gebruikers die veel km afleggen niet doorweegt. Ook hier noteren we een significante daling van de gemiddelden door stelselmatige introductie van modellen met kleinere range. Volgens dit perspectief werd een inschatting gemaakt voor de 25% beste gebruikers en de 50% beste gebruikers. Hun gemiddeld aandeel elektrisch rijden ligt respectievelijk op 55% en 47%.

Tabel 3: Het aandeel elektrisch gereden kilometers volgens het gebruikersperspectief **(Bron: Ligterink and Smokers 2016)**

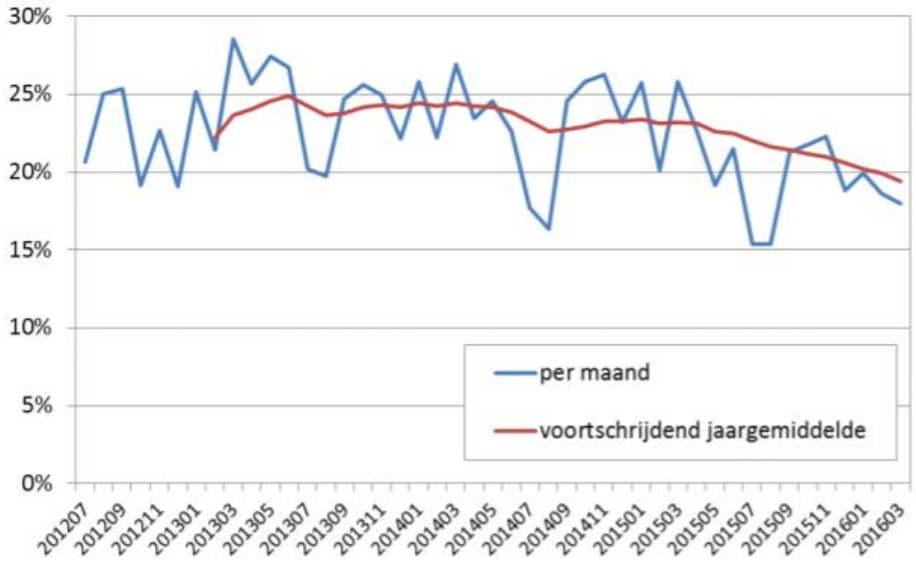
| | | Voortschrijdend jaargemiddelde (op basis van jaar voorafgaand aan einde kwartaal) | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Gemiddelden op basis van weging over voertuigen* | Type-keuring | 2013 Q2 | 2013 Q3 | 2013 Q4 | 2014 Q1 | 2014 Q2 | 2014 Q3 | 2014 Q4 | 2015 Q1 | 2015 Q2 | 2015 Q3 | 2015 Q4 | 2016 Q1 |
| Opel Ampera | 77% | 46% | 48% | 48% | 48% | 49% | 49% | 49% | 48% | 47% | 47% | 46% | 46% |
| Chevrolet Volt | 77% | 44% | 48% | 47% | 47% | 48% | 49% | 48% | 47% | 47% | 46% | 46% | 48% |
| Toyota Prius Plug-in | 50% | 15% | 19% | 17% | 16% | 18% | 18% | 18% | 18% | 18% | 17% | 17% | 18% |
| Volvo V60 PHEV | 67% | 30% | 31% | 26% | 23% | 25% | 26% | 25% | 24% | 24% | 25% | 24% | 27% |
| Mitsubishi Outlander PHEV | 68% | | | 29% | 28% | 34% | 35% | 34% | 31% | 32% | 32% | 31% | 33% |
| Audi e-tron | 67% | | | | | | | | 21% | 32% | 34% | 31% | 31% |
| VW Golf GTE | 66% | | | | | | | | 21% | 27% | 30% | 28% | 30% |
| Ford C-Max plug-in hybride | 64% | | | | | | | | | | 37% | 34% | 28% |
| Mercedes-Benz 350 e | 55% | | | | | | | | | 40% | 27% | 23% | 25% |
| VW Passat GTE | 67% | | | | | | | | | | | 29% | 30% |
| BMW i3 | 86% | | | | | | | 89% | 86% | 87% | 86% | 87% | 84% |
| Gemiddeld (jaargemiddelden) | | 46% | 38% | 37% | 33% | 33% | 34% | 33% | 31% | 31% | 31% | 30% | 31% |
| Gemiddeld (alle data) | | 37% | 38% | 35% | 32% | 34% | 34% | 33% | 32% | 31% | 32% | 30% | 31% |

Naast het aandeel elektrisch rijden wordt er ook gekeken naar de gemiddelde uitstoot aan $CO_2$, om na te gaan in welke mate er voor PHEV's eenzelfde toename in verbruik kan worden opgetekend als dat dit het geval is voor conventionele personenwagens. Gezien het toegenomen aandeel grote PHEV's met een kleinere elektrische reikwijdte nam ook in Nederland het gemiddelde normverbruik toe.
Tabel 4 toont de PHEV-vlootgemiddelden gezien over de kwartalen van de gemonitorde tijdspanne. Ook hier zien we in de tweede kolom van links het normverbruik volgens de typegoedkeuring. Merk op hoe het gemiddelde van 92 g/km toenam tot 123 g/km voor alle data. Een selectie van de 50% beste PHEV-gebruikers toont hoe het gemiddelde in 2013 van 72 g/km toenam naar 95 g/km in 2016.

Tabel 4: De gemiddelde $CO_2$ uitstoot per kilometer per PHEV model per kwartaal tussen Q2 2013 en Q1 2016 voor de hele PHEV-vloot in Nederland **(Bron: Ligterink and Smokers 2016)**

| **100%** | | $CO_2$-praktijkemissie [g/km] (voortschrijdend jaargemiddelde op basis van jaar voorafgaand aan einde kwartaal) | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Gemiddelden op basis van weging over kilometers* | Type-keuring | 2013 Q2 | 2013 Q3 | 2013 Q4 | 2014 Q1 | 2014 Q2 | 2014 Q3 | 2014 Q4 | 2015 Q1 | 2015 Q2 | 2015 Q3 | 2015 Q4 | 2016 Q1 |
| Opel Ampera | 27 | 86 | 84 | 84 | 85 | 84 | 85 | 85 | 85 | 86 | 87 | 88 | 88 |
| Chevrolet Volt | 27 | 97 | 92 | 92 | 92 | 91 | 89 | 89 | 90 | 90 | 92 | 94 | 91 |
| Toyota Prius Plug-in | 49 | *104* | 100 | 101 | 102 | 101 | 100 | 100 | 100 | 101 | 101 | 102 | 101 |
| Volvo V60 PHEV | 48 | *122* | *126* | *128* | 129 | 127 | 126 | 127 | 128 | 128 | 128 | 129 | 125 |
| Mitsubishi Outlander PHEV | 44 | | | *155* | *146* | *136* | *132* | 135 | 139 | 139 | 138 | 139 | 135 |
| Audi e-tron | 37-39 | | | | | | | | *133* | *118* | *114* | *118* | 117 |
| VW Golf GTE | 35-37 | | | | | | | | *136* | *124* | *120* | 122 | 118 |
| Ford C-Max plug-in hybride | 46 | | | | | | | | | | *112* | *114* | *119* |
| Mercedes-Benz C350 e | 48-55 | | | | | | | | | | *143* | *149* | *143* |
| VW Passat GTE | 37-39 | | | | | | | | | | | *127* | *121* |
| BMW i3 | 13 | | | | | | | *21* | *27* | *27* | *27* | *27* | *28* |
| Gemiddeld (jaargemiddelden) | | 88 | 90 | 91 | 98 | 100 | 101 | 115 | 119 | 121 | 122 | 124 | 122 |
| Gemiddeld (alle data) | | *92* | *91* | *96* | *104* | *108* | *111* | *115* | *119* | *121* | *121* | *124* | *123* |

Afgaand op de beschikbare laadpasdata wordt eveneens een becijfering gedaan van hoe dikwijls PHEV-gebruikers gemiddeld hun voertuig opladen. Een belangrijke kanttekening die hierbij dient te worden gemaakt is dat deze data enkel een inzicht geeft in de laadbeurten die *buitenshuis* hebben plaatsgevonden, evenmin over laadbeurten die plaatsvonden elders (zoals op het werk) zonder dat er gemeten werd. Bijgevolg zijn de bekomen resultaten een onderschatting van de realiteit. Figuur 8 toont aan dat over de hele testpopulatie gemiddeld 23% van de PHEV-gebruikers dagelijks laadt aan een publieke laadpaal, al noteren we een dalende trend sinds eind 2014.




Figuur 8: Het aandeel voertuigen dat gemiddeld 1x/dag oplaadt aan een laadpunt waarvoor een laadpas nodig is **(Bron: Ligterink and Smokers 2016)**

### 2.3.4 Conclusies

Voortgaand op de oorspronkelijke doelstellingen kan het volgende worden geconcludeerd:

1. Beschikbaarheid laadpunten: >90% thuis of op kantoor
    a. In realiteit waren er echter geen gegevens beschikbaar ter staving hiervan
2. Gebruik laadpunten: >75% laadt gemiddeld 1x per dag op

    a. Realiteit: <25% laadt tenminste 1x per dag op en aantal daalt langzaam
3. Aandeel EV km:
    a. Gemiddeld wordt zo'n 30% van de afgelegde km elektrisch gereden
        i. De 25% slechtste PHEV gebruikers rijden slechts 7% van de tijd elektrisch
    b. De beste 50% van de PHEV gebruikers slagen erin om 46% elektrisch te rijden, de beste 25% tot 55% van de tijd. Ter vergelijking wordt er in de NEDC typegoedkeuringstest uitgegaan van een gemiddeld elektrisch aandeel van 67%.
4. $CO_2$ uitstoot:
    a. Gemiddeld van 96 g/km in 2013 naar 123 g/km in 2015
    b. Verschil met typegoedkeuring is er alleen op vergroot
    c. Beste 50% stoten gemiddeld zo'n 25% minder $CO_2$ uit

Rijgedrag lijkt over deze jaren niet veranderd te zijn, wijzigingen in de trends zijn eerder te wijten aan nieuwe modellen met een kleinere range en/of een hoger verbruik van de verbrandingsmotor. Het normverbruik toont het potentieel van PHEV's, al worden de gebruikers eerder gestimuleerd door fiscale gunstmaatregels dan door ecologische motieven, dit ondergraaft de reductiecapaciteit van de technologie op vlak van emissies. Extra uitstoot bij moderne personenwagens ligt 30 tot 50% hoger dan de norm of gemiddeld 50 g/km. Dit als gevolg van:

- Verschil in inzet van voertuigen
- Rijstijl
- Rijomstandigheden wijken af van de testcondities
- Energieverbruik van verlichting en A/C is anders dan tijdens typegoedkeuringstests
- Start-stop heeft meer effect op de NEDC dan in realiteit
- Toegestane bandbreedtes in de testprocedure

Bij PHEV's is dit gelijk, met de aanvulling erop dat:

- Aandeel EV km bepalend is, dit is afhankelijk van:
    - Capaciteit accu + omgevingsfactoren
    - Beschikbaarheid laadpunten
    - Gebruik van deze infrastructuur door de bestuurder

Slechtste 25% van de PHEV gebruikers rijdt gemiddeld maar 7% van de tijd elektrisch. Hier zit een groot potentieel om het vlootgemiddelde op te kunnen krikken. Als deze gebruikers het gemiddelde laadgedrag van de 75% beste PHEV-rijders zouden overnemen, dan:

- Daalt gemiddelde uitstoot van 123 naar 109 g/km
- Stijgt het aantal EV km van 30 naar 38 %
    - En naar 40% als ze het laadgedrag van de 25% beste gebruikers zouden overnemen

### 2.3.5 NOx emissiefactoren

Hoewel er in deze studie niet werd gekeken naar de werkelijke uitstoot van $NO_x$, kan het aandeel elektrisch rijden bij plug-in hybriden (de utiliteitsfactor) een sterke determinant zijn voor de reductie van schadelijke polluenten. Gecombineerd met het bemeten aandeel elektrisch rijden in de SEMS studie geven de resultaten uit deze studie belangrijke inzichten voor de simulaties die worden uitgevoerd door EMISIA voor de 'PHEV van de (nabije) toekomst'.

## 2.4 RAPPORT 3: EVALUATION OF EXHAUST EMISSIONS FROM THREE DIESEL-HYBRID CARS AND SIMULATION OF AFTER-TREATMENT SYSTEMS FOR ULTRALOW REAL-WORLD NOX EMISSIONS (FRANCO ET AL., 2016)

### 2.4.1 Introductie

Ook de *International Council on Clean Transportation* (ICCT) en het *Joint Research Centre* (JRC) zijn in 2016 in samenwerking met de universiteit van Thessaloniki (AUTH) de praktijkemissies van PHEV personenwagens nagegaan. Drie PHEV modellen werden daarvoor uitgerust met PEMS en de baan opgestuurd, waarna de bekomen resultaten tegen die van de officiële rollenbanktest werden gehouden. Gezien de studie dateert van vóór de introductie van de huidige WLTC testcyclus, wordt de vergelijking gemaakt met de NEDC. De voordelen die aan PHEV technologie worden toegeschreven zijn de volgende:

- Laten het motormanagement toe om de verbrandingsmotor in een gunstiger regime te laten werken, hetgeen een positief effect heeft op diens efficiëntie
- De elektromotor kan kracht bijleveren tijdens optrekken en zo $NO_x$ pieken helpen verminderen tijdens transiënte motorbelasting
- Energie uit de batterij kan toegepast worden ter voorverwarming van de katalysatoren

Met deze praktijktests gaat men na in welke mate de uitstoot van $NO_x$ overeenstemt met het respecteren van de Euro 5 (180 mg/km) en Euro 6 limiet (80 mg/km) volgens de typegoedkeuring.

### 2.4.2 Methodologie

Drie diesel PHEV's werden getest volgens de NEDC en de WLTC op een rollenbank en vervolgens op de baan met draagbare emissiemeetapparatuur (PEMS). De rollenbanktests gebeurden volgens de specificaties die staan beschreven in de relevante wetteksten. Betreffende de testroutes voor de praktijkmeting werd een onderscheid gemaakt tussen:

- Routes 1 en 2: stedelijk/ruraal/snelweg met een heuvelachtig profiel;
- Route 3: voornamelijk snelweg om de potentiële efficiëntiestijging aan hogere snelheden aan te tonen, en;
- Route 4: voornamelijk stedelijk om het potentieel van de hybride aandrijflijn aan te tonen

Elke route werd tweemaal gereden, terwijl de voertuigen voorafgaand aan iedere route werden opgeladen. In totaal werden er 33 PEMS trips gereden.

Tabel 5: Overzicht van de technische parameters van de drie PHEV testvoertuigen **(Bron: Franco et al. 2016)**

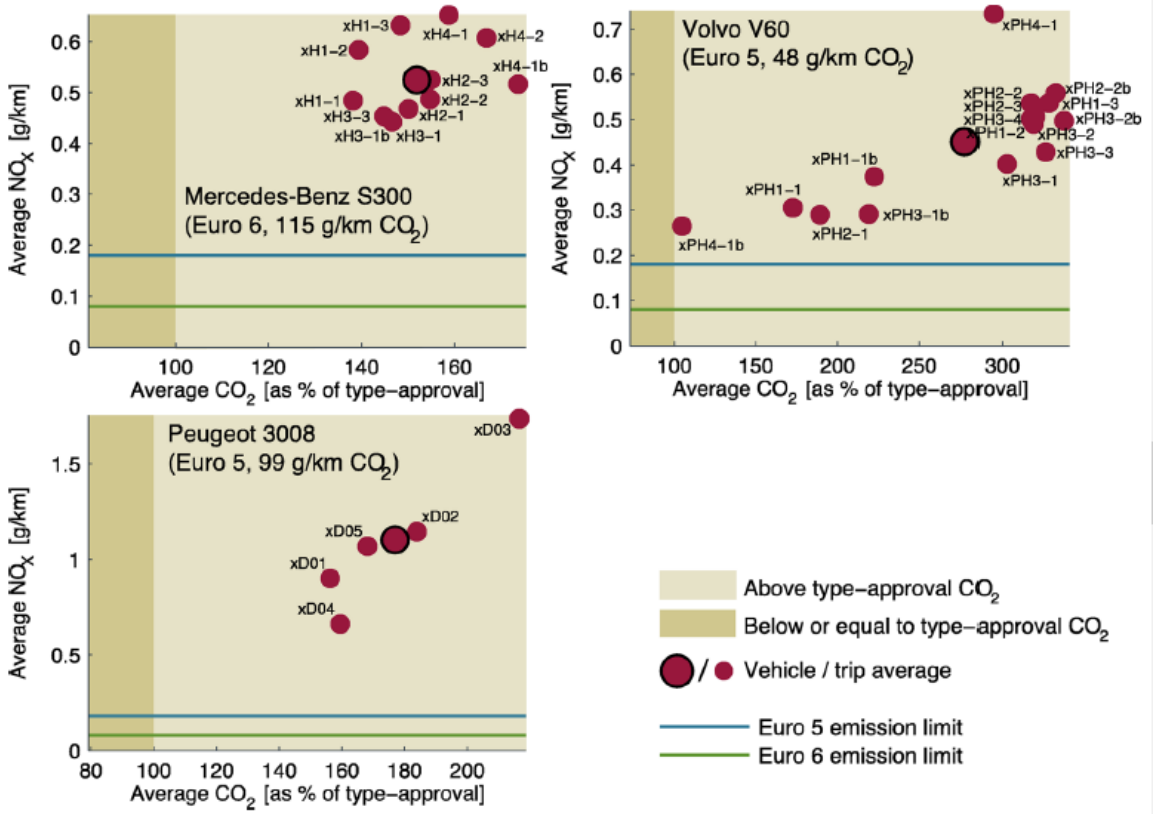
| | Volvo V60 plug-in hybrid | Mercedes-Benz S300 Bluetec hybrid | Peugeot 3008 HYbrid4 |
|---|---|---|---|
| emissions standard | Euro 5 | Euro 6 | Euro 5 |
| ICE fuel | diesel | diesel | diesel |
| hybrid concept | parallel plug-in hybrid | parallel hybrid | parallel hybrid (two electric motors) |
| type-approval $CO_2$ emissions (NEDC procedure) (g/km) | 48 | 115 | 99 |
| exhaust after-treatment | DOC + DPF + EGR | DOC + DPF + EGR + SCR | DOC + DPF + EGR |
| approximate mileage (km) | 1000 | 10000 | 10000 |
| year of manufacturing | 2014 | 2014 | 2012 |
| battery capacity (useable) (kWh) | 8.0 | 0.8 | 1.1 |
| curb weight (kg) | 2052 | 2015 | 1735 |
| nominal battery voltage (V) | 385 | 126 | 202 |
| battery technology | lithium ion | lithium ion | nickel–metal hydride |
| nominal electric motor power (kW) | 52 | 20 | 8 (front axle)<br>27 (rear axle) |

| | | | |
|---|---|---|---|
| ICE power (peak) (kW) | 158 | 150 | 120 |
| transmission | six-speed automatic | seven-speed automatic | six-speed automatic |
| | Emission Tests and Simulation | | |
| chassis dynamometer testing | yes (NEDC and WLTP) | yes (NEDC and WLTP) | no |
| on-road testing with PEMS | yes (16 trips) | yes (12 trips) | yes (5 trips) |
| $NO_x$ after-treatment simulation | yes (LNT and SCRF) | no | no |

[a]DOC, diesel oxidation catalyst; DPF, diesel particulate filter; EGR, exhaust gas recirculation; WLTP, Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure.

### 2.4.3 Resultaten:

Waar de rollenbanktests resulteerden in aanvaardbare emissies van de gereglementeerde polluenten (CO, $NO_x$, THC en PM), zowel volgens de NEDC als de WLTC, lagen de praktijkemissies voor $NO_x$ volgens de PEMS tests vele malen boven de wettelijke limiet. Dit is te zien in Figuur 9. De gemiddelde emissiefactoren per testvoertuig zijn opgelijst in Tabel 6.

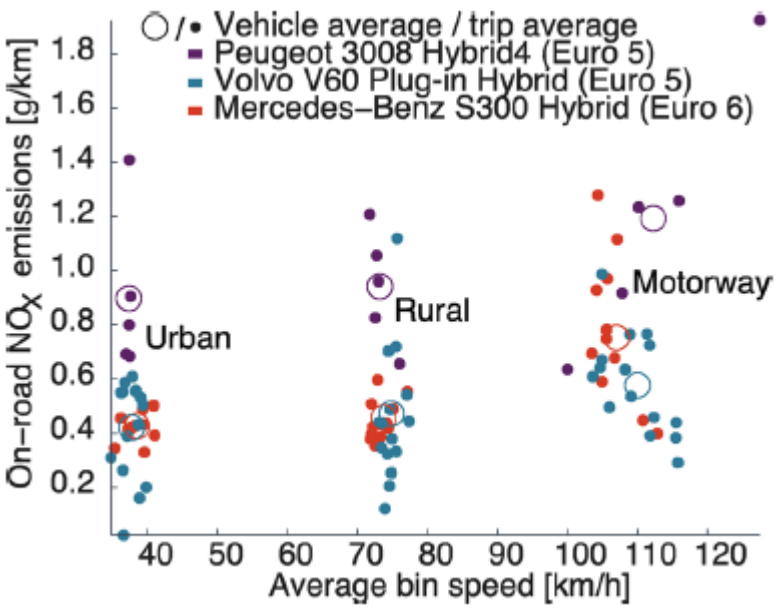



Figuur 9: Overzicht van de $NO_x$ emissiefactoren voor de geteste voertuigen

Tabel 6: Overzicht van de emissiefactoren voor $NO_x$ en $CO_2$, aangevuld met de factor waarmee ze de testlimiet overschrijden

| | NOx [mg/km] | Overschrijdings-factor | $CO_2$ [g/km] | Overschrijdings-factor |
|---|---|---|---|---|
| **Mercedes-Benz S300 Bluetec Hybrid (Euro 6)** | 520 | 6,5 | 175 | 1,52 |
| **Volvo V60 PHEV (Euro 5)** | 450 | 2,5 | 133 | 1,77 |
| **Peugeot 3008 Hybrid4 (Euro 5)** | 1100 | 6,1 | 175 | 1,78 |

Naast deze tripgemiddelden werd er ook gekeken naar de specifieke uitstoot per wegtype, waarbij een onderscheid is gemaakt tussen stedelijk, ruraal en snelweg rijden. Dit is te zien in Figuur 10. De gemiddelde waarden per wegtype zijn dan weer terug te vinden in Tabel 7.




Figuur 10: Overzicht van de stedelijke, rurale en snelwegemissies van $NO_x$ **(Bron: Franco et al. 2016)**

Tabel 7: RDE emissiefactoren voor $NO_x$ per voertuigmodel

| NOx (mg/km) | RDE | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Overall | Urban | Rural | Highway |
| **MB S300** | 520 | 440 | 420 | 750 |
| **Volvo V60** | 450 | 430 | 450 | 570 |
| **Peugeot 3008** | 1100 | 900 | 920 | 1200 |

### 2.4.4 Conclusies

Hoewel het potentieel er is voor PHEV-modellen om aanzienlijk minder brandstof te verbruiken en daaraan gelinkt ook minder polluenten uit te stoten, wordt ook in deze studie aangetoond dat dit potentieel ondergraven kan worden door de manier waarop het voertuig wordt gebruikt, hoe de hybride aandrijving wordt aangestuurd (softwarematig) en hoe de $NO_x$-emissiebestrijdingsmiddelen werden gekalibreerd. Deze kalibraties, waaronder we bijvoorbeeld de dosering van AdBlue of de aansturing van de uitlaatgasrecirculatie kunnen verstaan, wordt in de studie aangehaald als een grotere determinant voor de toekomstige overeenkomst met de emissielimiet voor $NO_x$ tijdens RDE tests voor typegoedkeuring dan dat een verdere hybridisatie van de aandrijving. Zulke kalibratie maakt het verschil tussen Euro 6a, 6b, 6c en Euro 6d(-TEMP).

### 2.4.5 NOx emissiefactoren

Deze werden aangehaald in Tabel 6 en Tabel 7.

## 2.6 RAPPORT 4: TRANSFORMERS (TNO, 2017)

### 2.6.1 Introductie

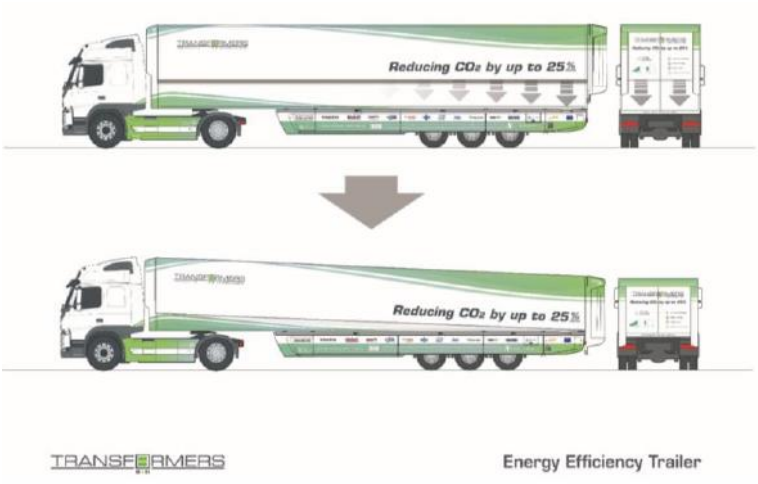
Transformers kadert in een Europa's grootste programma voor innovatie en onderzoek, Horizon 2020, dat loopt tussen 2014 en 2020. Dit specifieke project werd opgezet om nieuwe manieren te vinden om de energie-efficiëntie van vrachtwagens voor transport over lange afstanden te verhogen. Concreet werd er gekeken naar een verbeterde beladingstechniek, een hybride-energiehuishouding en een adaptieve stroomlijning van de trekker-oplegger combinatie. Op deze manier wil men een alternatief vinden voor de wijze waarop vrachtwagens vandaag worden geconstrueerd, zijnde met het oog op en maximale *pay load*, terwijl de laadruimte van een oplegger in realiteit zelden maximaal gevuld is.
De doelstelling van het Transformersproject was om de energieconsumptie tijdens lange-afstandstransport met 25% te doen dalen per tonkilometer, en dit zonder enige wijziging toe te brengen aan de bestaande infrastructuur (wegdek, aansturing verkeerslichten, etc.). Deze optimalisatie zou bovendien eenvoudig toepasbaar moeten zijn zodat de trekker-oplegger combinatie voor elke opdracht geoptimaliseerd kan worden. Om dit doel te bereiken worden volgende innovaties onderzocht:

1. Een '*Hybrid-on-demand*' (HoD) geëlektrificeerde aandrijflijn met als interimdoelstelling 3 tot 5% efficiëntieverbetering)
2. Transformeerbare aerodynamica met als interimdoelstelling een verbetering tot 8%
3. Een verbeterd ontwerp van het interieur van de trailer, nl. een betere ladingsefficiëntie, met als interimdoelstelling een efficiëntiewinst van 3 tot 40%

In welke mate deze innovaties een impact hebben op de bestaande snelweginfrastructuur valt buiten de *scope* van deze studie, hoewel er kan besloten worden dat er geen noemenswaardige impactswijziging zou plaatsvinden vergeleken met conventionele vrachtwagens. De belangrijkste indicatoren die met dit rapport worden besproken zijn de invloeden op energieverbruik, brandstofverbruik en $CO_2$ emissies

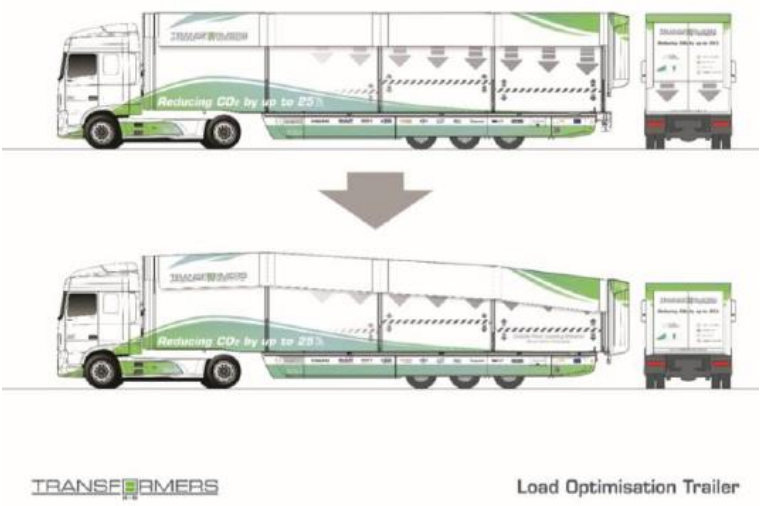
### 2.6.2 Methodiek

In dit project werden zowel twee prototypes/demonstratievoertuigen gebouwd als simulaties uitgevoerd om de effecten van de innovaties te kunnen becijferen. Eén zulk voertuig toont het effect op de energie-efficiëntie van de *hybrid-on-demand* (HoD) aandrijflijn. Hiernaast werd ook een aanpasbare aerodynamica van de oplegger verwezenlijkt, zoals zichtbaar is in Figuur 11. De HoD elektrische aandrijflijn werkt supplementair aan de bestaande dieselmotor en wordt volledig gebouwd op de oplegger, inclusief batterijpakket, de elektrische motor en de koppeling met de wielas. Op deze as wordt zo regeneratief remmen mogelijk gemaakt, waardoor er energie kan worden aangewend om extra kracht te leveren voor de aandrijving in specifieke omstandigheden. Wanneer de laadruimte in de oplegger niet volledig benut hoeft te worden, dan kan het volume hiervan bovendien aangepast worden zodat het geheel met de trekker gestroomlijnder wordt.




Figuur 11: Weergave van het demonstratievoertuig met de aerodynamisch aanpasbare oplegger waarin de hybrid-on-demand module zit ingebouwd **(Bron: Van Zyl et al. 2017)**

Het andere demontratievoertuig toont het effect van een geoptimaliseerde belading, samen met een aerodynamisch aanpasbare vorm van de oplegger. Door middel van een dubbele laadvloer vergroot het ladingsoppervlak en zo het ladingsvolume, in geval het soort lading deze modificaties toelaat. Ook hier zien we dat naast de beweegbare laadvloer het dak van de oplegger kan zakken, terwijl zijpanelen ter hoogte van de wielen en vinnen achteraan de oplegger in vier verschillende standen de aerodynamica kunnen optimaliseren. Dit wordt grafisch weergegeven in Figuur 12.




Figuur 12: Weergave van het demonstratievoertuig met de aerodynamisch aanpasbare oplegger waarin de verstelbare laadvloer zit ingebouwd **(Bron: Van Zyl et al. 2017)**

Gezien de beperkte ruimte voor praktijktests in reëel verkeer (ondanks uitvoerige proeven op een testcircuit), werden een aantal scenario's doorgerekend middels simulaties, om de resultaten die hieruit voortvloeien te valideren met de resultaten van de uitgevoerde praktijktests. Deze scenario's zijn:

- Snelwegritten op vlak wegdek
- Snelwegritten over een combinatie van verschillende soorten wegdek (hellend, vlak, bochten, recht)
- Ritten met frequente veranderingen in hoogteverschil
- Steile beklimmingen
- Ritten in een stedelijke context

### 2.6.3 Resultaten

#### 2.6.3.1 Hybrid-on-demand

Op vlak van de brandstofbesparingen dankzij de *hybrid-on-demand* innovatie werd er zowel getest op een circuit waar druk stedelijk verkeer werd nagebootst, als op de Zweedse publieke weg. De potentiële besparingen zijn onderhevig aan de belading, het wegtype, de topografie (hoogtemeters en -verschillen) en de dynamiek van de rijcyclus. Al deze invloeden in acht genomen tonen de tests aan dat een 5,9% tot 6,6% lager verbruik haalbaar moet zijn bij stedelijk verkeer. Met een belading van 15 ton wordt op een snelweg een reductie van 2,2% behaald op rurale wegen en snelwegen, terwijl een maximale belading van 40 ton een reductie tussen de 3,3% en 3,8% mogelijk zou maken. Deze reducties liggen in lijn met de oorspronkelijk vooropgestelde doelstelling van 3% tot 5%. Bovendien zou er met behulp van alternatieve controlestrategieën op vlak van energiebeheer via de HoD het potentieel ervan nog groter kunnen uitvallen, zoals bleek uit de korte testperiode op het eind van het project.

#### 2.6.3.2 Beladingsefficiëntie

Het effect van een aanpasbaar dak, een vergrootte laadvloer en een dubbel vloersysteem werd in de praktijk getest in een distributiecenter van Proctor & Gamble op vlak van het gemak van in- en uitladen en het 'aanrijden' van de trekker-opleggercombinatie tegen de brug van een opslagruimte.
Het resultaat toont aan dat dankzij de verstelbare oppervlakten één extra pallet kan geladen worden terwijl de duurtijd voor het aanpassen van de flexibele vloer en het in-/uitladen van paletten gunstig werd bevonden. De mogelijkheid om 34 in plaats van 33 paletten mee te kunnen nemen vergroot de ladingsefficiëntie met 3%, hetgeen de ondergrens was van de beoogde 3% tot 40% verbetering. Dankzij deze winst verlaagt de impact per tonkilometer.

#### 2.6.3.3 Aerodynamica

Deze tests werden eveneens uitgevoerd op het testcircuit om na te gaan welke verbruiksreducties mogelijk waren bij verschillende constante snelheden startende van 60 km/u, gezien luchtweerstand weinig invloed heeft bij lagere snelheden. Alle mogelijke instellingen van de aerodynamisch aanpasbare delen werden getest om tot een verbruiksreductie van 5,7% aan een snelheid van 80 km/u te komen bij de configuratie waarbij het dak sterk afhelt naar achter toe en de vinnen aan de achterzijde zijn bevestigd. De reductie wordt in perspectief gezet tegen de originele configuratie van een oplegger waarbij het dak vlak is en er niks bevestigd is aan het uiteinde. De behaalde reductie is aanzienlijk gezien de marge die nog resteert om efficiëntie over de totale aandrijflijn te kunnen verhogen tegen een aanvaardbare kost. Bovendien is er een nog groter reductiepotentieel wanneer de zijpanelen ter hoogte van de wielen zouden worden geïmplementeerd, alsook een meer gestroomlijnde voorzijde van de oplegger (de voorste 'bulk head' in vrachtwagenjargon). In totaal is men erin geslaagd om een luchtweerstandsreductie tot 14,3% te genereren bij een snelheid van 90 km/u. De luchtweerstandscoëfficiënt is mee bepalend voor de berekening van het brandstofverbruik.

#### 2.6.3.4 Simulaties

Door middel van simulaties kan men de invloed van verschillende parameters gaan inschatten zonder dat er fysieke veranderingen moeten worden aangebracht aan de oplegger. Op deze manier heeft men onder andere geëxperimenteerd met verschillende batterijmodellen en kon men alle mogelijke instellingen van de aanpasbare aerodynamica nogmaals aftoetsen met de praktijktests. Hiermee kon men achtereenvolgens de optimale configuratie samenstellen om de verbruiksreductie te maximaliseren. De voornaamste modelparameters waren de belading, het vermogen van de elektromotor en de batterijcapaciteit. In totaal vonden er 700 simulaties plaats op een holistisch niveau waarbij een generische trekker werd verondersteld in combinatie met het werkelijke HoD systeem.
Belangrijke bevindingen die uit de simulaties voortkomen zijn dat een hoger motorvermogen tot een snellere energierecuperatie leidt, hetgeen in de beste brandstofverbruikscijfers resulteert. Hetzelfde of

zelfs een groter effect kan men bereiken met een lagere batterijcapaciteit, bijvoorbeeld met 10 kWh aan boord i.p.v. de oorspronkelijke 20 kWh. Voor wat betreft verschillende types weg blijken de resultaten nog sterk te kunnen verschillen, waardoor verder onderzoek wordt geopperd om per wegtype een optimale configuratie te kunnen bepalen.
Samengevat is er nog een groot potentieel tot verbetering voor de verschillende routes, vooral wanneer deze dynamisch aangepast kunnen worden aan het type route, tijdens het rijden.

### 2.6.4 Conclusies

Waar de testresultaten een inzicht geven in een beperkt aantal mogelijkheden, vullen de simulaties aan en tonen ze aan welke combinaties optimaal zijn. Wanneer we de testresultaten uit deze simulaties vergelijken met de oorspronkelijke doelstellingen van het project, dan kan het volgende geconcludeerd worden:

- Hybrids-on-demand's (HoD's) grootste reducties tot 18% - 20% wanneer:
    - Een grote generator wordt gecombineerd met kleine batterij
    - In stedelijk gebied met veel dynamiek
    - Bij frequente en steile hoogteverschillen
        - Bij een vlak tot licht hellend wegdek beperkt de reductie zich tot 4%
- Aerodynamica komt tot zijn recht bij:
    - Hogere snelheden, dus niet tijdens stedelijk rijden
    - Gecombineerde reductie van 6,5% dankzij aanpasbare staart en dak
    - Verdere optimalisatie tot 8% mogelijk mits zijpanelen en gestroomlijnde *'bulk head'*
- Optimalisatie belading:
    - 3% reductie dankzij extra pallet, waardoor impact per ton-km zakt
    - De impact van de extra laadvloer hangt af van het type lading. Veronderstellen we dat er tot 5 ton extra lading kan worden meegenomen i.p.v. een oorspronkelijke 8 ton, dan levert dit een energiereductie van 31% op
        - Bij 15 ton originele cargo daalt de reductie tot 17%
- Alle innovaties gecombineerd voor een gemiddelde lading van 15 ton:
    - >25% reductie in energieverbruik per ton-km
        - 24% bij gemiddelde belading over vlakke snelweg
        - Tot potentieel 31% in andere situaties bij maximale optimalisatie elektromotor – accu - aerodynamica
    - Bij hogere belading daalt de reductie, bij lagere belading stijgt ze

### 2.6.5 Emissiefactoren

Hoewel er in deze studie evenmin werd gekeken naar de werkelijke uitstoot van polluenten als $NO_x$, kan het terugdringen van het brandstofverbruik ook hier een sterke determinant zijn voor de reductie van schadelijke polluenten.

## 2.8 RAPPORT 5: ASSESSMENT ON EMISSION FACTORS OF HDV OVER MISSION PROFILES (TNO, 2018)

### 2.8.1 Introductie

In deze studie, die resulteert uit een stage bij TNO door een ingenieursstudent van TU Eindhoven, wordt nagegaan in welke mate men met plug-in hybride elektrische technologie voor zwaar vervoer reducties kan genereren voor zowel het brandstofverbruik als de schadelijke uitstoot van stikstofoxiden ($NO_x$). De onderzoeksvraag die hiermee wordt behandeld is in hoeverre de focus op verbruiksvermindering (en zo een $CO_2$ reductie) strookt met een reductie van de $NO_x$ uitstoot. Dit is relevant gezien, ondanks het feit dat er aanzienlijk lagere $NO_x$ emissies worden uitgestoten sinds Euro VI, vrachtwagens nog steeds een hoge uitstoot kunnen hebben in bepaalde situaties. Denk hierbij aan ritten in een stedelijke context. Door een hybride aandrijflijn te gaan modelleren op basis van motortesten in een zogenaamde *engine-dynamometer* tonen simulaties aan welk emissieprofiel we kunnen verwachten in realiteit voor verschillende rijsituaties voor zwaar vervoer.

### 2.8.2 Methodiek

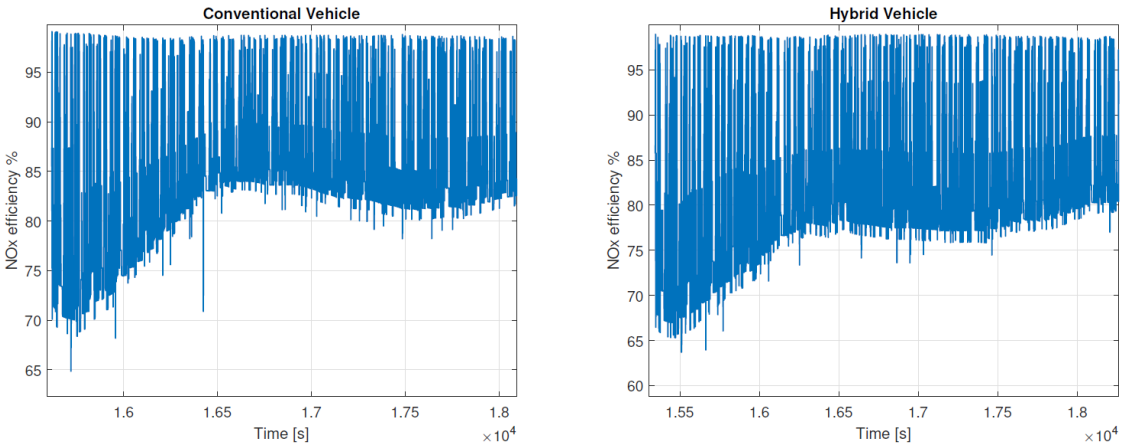
Om een betrouwbare beoordeling te kunnen doen op de '*real-world*' emissies van $NO_x$ en $NO_2$ door vrachtwagens – in al hun vormen voor transport over de weg, en dit vooral bij lage snelheden, wordt aan de hand van bestaande emissiemappen van testmotoren een model gebouwd in een virtuele omgeving. Om het model te valideren wordt het getest over verschillende rijcycli, die zowel stedelijk, ruraal als snelweg rijden vertegenwoordigen. Een belangrijk ijkpunt is een simulatie van de WHTC, een transiënte testcyclus die wordt toegepast bij de typegoedkeuring van vrachtwagens, waarvoor de resultaten van de Euro VI motor gekend zijn. In het model worden aan de aandrijflijn van de bestaande testmotor een elektromotor, een batterij en een energiebeheersysteem toegevoegd, waarmee de *power-split* tussen de twee energiebronnen wordt mogelijk gemaakt. De werking van de uitlaatgasnabehandelingssystemen voor de bestrijding van $NO_x$ wordt eveneens in kaart gebracht, die voornamelijk beheerst wordt door de temperatuur van de uitlaatgassen. Hiervoor wordt teruggegrepen naar goed gedocumenteerde modellen die reeds eerder werden ontwikkeld. De temperatuur van de uitlaatgassen is een gevoelig punt bij elektrificeren van aandrijflijnen, gezien katalysatoren zoals een SCR nood hebben aan een bepaalde temperatuur om optimaal te kunnen werken.

De voornaamste onderdelen van het model zijn de volgende:

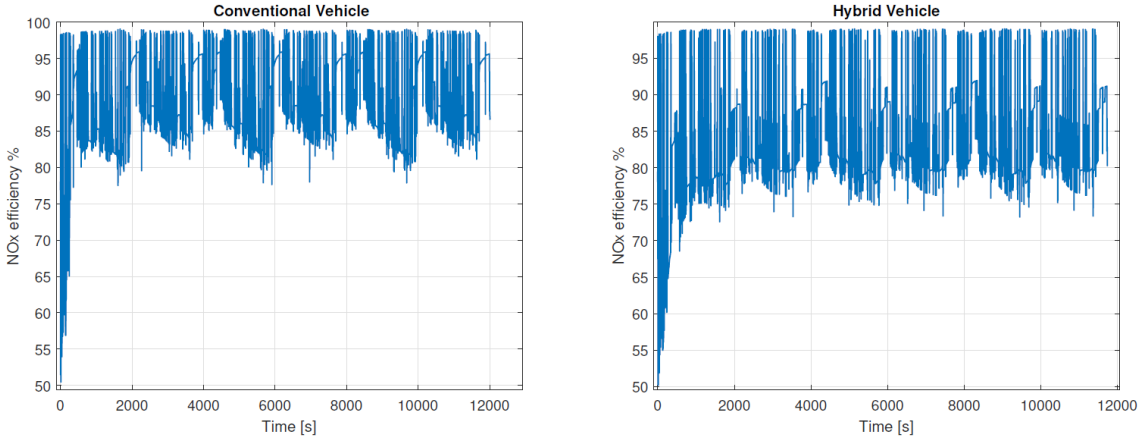
1. De configuratie van de aandrijflijn, waarbij het koppel en het vermogen van de motor worden bepaald voor iedere rijsituatie, alsook het toerental van de motor en het verbruik dat (onder meer) met deze parameters kan worden berekend. Als output van dit model ontstaat een emissiemap waaruit ook de uitlaattemperatuur en de *engine-out* $NO_x$ emissies kunnen worden gehaald.
2. De uitbreiding van de emissiemap van de motor met een model voor de werking van de nabehandelingssystemen voor schadelijke polluenten, zoals de oxidatiekatalysator, de partikelfilter en de SCR. Via de uitlaatgastemperatuur kan de efficiëntie van de omzetting van $NO_x$ door de SCR bepaald worden.
3. Verschillende rijcycli worden losgelaten op het model om het volledige potentieel van de nabehandelingssystemen in kaart te kunnen brengen.

### 2.8.3 Resultaten

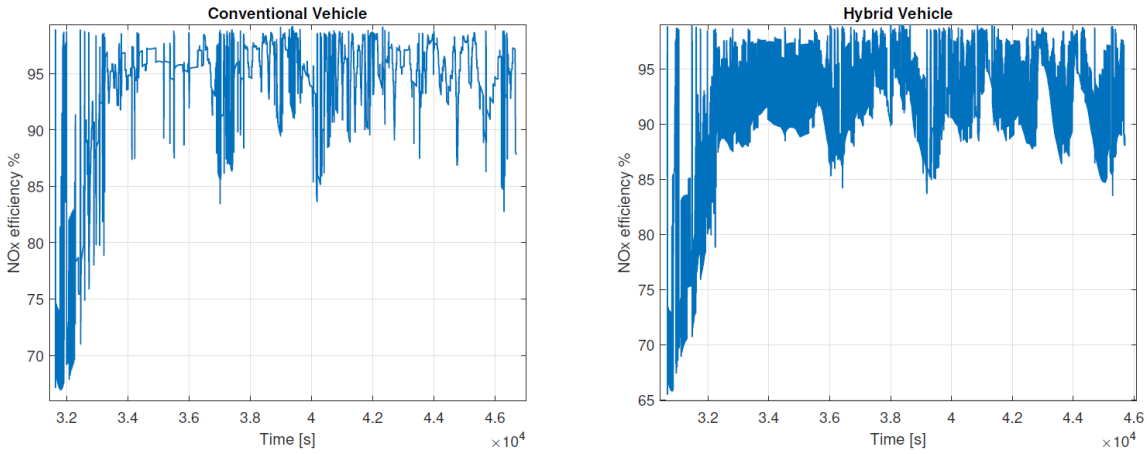
Via dit thermische model kan een vergelijk worden gemaakt tussen het emissieprofiel van een conventionele Euro VI vrachtwagen en één waarvan de aandrijflijn geëlektrificeerd is. Op vlak van $NO_x$ emissies kan dit belangrijke gevolgen hebben, zoals blijkt uit Figuur 13 tot Figuur 15.




Figuur 13: De efficiëntie van de $NO_X$ omzetting tijdens stedelijk rijden, voor een conventionele en een hybride vrachtwagen **(Bron: Gowrisankar 2018)**

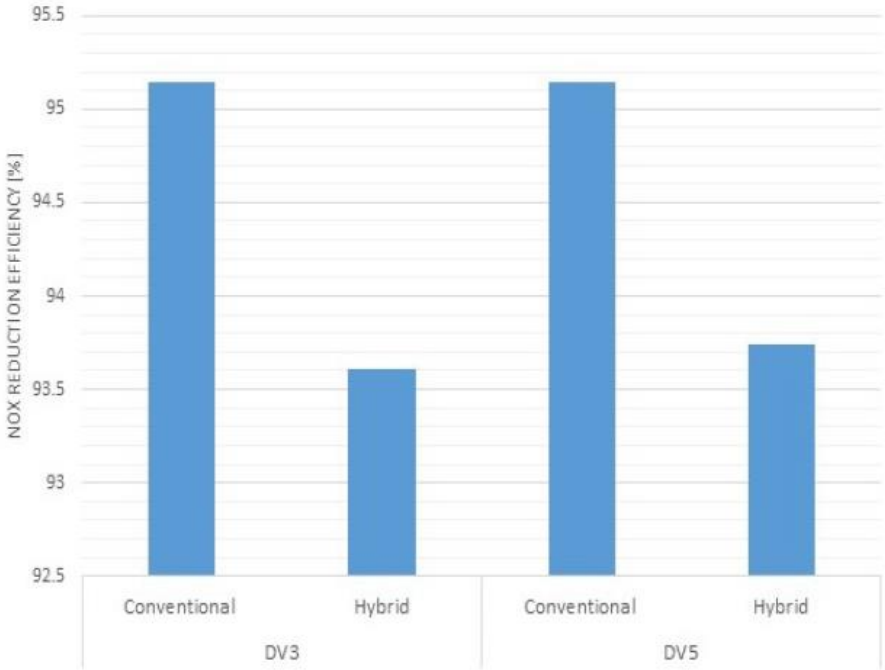



Figuur 14: De efficiëntie van de $NO_X$ omzetting tijdens een rurale cyclus, voor een conventionele en een hybride vrachtwagen **(Bron: Gowrisankar 2018)**




Figuur 15: De efficiëntie van de $NO_X$ omzetting tijdens een snelwegcyclus, voor een conventionele en een hybride vrachtwagen **(Bron: Gowrisankar 2018)**

Uit deze figuren, die worden samengevat in Figuur 16, blijkt dat hoe hoger de dynamiek onderweg en hoe lager de gemiddelde snelheid wordt, hoe lager de uitlaatgastemperatuur komt te liggen. Hierdoor neemt de omzettingsefficiëntie van de $NO_x$ bestrijdingssystemen af. Voor hybride aandrijflijnen, waarin de aandrijving door de verbrandingsmotor vaak wordt bijgestaan en/of vervangen door die van de elektromotor, komt de uitlaatgastemperatuur sneller onder de kritische grens voor een optimale werking van de katalysatoren. Dit vertaalt zich in een mindere omzetting van $NO_x$. Hieruit kunnen we afleiden dat een eenzijdige focus op brandstofreductie via hybridisatie kan leiden tot een negatieve beïnvloeding op de uitstoot van polluenten. Dit probleem doet zich voornamelijk voor in een stedelijke context, zoals wordt aangetoond in Figuur 13. De emissiefactoren voor $NO_x$, die voortkomen uit rijcycli DV3 en DV5 zijn opgesomd in Tabel 8 en Tabel 9.




Figuur 16: De gemiddelde $NO_x$ reductie-efficiëntie voor hybride en conventionele vrachtwagens, gezien over een combinatie van stedelijk, ruraal en snelweg rijden in tests DV3 en DV5 **(Bron: Gowrisankar 2018)**

Tabel 8: Emissiefactoren voor de conventionele en de hybride vrachtwagen voor rijcyclus DV3 **(Bron: Gowrisankar 2018)**

| Emission Details | Conventional | | Hybrid | |
|---|---|---|---|---|
| | Engine Out | Tail Pipe | Engine Out | Tail Pipe |
| $NO_x$ mass | 1949.9 [g] | 95.62 [g] | 1565.97 [g] | 100.07 [g] |
| $NO_x$ mass/distance | 3.643 [g/km] | 0.179 [g/km] | 2.926 [g/km] | 0.187 [g/km] |
| $NO_x$ mass/work | 3.225 [g/kWh] | 0.158 [g/kWh] | 3.204 [g/kWh] | 0.205 [g/kWh] |

Tabel 9: Emissiefactoren voor de conventionele en de hybride vrachtwagen voor rijcyclus DV5 **(Bron: Gowrisankar 2018)**

| Emission Details | Conventional | | Hybrid | |
|---|---|---|---|---|
| | Engine Out | Tail Pipe | Engine Out | Tail Pipe |
| $NO_x$ mass | 1942.55 [g] | 94.32 [g] | 1542.88 [g] | 96.54 [g] |
| $NO_x$ mass/distance | 3.643 [g/km] | 0.176 [g/km] | 2.884 [g/km] | 0.18 [g/km] |
| $NO_x$ mass/work | 3.223 [g/kWh] | 0.157 [g/kWh] | 3.19 [g/kWh] | 0.2 [g/kWh] |

### 2.8.4 Conclusies

Via het *Energy Management System* (EMS) van de plug-in hybride architectuur kan men $NO_x$ reducties tot 15% realiseren ten opzichte van conventionele vrachtwagens. De inzet van de EMS enkel toespitsen op brandstofverbruik kan echter averechtse effecten hebben voor schadelijke emissies zoals $NO_x$ en $NO_2$. Dit vraagt een specifieke aandacht om de extra kosten voor uitlaatgasnabehandelingssystemen en hun aansturing binnen de perken te houden.
De EMS moet dus, naast power split, ook focussen op emissies. Dit omdat een fluctuerende motoraansturing nefast is voor stabiele emissiereductie via katalysatoren tijdens hybride modus. Zo dient de afregeling dusdanig toegepast te worden dat motorsnelheden onder de 600 rpm vermeden worden, en zo ook hoge emissies en hoog verbruik. De hybride modus verhindert de SCR ervan om op een stabiele werkingstemperatuur te komen, door een hoog-variabele stroom aan uitlaatgassen. Dit temperatuursprobleem geldt ook tijdens de simulatie van stadsverkeer, door het vele starten en stoppen. Zo noteren we voor de conventionele vrachtwagen een gemiddelde $NO_x$ omzettingsëfficiëntie van 95%, terwijl deze voor de hybridetoepassing op 93,5% komt te liggen.
De grootste uitdaging ligt echter bij de overgang van EV modus naar HEV modus, bijvoorbeeld wanneer de vrachtwagens uit een zero-emissiezone zou rijden. Hier ligt de omzettingsefficiëntie voor $NO_x$ slechts op 45%-65%, wat verbetert naarmate SCR opwarmt. Deze daling in efficiëntie hangt echter af van naar welk type weg de overgang wordt gemaakt. Van zero-emissiezone naar ruraal kan een daling van 20% mogelijk zijn, terwijl deze vermindert tot 10% wanneer er ineens overgegaan wordt naar een snelweg. De mate waarin de SCR opgewarmd geraakt is dus cruciaal.

### 2.8.5 NOx emissiefactoren

De resultaten die voortvloeien uit deze simulatiestudie geven ons belangrijke inzichten in de procentuele emissiewinsten die geboekt kunnen worden naarmate de aandrijflijn geëlektrificeerd wordt. Zo zien we dat een gemiddelde reductie met 20% haalbaar is, gezien over de verschillende wegtypes heen.

## 2.9 RAPPORT 6: REAL-WORLD MEASUREMENT OF HYBRID BUSES' FUEL CONSUMPTION AND POLLUTANT EMISSIONS IN A METROPOLITAN URBAN ROAD NETWORK (KERAMYDAS ET AL. (EMISIA), 2018)

### 2.9.1 Introductie

In deze studie gaat men na in hoeverre hybride Euro VI bussen een verbetering zijn op vlak hun verbruik en schadelijke uitstoot ten opzichte van hun conventionele tegenhangers van de vorige emissieklasse, Euro V. Voorafgaand werk over simulaties met serie- en parallelle hybride architecturen toonde immers aan dat het brandstofverbruik tot 45% lager zou kunnen zijn dan dat dit het geval is voor conventionele bussen. Resultaten uit experimentele studies wijken hier eerder van af en vertonen een spreiding voor het reductiepotentieel tussen de 12% en de 30%. Algemeen wordt geconcludeerd dat de verbruiksvoordelen voornamelijk afhankelijk zijn van het toepassingsgebied en de rijomstandigheden waaraan de bussen onderworpen worden.
Voor wat betreft de uitstoot van $NO_x$ beschrijven de auteurs in hun literatuuronderzoek een hybride Euro V bus, die tot 90% minder $NO_x$ uitstootte dan haar conventionele Euro V tegenhanger, terwijl er uit tests met Euro IV hybride bussen een verschil tot 63% bleek ten nadele van een conventionele Euro IV bus. Een belangrijke conclusie die hier wordt aangehaald is echter dat het niet de technologie is, die bepalend is voor de $NO_x$ uitstoot van een bus, maar de limiet die door de Europese Commissie wordt opgelegd en waar de constructeurs aan moeten voldoen. Zo voldoen voor de recentste (Euro VI) norm zowel conventionele als hybridebussen aan de limiet dankzij de emissiebestrijdingssystemen die worden toegepast (EGR, SCR, LNT) en de verstrenging van de typegoedkeuring sinds de invoering van praktijktesten. De theoretische overeenstemming met de limiet *op papier* kan echter verschillen in de praktijk, hetgeen de aanzet was tot het uitvoeren van deze studie voor de recentste bussen.

### 2.9.2 Methodiek

Zes conventionele Euro V bussen worden vergeleken met zes Euro VI hybride dubbeldek bussen tijdens hun werkelijke routines doorheen Hongkong. In Tabel 10 worden de technische karakteristieken van de twee soorten bussen gegeven. De hybridevarianten werden voorzien van zowel een PEMS als een draagbaar Fourrier-analysetoestel om de concentraties van ammonium ($NH_3$) en distikstofmonoxide ($N_2O$) te kunnen analyseren. De PEMS tests werden uitgevoerd volgens de in voege zijnde ISO-specificaties (ISO 16183) en verdere regelgeving van de Europese Commissie en de US EPA op vlak van kalibratie.

Tabel 10: Overzicht van de technische karakteristieken van de twee soorten bussen **(Bron: Keramydas et al. 2018)**

| Specification | Euro V Conventional | Euro VI Hybrid |
|---|---|---|
| ID | 1–6 | 7–12 |
| Year of registration | 2013–2015 | 2014 |
| Emission standard | Euro V | Euro VI |
| Technology | Conventional | Hybrid (serial) |
| Fuel | Diesel | Diesel |
| Emission control technology | SCR | DPF, EGR, SCR |
| Mean mileage (min/max) (km) | 50,506 (23,391/92,143) | 26,299 (15,858/48,092) |
| Transmission | Automatic | Automatic |
| Gross vehicle weight (t) | 24 | 24 |
| Weight before/after installation * (t) | 15.3/19.5 | 16.0/20.0 |
| Number of cylinders | 6 | 6 |
| Idle/max speed (RPM) | 700/2400 | 600/2850 |
| Engine displacement (L) | 8.9 | 6.7 |
| Engine rated power (kW@rpm) | 243@2100 | 204@2100 |
| Engine peak torque (Nm@rpm) | 1500@1200–1400 | 1100@1200–1600 |

In totaal werd er gedurende 140 uur aan testdata verzameld, goed voor 10 uur tests per bus. De testbussen reden hun gebruikelijke routines doorheen Hongkong maar reden zonder echte passagiers.

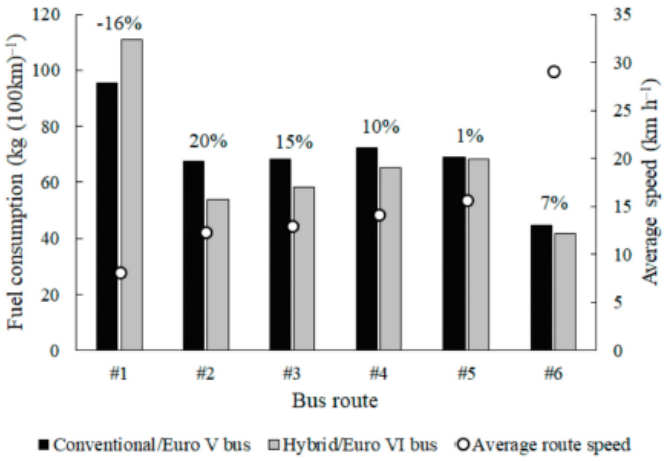
De tests gebeurden namelijk door de testbus rechtstreeks een normale bus in operatie te laten volgen. Door middel van gewichten werd een bezettingsgraad van zo'n 60% gesimuleerd, hetgeen representatief is voor een typische rit in Hongkong. *Airconditioning* werkte voortdurend tijdens het testen. De testroutes omvatten voornamelijk stedelijk rijden, al werd er ook op snelwegen gereden. Elke bus reed minstens driemaal dezelfde route. Een overzicht van deze routes is te zien in Tabel 11.

Tabel 11: Overzicht van de testroutes **(Bron: Keramydas et al. 2018)**

| Route # | Bus Termini | Route Number | Driving Mode | Average One-Way Duration (h; min) | Distance (km) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Kennedy Town–Hong Kong Stadium | 5B | Urban | 1 h; 2 min | 8.4 |
| 2 | Lai Chi Kok–Wan Chai North | 905 | Urban (mainly)/Highway | 1 h; 19 min | 16.3 |
| 3 | Star Ferry–Sau Mau Ping | 1A | Urban | 1 h; 8 min | 14.7 |
| 4 | Shun Lee–Macau Ferry | 619 | Urban (mainly)/Highway | 1 h; 15 min | 17.5 |
| 5 | Heng Fa Chuen–Wan Chai North | 8 | Urban (mainly)/Highway | 0 h; 53 min | 13.6 |
| 6 | Tin Shui Wai–Causeway Bay | 969 | Urban/Highway (mainly) | 1 h; 31 min | 43.9 |

### 2.9.3 Resultaten

De resultaten voor het brandstofverbruik staan afgebeeld in Figuur 17 en tonen aan de spreiding voor de $CO_2$ uitstoot voor de conventionele bus neerkomt op een 1,41 tot 3,0 kg/km, vergeleken met een spreiding van 1,31 tot 3,49 kg/km voor de hybride bus. Gemiddeld is dit gelijk aan een reductie van 6,1% ± 12,4% voor de laatstgenoemde technologie. Het meerverbruik dat te zien is bij route 1 kan deels verklaard worden door een hogere nood aan koeling gezien de omgevingstemperatuur hoger was ten tijde van de tests met de hybride bus. De voornaamste reden is echter de hogere uitstoot van $N_2O$ door de Euro VI technologie, welk een sterk broeikasgas is.




Figuur 17: Overzicht van het gemiddeld brandstofverbruik per technologie per route, aangevuld met de gemiddelde snelheid **(Bron: Keramydas et al. 2018)**

Voor wat betreft de uitstoot van polluenten vat Tabel 12 alle emissiefactoren samen die resulteren uit de tests. Wat opvalt is dat voor de Euro VI bussen alle polluenten lager uitvallen behalve $N_2O$. Deze stof is nodig voor een betere werking van de SCR, al is ook hier nog ruimte voor optimalisatie m.b.v. een preciezere ureuminjectie (AdBlue). De terugval van $NO_x$ emissies gezien bij de overgang van Euronorm V naar VI is substantieel, zo ligt het emissieniveau voor Euro VI bussen gemiddeld 93% ± 5% lager dan bij Euro V technologie. Een interessant vergelijk toont aan dat indien een bezettingsgraad van 85% wordt verondersteld, er 7,4 mg/km per passagier wordt uitgestoten, vergeleken met ongeveer 30 mg/km per passagier in een recente Euro 6 personenwagen op benzine (of vier keer minder als men een typische bezettingsgraad van 1,4 personen in acht neemt voor personenwagens in Hongkong). Per kilometer stoot

de hybride bus in een stedelijke context 740 mg/km uit. Ook de $N_2O/NO_x$ ratio is beduidend verlaagd voor de recentste Euronorm, 018 ± 0.26 vergeleken met 0.31 +- 0.04 voor Euro V.
Voor de polluenten CO, THC en $NH_3$ tekenen we een beduidend lager uitstoot op voor de Euro VI hybride bus, met voor de laatstgenoemde een gemiddelde ver onder de 10 PPM limiet.

Tabel 12: Overzicht van de gemeten emissiefactoren voor de conventionele Euro V en hybride Euro VI bus **(Bron: Keramydas et al. 2018)**

| | | Emission Factors (g km$^{-1}$) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Route # | Route Characteristics | $NO_x$ | NO | $NO_2$ | CO | THC | $NH_3$ * | $N_2O$ * | $CO_{2e}$ |
| | | | | | | Euro V (conventional) buses | | | |
| 1 | SL/EL/AM/HM | 26.64 | 21.74 | 4.89 | 8.78 | 0.10 | 5.5 | 72 | 3020 |
| 2 | SM/EL/AL/HL | 9.55 | 8.26 | 1.29 | 9.24 | 0.07 | 11.9 | 221 | 2168 |
| 3 | SM/EL/AL/HH | 10.62 | 9.55 | 1.07 | 6.91 | 0.08 | 4.0 | 181 | 2190 |
| 4 | SM/EM/AL/HH | 8.81 | 7.96 | 0.84 | 5.10 | 0.07 | - | - | 2269 |
| 5 | SM/EH/AH/HH | 12.95 | 10.55 | 2.40 | 4.52 | 0.03 | 3.4 | 94 | 2194 |
| 6 | SH/EH/AM/HH | 6.58 | 5.45 | 1.13 | 2.24 | 0.03 | 2.2 | 59 | 1422 |
| | | Euro V emission limit (transient testing) | | | | | | | |
| | | | | | | Euro VI (hybrid) buses | | | |
| 1 | SL/EM/AH/HM | 4.08 | 0.64 | 3.44 | 3.55 | 0.04 | 4.6 | 1177 | 3803 |
| 2 £ | SM/EL/AL/HL | 0.21 | 0.20 | 0.02 | 1.26 | 0.02 | 7.3 | 265 | 1770 |
| 3 £ | SM/EM/AL/HH | 0.48 | 0.37 | 0.10 | 1.81 | 0.01 | 2.4 | 494 | 1964 |
| 4 | SM/EM/AL/HH | 0.42 | 0.34 | 0.07 | 1.55 | 0.02 | 2.4 | 421 | 2162 |
| 5 | SM/EH/AH/HH | 0.70 | 0.13 | 0.58 | 1.92 | 0.01 | 2.7 | 540 | 2292 |
| 6 | SH/EH/AM/HH | 0.64 | 0.41 | 0.22 | 0.99 | 0.01 | 1.7 | 294 | 1390 |

**$NH_3$ en $N_2O$ in mg/km*

### 2.9.4 Conclusies

Op vlak van brandstofverbruik presteren de hybride bussen gemiddeld beter dan hun conventionele tegenhanger. Hier dient echter de kanttekening gemaakt te worden dat de verbetering eerder marginale is dankzij de impact van de 'zwaarte' van de operationele inzet en omgevingscondities zoals inclinaties, kruipsnelheden en drukte op de Hongkongse wegen, alsook het AC gebruik door de temperaturen die hoog oplopen.
Voor de polluenten zien we een zeer grote terugval voor $NO_x$ emissies (93%) van Euro V naar Euro VI, hetgeen te danken is aan een betere kalibratie van de emissiebestrijdingssystemen. Deze waren noodzakelijk om te kunnen voldoen aan de verstrengde limieten.

### 2.9.5 NOx emissiefactoren

Zie Tabel 12

## 2.10 RAPPORT 7: ANALYSIS OF TAIL-PIPE EMISSIONS OF A PLUG-IN HYBRID ELECTRIC VEHICLE AND ITS AVERAGE EMISSIONS FOR DIFFERENT TEST CYCLES (EHRENBERGER ET AL., 2018)

### 2.10.1 Introductie

In deze laatste studie in de reeks naar de werkelijke emissies van plug-in personenwagens worden weerom twee modellen getest op de weg met behulp van PEMS. De motivatie voor dit onderzoek was de sterke variatie in het emissiegedrag van de technologie en de afhankelijkheid van de gebruiksstrategie en externe invloeden als de omgevingstemperatuur, de uitlaatgastemperatuur, etc. Het verschil met de eerder besproken studie door Franco et al. (2016) is dat er niet langer wordt gekeken naar de NEDC. Voorafgaand aan deze studie werden het testvoertuigen namelijk uitgemeten volgens het WLTP-kader. Hier ligt de focus op de spreiding van de uitstoot van de gereglementeerde polluenten en het elektrisch verbruik, terwijl er ook aandacht is voor de link tussen de elektrische range en de absolute emissies in de verschillende rijsituaties. Een belangrijke kanttekening die we moeten maken is dat in deze studie de reglementaire PEMS tests werden uitgevoerd, en de grenzen van de testcondities dus niet werden afgetast.

### 2.10.2 Methodiek

Twee Euro 6 conforme benzine PHEV's van (vermoedelijk) hetzelfde model werden uitgerust met een PEMS toestel. Een testroute werd bepaald die conform is aan de specificaties volgens de RDE regelgevingspakketten. Om een betere benadering te kunnen doen van de realiteit, werden de testritten uitgevoerd met de airconditioning aan. De resultaten van de praktijktest werden vergeleken met de WLTP resultaten op de rollenbank, waarvoor men bij zowel -7°C als 23°C testte.
De volgende rijmodi werden gekozen:

- Een maximale puur elektrische rit met een volle batterij en het voertuig in de ecostand
- Een rit in comfortmodus in hybridestand met een volle batterij
- Een rit in comfortmodus in hybridestand en een ontladen batterij
- Een maximale dynamische rit (in powerstand) en een ontladen batterij

De technische specificaties van het model(/len) wordt weergegeven in Tabel 13.

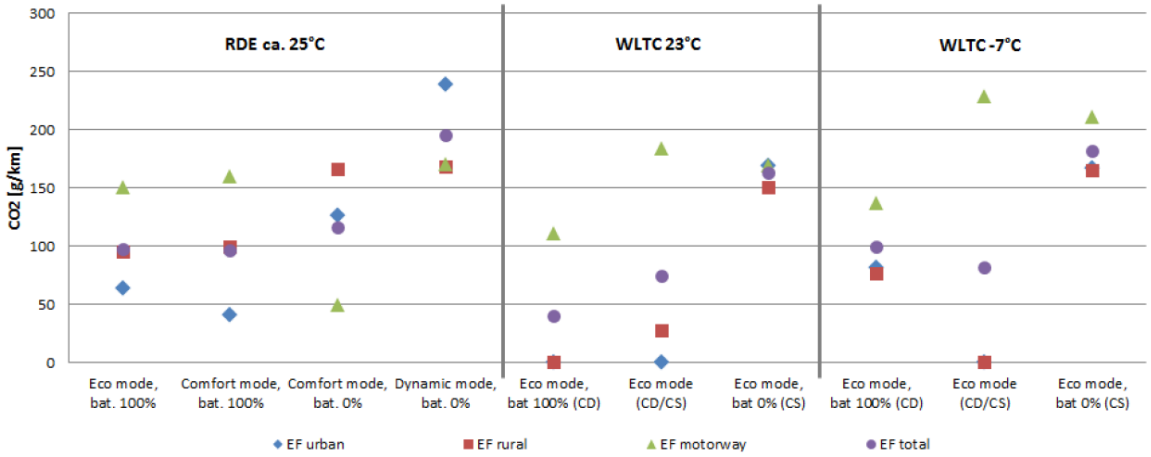
Tabel 13: Overzicht van de technische karakteristieken van de testvoertuigen.

| | |
|---|---|
| Vermogen verbrandingsmotor | 135 kW |
| Vermogen elektrische motor | 65 kW |
| Elektrische range | 40 km |
| Brandstofverbruik (NEDC) | 1,9 l/100 km |
| $CO_2$ emissie (NEDC) | 44 g/km |
| Massa in rijklare toestand | 1735 kg |

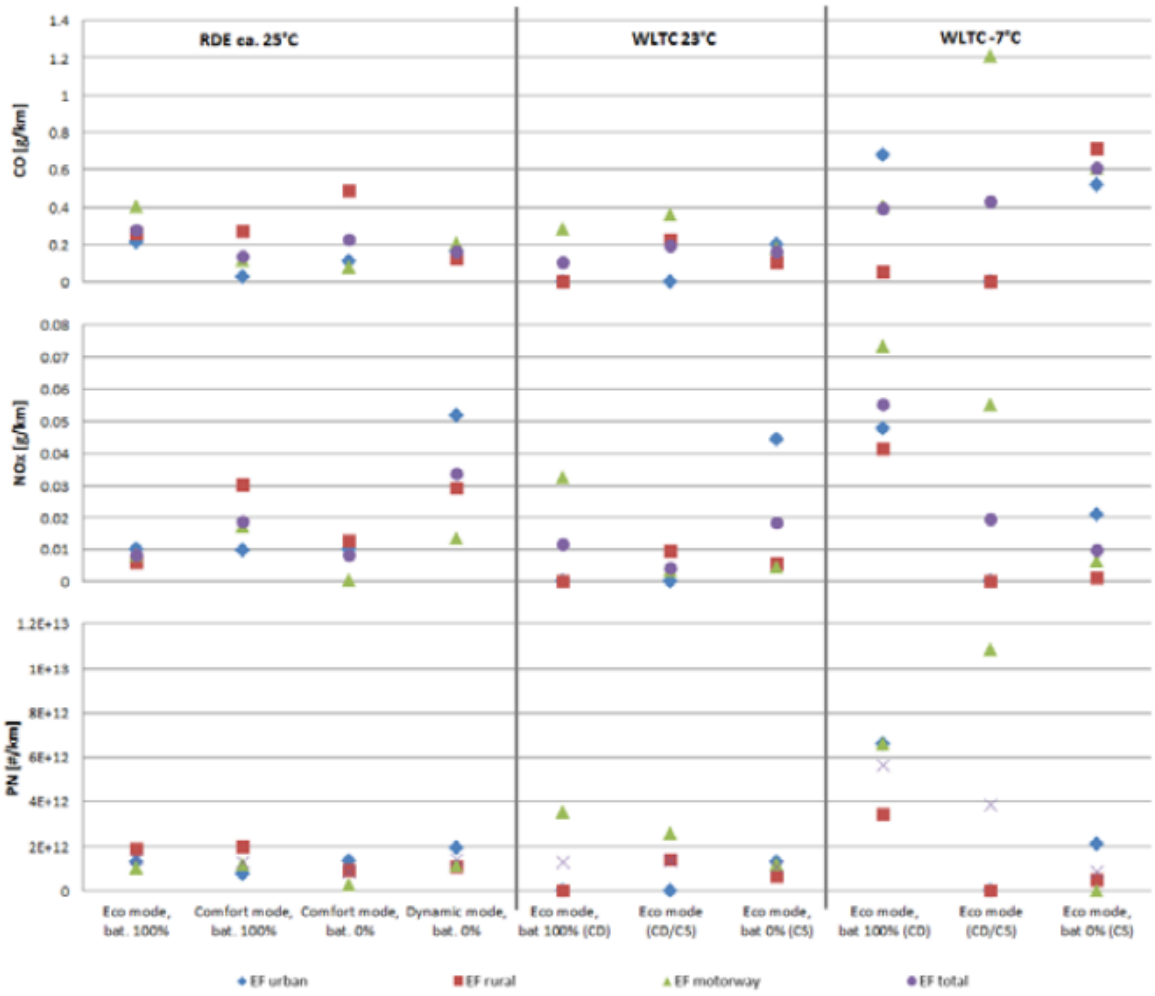
### 2.10.3 Resultaten

De resultaten voor de emissie van $CO_2$ tijdens de RDE tests worden grafisch weergegeven in Figuur 18 en 17, terwijl de emissiefactoren die uit de testritten kunnen worden afgeleid terug te vinden zijn per polluent in tabellen 14 tot en met 17. Wat voor $CO_2$ meteen opvalt is dat het ladingsniveau van de batterij de belangrijkste determinant is voor de uitstoot. Bij de WLTC test bij de negatieve omgevingstemperatuur van -7°C zien we dat ondanks het feit de batterij volledig vol is bij aanvang, de motor nagenoeg constant

draaide terwijl de verwarming uitstaat. Ook zien we in de ecomodus dat de emissie van CO en PN aan de hoge kant is, gezien de katalysatoren nog niet opgewarmd zijn. Wat verder opvalt is het snelwegverbruik in de comfortmodus dat lager blijkt te zijn uitgevallen dan stedelijk en ruraal rijden, mede door de grotere energierecuperatie.




Figuur 18: Overzicht van de $CO_2$ uitstoot tijdens de RDE tests (links) en de WLTC tests bij verschillende temperaturen **(Bron: Ehrenberger et al. 2017)**




Figuur 19: Overzicht van de emissiefactoren voor CO, $NO_x$ en PN volgens de RDE tests en de WLTC tests **(Bron: Ehrenberger et al. 2017)**

Voor deze geteste benzine PHEV's bleven de emissies van CO en $NO_x$ onder de limietwaarde tijdens de RDE test, hetgeen strookt met de bevindingen uit andere studies. Wat opvalt is dat voor de meeste situaties de uitstoot van het aantal deeltjes de limiet overschrijdt. Dit doet ons vermoeden dat er nog geen roetfilter werd geïmplementeerd op deze voertuigen, hetgeen niet duidelijk wordt gesteld in de publicatie. Verder zien we amper beïnvloeding van het type weg of de gekozen rijmodus op de emissie van CO en PN, waar we dit wel zien voor $CO_2$ en $NO_x$. Zo zien we voor de laatstgenoemde polluent een hogere uitstoot tijdens de stedelijke trip wanneer er dynamisch wordt gereden (powermodus), een fenomeen dat hoogstwaarschijnlijk het gevolg is van een koude start. Dit effect zien we sterk versterkt bij de rollenbanktests bij 7°C, voornamelijk in het gesimuleerde stedelijke gedeelte van de test.
Tot slot zien we geen duidelijk verband tussen de uitstoot van de verschillende schadelijke polluenten en het elektrisch gereden gedeelte van de tests. De absolute emissies worden namelijk het meeste bepaald door de omgevingstemperatuur, de rijomstandigheden en het moment waarop de motor aanslaat.

Tabel 14: Samenvatting van de $CO_2$ emissiefactoren per wegtype en rijmodus

| $CO_2$ (g/km) | RDE 25°C | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Eco | Hybride | Hybride | Power |
| | 100% SoC | 100% SoC | 0% SoC | 0% SoC |
| **Urban** | 65 | 45 | 130 | 235 |
| **Rural** | 95 | 100 | 170 | 170 |
| **Motorway** | 150 | 160 | 45 | 170 |
| **Total** | 97 | 95 | 120 | 190 |

Tabel 15: Samenvatting van de CO emissiefactoren per wegtype en rijmodus

| CO (g/km) | RDE 25°C | | | |
|---|---|---|---|---|
| *(Euro 6 limit: 1 g/km)* | Eco | Hybride | Hybride | Power |
| | 100% SoC | 100% SoC | 0% SoC | 0% SoC |
| **Urban** | 0,22 | 0,03 | 0,1 | 0,17 |
| **Rural** | 0,24 | 0,3 | 0,5 | 0,11 |
| **Motorway** | 0,4 | 0,1 | 0,06 | 0,2 |
| **Total** | 0,3 | 0,15 | 0,22 | 0,175 |

Tabel 16: Samenvatting van de $NO_x$ emissiefactoren per wegtype en rijmodus

| NOx (mg/km) | RDE 25°C | | | |
|---|---|---|---|---|
| (Euro 6 limit: 60 mg/km) | Eco | Hybride | Hybride | Power |
| | 100% SoC | 100% SoC | 0% SoC | 0% SoC |
| **Urban** | 11 | 10 | 11 | 52 |
| **Rural** | 5 | 31 | 13 | 29 |
| **Motorway** | 7 | 17 | 0 | 13 |
| **Total** | 8 | 19 | 8 | 34 |

Tabel 17: Samenvatting van de PN emissiefactoren per wegtype en rijmodus

| PN (#/km) | RDE 25°C | | | |
|---|---|---|---|---|
| (Euro 6 limit: 6 x 1e12/km) | Eco | Hybride | Hybride | Power |
| | 100% SoC | 100% SoC | 0% SoC | 0% SoC |
| **Urban** | 1,60E+12 | 9,00E+11 | 1,50E+12 | 2,00E+12 |
| **Rural** | 1,90E+12 | 2,00E+12 | 9,00E+11 | 1,10E+12 |
| **Motorway** | 9,00E+11 | 1,00E+12 | 2,00E+11 | 1,10E+12 |
| **Total** | 1,60E+12 | 1,40E+12 | 9,00E+11 | 1,50E+12 |
| **Limit** | 6,00E+11 | 6,00E+11 | 6,00E+11 | 6,00E+11 |

### 2.10.4 Conclusies

In deze studie werden de RDE emissies van twee benzine plug-in hybriden onder de loep genomen. De resultaten tonen aan dat er een sterke correlatie is tussen het ladingsniveau en de rijmodus als het op $CO_2$ emissies aankomt. Voor deze (vermoedelijk) ongefilterde modellen merken we dat de emissie van CO en $NO_x$ vlot onder de limiet blijven. Voor PN zien we echter dat de limiet meestal wordt overschreden, hetgeen het vermoeden staaft dat er nog geen roetfilter geïnstalleerd werd.

### 2.10.5 Emissiefactoren

Zie Tabel 14, Tabel 15, Tabel 16 en Tabel 17.

## 2.11 ALGEMENE CONCLUSIES VAN HET LITERATUURONDERZOEK

Uit de hiervoor besproken studies blijkt in welke mate er onderzoek wordt gevoerd naar hybride alternatieven voor voertuigen bestemd voor wegverkeer. Waar de meeste aandacht gaat naar het potentieel van plug-in hybridetechnologie voor personenwagens, dient men ook in de sector van het zware vervoer over de weg belangrijke stappen te zetten tot optimalisatie van de energie-efficiëntie. Toch blijft voor deze laatstgemelde sector de implementatie van zulke innovaties voorlopig beperkt tot het *modelleren* van de impact. De reden hiervoor is dat de waaier aan toepassingsmogelijkheden voor voertuigen in de categorie 'zwaar vervoer' heel uitgebreid is en er al snel sprake is van een heel specifieke inzetbaarheid van elektrificatie. Zo kan een lijnbus, met een vast rijschema en route, al makkelijker volledig geëlektrificeerd worden dan een vrachtwagen die zware ladingen over lange afstanden moet transporteren. Bij personenwagens is dit aspect veel minder van tel en maakt een volledig doorgedreven elektrificatie naar een zero-emissievoertuig veel meer steek. Dit in zulke mate dat veel autofabrikanten de vaak dure dubbele technologie voor (plug-in) hybride voertuigen proberen overbruggen voor hun grote en luxueuze modellen, om meteen met 100% elektrische varianten op de markt te komen. *Pooling* door constructeurs maakt het echter mogelijk dat er meer modellen in een PHEV-versie worden gelanceerd, hetgeen van pas komt omdat ze in 2020 nog zoveel mogelijk ZLEV's willen verkopen (zie hoofdstuk 1.1).

Zoals blijkt uit de beschreven studies zijn er enkele cruciale aspecten die het slagen van PHEV technologie in de weg kunnen staan met het oog op zowel verbruiksreducties als het terugdringen van schadelijke polluentenconcentraties. Zo wordt de efficiëntie van een PHEV bepaald door de ladingstoestand van de batterij, de triplengte, de rijstijl en de beschikbaarheid van laadinfrastructuur. In een ongeladen toestand gaan de veelal zwaardere PHEV méér uitstoten dan een conventionele variant waarin geen batterijpakket zit. Ook leert het meerjarig onderzoek naar het gebruik van PHEV's in Nederland dat amper 25% van de gebruikers hun voertuig minstens één keer per dag oplaadt, wat zich vertaalt in feit dat gemiddeld 30% van de afgelegde afstand in Nederland elektrisch wordt gereden. Voor de 50% 'beste' PHEV gebruikers komt dit gemiddelde op 46% te liggen, en voor de 25% 'beste' gebruikers op 55% elektrisch. Dit toont het potentieel dat de technologie heeft, al heeft een lokale overheid nauwelijks vat op het laadgedrag van de consument, tenzij de accijnzen op brandstof drastisch worden verhoogd of er een belasting komt op het verbruik ervan ($CO_2$-taks). Andersom kan een verlaging op de btw op elektriciteit hier ook een effect hebben. Ook kan een overheid de markt sturen door kleinere/lichtere PHEV's met een groot batterijpakket te stimuleren. Wat de Nederlandse studie immers aantoont is hoe PHEV modellen steeds meer $CO_2$ zijn gaan uitstoten, naargelang autofabrikanten hun modellen steeds specifieker zijn gaan kalibreren om tijdens de typegoedkeuring precies aan de fiscaal aantrekkelijke bovengrens van 49 g/km te voldoen, en er steeds grotere/zwaardere PHEV modellen op de markt kwamen. Ondanks het feit dat er geen studies voorhanden zijn over plug-in bestelwagens, mogen we stellen dat deze in wezen niet verschillen van personenwagens en dat dezelfde principes van tel zijn.

De studies rond vrachtwagens berusten voornamelijk op simulatiewerk en tonen aan dat er nog aanzienlijke verbeteringen mogelijk zijn op vlak van brandstofverbruik. Een loutere focus op verbruik alleen dient echter vermeden te worden, gezien dit een averechts effect kan hebben op de uitstoot van polluenten. Zo kan een optimalisatie van de efficiëntie, met inbegrip van het effect op de bedrijfstemperatuur van de SCR, tot $NO_x$ reducties van 15% leiden, door betere controle van de motorbelasting. Wordt er enkel gefocust op verbruik, dan kan de variabele uitlaatgastemperatuur door gedeeltelijke elektrificatie leiden tot een verminderde omzettings-efficiëntie van een SCR. Ook is de overgang van zero-emissie naar hybride/thermisch aandrijven tijdens het rijden belangrijk wanneer we kijken naar het wegtype. Zo zal een SCR sneller weer opwarmen en aan diens hoogste efficiëntie kunnen werken wanneer de motor zwaar belast wordt. Dit is, bijvoorbeeld, niet het geval wanneer bij het

uitrijden van een lage-emissiezone (LEZ) eenzelfde (stedelijke/rurale) wegtype aanhoudt met lage snelheden. Hier kan een oplaadstrategie, die extra motorbelasting geeft, dit effect deels compenseren.
Naast een elektrificatie van de aandrijflijn van een vrachtwagen zit er ook nog een groot potentieel in het verbeteren van de aerodynamische kenmerken ervan, alsook een verdere optimalisering van de belading in het ruim van de oplegger. Simulaties tonen aan dat een combinatie van zulke innovaties tot een efficiëntiewinst hoger dan 30% kan leiden per tonkilometer. Zulke verminderingen in brandstofverbruik kunnen we in geval van vrachtwagens correleren aan de uitstoot van schadelijke stoffen wanneer we spreken over conventionele (diesel) technologie. Naarmate ook in deze sector de elektrificatie zijn ingang zal hebben en het aandeel elektrisch rijden toeneemt, zullen we echter een minder rechtlijnig verband kunnen vaststellen tussen verbruik en de uitstoot van polluenten. Dit tenzij er ook aandacht wordt besteed aan het warmtebehoud van de uitlaatgasnabehandelingssystemen.
Op vlak van emissiefactoren voor polluenten zoals $NO_x$ en PM vernemen we via de literatuur voornamelijk hoe plug-in personenwagens zich gedragen in reële en testbankomstandigheden. Voor zwaar vervoer blijft de focus voornamelijk op verbruik liggen, mede omdat nabehandelingssystemen voor uitlaatgassen algemeen gezien efficiënter werken op Euro VI voertuigen dan dat dit het geval is voor Euro 6 (b, c en d-TEMP) personenwagens. Verder hebben we nu vooral inzichten verworven van de situatie in Nederland, gezien daar jarenlang systematisch onderzoek verricht is naar de werkelijke impact van PHEV's. Om af te toetsen in welke mate deze bevindingen overeenstemmen met de Vlaamse situatie werd beslist om ook hier aan veldonderzoek te doen. Daarenboven beschrijven de besproken publicaties de huidige generatie plug-ins, terwijl het niet ondenkbaar is dat ook deze voertuigen op korte termijn andere karakteristieken zullen meekrijgen. Denk hierbij bijvoorbeeld aan grotere batterijcapaciteiten, verbeterde efficiëntie enzovoort. De varianten met grotere batterijen en een kleine verbrandingsmotor, zoals de BMW i3 en in mindere mate de Opel Ampera, zijn echter verdwenen ten gunste van de varianten op de grens van de regeling voor superkredieten (zie hoofdstuk 1.2). Om die reden wordt in het tweede luik van het voorgestelde onderzoek ook via simulatie ingeschat welke emissiefactoren we mogen verwachten van de plug-in van morgen, dit zowel voor personenwagens als voor lijnbussen.

# 3 VLAAMSE MEETCAMPAGNE

Door middel van '*smart emissions measurement systems*', of kortweg SEMS, hebben we in Vlaanderen onderzoek gedaan naar hoe PHEV personenwagens in werkelijkheid worden gebruikt. Dit is relevant gezien we zo kunnen nagaan in welke mate de Vlaamse PHEV chauffeur de Nederlandse tendensen volgt. Hoewel de steekproef beperkt werd tot drie voertuigen die gedurende bijna twee maanden werden gemonitord tijdens hun dagelijks gebruik, zijn de resultaten een belangrijke aftoetsing voor de Vlaamse Overheid om de haalbaarheid en de zin van beleid dat PHEV technologie bevoordeeld na te kunnen gaan.

## 3.1 OMSCHRIJVING SEMS MONITORING

In dit onderzoek is bij drie plug-in hybridevoertuigen het SEMS-systeem ingebouwd. Dit is een robuust, *stand-alone* systeem dat is ontworpen om voor lange termijn emissies te monitoren van voertuigen tijdens normaal gebruik. Hiervoor is het SEMS-systeem zo ontworpen, dat het tussentijds geen onderhoud vereist en dat de gebruiker geen handelingen aan het meetsysteem hoeft te verrichten voor of na de rit. Vanop afstand kan bovendien gecontroleerd worden of de datastroom volledig en correct zijn. Twee van de bemeten voertuigen, de Mitsubishi Outlander en de Volvo XC90 T8 zijn uitgerust met een benzinemotor, terwijl de Volvo V60 Twin Engine een dieselmotor bevat. Deze voertuigen werden geselecteerd op basis van hun populariteit op de Vlaamse markt volgens de Ecoscoredatabank voor het steekjaar 2017. Zo was de Volvo XC90 in 2017 de bestverkochte benzine PHEV en de Volvo V60 de bestverkochte dieselvariant. De Mitsubishi Outlander werd aan de selectie toegevoegd omdat deze ook na de herziening van de fiscaliteit voor plug-ins 100% aftrekbaar is gebleven voor zelfstandige ondernemers bij de ingang van 2020.

Het SEMS-systeem bestaat uit een datalogger die aangesloten is op de *On-board Diagnostics* (OBD) aansluiting van het voertuig, aangevuld met automotive sensoren in het uitlaatsysteem voor $NO_x$, $NH_3$ (in het geval van Diesel), een k-type thermokoppel voor uitlaatgastemperatuur en een Lambdasensor (in het geval van benzine, voor de regeling van de driewegkatalysator). Daarnaast bevat het systeem een gps-module en een datamodem, waarmee gegevens automatisch verstuurd worden naar de server. Om specifieke gegevens over het elektrische systeem vast te leggen is het SEMS-systeem zo geprogrammeerd dat *State of charge* (SoC), HV-batterijspanning (V) en HV-batterijstroom (A) gelogd konden worden via de OBD van het voertuig. Voor de Mitsubishi Outlander werden echter geen bruikbare signalen van het elektrische systeem aangetroffen op de OBD, en worden alleen de gegevens van de verbrandingsmotor gebruikt. Van dit voertuig zijn daarom niet alle parameters doorgerekend. De $CO_2$- en $NO_x$ emissies zijn wel weergegeven. Het SEMS-systeem op alle auto's logt met een frequentie van 1 Hz o.a. $NO_x$, $O_2$, Lambda, $NH_3$ in deeltjes per miljoen deeltjes (PPM), en logt van de OBD o.a. wielsnelheid, de bovengenoemde signalen van het elektrische systeem en parameters die relevant zijn voor brandstofverbruik en milieubelasting zoals toerental, (koelwater)temperatuur etc., afhankelijk van de beschikbaarheid in het voertuig.

Na ontvangst van de data in de TNO-serveromgeving, via een automatische en draadloze datatransfer, vindt een geautomatiseerde foutcontrole en tijdsalignering plaats (indien van toepassing), worden concentraties $NO_x$ en $NH_3$ omgerekend naar grammen emissie per seconde en worden snelheid, brandstofverbruik en $CO_2$-emissie berekend voor een robuuste inschatting van de emissies van voertuigen. De methodiek van het SEMS systeem is nader beschreven in (Spreen et al. 2016; Vermeulen et al. 2012; Vermeulen, Goethem, et al. 2014). Gezien er in deze monitoringscampagne géén SCR-diesel werd getest, en de $NH_3$ metingen bij benzinemotoren nog te veel onzekerheden met zich meebrengen, wordt deze polluent niet verder besproken.

De in deze paragraaf gepresenteerde analyse wordt op een later moment uitgebreid beschreven in de rapportage voor het Nederlandse Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, in het kader van het praktijkverbruik van (plug-in) voertuigen. De laatste rapportage in deze serie was (Gijlswijk en Ligterink, 2018). Dit publieke rapport wordt omstreeks mei 2020 verwacht. Met behulp van SEMS is de $CO_2$ en $NO_x$ emissie van de drie hybride voertuigen voor deze opdracht geanalyseerd. De gegevens zijn beschikbaar gesteld voor validatie van de simulaties in hoofdstuk 4 'Modelleringsonderzoek'. Daarnaast is er ook naar de SoC en het elektrisch gebruik van de twee Volvo's gekeken. Omdat deze signalen, via het motormanagementsysteem, niet beschikbaar waren voor de Mitsubishi Outlander is dit voertuig uit dit deel van de analyse gelaten. Een overzicht van de metingen is gegeven in Tabel 18.

Tabel 18: Overzicht van de duur en afstand van de SEMS metingen van de hybride voertuigen.

| | Mitsubishi Outlander | Volvo V60 | Volvo XC90 |
|---|---|---|---|
| **Euronorm** | Euro 6d-TEMP | Euro 5b | Euro 6b |
| **Brandstof** | Benzine | Diesel | Benzine |
| **Duur meting [uur]** | 108,8 | 78,5 | 145,3 |
| **Duur meting voertuig beweegt [uur]** | 97,3 | 69,9 | 111,6 |
| **Afgelegde afstand [km]** | 6.002 | 4.270 | 7.056 |
| **Duur met verbrandingsmotor [uur]** | 58,6 | 42,7 | 66,7 |
| **Afstand met verbrandingsmotor [km]** | 4.487 | 3.119 | 5.377 |
| **Duur volledig elektrisch [uur]** | 38,7 | 27,2 | 44,9 |
| **Afstand volledig elektrisch [km]** | 1.515 | 1.151 | 1.679 |
| **Gemiddelde snelheid [km/uur]** | 55,2 | 54,4 | 48,6 |

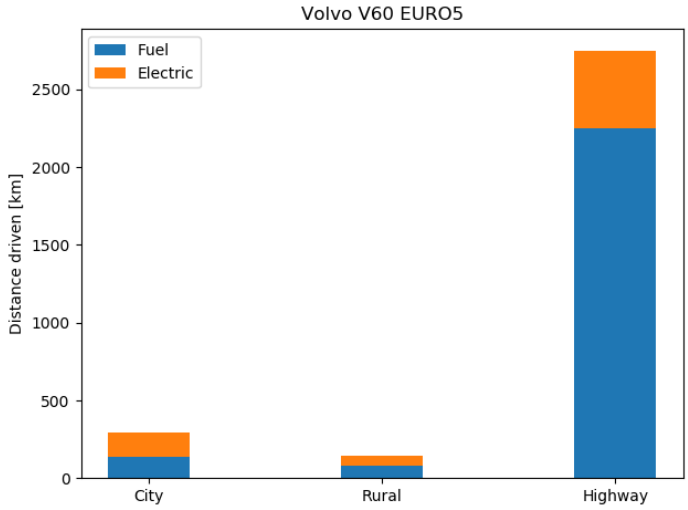
Het SEMS gps-locatiesignaal is voor iedere meting gekoppeld aan de wegenkaart via *Open Street Maps* (OSM, www.openstreetmap.org). Vervolgens is de data ingedeeld in drie categorieën gebaseerd op het type weg, waarbij onderscheid is gemaakt tussen stadswegen, buitenwegen en snelwegen. Met deze benadering wordt, in tegenstelling tot de eenvoudigere snelheidsklasse-benadering, bijvoorbeeld filerijden op de snelweg correct toebedeeld aan snelweg. Metingen waarvan het gps-signaal niet kon worden gekoppeld aan een in de OSM data bekende weg zijn uit de analyse weggelaten. Voor alle drie de voertuigen betekent dit dat ongeveer 70% van de ruwe data is opgenomen in de onderstaande analyse, wat neerkomt op een totale afgelegde afstand van ongeveer 3.200, 5.500 en 4.200 kilometer voor respectievelijk de Volvo V60, de Volvo XC90 en de Mitsubishi Outlander, over een periode van ongeveer twee maanden.

## 3.2 RESULTATEN

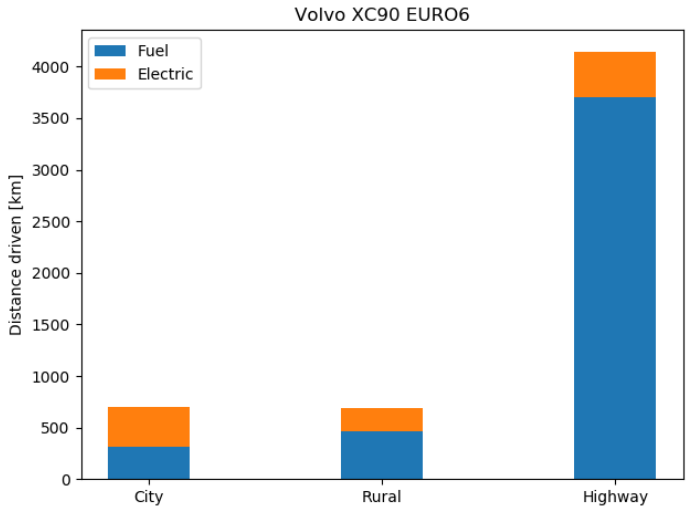
### 3.2.1 Utiliteitsfactoren

Allereerst is de verhouding in afgelegde afstand tussen elektrisch rijden en rijden op brandstof geanalyseerd, dit is de utiliteitsfactor. In Figuur 20, Figuur 21 en Figuur 22 is voor iedere auto het aantal kilometers dat elektrisch en op brandstof is gereden weergegeven, waarbij onderscheid is gemaakt tussen het rijden op stadswegen, buitenwegen en snelwegen. De percentages zijn ook in Tabel 19 aan het eind van dit document weergegeven. Voor de drie voertuigen geldt dat de verdeling elektrisch rijden/rijden op brandstof grofweg overeenkomt met 50%/50%, 50%/50% en 20%/80% respectievelijk

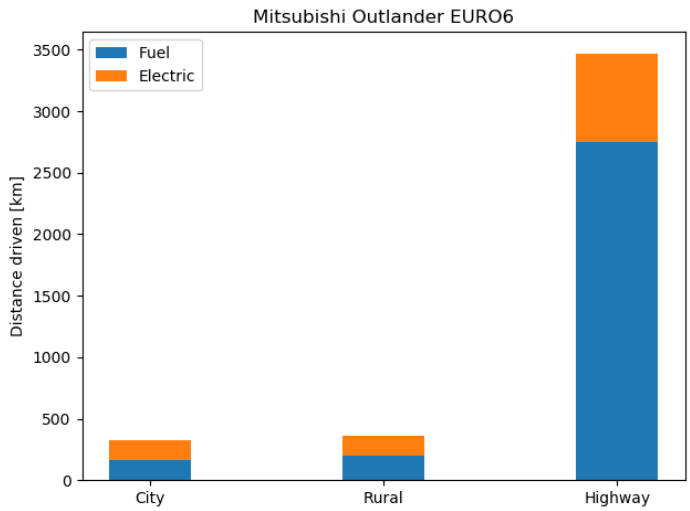
voor rijden op stadswegen, buitenwegen en snelwegen. Een algemene Voor elk voertuig geldt ongeveer dezelfde verdeling, en kan daarom als generiek beschouwd worden. Een gewogen gemiddelde voor alle wegtypes en voor alle testvoertuigen komt neer op zo'n 25%.




Figuur 20: De afgelegde afstand in kilometers waarbij de Volvo V60 elektrisch heeft gereden (oranje) en op diesel heeft gereden (blauw), verdeeld in stadswegen, buitenwegen en snelwegen.



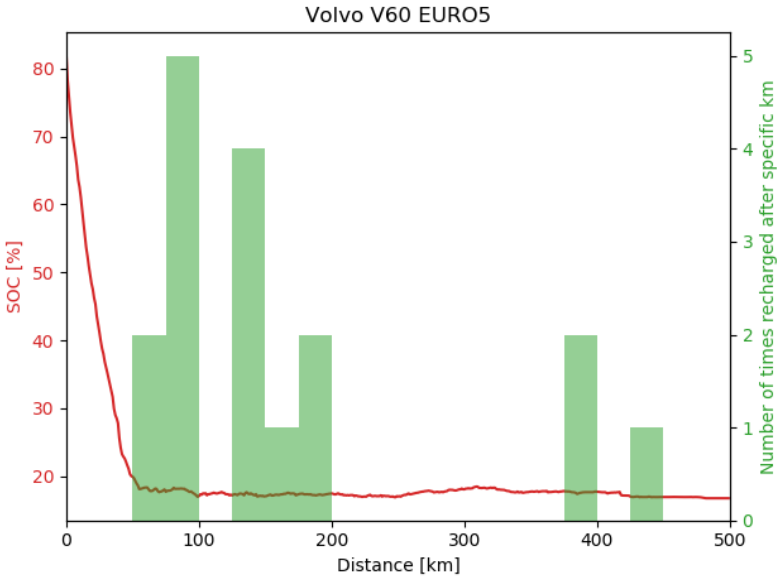

Figuur 21: De afgelegde afstand in kilometers waarbij de Volvo XC90 elektrisch heeft gereden (oranje) en op benzine heeft gereden (blauw), verdeeld in stadswegen, buitenwegen en snelwegen.



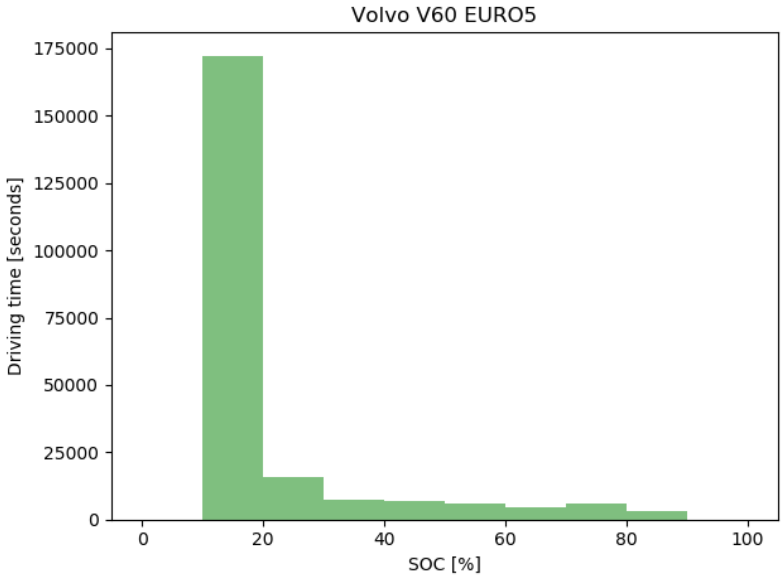

Figuur 22: De afgelegde afstand in kilometers waarbij de Mitsubishi Outlander elektrisch heeft gereden (oranje) en op benzine heeft gereden (blauw), verdeeld in stadswegen, buitenwegen en snelwegen.

### 3.2.2 Laad-/ontlaadgedrag

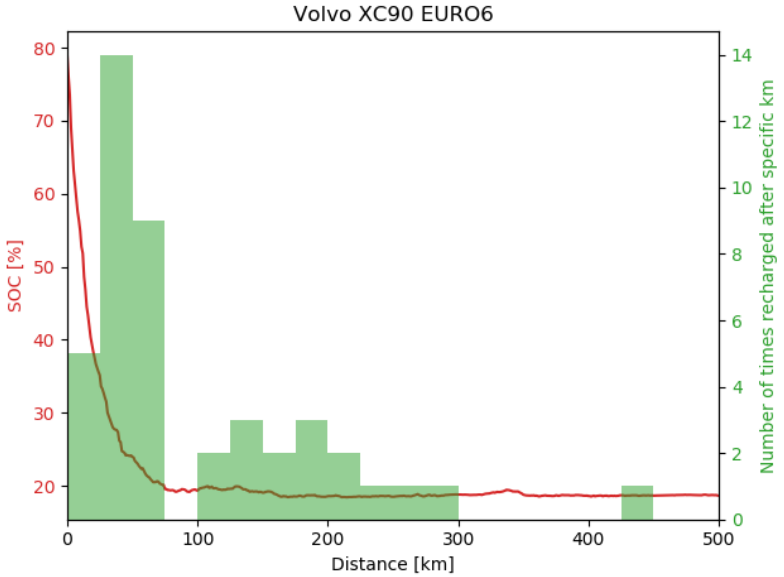
Vervolgens is gekeken naar het ontlaadgedrag van de accu's van de Volvo V60 en de Volvo XC90, waarvan het overzicht in Figuur 23, Figuur 24, Figuur 25 en Figuur 26 is gegeven. De rode curve in Figuur 23 en Figuur 25 laat het gemiddelde verloop van de batterijlading (SoC) zien voor gevallen nadat de accu is ten minste 50% is bijgeladen. Na ongeveer 50 kilometer (mogelijk wordt binnen deze afstand ook gebruik gemaakt van de verbrandingsmotor) is de SoC van beide voertuigen afgenomen naar 20%, waarna de voertuigen grotendeels door brandstof worden aangedreven. Het staafdiagram in de vier figuren laat zien na welke afgelegde afstand de voertuigen zijn opgeladen. Voor de Volvo XC90 is dit gemiddeld na ongeveer 100 kilometer, maar voor de Volvo V60 ligt dit gemiddelde hoger, rond de 200 kilometer met uitschieters tussen 400 en 500 kilometer. Over het algemeen is de accu van de Volvo XC90 vaker opgeladen. De SoC van de Volvo V60 is het vaakst tussen 10% en 20%, en voor de Volvo XC90 is dit tussen de 20% en 30%.



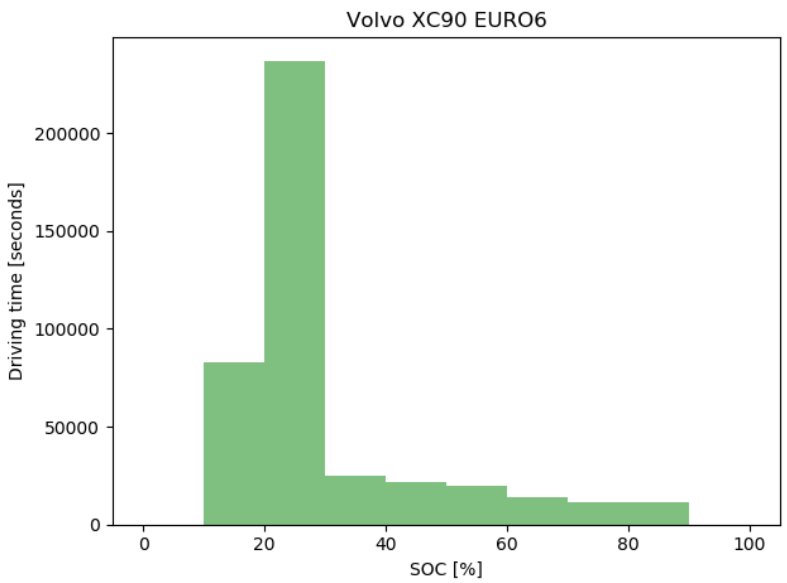

Figuur 23: Resultaten voor de Volvo V60. Rood: het gemiddelde verloop van de SoC voor gevallen nadat de accu is ten minste 50% is bijgeladen. Groen: histogram welke laat zien hoe vaak de accu na een bepaalde afstand is bijgeladen.




Figuur 24: Tijdsverdeling van de State of charge Volvo V60. Verdeling van de SoC, welke piekt tussen 10% en 20% als gevolg van het onvoldoende frequent opladen, en het rijden op de verbrandingsmotor.

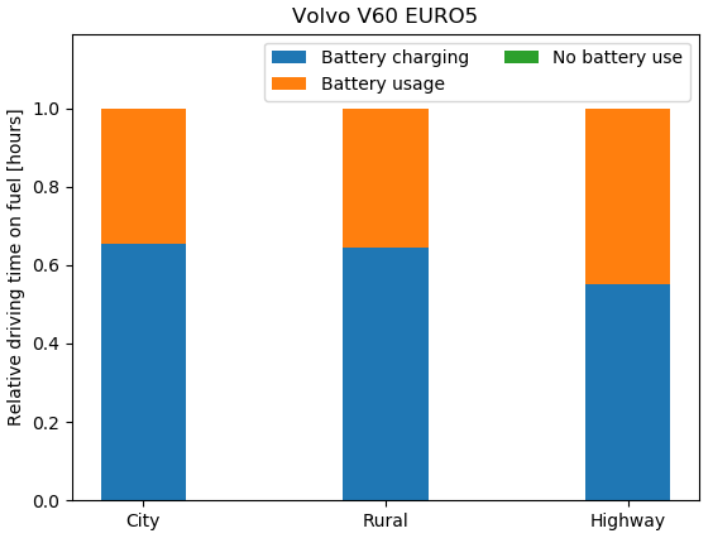



Figuur 25: Resultaten voor de Volvo XC90. Rood: het gemiddelde verloop van de SoC voor gevallen nadat de accu is ten minste 50% is bijgeladen. Groen: histogram welke laat zien hoe vaak de accu na een bepaalde afstand is bijgeladen.

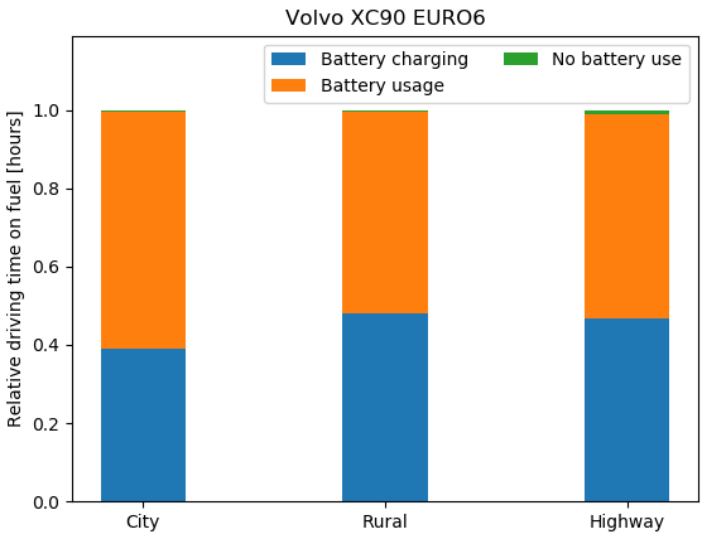



Figuur 26: Tijdsverdeling van de State of charge van de Volvo XC90, welke piekt tussen 20% en 30%.

Wanneer een hybride voertuig op brandstof rijdt, wordt eveneens de accu gebruikt. Er lopen stromen van en naar de accu. Bij het remmen kan bijvoorbeeld de remenergie worden gebruikt om de accu op te laden, en kan elektrisch energie worden gebruikt om het voertuig extra te versnellen. In Figuur 27 en Figuur 28 is het gebruik van de accu weergegeven, wanneer het voertuig voornamelijk wordt aangedreven door de verbranding van brandstof. Voor beide Volvo's geldt dat de accu in de meeste gevallen of wordt opgeladen of wordt gebruikt. Waar de verhouding tussen laden en elektrisch gebruik voor de Volvo V60 ligt op ongeveer 60%/40%, is dit voor de Volvo XC90 ongeveer 40%/60%. De accu wordt zelden helemaal niet gebruikt.



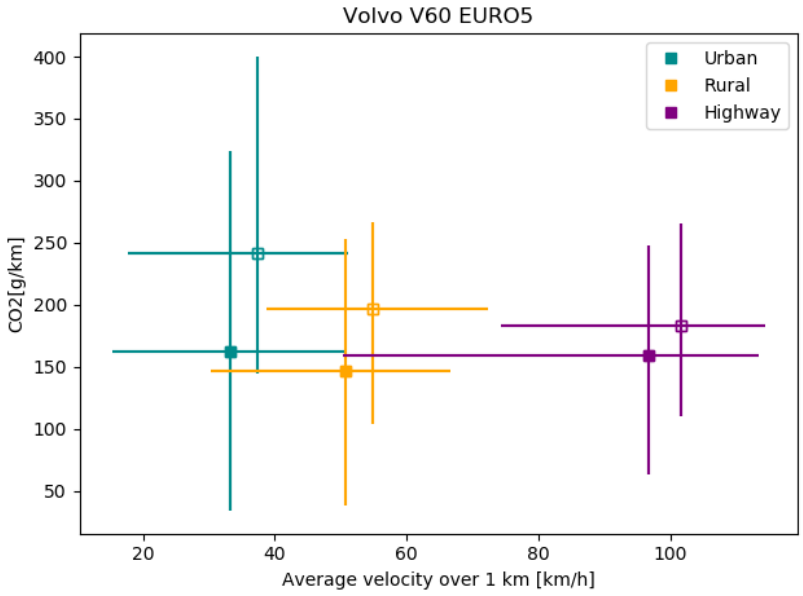

Figuur 27: Rijtijdverdeling energiebronnen Volvo V60. Wanneer er op brandstof wordt gereden wordt in gemiddeld 60% van de gevallen de accu bijgeladen. Voor de overige 40% wordt de accu gebruikt voor extra energie.



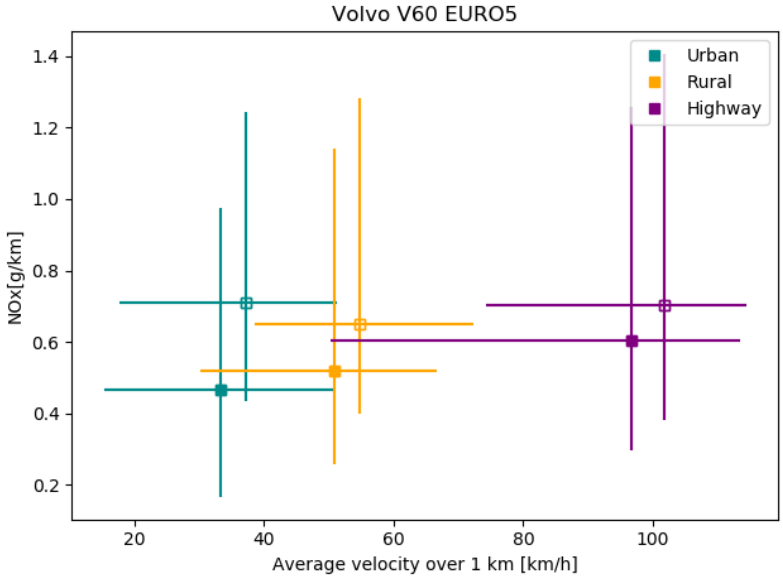

Figuur 28: Rijtijdverdeling energiebronnen Volvo VC90. Wanneer er op brandstof wordt gereden wordt in gemiddeld 40% van de gevallen de accu bijgeladen. Voor de overige 60% wordt de accu gebruikt voor extra energie en in zeldzame gevallen wordt er geen beroep op de accu gedaan.

### 3.2.3 Emissie van polluenten

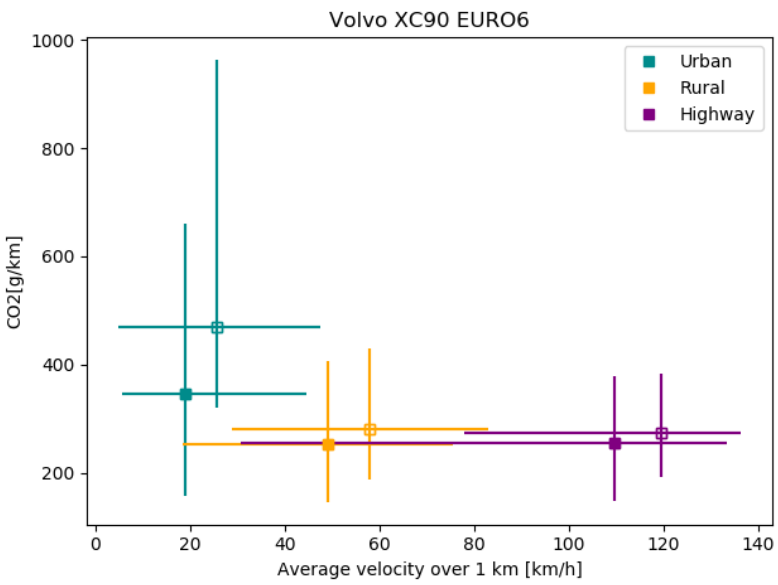
De emissiefactoren voor $CO_2$ en $NO_x$ van de drie voertuigen zijn eveneens bepaald uit de SEMS metingen. Tevens is ook hierbij onderscheid gemaakt tussen het rijden op stadswegen, buitenwegen en snelwegen. De gemiddelde emissiefactoren zijn weergegeven in onderstaande zes figuren, waarbij ook de 1-sigma standaardafwijkingen zijn weergegeven, ofwel dat grofweg 68% van alle metingen vallen binnen de lijnen in deze figuren. De x-as is de gemiddelde snelheid, gedefinieerd over 1 kilometer, welke het gemiddelde is van de snelheden 500 meter voor en 500 meter na het meetpunt. De resultaten waarvoor alle data van de auto's zijn gebruikt, dus waar elektrisch en op brandstof is gereden (CS + CD modus), zijn weergegeven met de 'gevulde' symbolen. De 'open' symbolen laten de emissiefactoren zien wanneer alleen op brandstof is gereden (CS modus), welke in alle gevallen hoger zijn dan wanneer elektrisch rijden ook is meegenomen in de bepaling van de emissiefactoren. Daarnaast is de gemiddelde snelheid op zowel stadswegen, buitenwegen en snelwegen hoger wanneer er alleen op brandstof is gereden. De $CO_2$- en $NO_x$-emissiefactoren zijn in Tabel 19 opgenomen.



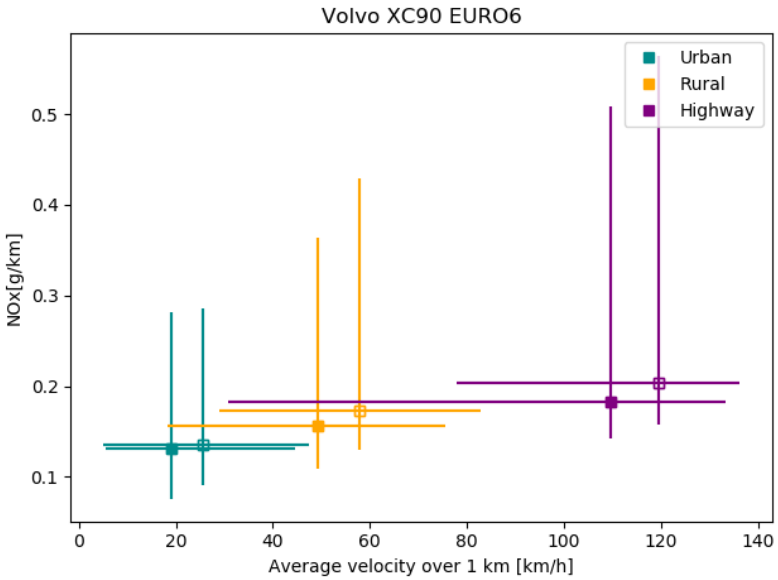

Figuur 29: $CO_2$ emissiefactoren voor de Volvo V60 diesel als functie van de gemiddelde snelheid over 1 kilometer. De gevulde symbolen laten de resultaten zien voor alle data (elektrisch rijden en op brandstof) en de open symbolen geven de emissiefactoren weer voor wanneer er alleen op brandstof is gereden. De lijnen laten zien waar 68% van de metingen liggen. De resultaten zijn verdeeld in het rijden op stadswegen, buitenwegen en snelwegen.



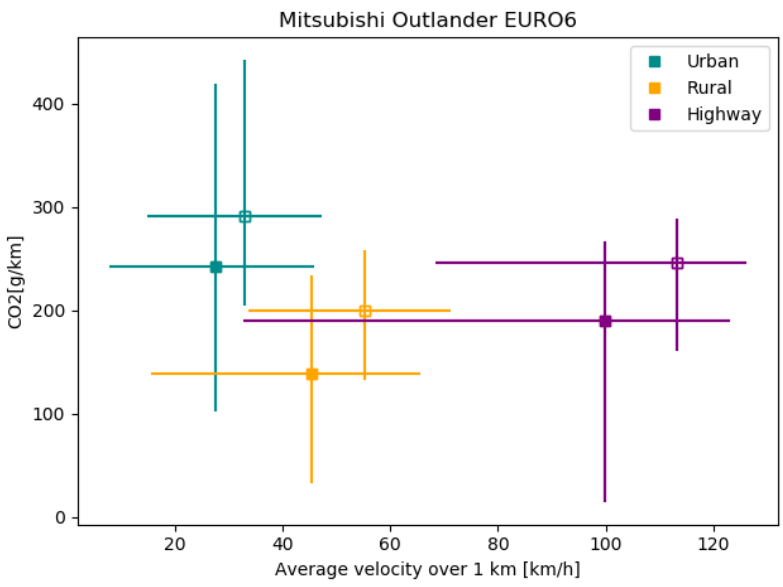

Figuur 30: $NO_x$ emissiefactoren voor de Volvo V60 diesel als functie van de gemiddelde snelheid over 1 kilometer. De symbolen zijn op dezelfde manier gebruikt als in Figuur 29.



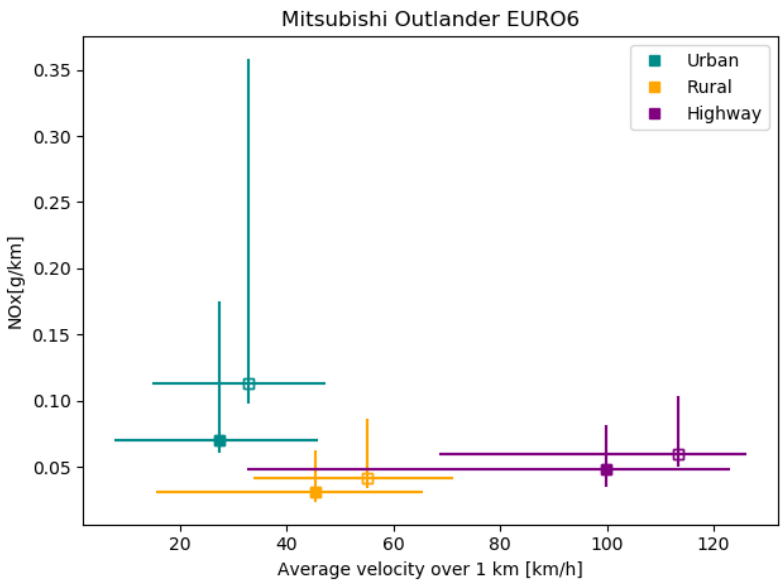

Figuur 31: $CO_2$ emissiefactoren voor de Volvo XC90 benzine als functie van de gemiddelde snelheid over 1 kilometer.




Figuur 32: $NO_x$ emissiefactoren voor de Volvo XC90 benzine als functie van de gemiddelde snelheid over 1 kilometer.




Figuur 33: $CO_2$ emissiefactoren voor de Mitsubishi Outlander benzine als functie van de gemiddelde snelheid over 1 kilometer.




Figuur 34: $NO_x$ emissiefactoren voor de Mitsubishi Outlander benzine als functie van de gemiddelde snelheid over 1 kilometer.

Tabel 19: Overzicht van de resultaten van de analyse van de drie hybridevoertuigen. Het aandeel kilometers dat op brandstof en elektrisch is gereden is gegeven voor de drie verschillen type wegen in de eerste drie rijen, zie ook Figuur 21, Figuur 22 en Figuur 23. De overige rijen geven de emissiefactoren die ook in Figuur 29 tot en met Figuur 34 zijn gepresenteerd.

| | Volvo V60 | Volvo XC90 | Mitsubishi Outlander |
|---|---|---|---|
| **Stad: op brandstof / elektrisch (km%)** | 46,2/53,8 | 45,2/54,8 | 51,3/48,7 |
| **Buitenweg: op brandstof / elektrisch (km%)** | 56,5/43,5 | 66,3/33,7 | 53,9/46,1 |
| **Snelweg: op brandstof / elektrisch (km%)** | 81,8/18,2 | 89,4/10,6 | 79,3/20,7 |
| **Stad: gemiddelde $CO_2$ alle data / alleen op brandstof (g/km)** | 162,5/242,0 | 345,7/469,1 | 242,0/290,8 |
| **Buitenweg: gemiddelde $CO_2$ alle data / alleen op brandstof (g/km)** | 146,8/196,4 | 253,7/280,3 | 138,6/200,0 |
| **Snelweg: gemiddelde $CO_2$ alle data / alleen op brandstof (g/km)** | 159,1/183,2 | 255,9/280,3 | 189,9/245,7 |
| **Stad: gemiddelde $NO_x$ alle data / alleen op brandstof (g/km)** | 0,464/0,709 | 0,131/0,136 | 0,070/0,113 |
| **Buitenweg: gemiddelde $NO_x$ alle data / alleen op brandstof (g/km)** | 0,519/0,648 | 0,157/0,173 | 0,031/0,042 |
| **Snelweg: gemiddelde $NO_x$ alle data / alleen op brandstof (g/km)** | 0,602/0,703 | 0,183/0,204 | 0,049/0,059 |

## 3.3 CONCLUSIES

De gemonitorde voertuigen kunnen tot ongeveer 50 km afleggen totdat de accu een eindwaarde van 20%-30% SoC heeft, en voordat er weer bijgeladen wordt via de verbrandingsmotor. Een deel van deze 50 km wordt mogelijk op brandstof afgelegd. Wat opvalt is dat de voertuigen niet frequent (genoeg) worden geladen en vooral bij snelweggebruik wordt er slechts in beperkte mate elektrische gereden, goed voor gemiddeld 20%. In de stad en buitenweg wordt een hoger aandeel van 50% van de kilometers elektrisch afgelegd. De gemiddelde utiliteitsfactor voor alle wegtypes ligt rond de 25%, terwijl een fijnmazigere insteek leidt tot 50%/50%/20% voor respectievelijk stedelijk/ruraal/snelweg.

De $CO_2$-emissies zijn bij de geteste voertuigen 15-50% lager voor stad en buitenweg, en 10-15% voor snelweg, ten opzichte van 'gewone hybride'-mode (*charge-sustaining*). Toch zijn de $CO_2$-emissies van deze voertuigen hoog, ook met het elektrische aandeel rijden, ten opzichte van typische $CO_2$-emissies van voertuigen. Dit komt waarschijnlijk omdat het grote en zware voertuigen betreft, en het aandeel elektrisch rijden daar beperkt voordeel geeft.

Het aandeel snelweg in het gebruik van deze voertuigen is verrassend hoog, met een gemiddelde van 79%[1]. De vraag is of een dergelijke inzet normaal is voor Vlaanderen, of specifiek voor dergelijke voertuigen. Algemeen rijden Vlaamse automobilisten immers maar zo'n 41% van de gereden kilometers over snelwegen. In Nederland rijden nieuwe auto's ongeveer 55% van de afstand op de snelweg.

[1] Voor de Mitsubishi Outlander 81% van de totaal gemeten afstand, voor de Volvo V60 84% van de tijd en voor de Volvo XC90 73% van de tijd

# 4 MODELLERINGSONDERZOEK

## 4.1 EMISSIE- EN ENERGIEVERBRUIKSFACTOREN VOOR PHEV PERSONENWAGENS

### 4.1.1 Doelstellingen

Het doel van dit onderdeel van de studie is het reëel elektrische energieverbruik (EC) en brandstofverbruik (FC) en de voornaamste reële emissiefactoren (NOx,CO, HC en PM uitlaat) binnen de verschillende segmenten voor plug-in hybride elektrische voertuigen (PHEV) in kaart te brengen. De resultaten moeten betrekking hebben op "gemiddelde" voertuigen die drie voertuig-segmenten vertegenwoordigen (PHEV klein, PHEV medium, PHEV groot), bij normaal gebruik in het Vlaamse Gewest. Het 'extra kleine' voertuigsegment, dat in COPERT wordt gebruikt, wordt niet onderzocht omdat de huidige trends een afnemende interesse van de consument in dit segment tonen. De gemiddelde voertuigen zijn gemodelleerd door voertuigspecificaties te combineren uit de $CO_2$-monitoring databank van het Europees Milieuagentschap (EEA 2019), en uit openbare bronnen zoals officiële websites van voertuigfabrikanten. De hiervoor beschreven SEMS-metingen uitgevoerd door TNO (zie hoofdstuk 3) worden gebruikt om inzicht te krijgen in de gemiddelde utiliteitsfactor (UF) van PHEV's, terwijl de bekomen praktijkemissiefactoren eveneens worden aangewend om de resultaten uit het modelleringswerk te kunnen valideren/kalibreren.
Naast het genereren van resultaten voor de gemiddelde voertuigen anno 2020, worden ook het brandstof- en energieverbruik en de reële emissiefactoren van toekomstige PHEV's onderzocht. Zo analyseren we een reeks verschillende parameters die naar verwachting in de toekomst zullen wijzigen/verbeteren.

## 4.2 HUIDIGE PHEV'S

### 4.2.1 Methodologie

In de afgelopen jaren is het heel gebruikelijk geworden om bij onderzoek naar brandstof- en energieverbruik en reële emissiefactoren een simulatiebenadering te doen, in plaats van eerst het voertuig te bouwen, te bemeten of te monitoren. De groeiende behoefte aan simulatiesoftware heeft geleid tot een breed scala aan *tools* die nauwkeurige resultaten opleveren. In deze studie werd ook een computersimulatie van de werking van PHEV gebruikt om gegevens te verkrijgen over de $CO_2$-uitstoot, het brandstofverbruik en het elektrisch energieverbruik. Het simulatie-platform dat voor deze studie wordt gebruikt, is geschikt voor voertuigsimulatie en aandrijflijnanalyse.

Laat ons starten door eerst nog even de werking van een PHEV (of *Off-Vehicle Charging Hybrid Electric Vehicle* (OVC-HEV)) te herhalen. Deze voertuigen gebruiken twee energiebronnen voor de aandrijving van de wielen, zijnde een interne verbrandingsmotor en een batterij. De batterij kan worden opgeladen door deze aan te sluiten op een externe voedingsbron of aan boord via de verbrandingsmotor en een generator. De werking van deze voertuigen kan worden onderverdeeld in twee hoofdmodi: de modus waarin de batterij ontladen wordt (*charge depleting* - CD) en de modus voor het behouden van een bepaald ladingsniveau (*charge sustaining* - CS). In de CD-modus is de werking van het voertuig vergelijkbaar met een puur elektrisch voertuig, omdat de energie voor de aandrijving hoofdzakelijk afkomstig is van de elektromotor, met de verbrandingsmotor nagenoeg altijd uitgeschakeld. In CS-modus blijft de ladingstoestand (*state of* charge of SoC) van de batterij ongeveer hetzelfde en is de belangrijkste

energiebron voor aandrijving de verbrandingsmotor. Het voertuig werkt dus als een hybride elektrisch voertuig (HEV), omdat zowel de batterij als de verbrandingsmotor worden gebruikt.

Voor het maken van simulatiemodellen die hele voertuig-segmenten kunnen vertegenwoordigen, zijn er drie belangrijke stappen. In de eerste stap wordt het simulatiemodel van één specifiek voertuig voor elk segment gemaakt. Vervolgens is een analyse van een databank met specificaties voor verschillende voertuigen uit elk segment vereist. Uit deze analyse kunnen de gemiddelde specificaties van elk segment worden afgeleid. Ten slotte worden deze gemiddelde specificaties gebruikt als input bij het maken van simulatiemodellen van gemiddelde voertuigen.

#### 4.2.1.1 Voertuigsimulatiemodel

De structuur van een simulatiemodel is vergelijkbaar met die van een echt voertuig. Er zijn componenten die verantwoordelijk zijn voor het simuleren van verschillende functies, zoals het brandstofverbruik, de uitstoot van de verschillende luchtverontreinigende stoffen en onderdelen die zijn gewijd aan het simuleren van de werking van de aandrijflijn, de batterij en het elektrisch verbruik, de elektromotor, de generator, enz. Er is ook een regeleenheid, in staat om de energiestroom te berekenen, gebaseerd op rijomstandigheden en het type hybride aandrijflijn. Deze besturingseenheid 'schakelt' tussen de gebruikte energiebronnen, zijnde de verbrandingsmotor en de batterij. Algemeen gezien zijn twee gegevenssets nodig voor het maken van de simulatiemodellen. De eerste dataset verwijst naar informatie van het voertuig en de tweede naar informatie over de specifieke simulatie die moet worden uitgevoerd, bijvoorbeeld een specifiek snelheidsprofiel, de geselecteerde overbrengingsverhoudingen en/of informatie over de omgevingsomstandigheden.

#### 4.2.1.2 Modelkalibratie

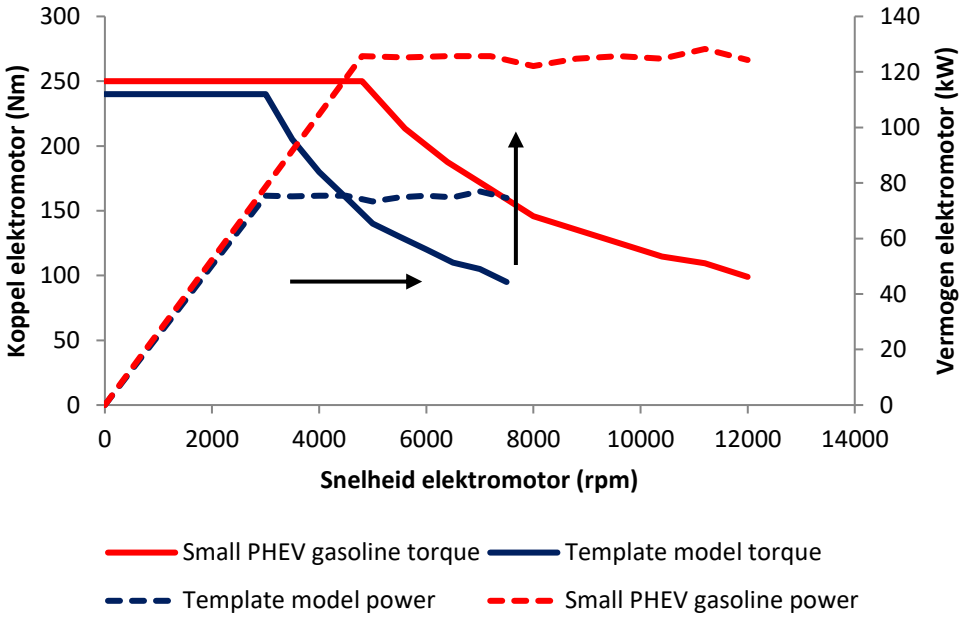
De eerste stap bij het bouwen van een simulatiemodel voor een voertuig is het verkrijgen van de voertuigspecificaties van de voertuigfabrikanten (*Original Equipment Manufacturers* of OEM) en uit de literatuur. Deze gegevens omvatten de specificaties van de motor (bijv. cilinderinhoud en het vermogen), de eigenschappen van het koetswerk (bv. het gewicht en de luchtweerstandscoëfficiënt) en alle andere informatie die gemakkelijk toegankelijk is. Samen met deze gegevens worden generieke *mappings* voor het brandstofverbruik, het generieke elektrische laadvermogen van de machine en andere gegevens uit een interne Emisia databank gebruikt. De volgende stap is om het simulatiemodel te maken met alle verzamelde gegevens en enkele testsimulaties uit te voeren.
De resultaten worden vergeleken en gevalideerd met de testresultaten van rollenbankmetingen en praktijktests. '*Test-runs*' en wijzigingen worden uitgevoerd totdat de resultaten van de simulatie zo dicht mogelijk bij de gemeten waarden komen. Deze *test-runs* simuleren herhalingen van de warme startcyclus (bijv. de NEDC warme start en WLTP warme start) waarop alle subsystemen van het model zijn gekalibreerd. Dezelfde methode wordt gevolgd voor de kalibratie van de koude start, met herhalingen van de koude startcyclus (bijv. de NEDC koude start en WLTP koude start), die voldoen aan de vereiste van een typegoedkeuring.

#### 4.2.1.3 Datacollectie en een 'gemiddeld' voertuig

De hierboven beschreven methodologie verwijst naar het creëren van een simulatiemodel van een specifiek voertuig. Om modellen te maken die een voertuigsegment kunnen vertegenwoordigen, moeten wijzigingen worden aangebracht op basis van gemiddelde gegevens voor dit segment. Daartoe werden voertuigspecificaties uit de EEA-databank en gegevens van openbaar beschikbare bronnen gecombineerd in één dataset. De PHEV's in deze gecombineerde database werden in drie segmenten ingedeeld: PHEV klein, PHEV medium, PHEV groot.

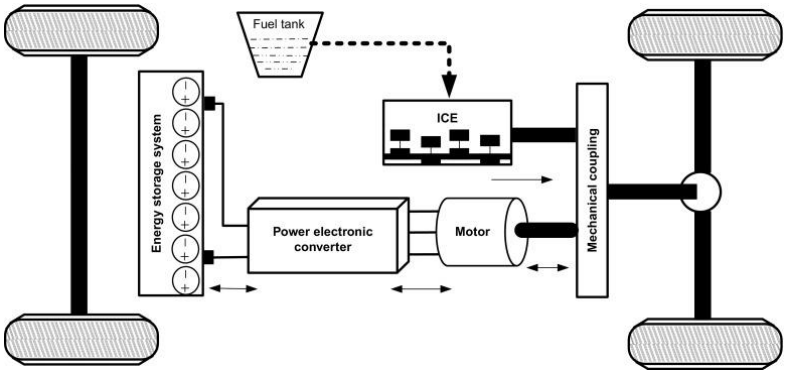
#### 4.2.1.4 Ontwikkeling van het gemiddeld voertuig

Gemiddelde specificaties, samen met generieke *mappings* voor brandstofverbruik, geschaalde koppel- en vermogencurves voor een verbrandingsmotor, geschaalde batterijkarakteristieken en geschaalde vollastkarakteristieken voor een elektromotor werden gebruikt om de simulatiemodellen te maken voor vier gemiddelde segmenten. Merk op dat in het kleine segment slechts één voertuigmodel in de databank bestond. Verder valt op dat we voor deze studie geen doorrekening maken van een kleine of medium PHEV diesel, gezien we hiervoor binnen het consortium geen toekomst meer zien. De *mapping* voor brandstofverbruik werd geselecteerd op basis van de motorverplaatsing van het gesimuleerde voertuig. De volledige belastingscurve van de elektromotor is geschaald, zoals weergegeven in Figuur 35 om het maximale vermogen en koppel van elk gemiddeld voertuig te matchen.

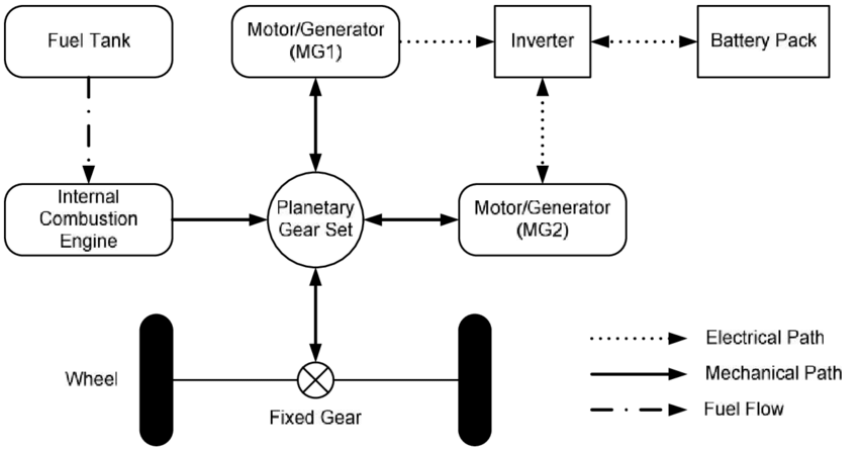



Figuur 35: Verschaling van de vollastcurve van de elektromotor, met op de primaire Y-as de verwijzing naar de continue lijnen en op de secundaire Y-as naar de stippellijnen.

Voor de gesimuleerde voertuigen maken we gebruik van de twee meest populaire hybride architecturen, nl. de parallelle en de zogenaamde *power-split*. In een parallelle configuratie zijn de verbrandingsmotor en de elektromotor parallel geschakeld, zoals weergegeven in Figuur 36. Hierdoor kunnen zowel de verbrandingsmotor als de elektromotor het voertuig afzonderlijk aandrijven. In het geval van een *power-split* aandrijflijn is er sprake van een complex planetair tandwielstelsel dat de vermogens tussen de twee krachtbronnen verdeelt, zoals weergegeven in Figuur 37.




Figuur 36: Parallelle hybrideconfiguratie (**Bron: Rashid 2017**)




Figuur 37: *Power-split* opstelling (**Bron: Wu, Boriboonsomsin, and Barth 2014**)

De kenmerken van de gemiddelde worden weergegeven in Tabel 20. De verwachte toekomstige veranderingen in deze kenmerken worden verderop in dit hoofdstuk toegelicht (zie paragraaf 4.3).

Tabel 20: Gemiddelde PHEV-karakteristieken, aangevuld met een spreiding per parameter om toe te laten dat toekomstige modellen volgens deze manier kunnen onderscheiden worden (gebaseerd op COPERT).

| Voertuig segment | Brandstof type | Config. | Gewicht (kg) | Luchtweer-stands-coëfficiënt | Batterij-capaciteit (kWh) | Motor-vermogen (kW)* | Vermogen elektro-motor (kW) | Modellen |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Klein** | Benzine | Parallel | 1.412 (1.390-1.480) | 0,29 | 27,2 | 28 | 125 | BMW i3* |
| **Medium** | Benzine | Power-split | 1.560 (1.500-1.625) | 0,25 (0,23-0,32) | 3,9 (3,2-10,9) | 72,8 (63-115) | 97,1 (44.5-111) | Toyota Prius |
| **Groot** | Benzine | Power-split | 1.982 (1.560-2.635) | 0,307 (0,25-0,36) | 10,8 (5-12) | 148,3 (99-410) | 97 (60-130) | Simulatie |
| **Medium** | Benzine | Parallel | 1.672 (1.500-1.880) | 0,292 (0,23-0,32) | 9,1 | 102,1 | 102,1 | VW Golf GTE |
| **Groot** | Benzine | Parallel | 1.982 (1.560-2.635) | 0,307 (0,25-0,36) | 10,8 (5-12) | 148,3 (99-410) | 97 (60-130) | Mitsubishi Outlander |
| **Groot** | Diesel | Parallel | 2.093 (1.949-2.785) | 0,3 (0,29-0,34) | 12,5 (8-15) | 164,8 (158-190) | 59,3 (50-94) | Volvo V60 Twin Engine |

**De BMW i3, een seriële hybride, is de enig beschikbaar kleine PHEV*

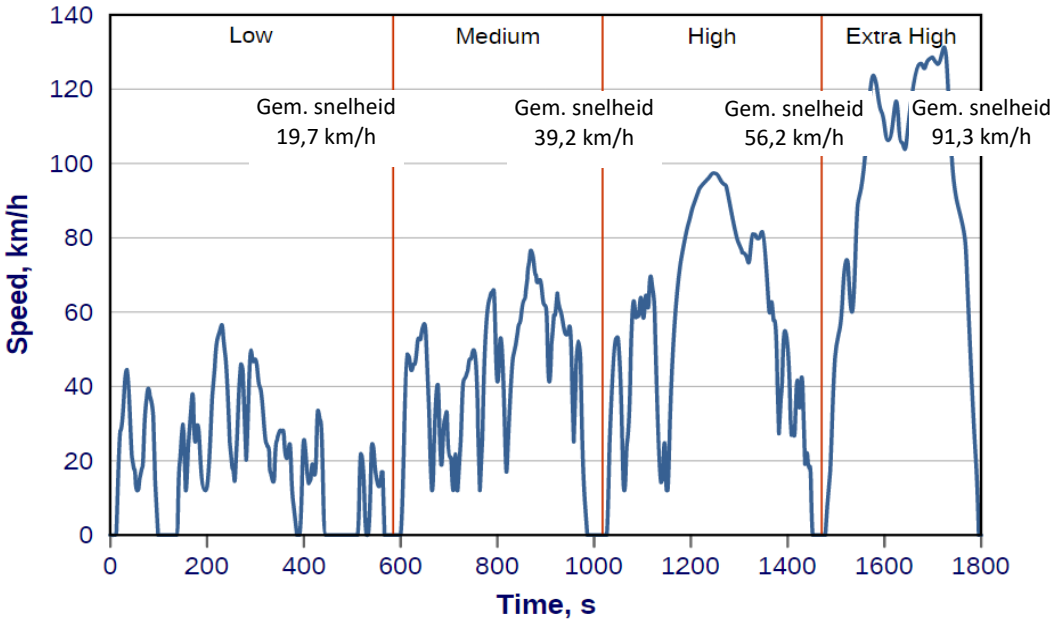
Het voertuiggewicht en motorvermogen kwamen rechtstreeks uit de EEA $CO_2$ monitoring databank (EEA 2019). Alle andere parameters zijn ontleend aan openbare bronnen (bijvoorbeeld officiële OEM-websites, brochures, enz.). Merk op dat de EEA $CO_2$ monitoring databank geen andere kleine PHEV's bevat dan de BMW i3, welke echter een serie-hybride model is. Simulaties in Tabel 21 zijn geselecteerd om het elektrische energieverbruik (EC) en brandstofverbruik (FC) van de gemiddelde voertuigen door te kunnen rekenen. De simulaties zijn uitgevoerd met twee verschillende waarden voor de initiële laadstatus (SoC) van de batterij. In het eerste geval wordt gestart met een hoge SoC en worden de resultaten gebruikt voor de berekening van het energieverbruik, omdat het voertuig dan voornamelijk rijdt met behulp van de elektromotor in de zogenaamde *charge-depleting* (CD) modus. In het tweede geval starten we met een lage SoC opdat we het brandstofverbruik kunnen berekenen, gezien het

voertuig dan in *charge-sustaining* (CS) modus werkt. Alle simulatieresultaten werden uitgevoerd onder warme startomstandigheden. De gebruikte testcycli zijn de WLTC, de CADC (Common Artemis Driving Cycle) en de RDE-test (*Real Driving Emissions*). De CADC bestaat uit drie subcycli, namelijk de Artemis Urban, Rural en Motorway (André 2004). De RDE-cyclus heeft ook een stads-, een plattelands- en een snelweggedeelte. Voor de ontwikkeling van emissiefactoren van PHEV's worden simulatie-resultaten van de bovenstaande rijcycli gebruikt, zoals dit gebruikelijk is voor de bepaling van alle emissiefactoren volgens het principe van COPERT.

Tabel 21: Simulatiescenario's voor de gemiddelde PHEV's

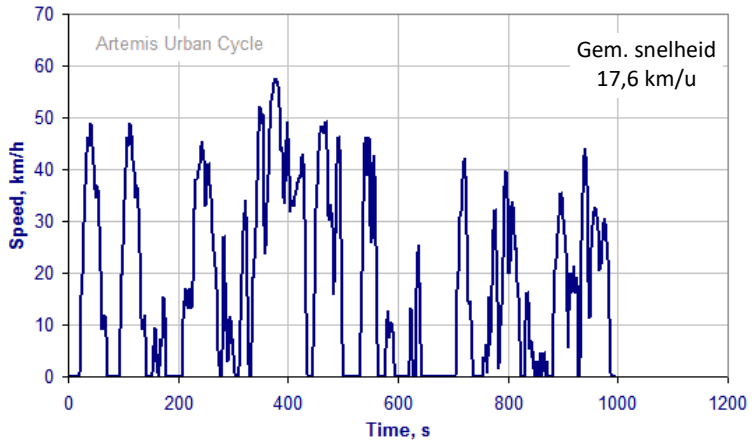
| Branstoftype | Voertuigsegment | Configuratie | Testcyclus |
|---|---|---|---|
| Benzine | Klein | Power-split | 1. WLTC high & low initial SOC[2] |
| | Medium | Power-split | 2. Artemis Urban high & low initial SOC |
| | Groot | Power-split | 3. Artemis Rural high & low initial SOC |
| | Medium | Parallel | 4. Artemis Highway high & low initial SOC |
| | Medium | Parallel | 5. RDE Urban 1 high & low initial SOC |
| Diesel | Groot | Parallel | 6. RDE Urban 2 high & low initial SOC<br>7. RDE Rural high & low initial SOC<br>8. RDE Motorway high & low initial SOC |

De hierboven beschreven testcycli worden grafisch weergegeven in Figuur 38 tot en met Figuur 42. Het WLT-rijprofiel (Figuur 38) is verdeeld in 4 fasen naargelang de voertuigsnelheid: laag, gemiddeld, hoog en extra hoog. Deze rijfasen simuleren respectievelijk stedelijke, voorstedelijke, landelijke en snelweg rijomstandigheden. Door de bovenstaande rijcycli op te splitsen in subcycli kunnen emissiefuncties worden geproduceerd door meer combinaties van emissies en gemiddelde snelheid te bieden (zie ook de resultaten in paragraaf 4.2.3) en is consistent met de methodologie voor de productie van emissiefactoren voor alle voertuigcategorieën en technologieën in COPERT.

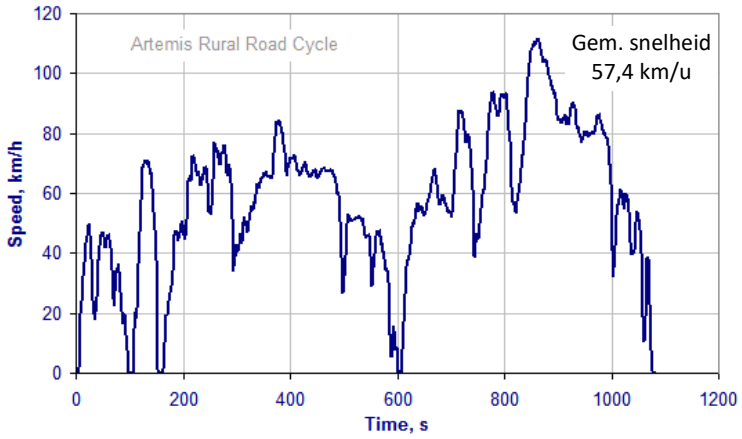



Figuur 38: WLTC snelheidsprofiel fasen **(Bron: Dieselnet)**

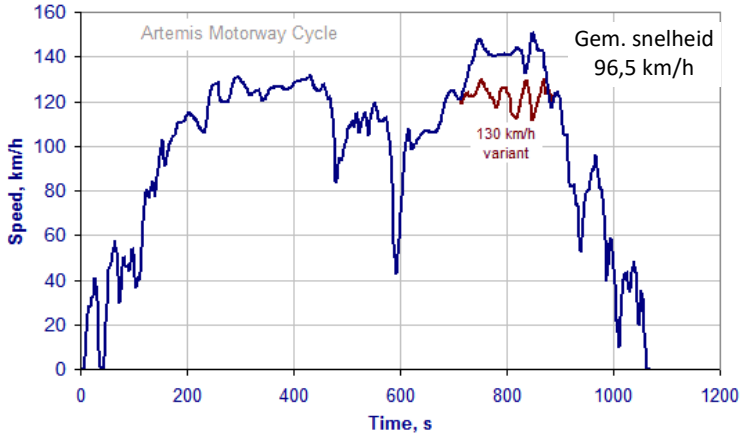
[2] De 'high' en 'low' SOC komen respectievelijk overeen met een laadniveau van de batterij van 90% en 10%.



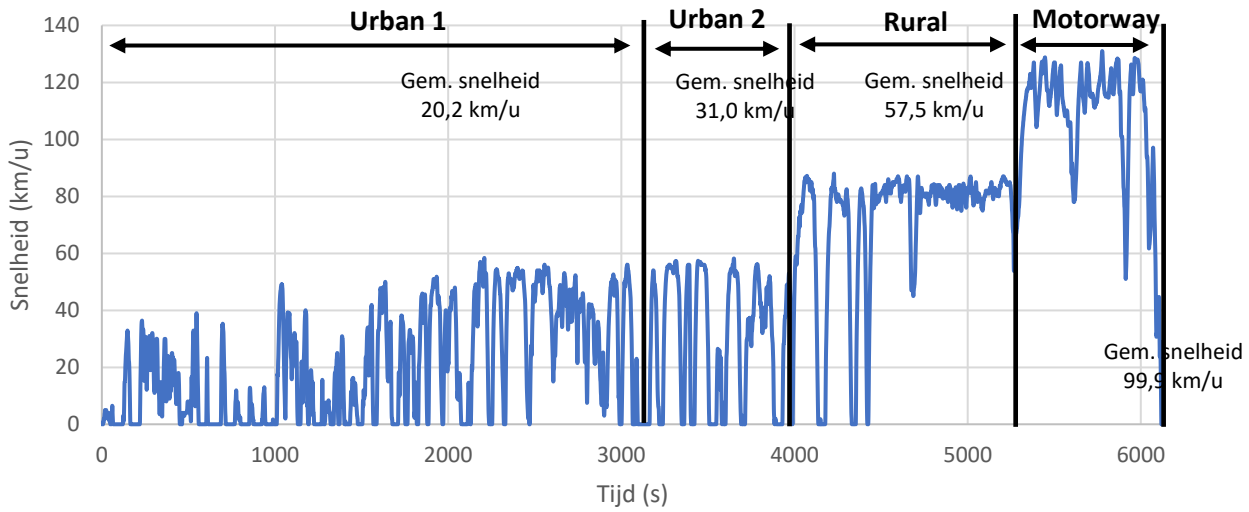

Figuur 39: Artemis stadsrijprofiel




Figuur 40: Artemis rijprofiel voor rurale wegen




Figuur 41: Artemis rijprofiel voor snelwegen



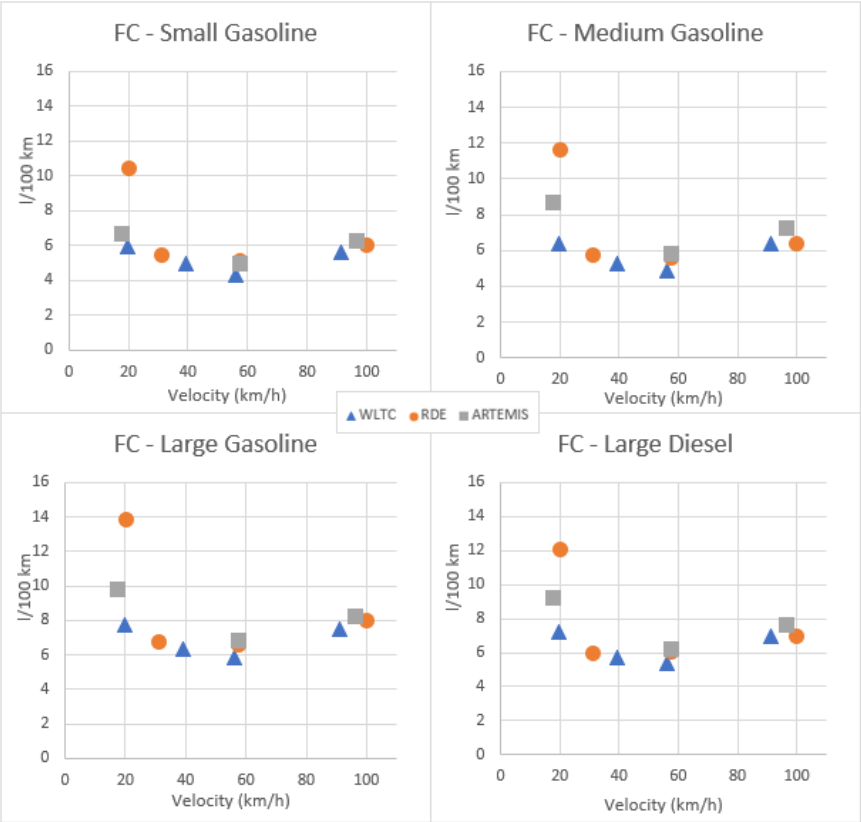

Figuur 42: The RDE cyclus

### 4.2.2 Resultaten

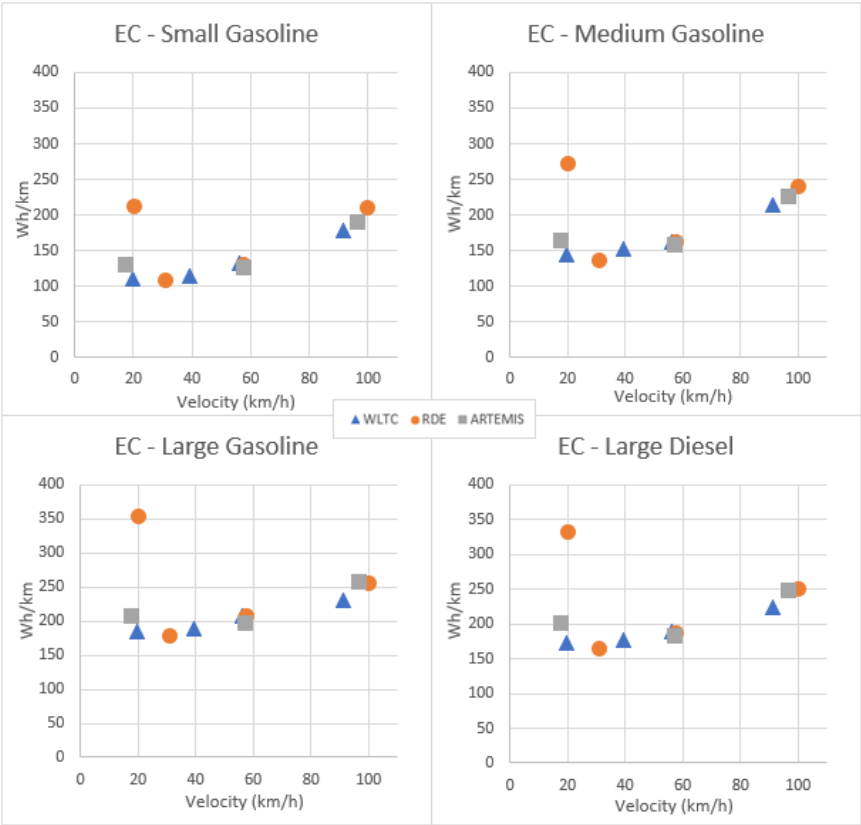
Na het uitvoeren van alle simulaties werden de resultaten verzameld en geanalyseerd. In de CD-modus wordt het elektrische energieverbruik berekend door de totale verbruikte elektrische energie te delen door de totale afstand van de gesimuleerde rit. Op vergelijkbare wijze wordt het brandstofverbruik berekend door de totale verbruikte brandstofmassa te delen door de totale afstand van de rit.

De *power-split*configuratie werd aanvankelijk gebruikt toen PHEV's voor het eerst op de markt verschenen, die werd gedomineerd door één PHEV-model (nl. de Toyota Prius). Sindsdien zijn steeds meer fabrikanten met PHEV-modellen met een parallelle configuratie op de proppen gekomen, terwijl geleidelijk aan marktaandeel van *power-split*voertuigen sterk daalt. Zo blijkt uit de EEA-databank dat hun totale aantal jaarlijkse registraties in de periode 2010-2017 slechts 3% van alle PHEV-voertuigen bedroeg. De resultaten in de onderstaande tabellen en cijfers weerspiegelen het gewogen gemiddelde van de verkoopsresultaten van *power-split*- en parallelle PHEV’s. Er moet opgemerkt worden dat het verschil in emissies tussen de twee configuraties erg klein is. Ter indicatie: de power-split voertuigen vertoonden ongeveer een 10% hoger energieverbruik dan het gemiddelde voertuig met parallelle aandrijflijn.
De resultaten van het elektrische energie (enkel CD-modus) en brandstofverbruik (enkel CS-modus) PHEV's worden gepresenteerd in Figuur 43 en Figuur 44. Het gecombineerde energievebruik (elektrisch + brandstof) in CD+CS-modes wordt weergegeven in Figuur 45. De verschillende punten in de grafieken komen overeen met het verbruik dat is genoteerd in de bovengenoemde rijcycli of delen daarvan. Gedetailleerde resultaten zijn vermeld in Gemiddelde snelheid van de fasen van elke cyclus. In de WLTC lage fase is de gemiddelde snelheid bijvoorbeeld 19,7 km/h. Op deze manier hebben we veel snelheid-energieverbruik punten gevonden om de snelheidsafhankelijke energieverbruik functie te berekenen.

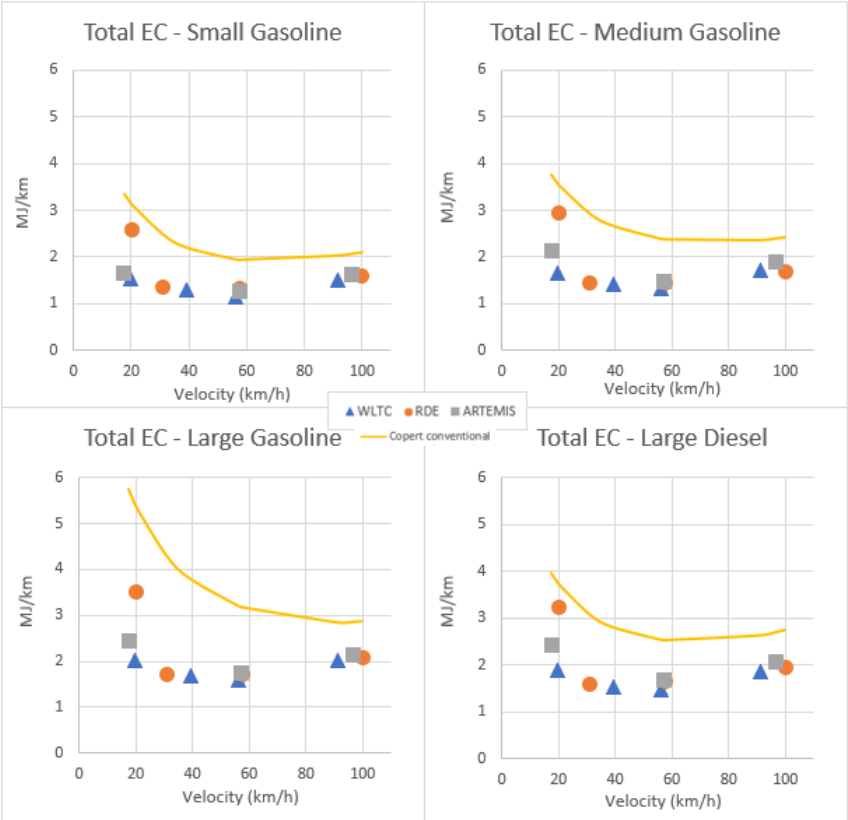
Tabel 66, Tabel 67 en Tabel 68 in de appendix.




Figuur 43: Brandstofverbruik van de generieke PHEV's bij verschillende rijprofielen (enkel CS-modus)




Figuur 44:
Elektrisch energieverbruik van PHEV bij verschillende rijprofielen (enkel CD-modus)

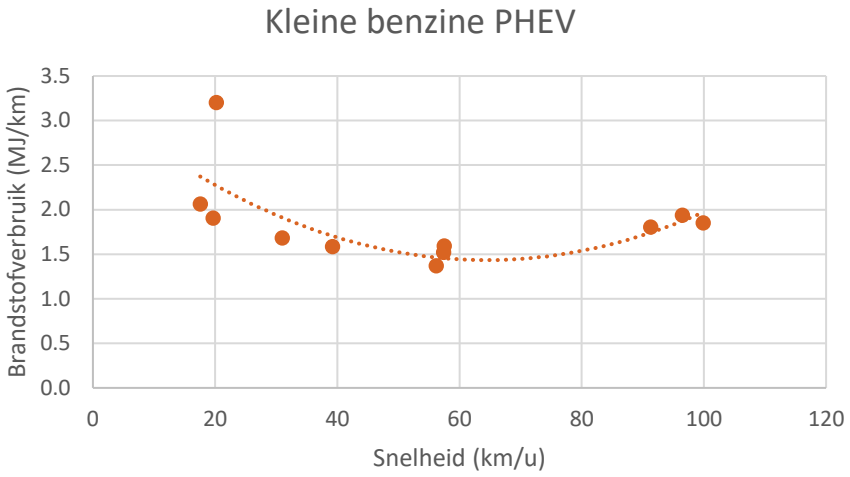



Figuur 45:
Totaal energieverbruik van PHEV's (elektrisch + brandstof) en gewone voertuigen bij verschillende rijprofielen (CD+CS-modus)

Over het algemeen zijn de resultaten voor het brandstofverbruik van PHEV's (in CD-modus) consistent met het typische gedrag van conventionele voertuigen, dat wil zeggen dat het verbruik hoger ligt bij lagere snelheden dan bij gemiddelde snelheden, waar de verbrandingsmotor onder gunstigere omstandigheden werkt, en weer toeneemt bij hogere snelheden voor alle verschillende segmenten. Dit kan worden verklaard door het algemene gedrag van verbrandingsmotoren die hun hogere efficiëntiewaarden alleen binnen een beperkt koppel- en snelheidsbereik hebben, terwijl bij hogere snelheden kwadratische impact van de luchtweerstand meer uitgesproken is.

Wat betreft het elektrische energieverbruik kunnen we de resultaten rechtstreeks relateren aan de technische eigenschappen van elektromotoren met hoge rendementswaarden (boven 90%) in bijna alle bedrijfsomstandigheden. Daarom is de rijsnelheid en de bijbehorende rijweerstand de belangrijkste oorzaak van de elektrische energieverbruiksfactor. Er moet opgemerkt worden dat de RDE Urban 1-cyclus verreweg de hoogste energie-eisen van alle rijcycli heeft. Daarom zijn de waarden van brandstof en elektriciteit voor deze cyclus zeer hoog in vergelijking met de andere rijcycli.

Ter vergelijking wordt in Figuur 45 de totale energie die een PHEV nodig heeft, uitgezet tegen de totale energie die wordt verbruikt door conventionele aandrijvingen (zoals overgenomen uit COPERT). De gele lijn geeft het energieverbruik van conventionele benzinevoertuigen in COPERT weer, terwijl de punten het totale energieverbruik van gesimuleerde PHEV-modellen in de verschillende rijcycli (zowel brandstof- als elektrisch energieverbruik in gecombineerde CD + CS-modus) weergeven. De snelheidsafhankelijke functies voor brandstof- en elektriciteitsverbruik zijn berekend op basis van de bovenstaande resultaten. Figuur 46 toont een voorbeeld van het berekenen van het brandstofverbruik voor een kleine benzine PHEV.




Figuur 46: Voorbeeld van de berekening van de snelheidsafhankelijke brandstofverbruiksfunctie

De volgende generieke vergelijking wordt gebruikt in COPERT voor het berekenen van snelheids-afhankelijke emissiefactoren (EF) voor alle voertuigklassen en verontreinigende stoffen. Waar nodig wordt een reductiefactor (RF) toegepast.

$$EF = (Alfa*v^2 + Bèta*v + Gamma + Delta/v)/ (Epsilon*v^2 + Zeta*v + Eta) *(1 - RF)$$

In deze formule staat *v* voor de snelheid in km/u en *alfa* voor de luchtweerstandscoëfficiënt. Merk op dat voor alfa de snelheid kwadratisch zijn invloed uitoefent. Gedetailleerde tabellen met alle parameters voor de bovenstaande vergelijking voor alle verschillende segmenten en verontreinigende stoffen zijn te vinden in Tabel 69, Tabel 70 en Tabel 71 in de appendix. Tabel 69 en Tabel 70 bevatten de parameters in respectievelijk CS- en CD-modus voor PHEV's. Bovendien toont Tabel 71 de COPERT-parameters voor de conventionele personenauto's.

De utiliteitsfactor (UF) speelt een zeer belangrijke rol voor de berekening van PHEV-emissiefactoren. Ter herinnering: deze wordt uitgedrukt als het aandeel van de puur elektrisch afgelegde afstand ten opzichte van de totale afgelegde afstand. De resultaten van de SEMS-meetcampagne in het Vlaamse Gewest (zie hoofdstuk 3) werden gebruikt om de UF en dus de gemiddelde voertuigemissiefactoren van PHEV te berekenen. Uit de testdata blijkt dat de gemiddelde UF voor alle drie de gemeten modellen ongeveer 25% is. Dit betekent dat PHEV's gemiddeld in CD-modus worden gereden op 25% van een rit en in CS-modus voor de rest 75%. Een fijnmazigere benadering van de SEMS-data leert ons dat de UF verschilt per wegtype. Tijdens stedelijke trips varieert de UF tussen 48,7% en 54,8%, tijdens rurale trips tussen 33,7% en 46,1%, en op snelwegen beduidend lager, nl. tussen 10,6% en 20,7%. Door een uitmiddeling van deze spreidingen bekomen we een UF van 50% stedelijk, 50% ruraal en 20% snelweg. Met deze drie UF wordt ook verder gerekend in de impactanalyse in hoofdstuk 5. Zoals al werd aangehaald in de conclusies van hoofdstuk 3, werden de meeste kilometers tijdens het SEMS-onderzoek afgelegd op snelwegen.

De hierboven vermelde UF's zijn dus een gemiddelde van alle gereden trips per wegtype. Om een vollediger beeld te krijgen, moeten extra functies worden onderzocht, zoals het laadgedrag van de batterij van consumenten, de laadinfrastructuur, de batterijcapaciteit van het voertuig, de ritten en veel andere parameters. Wanneer we onze gemiddelden vergelijken met wat terug kan gevonden worden in de vakliteratuur, dan blijkt dat (bv.) in Californië hogere UF's bekomen worden voor het gewogen gemiddelde van de drie wegtypes. Zo toont een recente studie een variatie 17% tot 68% afhankelijk van de batterijcapaciteit van de geteste PHEV-modellen, alsook de beschikbaarheid van laadinfrastructuur

(Srinivasa Raghavan and Tal 2019). Dit benadrukt dat daar anders wordt gereden met PHEV's, dan wat we bijvoorbeeld zien in België en Nederland. Het gemiddelde brandstofverbruik (FC) van PHEV's voor de verschillende wegtypes wordt berekend met behulp van de onderstaande vergelijking:

$$FC_{U/R/H\ gemiddeld} = (1-UF_{U/R/H}) * FC_{CS\ modus}$$

Vervolgens wordt het gemiddelde elektrische verbruik (EC) van PHEV's als volgt berekend:

$$EC_{U/R/H\ gemiddeld} = UF_{U/R/H} * EC_{CD\ modus}$$

De gecombineerde (CD + CS-modus) resultaten van de bovenstaande vergelijkingen worden voor de gemiddelde PHEV's weergegeven in Tabel 22, en dit voor de gemiddelde snelheden die door de Vlaamse overheid worden gebruikt voor verschillende rijmodi (*Urban/Rural/Highway*) in de volgende tabellen. Tabel 23 geeft ook de overeenkomstige energieverbruiksfactoren voor de conventionele voertuigen verkregen uit COPERT 5.3 weer.

Tabel 22: Energieverbruik factoren voor gemiddelde PHEV's

| PHEV | Voertuigsegment | Stad 29 (km/u) | Platteland 56 (km/u) | Snelweg 110 (km/u) |
|---|---|---|---|---|
| **FC (MJ/km)** ***CD + CS mode*** | Kleine benzine | 0,99 | 0,73 | 1,86 |
| | Medium benzine | 1,12 | 0,81 | 2,11 |
| | Grote benzine | 1,31 | 0,96 | 2,50 |
| | Grote diesel | 1,24 | 0,90 | 2,37 |
| **FC (l/100km)** ***CD + CS mode*** | Kleine benzine | 3,00 | 2,23 | 5,66 |
| | Medium benzine | 3,40 | 2,46 | 6,43 |
| | Grote benzine | 4,01 | 2,91 | 7,63 |
| | Grote diesel | 3,46 | 2,50 | 6,61 |
| **EC (MJ/km)** ***CD + CS mode*** | Kleine benzine | 0,24 | 0,22 | 0,17 |
| | Medium benzine | 0,30 | 0,28 | 0,20 |
| | Grote benzine | 0,39 | 0,35 | 0,21 |
| | Grote diesel | 0,37 | 0,32 | 0,21 |
| **EC (Wh/km)** ***CD + CS mode*** | Kleine benzine | 65,75 | 62,22 | 48,31 |
| | Medium benzine | 84,07 | 77,58 | 55,78 |
| | Grote benzine | 109,04 | 97,70 | 58,54 |
| | Grote diesel | 101,62 | 89,72 | 58,38 |
| **Totaal energie verbruik (MJ/km)** ***CD + CS mode*** | Kleine benzine | 1,22 | 0,96 | 2,03 |
| | Medium benzine | 1,42 | 1,09 | 2,31 |
| | Grote benzine | 1,71 | 1,31 | 2,72 |
| | Grote diesel | 1,61 | 1,22 | 2,58 |

Tabel 23: Energieverbruik factoren voor conventionele voertuigen (**Bron: COPERT 5.3**)

| Conventioneel | Voertuigsegment | Stad 29 (km/u) | Platteland 56 (km/u) | Snelweg 110 (km/u) |
|---|---|---|---|---|
| **Total energie verbruik (MJ/km)** | Kleine benzine | 2,58 | 1,96 | 2,20 |
| | Medium benzine | 3,02 | 2,39 | 2,52 |
| | Grote benzine | 4,46 | 3,22 | 2,97 |
| | Grote diesel | 3,18 | 2,54 | 2,94 |

Naast de uitgevoerde simulaties werden gegevens van COPERT gebruikt om emissiefactoren (EF) van gereguleerde verontreinigende stoffen te berekenen. Het voorkomen van deze verontreinigende stoffen is te wijten aan de werking van de verbrandingsmotor, en is daarom alleen maar van toepassing in CS-modus. De gemiddelde uitstoot van een verontreinigende stof voor PHEV-voertuigen wordt berekend met behulp van de onderstaande vergelijking. De resultaten van deze oefening staan opgelijst in Tabel 24.

.

$$\text{Polluent}_{\text{U/R/H, gemiddelde}} = (1-UF_{U/R/H}) * \text{Polluent}_{\text{CS modus}}$$

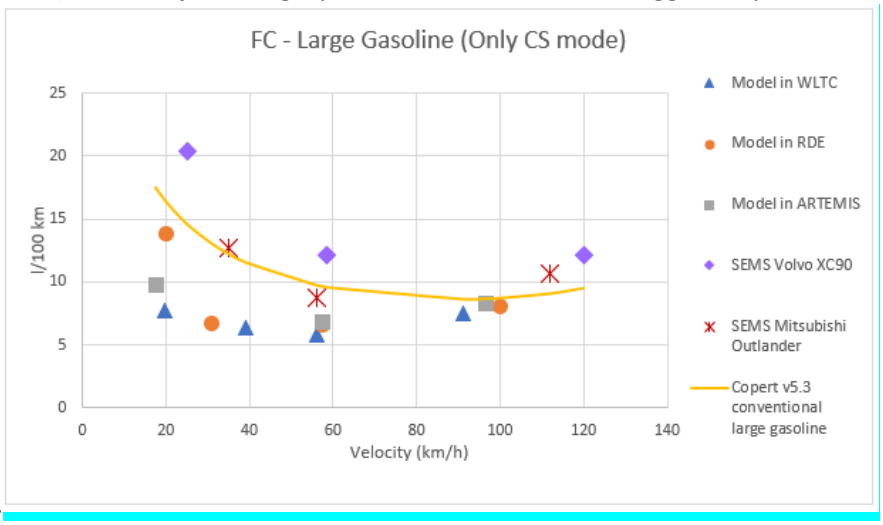
Tabel 24: Emissiefactoren voor gereguleerde polluenten voor de gemiddelde PHEV's

| | Voertuigsegment | Stad 29 (km/u) | Platteland 56 (km/u) | Snelweg 110 (km/u) |
|---|---|---|---|---|
| **$CO_2$ (g/km)** | Kleine benzine | 68,90 | 51,20 | 130,00 |
| | Medium benzine | 78,10 | 56,50 | 147,70 |
| | Grote benzine | 92,00 | 66,90 | 175,20 |
| | Grote diesel | 91,30 | 66,10 | 174,50 |
| **$NO_X$ (g/km)** | Kleine benzine | 0,0029 | 0,0074 | 0,0132 |
| | Medium benzine | 0,0029 | 0,0074 | 0,0132 |
| | Grote benzine | 0,0029 | 0,0074 | 0,0132 |
| | Grote diesel | 0,3417 | 0,2563 | 0,4906 |
| **CO (g/km)** | Kleine benzine | 0,0326 | 0,0151 | 0,0110 |
| | Medium benzine | 0,0326 | 0,0151 | 0,0110 |
| | Grote benzine | 0,0326 | 0,0151 | 0,0110 |
| | Grote diesel | 0,0302 | 0,0174 | 0,0040 |
| **HC (g/km)** | Kleine benzine | 0,0006 | 0,0003 | 0,0008 |
| | Medium benzine | 0,0006 | 0,0003 | 0,0008 |
| | Grote benzine | 0,0006 | 0,0003 | 0,0008 |
| | Grote diesel | 0,0006 | 0,0004 | 0,0005 |
| **PM Uitlaat (g/km)** | Kleine benzine | 0,0009 | 0,0008 | 0,0014 |
| | Medium benzine | 0,0009 | 0,0008 | 0,0014 |
| | Grote benzine | 0,0009 | 0,0008 | 0,0014 |
| | Grote diesel | 0,0014 | 0,0010 | 0,0012 |

### 4.2.3 Validatie met SEMS-data

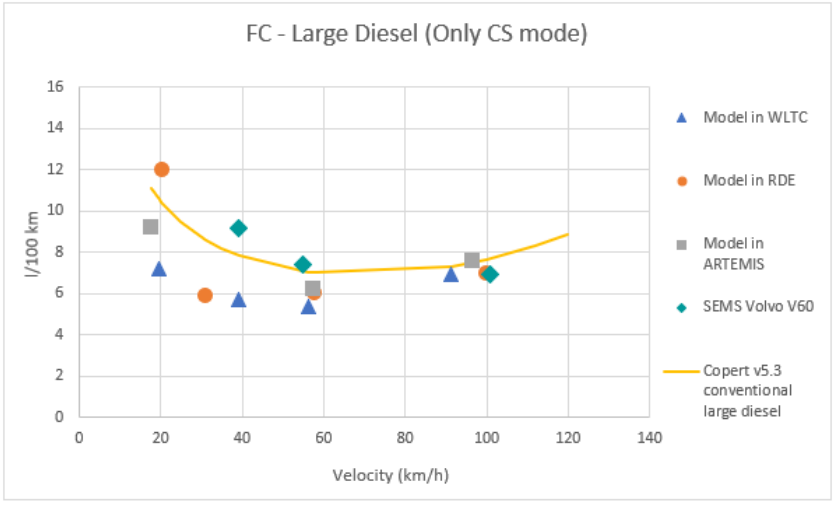
Teneinde ons voorgesteld model verder te kunnen verfijnen (kalibreren) aan de hand van praktijk-emissies, maken we in deze paragraaf de vergelijking met de SEMS-data van de drie testvoertuigen. Figuur 47 geeft het brandstofverbruik weer van zowel de gemodelleerde 'gemiddelde' grote benzine PHEV volgens de WLTC, CADC ('Artemis') en RDE tests, alsook de gemeten waarden voor de Volvo XC90 en de Mitsubishi Outlander. Hiernaast toont de gele curve ook het generieke verbruik in functie van de voertuigsnelheid volgens het COPERT 5.3 model voor een conventionele, grote benzinewagen. Merk op dat we enkel de CS-modus weergeven (CS+CD-modus wordt weergegeven in figuur 49 & 50), gezien dit de periode is waarin de motor het merendeel van de aandrijving vertegenwoordigt. De PHEV modellen werken in CS-modus als HEV, en geven dus logischerwijze lagere waarden dan een conventionele 'gemiddelde' grote benzine wagen. De modellen geven in stedelijke en rurale trips een lager brandstofverbruik omdat bij lagere snelheden (stedelijke condities) er meer regeneratief afgeremd (en

dus ook brandstof gespaard) wordt. Bij snelwegtrips is dit verschil kleiner en liggen de punten dus dicht bij de gele curve.



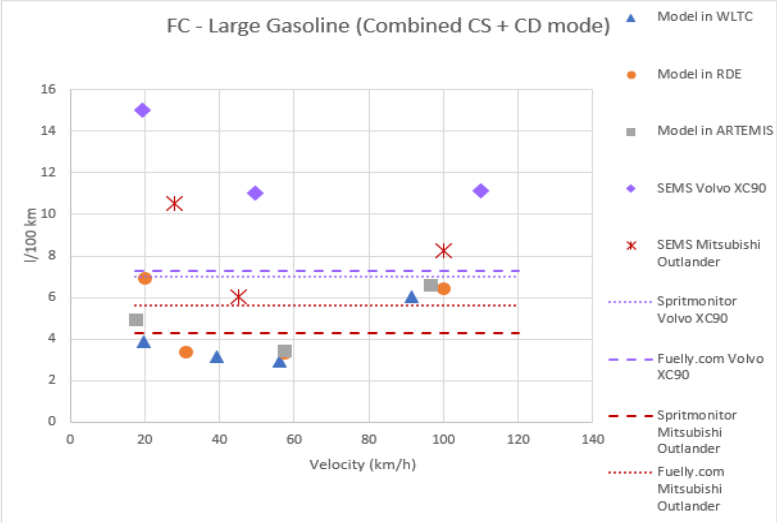

Figuur 47: Brandstofverbruik van grote benzine PHEV's in CS modus

Wat opvalt is dat de resultaten van het simulatiemodel binnen de verwachting liggen. In alle drie de testcycli ligt het verbruik van de PHEV immers lager dan dat van een conventionele variant volgens COPERT. Er blijkt echter wel een significant verschil te zijn met de SEMS-waarden. Zo tekenen we voor de Volvo XC90 een verbruik op van 12 – 20 l/100 km, afhankelijk van het wegtype. Figuur 48 toont een gelijkaardige grafiek, maar dan voor de grote dieselmodellen. Ook hier zien we dat de verbruikscijfers die voortvloeien uit het PHEV model over het algemeen lager liggen dan voor de conventionele variant, hetgeen wat in de lijn van de verwachting ligt. De resultaten van de Volvo V60 tonen een veel kleiner verschil met die van het model dan wat we zagen in Figuur 43, hoewel deze dichter aanleunen bij de conventionele dieselwagen tijdens stedelijke en rurale trips. Voor snelwegtrips komen alle resultaten samen.

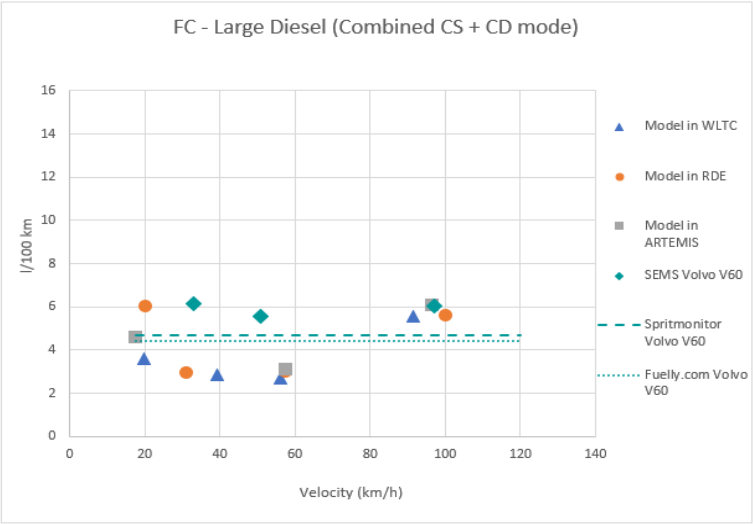



Figuur 48: Brandstofverbruik van grote diesel PHEV's in CS modus

Hieronder volgen de vergelijkingen voor het brandstofverbruik waarvoor zowel naar de CS als de CD modus werd gekeken. Merk op dat voor de berekeningen in het simulatiemodel rekening werd gehouden met de utiliteitsfactoren per wegtype, welke voortkomen uit het SEMS-onderzoek. Hiernaast werd ter validatie van de SEMS-data ook een vergelijking gemaakt met wat teruggevonden kan worden in de online verbruiksdatabanken van Spritmonitor.de en Fuelly.com. Op deze websites geven eigenaars hun praktijkverbruik van zowel brandstof als elektriciteit in van hun PHEV's.




Figuur 49: Brandstofverbruik van grote benzine PHEV's in CS+CD modus




Figuur 50: Brandstofverbruik van grote diesel PHEV's in CS+CD modus

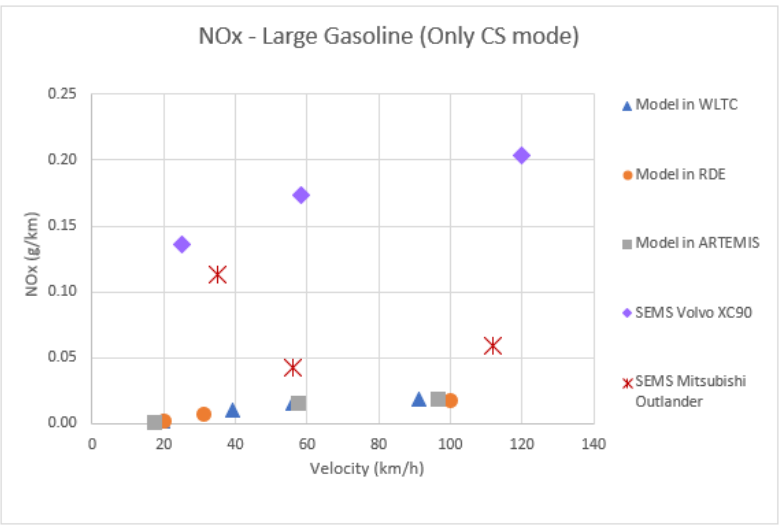
Wat we hieruit kunnen afleiden is dat de absolute verbruikscijfers van de met SEMS gemonitorde modellen sterk afwijken van zowel het simulatiemodel als de gemiddelde waarden volgens de online databanken (Sprittmonitor & Fuelly). Bovendien is bij de SEMS data het verschil in verbruik tussen de gecombineerde CS+CD-modus en de CS-modus alleen beduidend kleiner dan wat men zou verwachten emissiefactor op basis van een utiliteitsfactor van 50% tijdens stedelijk rijden.
Zo heeft de Volvo XC90 bijvoorbeeld:

- Brandstofverbruik CS = 20l/100 km
- Brandstofverbruik CS+CD = 15 l /100 km
- Met een UF = 50% (SEMS data in urban conditions) zou dus het verbruik in CS+CD zo'n 10l/100 km en niet 15 l/100 km moeten zijn.

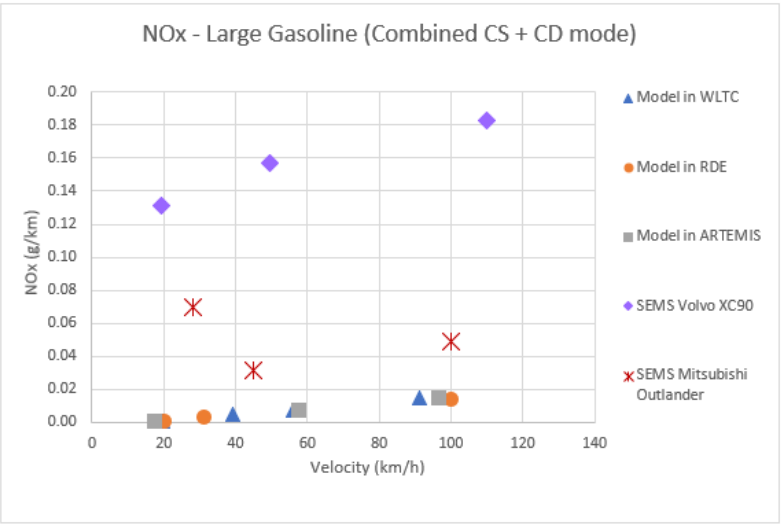
Daarnaast blijken de resultaten volgens het simulatiemodel overeenstemmen met het online aangegeven verbruik voor de Mitsubishi Outlander (Figuur 49) en de Volvo V60 (Figuur 50), terwijl er een verschil is met het verbruik van de Volvo XC90. De reden die we hierachter kunnen zoeken is dat de XC90 momenteel het zwaarste en krachtigste PHEV model is. Zo heeft deze een vermogen van 235 kW terwijl de Outlander het moet stellen met 99 kW. Algemeen kunnen we stellen dat de manier waarop er met de (zware) geteste PHEV's gereden werd mogelijk onvoldoende representatief is voor gemiddelde PHEV's.

Om deze stelling te kunnen bevestigen zouden we een gelijkaardige monitoringscampagne moeten kunnen uitvoeren met een grotere (en statistisch relevante) testpopulatie.

Wanneer we resultaten voor $NO_x$ uiteenzetten krijgen we wat te zien is in Figuur 51 tot Figuur 54. Men dient op te merken dat de gebruikte simulatie*tool* niet geschikt is voor het beoordelen van polluenten als $NO_x$. Om nauwkeurige $NO_x$ waarden met de simulatie tool te bekomen heeft men een gedetailleerde motorkaart (enginemap) en data van het nabehandelingssysteem nodig die niet beschikbaar zijn bij deze studie. Daarom gebruiken we in de vergelijking met de SEMS-data de emissiefactoren uit COPERT voor benzine hybrides en conventionele dieselwagens, in combinatie met de utiliteitsfactoren via de SEMS-campagne. Zoals te zien in Figuur 51 en Figuur 52 vallen de SEMS resultaten voor de benzine PHEV's hoger uit dan wat we bekomen via de simulaties. Zo stoot de Volvo XC90 tot driemaal meer $NO_x$ uit dan de 60 mg/km limiet terwijl de Mitsubishi Outlander hier redelijk dichtbij aanleunt. Ook hier valt de hoge emissie door de XC90 wellicht te verklaren door enerzijds de krachtige motor en anderzijds de rijstijl. Twee benzine PHEV modellen die in *Laboratorium of Applied Thermodynamics* (LAT) in Thessaloniki werden getest over een WLTC cyclus lieten $NO_x$ emissies tussen de 5 – 10 mg/km optekenen, hetgeen dicht bij de benadering via het simulatiemodel ligt.

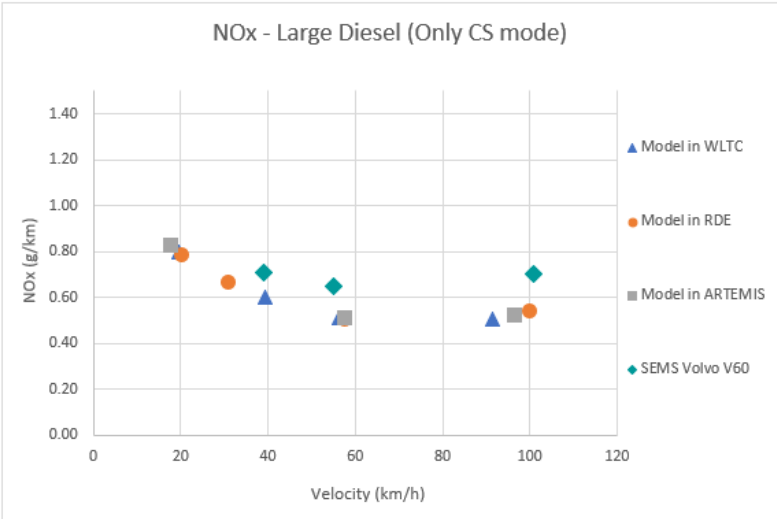



Figuur 51: NOx emissiefactoren voor grote benzine PHEV's in CS modus

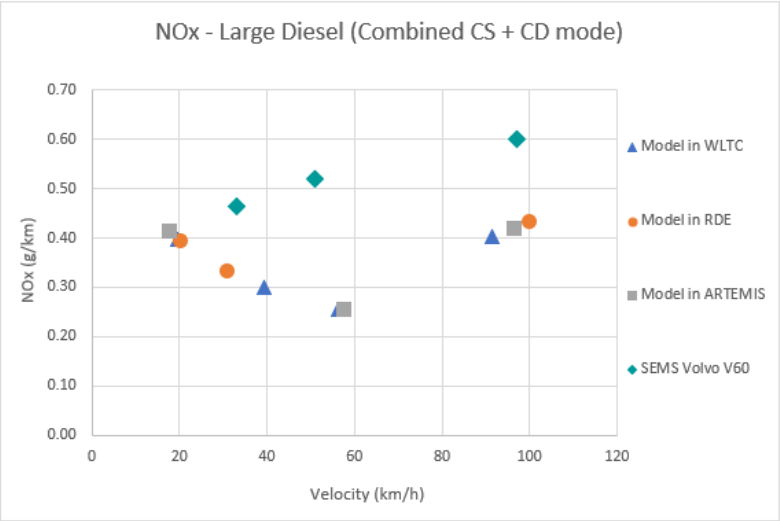



Figuur 52: NOx emissiefactoren voor grote benzine PHEV's in CS + CD mode

Voor wat betreft de $NO_x$ emissies van diesel PHEV's zien we dat het model en de SEMS-data redelijk goed overeenstemmen in CS modus (Figuur 53). Wanneer we echter de gecombineerde CS + CD modus in acht nemen, valt een grote discrepantie op tussen het model en de SEMS-data.




Figuur 53: NOx emissiefactoren voor grote diesel PHEV's in CS modus




Figuur 54: NOx emissiefactoren voor grote diesel PHEV's in CS + CD mode

Wat we kunnen besluiten uit deze vergelijking is dat de verbruiksresultaten voor de gemiddelde PHEV's volgens het simulatiemodel zeer dichtbij de praktijkemissies liggen die door eigenaars van hetzelfde model worden opgegeven in de online databanken. Bovendien liggen de emissiefactoren voor $NO_x$ dicht bij de experimentele resultaten die bekomen werden bij tests op benzine PHEV's in het Griekse labo, terwijl een aanvaardbare afwijking gerapporteerd wordt van de overeenkomstige conventionele segmenten binnen het reeds gevalideerde COPERT 5.3 model. De SEMS-data wordt geacht eerder niet representatief te zijn voor de gemiddelde PHEV personenwagen gezien hun verbruik (en de hieraan gelinkte polluenten) te veel verschillen van de verbruiksdatabanken. In geval van een statistisch relevante steekproef hadden uitschieters als de Volvo XC90 meer uitgemiddeld geworden, terwijl zo'n voertuig in deze beperkte steekproef een vertekend beeld geeft.

### 4.2.4 Volvo V60 vergelijking

In deze paragraaf worden de emissies van het model, ontwikkeld voor de gemiddelde grote diesel-PHEV vergeleken met de SEMS-metingen met de Volvo V60 en de metingen die ICCT voor hetzelfde voertuigmodel (Volvo V60) met PEMS heeft uitgevoerd. De details van deze ICCT-studie zijn terug te vinden in hoofdstuk 2.4.
Figuur 10 laat zien dat er voor elke rijmodus (stad/platteland/snelweg) een brede waaier aan $NO_x$-emissies is voor het Volvo V60-model. Specifiek voor het stedelijke deel variëren de $NO_x$-emissies op de weg van ongeveer 170 mg/km tot 600 mg/km. Het bereik wordt nog groter op het platteland en op de snelweg. In de landelijke rijmodus is de minimale NOx-emissiewaarde 150 mg/km en de maximale 1100 mg/km, terwijl op de snelweg de waarden variëren van 300 tot 1000 mg/km.

Tabel 25 Bereik van NOx-emissiefactor per rijmodus in ICCT-onderzoek

| $NO_x$ | Emissie factor (mg/km) | | | Binnen de limieten |
|---|---|---|---|---|
| | U | R | H | |
| ICCT V60 PEMS low | 170 | 150 | 300 | - |
| ICCT V60 PEMS high | 600 | 1100 | 1000 | - |
| Large diesel PHEV model | 342 | 256 | 491 | ✓ |
| SEMS V60 | 464 | 519 | 602 | ✓ |

Zoals te zien is in Tabel 25, liggen de $NO_x$-emissies van zowel het rekenkundig model als de SEMS-metingen binnen het bereik dat uit de ICCT-studie naar voren kwam.

#### 4.2.4.1 Vergelijking $CO_2$ waarden

Het ICCT-onderzoek concludeert dat de $CO_2$-uitstoot op de weg gemiddeld 133 g/km was voor de Volvo V60. Om een eerlijke vergelijking te maken tussen de gemiddelde grote diesel PHEV en de SEMS metingen, moet rekening worden gehouden met de omstandigheden waaronder deze emissies (in de ICCT-studie) bepaald zijn, zoals bijvoorbeeld het aandeel van de stad/platteland/snelweg, de overeenkomstige gemiddelde snelheden en het aandeel van puur elektrisch rijden (UF).
Wat de aandelen van de verschillende rijmodi betreft, stelt de ICCT-studie dat de routes waarin de Volvo V60 werd getest, een evenwichtige verdeling hebben van het rijden in de stad, het platteland en de snelweg. Daarom moet voor een eerlijke vergelijking een gewogen gemiddelde CO2-emissiefactor voor het model en SEMS worden berekend met 33,3% als aandeel voor alle drie de rijmodi.
Daarnaast is de UF een andere cruciaal gegeven waarmee bij de vergelijking rekening moet worden gehouden. Helaas wordt de waarde van de UF niet vermeld in de ICCT-studie. De studie beschrijft echter de totale afstanden van de routes waarop de tests plaatsvonden, en er wordt gesteld dat elke test begon met een volledig opgeladen batterij en werd voortgezet met rijden in de CS-modus. Volgens de website "https://ev-database.org/" is het echte pure elektrische rijbereik 25 km.
Op basis van de hierboven vermelde gegevens kan een UF per route worden berekend en dus ook een gewogen gemiddelde UF.

Tabel 26: Berekening van de UF in de ICCT-studie

| Elektrisch bereik (km) | Route | Afstand (km) | UF | Gewogen gem. UF |
|---|---|---|---|---|
| 25 | 1 | 76.1 | 32.9% | 30.7% |
| | 2 | 88.6 | 28.2% | |
| | 3 | 110.6 | 22.6% | |
| | 4 | 50.6 | 49.4% | |

Ook de gemiddelde snelheden per rijmodus zijn belangrijk. Helaas is deze informatie noch in de ICCT-studie opgenomen noch in de SEMS-gegevensanalyse.
Bovendien moet opgemerkt worden dat de tests in het kader van de ICCT-studie elke dag met een koude motor begonnen. Hetzelfde geldt voor SEMS-analyse. De formules die voor het rekenkundig model geproduceerd zijn, hebben daarentegen alleen betrekking op emissies van opgewarmde motoren.
Ten slotte moet opgemerkt worden dat de volledige PEMS-configuratie ongeveer 200 kg laadvermogen toevoegt aan het te testen voertuig, wat een negatief effect heeft op het energieverbruik en de emissies.
In onderstaande tabel worden de $CO_2$-emissieresultaten vergeleken, rekening houdend met alle hierboven geanalyseerde parameters.

Tabel 27: $CO_2$ vergelijking

| $CO_2$ | Snelheid (km/h) | | | Aandeel (%) | | | UF | | | Emissie factor (g/km) | | | Gemiddelde (g/km) | Verschil | Koude start |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | U | R | H | U | R | H | U | R | H | U | R | H | | | |
| Groot diesel PHEV model | 29 | 56 | 110 | 33 % | 33% | 33% | 31 % | 31 % | 31 % | 126.5 | 91.6 | 151.2 | 123.1 | -7.4% | × |
| SEMS meting | ? | ? | ? | 33 % | 33% | 33% | 50 % | 50 % | 20 % | 162.5 | 146.8 | 159.1 | 156.1 | 17.4% | ✓ |
| ICCT meting | ? | ? | ? | 33 % | 33% | 33% | 31 % | 31 % | 31 % | ? | ? | ? | 133.0 | | ✓ |

Het voor gemiddelde grote diesel PHEV ontwikkeld model heeft een zeer kleine afwijking in vergelijking met de ICCT-analyse met betrekking tot de Volvo V60. Concreet geeft het model een 7,4% lagere $CO_2$-

uitstoot (123,1 g/km) dan de ICCT-analyse. Het is heel waarschijnlijk dat de gemiddelde $CO_2$-uitstoot nog meer zou convergeren als het rekenkundig model de koude-startemissies berekende, en er geen 200kg extra gewicht was in de ICCT-analyse vanwege PEMS.
Met betrekking tot SEMS-analyse lijkt het erop dat door gebruik te maken van de $CO_2$-emissiefactoren per rijmodus die zijn berekend in SEMS-analyse en de gewogen rijaandelen, de resulterende gewogen gemiddelde waarde van $CO_2$-emissies 156,1 g/km is, wat 17,4% hoger is dan de overeenkomstige ICCT-waarde. In feite zijn de waarden van $CO_2$-emissiefactoren per rijmodus in de SEMS-analyse berekend voor de volgende UF: U = 50%, R = 50%, H = 20%. Daarom worden hogere emissies verwacht en dus een grotere afwijking in het geval dat UF 30,7% is voor alle rijmodi.

#### 4.2.4.2 Vergelijking $NO_x$ waarden

Soortgelijke resultaten kwamen ook naar boven voor $NO_x$. Het model dat is ontwikkeld voor gemiddelde grote diesel PHEV heeft namelijk 7,1% lagere $NO_x$-emissies in vergelijking met ICCT-metingen. Als de emissies bij koude start zouden worden berekend, zouden ze leiden tot een kleine toename van de modelemissies, terwijl als de extra 200 kilo zou worden weggenomen uit de ICCT-meting, de $NO_x$-emissies iets lager zouden zijn en het rekenkundig model en de ICCT-analyse dus meer zouden convergeren. Wat betreft SEMS-analyse zijn de $NO_x$-emissies 17,4% hoger in vergelijking met de ICCT-meting.

Tabel 28: $NO_x$ vergelijking

| $NO_x$ | Snelheid (km/h) | | | Aandeel (%) | | | UF | | | Emissiefactor (g/km) | | | Gemiddelde (g/km) | Verschil | Koude start |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | U | R | H | U | R | H | U | R | H | U | R | H | | | |
| Groot diesel PHEV model | 29 | 56 | 110 | 33.3% | 33.3% | 33.3% | 30.7% | 30.7% | 30.7% | 473.6 | 355.2 | 425.0 | 417.9 | -7.1% | × |
| SEMS meting | ? | ? | ? | 33.3% | 33.3% | 33.3% | 50.0% | 50.0% | 20.0% | 464.0 | 519.0 | 602.0 | 528.3 | 17.4% | ✓ |
| ICCT meting | ? | ? | ? | 33.3% | 33.3% | 33.3% | 30.7% | 30.7% | 30.7% | ? | ? | ? | 450 | | ✓ |

## 4.3 TOEKOMSTIGE PHEV'S

### 4.3.1 Bestudeerde parameters

Voor een inschatting van de impact van de PHEV van de (nabije) toekomst zijn er een aantal bepalende factoren waarmee we in deze oefening hebben gespeeld. Voor de selectie van de bestudeerde parameters baseren we ons op literatuurbronnen, op de analyse van de gecreëerde database en op de beperkingen van de simulatietool. De massa van het voertuig, de rolweerstand en de ICE-efficiëntie zijn enkele kenmerken die naar verwachting voor alle voertuigen zullen veranderen, onafhankelijk van hun elektrificatieniveau. De batterijcapaciteit en de specificaties van de elektromotor zijn dan weer enkele parameters die alleen betrekking hebben op gedeeltelijk of volledig elektrische voertuigen. In de volgende paragrafen geven we een overzicht van hoe we verwachten dat deze parameters zullen evolueren.

#### 4.3.1.1 Rolweerstand

De rolweerstand van het voertuig is het totaal van krachten die op het voertuig inwerken, terwijl het op een weg zonder helling beweegt. De grootste weerstanden die we kunnen onderscheiden zijn de wrijving tussen de banden en het wegdek en de aerodynamische weerstand (*air drag* in het Engels) van het voertuig. Een lagere rolweerstand kan leiden tot lager brandstofverbruik. Volgens de bandenindustrie kan deze reductie oplopen tot 25% ten opzichte van de situatie in 2005 (Bridgestone 2020). Deze kan

worden bereikt door een wijziging van de gebruikte materialen, de bandstructuur en/of de algemene geometrische kenmerken van de banden.
De aerodynamische weerstand heeft een grote invloed op het energieverbruik gezien deze onderhevig is aan het kwadraat van de voertuigsnelheid, hetgeen verklaart waarom deze weerstand substantieel toeneemt bij snelheden boven de 70 km/u. Deze weerstand kan worden verminderd door een voertuig te ontwerpen met optimale aerodynamische eigenschappen. Met behulp van de juiste materialen en het herzien van de vorm van het voertuig, kan de aerodynamische weerstand worden verminderd tussen 20% en 30% (Mukut and Abedin 2019), afhankelijk van de gebruikte methoden.

#### 4.3.1.2 Thermische motorefficiëntie

Volgens sommige studies wordt in de komende decennia een toename van de thermische efficiëntie van verbrandingsmotor verwacht. Voor motoren met vonkontsteking (benzine) zal de toename naar verwachting 15% zijn en zo'n 10 - 12% voor motoren met compressieontsteking (diesel) (ERTRAC 2016). Deze toename is het gevolg van verschillende veranderingen, zoals minder mechanische verliezen en warmteverliezen, verhoogde efficiëntie van de turbocompressor en terugwinning van restwarmte door brandstofreforming. Voor het bestek van deze studie werd het maximaal haalbare piekrendement voor zowel diesel- als benzinemotoren met ongeveer 50% verhoogd, hetgeen in lijn ligt met de verwachtingen volgens ERTRAC. De mate waarin deze aannames realistisch zijn zal voornamelijk in de komende jaren bepaald worden door de concurrentie van 100% elektrische voertuigen op de Europese markt. Een sterk toenemend verkoopsaandeel voor elektrische voertuigen, ten gevolge van steeds goedkoper wordende batterijtechnologie, zal het moeilijker maken voor constructeurs van personenwagens om innovaties die leiden tot hogere motorefficiënties te kunnen financieren. Achter iedere procentuele efficiëntiewinst houden er zich immers grote investeringen schuil. Een keerpunt voor de marktadoptie van elektrische voertuigen wordt al verwacht rond 2024, wanneer de verder gezakte batterijprijs ertoe zal leiden dat de productie van een elektrisch voertuig even duur/goedkoop wordt als een benzinevariant (Soulopoulos 2017)(Henze 2019). Verbrandingsmotoren zullen echter nog lange tijd de voornaamste aandrijvingsbron blijven voor het lange-afstandstransport door vrachtwagens, gezien een doorgedreven elektrificatie hier nog niet meteen aan de orde is. Dit is te wijten aan de grote vermogensvraag door de massa die een vrachtwagen dient te transporteren. Voor lichte vracht en korte afstandsvrachtwagens zien we een doorgedreven (tot volledige) elektrificatie op korte termijn dan weer wel als een haalbare piste.

#### 4.3.1.3 Gewicht

Vermindering van het totale gewicht van het voertuig kan leiden tot lagere verbruik van zowel brandstof als energie, gezien de vraag naar vermogen geleverd door de aandrijflijn afneemt. Lichtere voertuigen kunnen worden bereikt met behulp van verschillende materialen zoals aluminium, magnesium en koolstofvezel. Het gebruik van magnesium en koolstofvezel levert nog steeds enkele problemen op, maar kan leiden tot een sterk verbeterde brandstofefficiëntie. Volgens sommige studies kan de gewichtsreductie van passagiersvoertuigen tussen 17% (Mascarin et al. 2016) en 23,2% (Kollamthodi et al. n.d.) liggen en in sommige gevallen zelfs hoger.

#### 4.3.1.4 Batterijen en elektromotoren

Zoals reeds aangehaald wordt er ook vooruitgang verwacht in de toegepaste batterijtechnologieën. Batterijen met hogere energie- en vermogensdichtheid, grotere capaciteit en een verbeterd warmtebeheer zullen een sleutelrol spelen bij de ontwikkeling van toekomstige PHEV's. Batterijen met een hogere capaciteit worden al in pure elektrische voertuigen gebruikt en kunnen ook in PHEV's worden geïmplementeerd, terwijl de toename van de energiedichtheid ertoe leidt dat de batterijen geen invloed hebben op het totale gewicht van het voertuig (Thielmann et al. 2013). Deze verbeteringen zullen het elektrisch bereik van de voertuigen vergroten, wat in totaal resulteert in lagere broeikasgasemissies. Zo zullen toekomstige PHEV's dus uitgerust zijn met een grotere batterijcapaciteit en kleinere

verbrandingsmotor, tot de vorderingen op batterijvlak dusdanige reikwijdtes toelaten dat ook de verbrandingsmotor overbodig wordt.
Een andere verwachte verbetering is de productie van elektromotoren met een hoger rendement. Zo achten we een verhoging van de efficiëntie met 9% aannemelijk voor de simulaties in deze studie.

### 4.3.2 Simulaties

Voor de becijfering van de impact van de bovengenoemde parameters zijn verschillende testscenario's gecreëerd door literatuurresultaten te combineren met de resultaten van de analyse van de database van de voertuigen. Voor elke parameter delen we de verbeteringen op in drie stappen, waarbij de eerste het minst optimistische scenario en de derde het meest optimistische scenario vertegenwoordigt. Een overzicht van de verschillende scenario's wordt gepresenteerd in Tabel 29, waar de gemarkeerde gebieden de parameter vertegenwoordigen die in elke set scenario's wordt onderzocht.

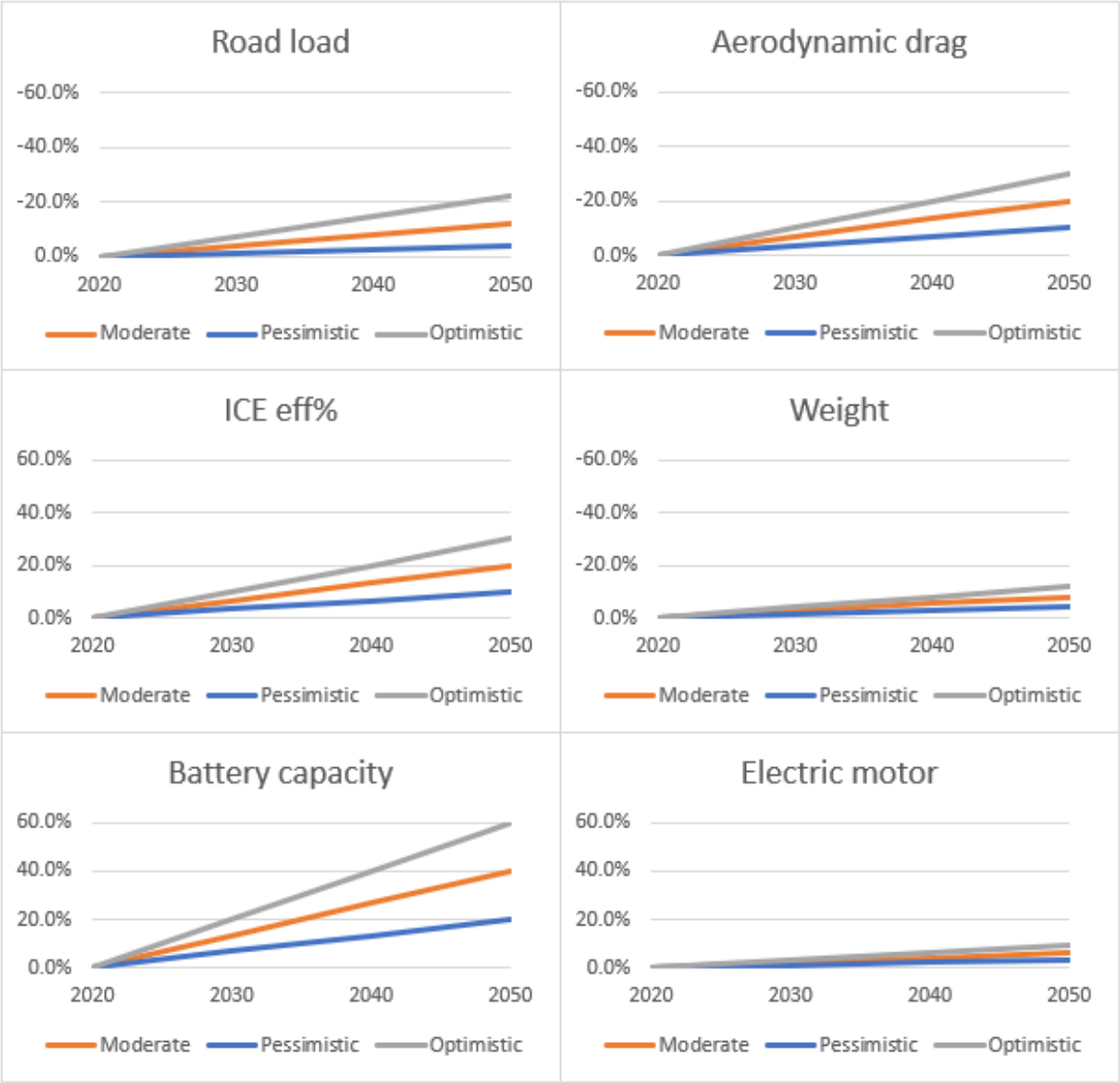
De verbeteringen in wegbelasting ($F_0$ verwijst hoofdzakelijk naar rolweerstand en $F_2$ naar aerodynamische weerstand) en in efficiëntie van de verbrandingsmotor worden afzonderlijk onderzocht in scenario's 1-9. Vervolgens wordt een tweede basisscenario gemaakt (nr. 10), waarbij de tweede meest optimistische waarden van de vorige scenario's (nr. 1-9) wordt beschouwd als de basis voor het onderzoek van de rest van de scenario's. In de scenario's 11-13 en in 14-16 worden de vermindering van het voertuiggewicht en de toename van de efficiëntie van de elektromotor onderzocht. In scenario's 17-19 wordt de toename van de energiedichtheid van de batterij onderzocht samen met het gebruik van batterijen met een hogere capaciteit. Dit is de reden waarom zowel de batterijcapaciteit als het voertuiggewicht tegelijkertijd veranderen. Ten slotte worden drie scenario's (nr. 20-22) gebruikt om de cumulatieve verandering in het brandstof- en energieverbruik te onderzoeken. De eerste fase van wijzigingen in elke parameter wordt gebruikt voor het minst optimistische scenario (geval 20) en de derde fase voor het meest optimistische scenario (geval 21).

Tabel 29: Testmatrix van gemiddelde PHEV

| | $F_0$ (%) | $F_2$ (%) | ICE eff. (%) | Batterij-capaciteit (%) | Gewicht (%) | El. motor eff. (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Scenario 0** | - | - | - | - | - | - |
| **Scenario 1** | -4% | -10% | - | - | - | - |
| **Scenario 2** | -12% | -20% | - | - | - | - |
| **Scenario 3** | -22% | -30% | - | - | - | - |
| **Scenario 4** | - | -10% | - | - | - | - |
| **Scenario 5** | - | -20% | - | - | - | - |
| **Scenario 6** | - | -30% | - | - | - | - |
| **Scenario 7** | - | - | 10% | - | - | - |
| **Scenario 8** | - | - | 20% | - | - | - |
| **Scenario 9** | - | - | 30% | - | - | - |
| **Scenario 10** | -12% | -20% | 20% | - | - | - |
| **Scenario 11** | -12% | -20% | 20% | - | -4% | - |
| **Scenario 12** | -12% | -20% | 20% | - | -8% | - |
| **Scenario 13** | -12% | -20% | 20% | - | -12% | - |
| **Scenario 14** | -12% | -20% | 20% | - | - | 3% |
| **Scenario 15** | -12% | -20% | 20% | - | - | 6% |
| **Scenario 16** | -12% | -20% | 20% | - | - | 9% |
| **Scenario 17** | -12% | -20% | 20% | 20% | -1,9% | - |
| **Scenario 18** | -12% | -20% | 20% | 40% | -1,6% | - |
| **Scenario 19** | -12% | -20% | 20% | 60% | -1,3% | - |
| **Scenario 20** | -4% | -10% | 10% | 20% | -4% | 3% |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Scenario 21** | -12% | -20% | 20% | 40% | -8% | 6% |
| **Scenario 22** | -22% | -30% | 30% | 60% | -12% | 9% |

Het is moeilijk om de tijdshorizon voor de bovengenoemde verbeteringen te voorspellen. De meeste geraadpleegde studies met betrekking tot de verbeteringen van de verschillende parameters bieden evenmin een situering in de toekomst. Een indicatief tijdschema voor de verwachte vooruitgang wordt hieronder echter weergegeven in Figuur 55. 2050 is gekozen als het jaar met de grootste verbeteringen ten opzichte van de huidige situatie in 2020, voorgesteld door scenario 0. De gedetailleerde nummers zijn weergegeven in Tabel 72 in de appendix.




Figuur 55: Verwachte verbetering van verschillende parameters van toekomstige PHEV

### 4.3.3 Resultaten

De resultaten tonen het relatief verschil in brandstof- (FC) en energieverbruik (EC) voor elk onderzocht scenario voor drie verschillende gemiddelde voertuigen. In Tabel 30, Tabel 31 en Tabel 33 worden de resultaten voor een grote benzine PHEV, een grote diesel PHEV en voor een middelgrote benzine PHEV dien overeenkomstig gepresenteerd.

Tabel 30: FC en EC voor een grote benzine PHEV

| | | FC (l/100km & % verschil van scenario 0) | | FC (MJ/km & % verschil van scenario 0) | | EC (Wh/km & % verschil van scenario 0) | | EC (MJ/km & % verschil van scenario 0) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Basis 1** | Scenario 0 | 7,02 | - | 2,16 | - | 204,49 | - | 0,74 | - |
| **$F_0$** | Scenario 1 | 6,93 | *-1,3%* | 2,13 | *-1,3%* | 201,81 | *-1,3%* | 0,73 | *-1,3%* |
| | Scenario 2 | 6,77 | *-3,5%* | 2,08 | *-3,5%* | 199,90 | *-2,2%* | 0,72 | *-2,2%* |
| | Scenario 3 | 6,54 | *-6,7%* | 2,01 | *-6,7%* | 191,47 | *-6,4%* | 0,69 | *-6,4%* |
| **$F_2$** | Scenario 4 | 6,81 | *-2,9%* | 2,10 | *-2,9%* | 202,87 | *-0,8%* | 0,73 | *-0,8%* |
| | Scenario 5 | 6,61 | *-5,7%* | 2,03 | *-5,7%* | 196,71 | *-3,8%* | 0,71 | *-3,8%* |
| | Scenario 6 | 6,43 | *-8,4%* | 1,98 | *-8,4%* | 190,44 | *-6,9%* | 0,69 | *-6,9%* |
| **ICE** | Scenario 7 | 6,39 | *-9,0%* | 1,96 | *-9,0%* | 204,49 | *0,0%* | 0,74 | *0,0%* |
| | Scenario 8 | 5,86 | *-16,5%* | 1,80 | *-16,5%* | 204,49 | *0,0%* | 0,74 | *0,0%* |
| | Scenario 9 | 5,41 | *-22,9%* | 1,66 | *-22,9%* | 204,49 | *0,0%* | 0,74 | *0,0%* |
| **Basis 2** | Scenario 10 | 5,33 | *-24,1%* | 1,64 | *-24,1%* | 187,93 | *-8,1%* | 0,68 | *-8,1%* |
| **Gewicht** | Scenario 11 | 5,31 | *-24,3%* | 1,63 | *-24,3%* | 187,92 | *-8,1%* | 0,68 | *-8,1%* |
| | Scenario 12 | 5,29 | *-24,7%* | 1,63 | *-24,7%* | 187,97 | *-8,1%* | 0,68 | *-8,1%* |
| | Scenario 13 | 5,28 | *-24,7%* | 1,62 | *-24,7%* | 188,04 | *-8,0%* | 0,68 | *-8,0%* |
| **El. Motor** | Scenario 14 | 5,30 | *-24,4%* | 1,63 | *-24,4%* | 180,80 | *-11,6%* | 0,65 | *-11,6%* |
| | Scenario 15 | 5,26 | *-25,0%* | 1,62 | *-25,0%* | 173,58 | *-15,1%* | 0,62 | *-15,1%* |
| | Scenario 16 | 5,23 | *-25,4%* | 1,61 | *-25,4%* | 166,51 | *-18,6%* | 0,60 | *-18,6%* |
| **Combi** | Scenario 20 | 6,12 | *-12,7%* | 1,88 | *-12,7%* | 193,08 | *-5,6%* | 0,70 | *-5,6%* |
| | Scenario 21 | 5,30 | *-24,5%* | 1,63 | *-24,5%* | 175,21 | *-14,3%* | 0,63 | *-14,3%* |
| | Scenario 22 | 4,58 | *-34,8%* | 1,41 | *-34,8%* | 153,70 | *-24,8%* | 0,55 | *-24,8%* |

Tabel 31: FC en EC voor een grote diesel PHEV

| | | FC (l/100km & % verschil van scenario 0) | | FC (MJ/km & % verschil van scenario 0) | | EC (Wh/km & % verschil van scenario 0) | | EC (MJ/km & % verschil van scenario 0) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Basis 1** | Scenario 0 | 6,26 | - | 2,04 | - | 197,22 | - | 0,71 | - |
| **$F_0$** | Scenario 1 | 6,21 | *-0,8%* | 2,02 | *-0,8%* | 194,53 | *-1,4%* | 0,70 | *-1,4%* |
| | Scenario 2 | 6,08 | *-2,9%* | 1,98 | *-2,9%* | 189,70 | *-3,8%* | 0,68 | *-3,8%* |
| | Scenario 3 | 5,90 | *-5,7%* | 1,92 | *-5,7%* | 183,02 | *-7,2%* | 0,66 | *-7,2%* |
| **$F_2$** | Scenario 4 | 6,10 | *-2,5%* | 1,99 | *-2,5%* | 192,15 | *-2,6%* | 0,69 | *-2,6%* |
| | Scenario 5 | 5,95 | *-4,9%* | 1,94 | *-4,9%* | 186,13 | *-5,6%* | 0,67 | *-5,6%* |
| | Scenario 6 | 5,79 | *-7,5%* | 1,89 | *-7,5%* | 179,03 | *-9,2%* | 0,64 | *-9,2%* |
| **ICE** | Scenario 7 | 6,02 | *-3,8%* | 1,96 | *-3,8%* | 197,22 | *0,0%* | 0,71 | *0,0%* |
| | Scenario 8 | 5,80 | *-7,3%* | 1,89 | *-7,3%* | 197,22 | *0,0%* | 0,71 | *0,0%* |
| | Scenario 9 | 5,60 | *-10,6%* | 1,82 | *-10,6%* | 197,22 | *0,0%* | 0,71 | *0,0%* |
| **Basis 2** | Scenario 10 | 5,33 | *-14,8%* | 1,74 | *-14,8%* | 178,00 | *-9,7%* | 0,64 | *-9,7%* |
| **Gewicht** | Scenario 11 | 5,31 | *-15,2%* | 1,73 | *-15,2%* | 176,89 | *-10,3%* | 0,64 | *-10,3%* |
| | Scenario 12 | 5,28 | *-15,6%* | 1,72 | *-15,6%* | 175,79 | *-10,9%* | 0,63 | *-10,9%* |
| | Scenario 13 | 5,27 | *-15,8%* | 1,72 | *-15,8%* | 175,42 | *-11,1%* | 0,63 | *-11,1%* |
| **El. Motor** | Scenario 14 | 5,29 | *-15,6%* | 1,72 | *-15,6%* | 170,91 | *-13,3%* | 0,62 | *-13,3%* |
| | Scenario 15 | 5,26 | *-16,0%* | 1,71 | *-16,0%* | 163,95 | *-16,9%* | 0,59 | *-16,9%* |
| | Scenario 16 | 5,22 | *-16,7%* | 1,70 | *-16,7%* | 156,96 | *-20,4%* | 0,57 | *-20,4%* |
| **Combi** | Scenario 20 | 5,81 | *-7,3%* | 1,89 | *-7,3%* | 182,56 | *-7,4%* | 0,66 | *-7,4%* |
| | Scenario 21 | 5,29 | *-15,5%* | 1,72 | *-15,5%* | 163,98 | *-16,9%* | 0,59 | *-16,9%* |
| | Scenario 22 | 4,78 | *-23,7%* | 1,56 | *-23,7%* | 142,75 | *-27,6%* | 0,51 | *-27,6%* |

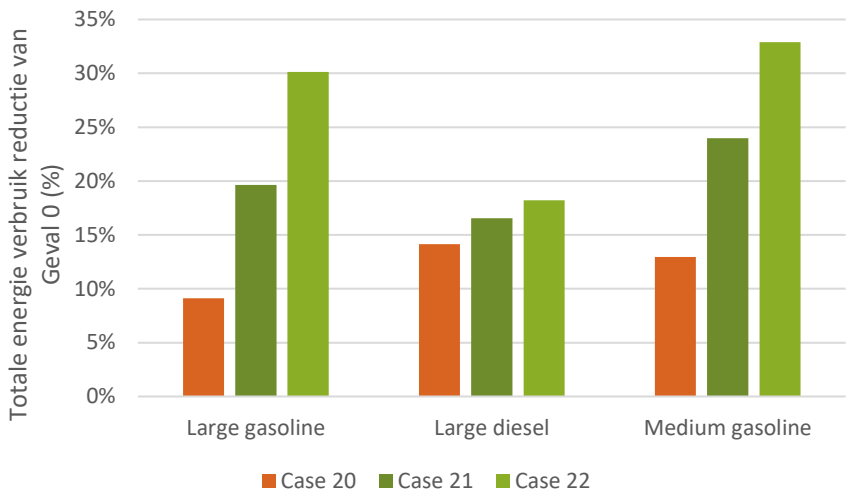
Tabel 32: FC en EC voor medium benzine PHEV

| | | FC (l/100km & % verschil met basis 1) | | FC (MJ/km & % verschil met basis 1) | | EC (Wh/km & % verschil met basis 1) | | EC (MJ/km & % verschil met basis 1) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Basis 1** | Scenario 0 | 5,92 | - | 1,82 | - | 175,27 | - | 0,63 | - |
| **$F_0$** | Scenario 1 | 5,86 | *-1,0%* | 1,80 | *-1,0%* | 173,20 | *-1,2%* | 0,62 | *-1,2%* |
| | Scenario 2 | 5,81 | *-1,9%* | 1,78 | *-1,9%* | 170,95 | *-2,5%* | 0,62 | *-2,5%* |
| | Scenario 3 | 5,75 | *-2,9%* | 1,77 | *-2,9%* | 169,00 | *-3,6%* | 0,61 | *-3,6%* |
| **$F_2$** | Scenario 4 | 5,75 | *-2,9%* | 1,77 | *-2,9%* | 168,26 | *-4,0%* | 0,61 | *-4,0%* |
| | Scenario 5 | 5,57 | *-5,9%* | 1,71 | *-5,9%* | 160,96 | *-8,2%* | 0,58 | *-8,2%* |
| | Scenario 6 | 5,39 | *-9,0%* | 1,66 | *-9,0%* | 154,08 | *-12,1%* | 0,55 | *-12,1%* |
| **ICE** | Scenario 7 | 5,16 | *-12,9%* | 1,59 | *-12,9%* | 175,27 | *0,0%* | 0,63 | *0,0%* |
| | Scenario 8 | 4,57 | *-22,8%* | 1,40 | *-22,8%* | 175,27 | *0,0%* | 0,63 | *0,0%* |
| | Scenario 9 | 4,10 | *-30,7%* | 1,26 | *-30,7%* | 175,27 | *0,0%* | 0,63 | *0,0%* |
| **Basis 2** | Scenario 10 | 4,20 | *-29,0%* | 1,29 | *-29,0%* | 156,17 | *-10,9%* | 0,56 | *-10,9%* |
| **Gewicht** | Scenario 11 | 4,20 | *-29,0%* | 1,29 | *-29,0%* | 155,73 | *-11,1%* | 0,56 | *-11,1%* |
| | Scenario 12 | 4,19 | *-29,2%* | 1,29 | *-29,2%* | 155,21 | *-11,4%* | 0,56 | *-11,4%* |
| | Scenario 13 | 4,18 | *-29,4%* | 1,28 | *-29,4%* | 154,48 | *-11,9%* | 0,56 | *-11,9%* |
| **El. Motor** | Scenario 14 | 4,18 | *-29,4%* | 1,29 | *-29,4%* | 149,62 | *-14,6%* | 0,54 | *-14,6%* |
| | Scenario 15 | 4,16 | *-29,7%* | 1,28 | *-29,7%* | 144,42 | *-17,6%* | 0,52 | *-17,6%* |
| | Scenario 16 | 4,13 | *-30,2%* | 1,27 | *-30,2%* | 138,16 | *-21,2%* | 0,50 | *-21,2%* |
| **Combi** | Scenario 20 | 4,95 | *-16,3%* | 1,52 | *-16,3%* | 159,52 | *-9,0%* | 0,57 | *-9,0%* |
| | Scenario 21 | 4,20 | *-29,1%* | 1,29 | *-29,1%* | 142,77 | *-18,5%* | 0,51 | *-18,5%* |
| | Scenario 22 | 3,61 | *-39,0%* | 1,11 | *-39,0%* | 127,21 | *-27,4%* | 0,46 | *-27,4%* |

De resultaten voor scenario's 17-19 worden niet gepresenteerd, omdat er geen significante verandering is in FC of EC naarmate de batterijcapaciteit toeneemt. De verandering in gewicht is vrij klein en niet belangrijk in deze scenario's. De vermindering van het totale energieverbruik voor scenario's 20-22, met verwijzing naar basis 1, wordt weergegeven voor alle voertuigen in Figuur 56. De cijfers achter deze figuur staan in Tabel 73 in de appendix. Deze resultaten werden als volgt berekend met behulp van de gemiddelde UF van 25%:

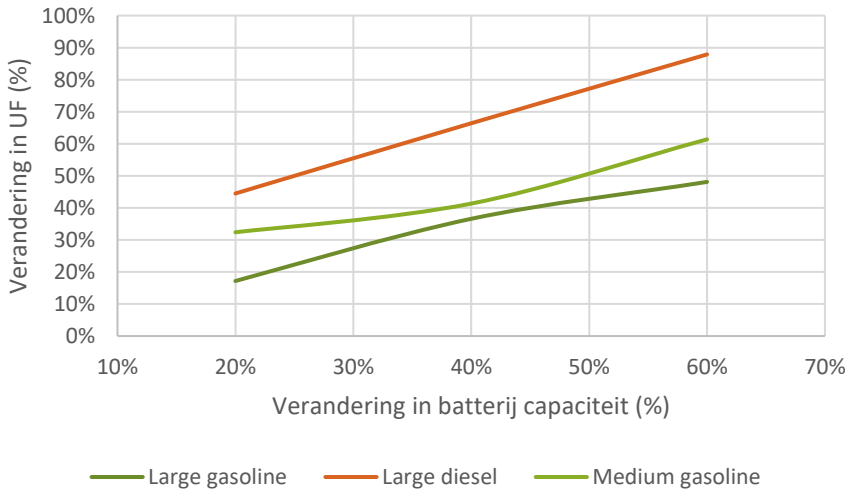
$$\text{Totaal energieverbruik } = 25\% * FC + 75\% * EC$$

De reductie in het meest optimistische scenario varieert van 18% tot 33%, waarbij de hoogste reductie geboekt wordt voor de medium benzine PHEV en dit vooral dankzij de grote toename van de efficiëntie van de verbrandingsmotor (tot ongeveer 50%).




Figuur 56: FC vermindering voor gecombineerde scenario's ten opzichte van basis 1

De verhoogde batterijcapaciteit zal vooral een effect hebben op het gehele elektrische bereik van het voertuig, en dus ook in de utiliteitsfactor (UF). De simulaties die in Figuur 57 hierin worden voorgesteld werden uitgevoerd in warme startomstandigheden, volgens het WLTC-snelheidsprofiel en met een initiële SOC van 30%. Gemiddeld resulteert dit in een toename van 17% in de UF per toename van 20% in batterijcapaciteit.




Figuur 57: Verandering in UF als een gevolg van de verandering in batterij capaciteit.

## 4.4 ENERGIEVERBRUIKSFACTOREN VOOR EEN PLUG-IN SERIE-HYBRIDE ELEKTRISCHE BUS

### 4.4.1 Introductie

Naast het modelleren van drie gemiddelde PHEV's wordt in deze studie ook het energiegedrag van een hybride-elektrische stadsbus bij verschillende verkeersomstandigheden onderzocht. Deze analyse doen we op basis van een gedetailleerd simulatieproces, waarbij een op vermogen gebaseerd plug-in hybride elektrisch stadsbusmodel is opgezet in de virtuele simulatieruimte van LMS AMESIM. Teneinde de verschillende verkeersomstandigheden te waarborgen lieten we verschillende rijcycli los op het simulatiemodel, die van toepassing zijn voor de prestatie-evaluatie van stadsbussen.

Met het ontwikkelen van dit hybride busmodel worden de eerste stappen gezet richting het invullen van een hiaat in de wetenschap, gezien er geen enkel Europees onderzoeksinstituut hier reeds werk van maakte. Op die manier zal het model dat we hier voorstellen bijdragen tot betere inzichten in het potentieel van plug-in hybride bussen in het klimaatvraagstuk en de problematiek rond lokale luchtkwaliteit.

### 4.4.2 Methodologie

#### 4.4.2.1 Modelparameters

De hybridisatie en elektrificatie van de stadsbusvloot bevindt zich in een relatief vroeg stadium, waardoor de beschikbaarheid van specifieke technische gegevens voor commerciële bussen die effectief rondrijden nog beperkt is. Om die reden zijn we voor deze studie aan de slag gegaan om een geheel nieuw model voor een serie-hybride bus te ontwikkelen en zo een belangrijke bijdrage te doen aan de wetenschap. Met behulp van dit model verwerven we inzichten in de werking van de bus en het energieverbruik dat daaruit voortvloeit. Belangrijke elementen voor de algehele opstelling van modellering en simulatie zijn:

- De configuratie van de serie-hybride elektrische bus
- De kenmerken van de bus en van zijn componenten
- Het algemene modelleringsproces dat wordt gevolgd

#### 4.4.2.2 Configuratie van de aandrijflijn

Wat betreft de topologie van de onderzochte bus wordt het vermogen naar de wielen expliciet geleverd door de elektrische tractiemotor, die ook als een generator werkt tijdens het remmen. Dit is eigen aan een serie-hybride. De belangrijkste energiebron is de batterij die de nodige elektrische stroom levert aan de tractiemotor. Als aanvullende energiebron wordt een dieselmotor gebruikt. Gewoonlijk hebben batterijpakketten voor dergelijke bussen een capaciteit variërend van 10 - 40 kWh.
De dieselmotor is gekoppeld aan een elektrische generator, zodat het mechanische vermogen dat door de motor wordt geproduceerd wordt omgezet in een elektrisch vermogen, dat ofwel rechtstreeks aan de tractiemotor wordt geleverd of in de batterij wordt opgeslagen. De configuratie van de onderzochte serie-hybride bus omvat ook het plug-in aspect, waardoor de batterij extern kan worden opgeladen via het elektriciteitsnetwerk.

#### 4.4.2.3 Typische buskarakteristieken

Voor het opstellen van het model is de volgende logica toegepast. Het totale ontwerp was gebaseerd op het nominale vermogen van een motor en een generator van een commercieel beschikbare bus (BAE 2020). De grootte van de generator is gebaseerd op de capaciteit van de batterij, waarvan de specificaties ook door dezelfde fabrikant zijn gepubliceerd. De dimensionering van de verbrandingsmotor is dan weer gebaseerd op het nominale vermogen van de generator die ermee is gekoppeld. Andere kenmerken zoals die van het koetswerk blijven in dit geval ongewijzigd en gelijk aan die van conventionele bussen van

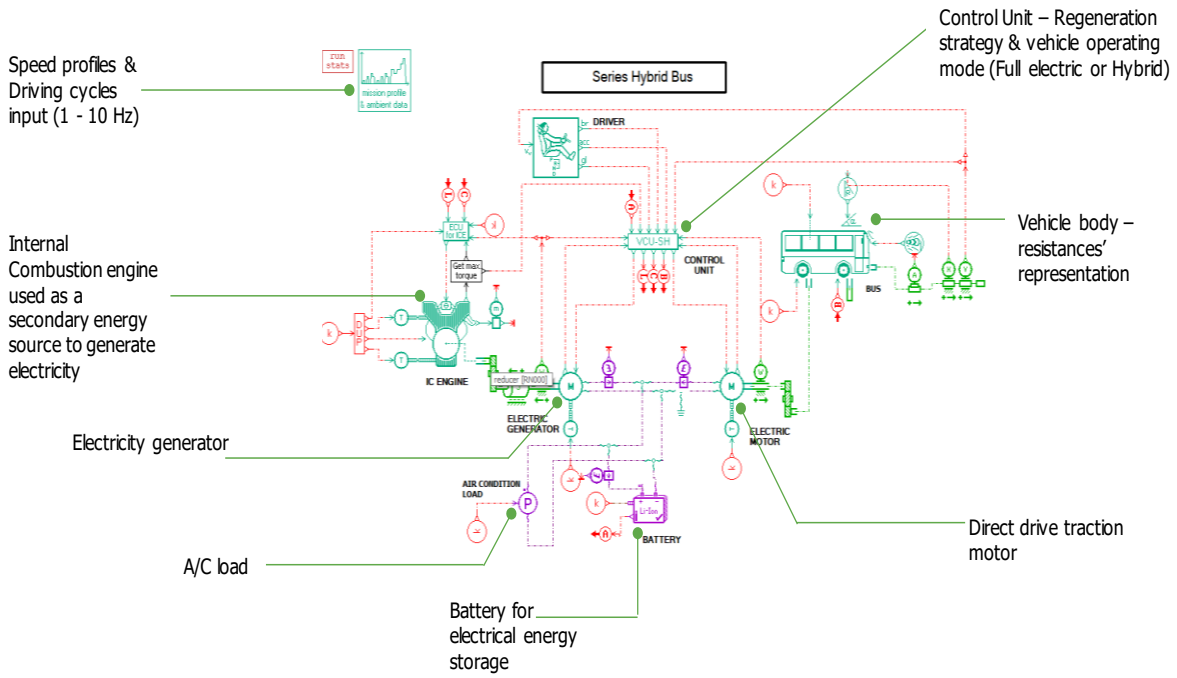
dezelfde massacategorie (15-18 ton brutogewicht). De airconditioning of verwarming wordt beschouwd als een constante stroomverbruiker, rechtstreeks verbonden met het elektrische circuit van het voertuig. De belangrijkste kenmerken van de gemodelleerde bus zijn weergegeven in Tabel 33.

Tabel 33: Karakteristieken van de gemodelleerde bus

| **Serie-hybride bus** | |
|---|---|
| Massa | 16 ton |
| Wieldiameter | 57 cm |
| Frontale oppervlakte | 6,9 $m^2$ |
| Finale versnellingsverhouding | 9 |
| Luchtweerstandscoëfficiënt | 0,536 |
| | |
| **Batterij** | |
| Type | Li – NMC |
| Nominale capaciteit | 31,8 kWh<br>48,8 Ah |
| Nominaal Voltage | 660 V |
| | |
| **Verbrandingsmotor** | |
| Brandstof | Diesel |
| Nominaal vermogen | 160 kW |
| | |
| **Elektromotor** | |
| Max vermogen | 195 kW |
| Max koppel | 2.100 Nm |
| Max draaisnelheid | 4.500 rpm |
| Gemiddelde efficiëntie | 85% |
| | |
| **Generator** | |
| Max vermogen | 140 kW |
| Max koppel | 660 Nm |
| Max draaisnelheid | 2.700 rpm |
| Gemiddelde efficiëntie | 85% |
| | |
| **Airconditioning** | |
| Constant vermogen | 15 kW |

### 4.4.3 Simulatieproces

De modelopstelling voor de plug-in serie-hybride elektrische bus is gemaakt in LMS Amesim. Amesim is een simulatie*tool* waarmee op energie gebaseerde modellen kunnen worden gebruikt, die het energieverbruik op een hoge resolutie inschatten. Deze resolutie is 1 Hz en geef dus een inschatting per seconde, op basis van de momentane vermogensbehoefte van de motor, en dit over een vooraf bepaald rijpatroon. De ontwikkeling van het geïntegreerde voertuigmodel is gebaseerd op een synthese van de verschillende subsystemen van de aandrijflijn (d.w.z. de motor, de elektromotor, de batterij, enz.). Figuur 58 presenteert de lay-out van het hybride busmodel in Amesim.



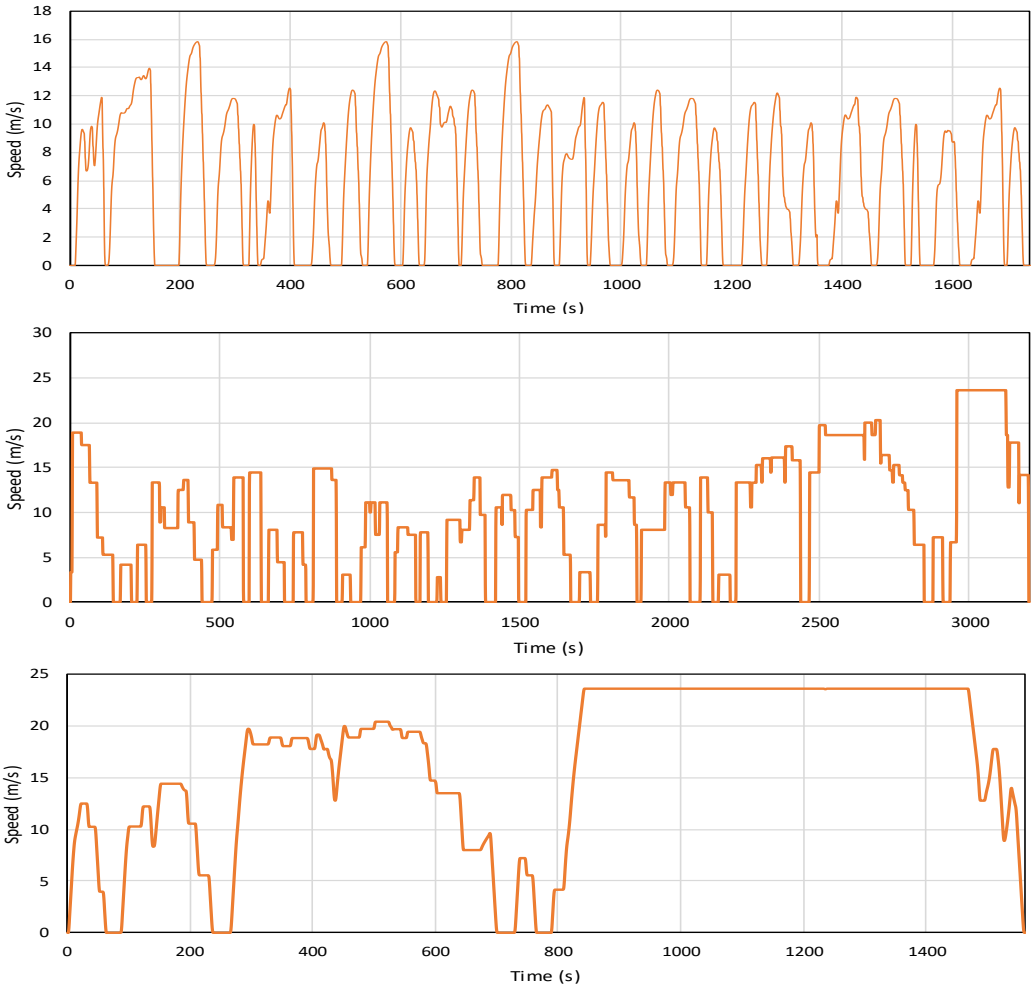

Figuur 58: Modelopstelling LMS Amesim

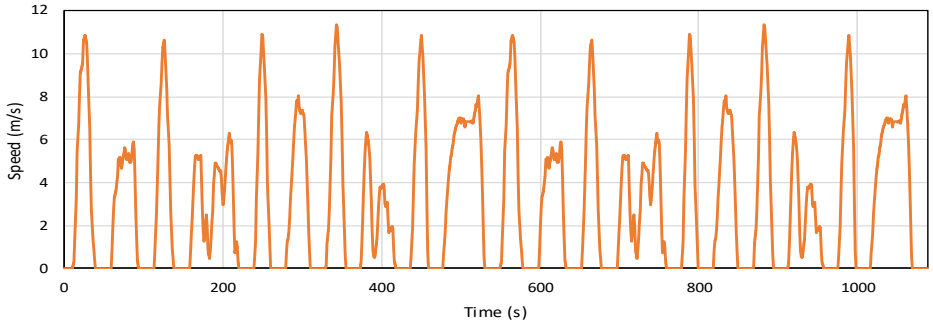
De ladingstoestand (SoC) van de batterij is 90% aan het begin van elke simulatie, aangezien we ervan uitgaan dat de batterij al vóór het begin van elke rit door het elektriciteitsnet is opgeladen, bijvoorbeeld via oplaadfaciliteiten in het depot, aan de terminal of aan een bushalte.
Om het energieverbruik onder verschillende rijomstandigheden te schatten, wordt het gesimuleerde voertuig volgens vier snelheidsprofielen gereden. De gebruikte rijcycli zijn de volgende met de volgorde die wordt weergegeven in Figuur 59:

- De 'Braunschweig City Driving'-cyclus, een tijdelijke cyclus met haltes, handig voor het testen van stadsbussen,
- De 'VECTO Urban Delivery'-cyclus voor het testen van zware voertuigen in het VECTO-model, die stedelijke omstandigheden weergeeft,
- De 'VECTO Regional Delivery'-cyclus voor het testen van zware voertuigen, die staat voor extra stedelijke rijomstandigheden,
- De 'Manhattan'-cyclus, een tijdelijke cyclus met lage snelheden en stops, handig voor het testen van stadsbussen.
- NYC - een rollenbanktest voor zware voertuigen, representatief voor de werkelijke rijpatronen van transit-bussen in New York City
- OCC (Orange County Bus OC BUS Cycle) - een door de West Virginia University (WVU) ontwikkelde rollenbanktest voor zware voertuigen, gebaseerd op de rijpatronen van stadsbussen in Los Angeles, Californië.
- VTP VECTO

- CBD (Central Business District) - een procedure voor rollenbank testen met zware voertuigen, opgesteld door het Amerikaanse ministerie van Transport en de Urban Mass Transit Association voor het beoordelen van busprestaties.
- Arterial Segment of the Transit Coach Operating Duty Cycle
- Commuter Segment of the Transit Coach Operating Duty Cycle
- ETC (FIGE urban)
- ETC (FIGE extra urban (rural +motorway))
- WHVC Urban/Rural/Motorway
- SORT 1/2/3
- UDDS HDV

Tabel 34 geeft de belangrijkste kenmerken van deze snelheidsprofielen in termen van tijdsduur, afstand en gemiddelde snelheid. De stadscycluscyclus van Braunschweig simuleert stadsbusritten met frequente stops (~ 2,4 stops per kilometer) en vertegenwoordigt de typische rit in Europa.






Figuur 59: De gebruikte rijprofielen voor stadsbussen

Tabel 34: karakteristieken van de gebruikte rijprofielen

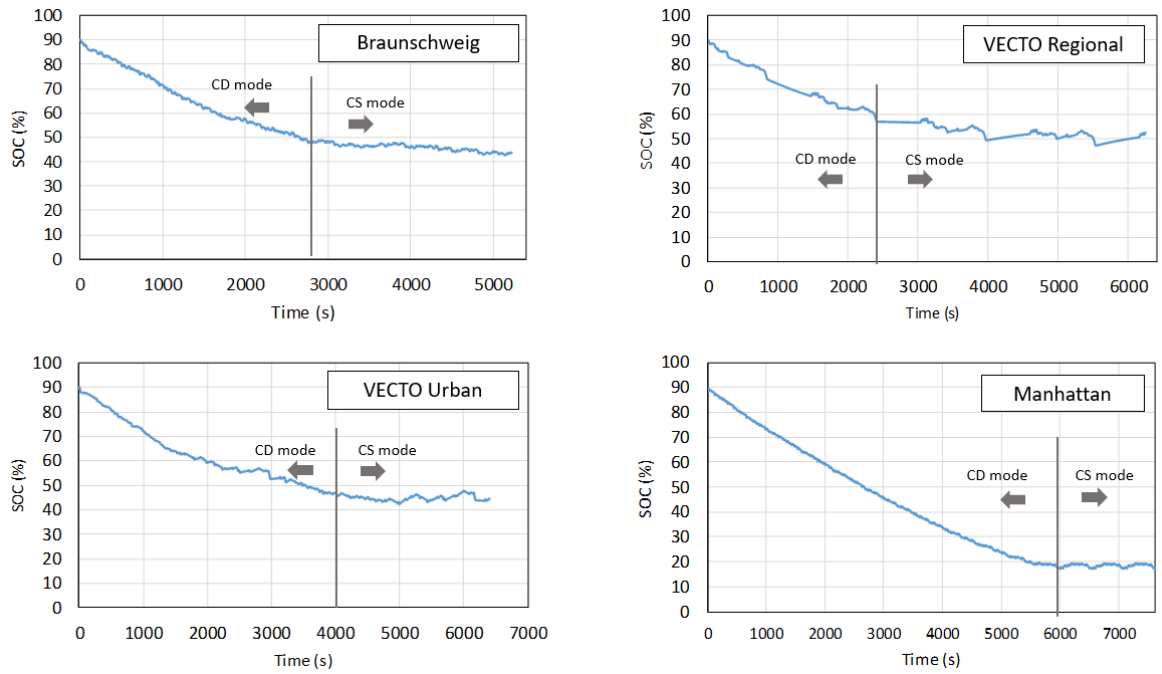
| Rijprofiel | Duur | Afstand | Gem. snelheid |
|---|---|---|---|
| **Braunschweig City Driving Cycle** | 1.740 s | 10.558 km | 22 km/u |
| **VECTO Urban Delivery speed profile** | 3.200 s | 30.172 km | 34 km/u |
| **VECTO Regional Delivery speed profile** | 1.561 s | 25.213 km | 58 km/u |
| **Manhattan bus cycle** | 1.989 s | 3.225 km | 11 km/u |

### 4.4.4 Resultaten

#### 4.4.4.1 Energieverbruik

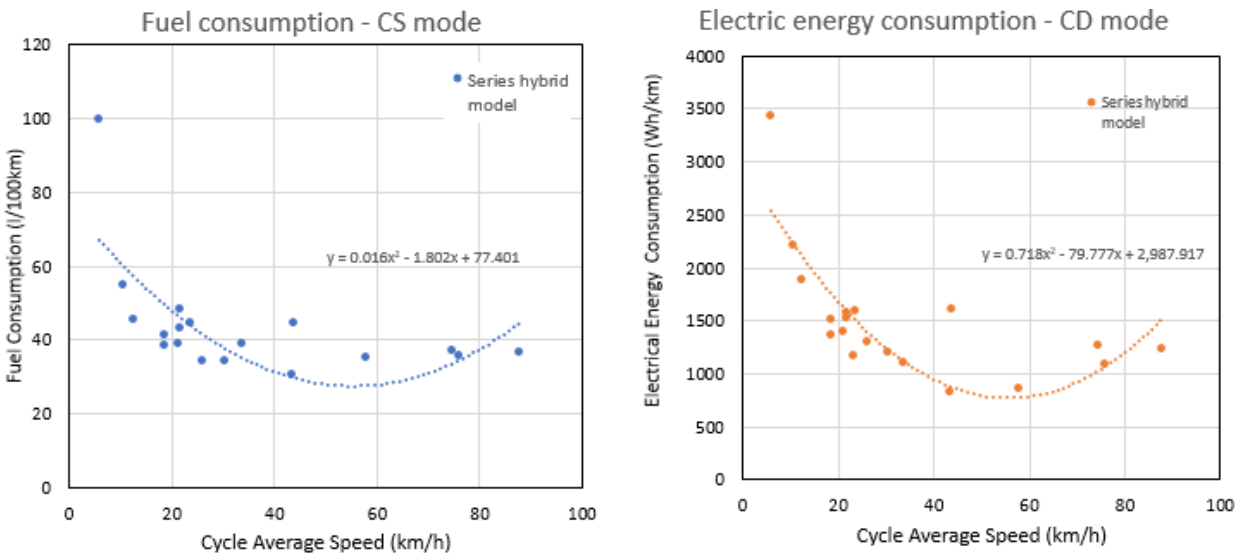
De resultaten zijn gericht op de inschatting van het energieverbruik van de serie-hybride elektrische bus over de geselecteerde snelheidsprofielen. Elk snelheidsprofiel wordt tijdens de simulatie verschillende keren herhaald. De schatting van het energieverbruik voor elk snelheidsprofiel wordt geanalyseerd in twee delen, gerelateerd aan de energiestrategie die het voertuig volgt. Het eerste deel van de analyse betreft het energieverbruik tijdens de *charge-depleting* (CD) modus, waarbij het voertuig de elektrische energie gebruikt die door de batterij wordt geleverd. Bij deze modus wordt enkel het elektrisch energie verbruik uitgedrukt in Wh/km of MJ/km berekend.

Het tweede deel is de *charge-sustaining* (CS) modus, waarin de verbrandingsmotor voornamelijk werkt om voldoende energie te produceren om het voertuig te besturen, terwijl het ladingsniveau balanceert rond een ingestelde SoC. Bij deze modus wordt enkel de brandstofverbruik uigedrukt in kg of l per 100lm berekend. De SOC-ontladingspercentages voor de snelheidsprofielen zijn weergegeven in Figuur 60, waar ook voor elke cyclus het onderscheid zichtbaar is tussen de laad- en ontlaadmodus per rijcyclus.




Figuur 60: SOC variatie over het duur van het snelheidsprofiel

Voor elk van de bovenstaande gevallen is het totale energieverbruik, gedeeld door de afgelegde afstand, gecorreleerd met de respectieve gemiddelde snelheid van het snelheidsprofiel. Hierdoor komen gemiddelde snelheidsafhankelijke energieverbruikscijfers naar voor. Deze ratios worden weergegeven in Figuur 61 zowel voor het brandstofverbruik (l brandstof/100 km) in de CS-modus (linkergrafiek), als het elektrisch energieverbruik in de CD-modus (rechtergrafiek).




Figuur 61: Brandstofverbruik van de verbrandingsmotor in uitputting en CS modus (links) en energieverbruik in de batterij gedurende de CD modus (rechts), voor een reeks gemiddelde snelheden

Merk op dat voor elke modus de toename van de gemiddelde snelheid resulteert in de vermindering van het energieverbruik, hetgeen te maken heeft met de energievraag tijdens het accelereren en decelereren van de busmassa. De resultaten van het energieverbruik tijdens de verschillende testcycli staan opgelijst in Tabel 35.

Tabel 35: Overzicht van de resultaten van het brandstof- en elektriciteitsverbruik per cyclus

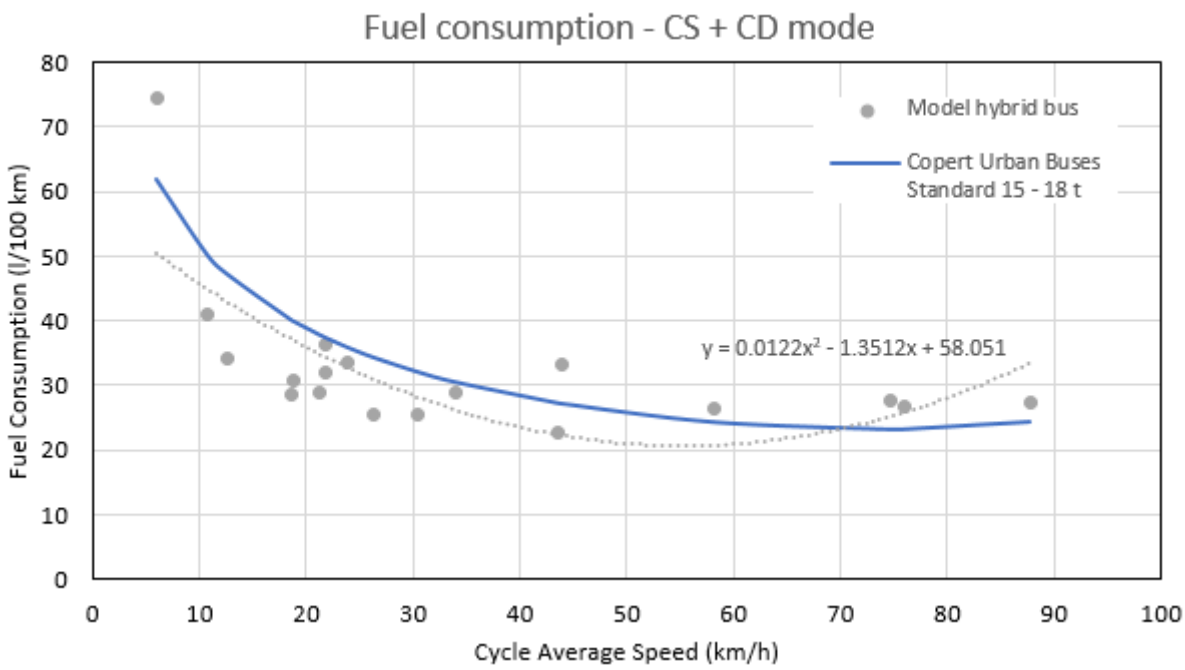
| Cycle | Gemiddelde snelheid (km/u) | CS modus (l/100km) | CD modus (Wh/km) |
|---|---|---|---|
| Braunsweig | 21,8 | 42,8 | 1524,4 |
| VECTO Delivery rural | 58,1 | 35,0 | 852,8 |
| VECTO Delivery urban | 33,9 | 38,7 | 1089,8 |
| Manhattan | 10,7 | 54,7 | 2196,2 |
| NYC | 6,0 | 99,4 | 3421,0 |
| OCC | 23,8 | 44,6 | 1582,5 |
| VTP VECTO | 30,5 | 34,2 | 1192,6 |
| CBD | 21,8 | 48,3 | 1569,4 |
| Arterial | 43,9 | 44,5 | 1608,2 |
| Commute | 74,7 | 37,0 | 1255,8 |
| ETC (Fige urban) | 23,5 | | 1161,1 |
| ETC (fige extra urban (rural +motorway) | 76,1 | 35,4 | 1080,6 |
| WHVC urban | 21,3 | 38,7 | 1391,1 |
| WHVC rural | 43,6 | 30,2 | 819,8 |
| WHVC motorway | 87,8 | 36,5 | 1221,4 |
| SORT 1 | 12,6 | 45,4 | 1870,7 |
| SORT 2 | 18,6 | 38,2 | 1498,9 |
| SORT 3 | 26,3 | 34,1 | 1288,7 |
| UDDS HDV | 18,9 | 41,1 | 1363,4 |

#### 4.4.4.2 Vergelijking met COPERT & inschatting van het voordeel in brandstofverbruik

Deze paragraaf vergelijkt de resultaten van het model met de overeenkomstige conventionele stadsbus-voertuigcategorie die in COPERT bestaat (stadsbus tussen 15 en 18 ton). Daarnaast wordt het voordeel onderzocht dat hybride bussen kunnen opleveren in vergelijking met conventionele bussen op het vlak van brandstofverbruik.

Het onderstaande diagram toont het brandstofverbruik van het hybride busmodel in CS + CD-modus bij gemiddelde snelheden van de verschillende rijcycli. Een aanname met betrekking tot de UF is noodzakelijk om deze grafiek tot stand te brengen. In dit geval wordt aangenomen dat de UF gelijk is aan de overeenkomstige totale UF voor personenauto's, wat neerkomt op 25%. Daarnaast bevat het diagram de verbruiksvergelijking van het corresponderende conventionele model van COPERT (stadsbus tussen 15 en 18 ton). Zoals in het diagram te zien is, zijn de meeste verbruikspunten van het model lager dan bij een conventioneel voertuig, vooral bij de lagere gemiddelde snelheden, die de rijcycli in de stad vertegenwoordigen.

Hybride bussen zijn meestal ontworpen om te rijden binnen een stad waar de gemiddelde snelheid van het voertuig nauwelijks hoger is dan 40 km/u. Daarom zijn de punten bij hogere snelheden, waar het brandstofverbruik hoger is in vergelijking met de overeenkomstige categorie van Copert, niet echt belangrijk.




Figuur 62: Brandstofverbruik in CS+CD modus van het hybride bus model en van Urban buses standard 15-18t in Copert

COPERT gebruikt de volgende algemene vergelijking voor de berekening van snelheid-afhankelijke emissie factoren (EF) voor alle voertuigcategorieën en polluenten.

$$EF = (Alpha \times V^2 + Beta \times V + Gamma + Delta / V) / (Epsilon \times V^2 + Zeta \times V + Eta) \times (1 - RF)$$

De energieverbuiksparameters worden weergegeven in de volgende tabellen.

Tabel 36: Parameters voor het brandstof- en elektrisch energieverbruik van het serieel hybride busmodel

| Serieel Hybrid bus Parameters | | Alfa | Bèta | Gamma | Delta | Epsilon | Zita | Eta | RF |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **CS modus** | FC | 5.79E-03 | -6.40E-01 | 2.75E+01 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.00E+00 | 0.00E+00 |
| **CD modus** | EC | 2.58E-03 | -2.87E-01 | 1.08E+01 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.00E+00 | 0.00E+00 |

Tabel 37: Parameters voor het brandstofverbruik voor de COPERT Urban Buses Standard 15 - 18 t

| Urban Buses Standard 15 - 18 t | Alfa | Bèta | Gamma | Delta | Epsilon | Zita | Eta | RF |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| FC | -3.14E-04 | -1.45E-02 | 5.34E+00 | 4.33E+00 | -1.20E-04 | 1.02E-02 | 2.11E-01 | 0.00E+00 |

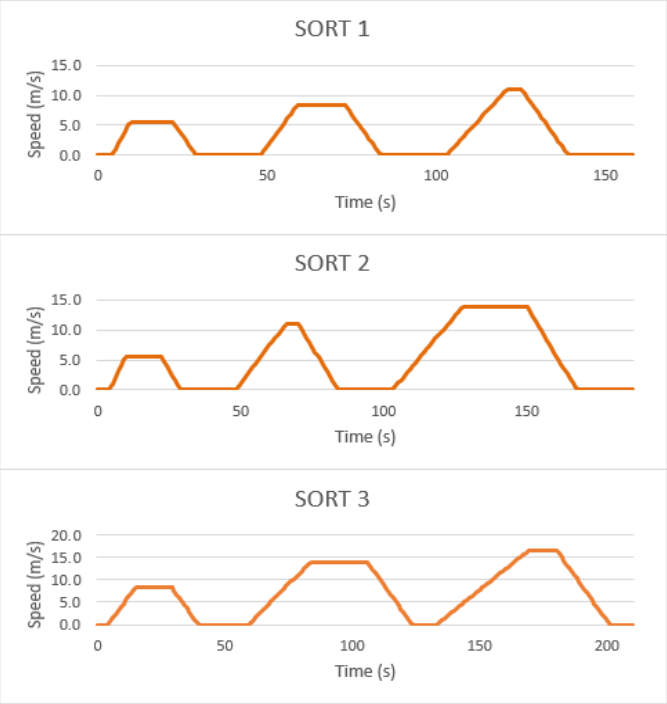
Het is belangrijk om de voordelen te analyseren die hybride bussen kunnen opleveren voor het brandstofverbruik. Er moet opgemerkt worden dat er enkele verbeteringen zijn aangebracht in het hybride busmodel en dat de resultaten in dit hoofdstuk dus enigszins verschillen van die in de studie.

Het brandstofverbruik voor een gemiddelde snelheid van 29 km/u (gemiddelde snelheid gebruikt in personenauto's voor stedelijke omstandigheden) en UF 25% is 31,54 l/100km. Het overeenkomstige brandstofverbruik van de conventionele bus in Copert is 35,96l/100km. Daarom heeft het serie-hybride busmodel een lager brandstofverbruik met 12,3% in vergelijking met het overeenkomstige conventionele.

Deze analyse heeft een bijhorend van een Excel-bestand waarin de verbruiksresultaten automatisch veranderen afhankelijk van de gemiddelde snelheid en UF gekozen door de gebruiker.

#### 4.4.4.3 Energetische analyse volgens de SORT cycli

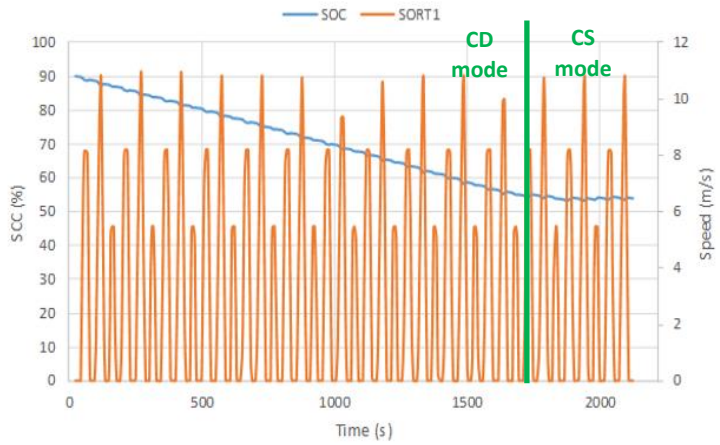
Voor het testen van (hybride) bussen wordt in de praktijk vaak teruggegrepen naar de SORT-cycli van de *International Association of Public Transport* (UITP 2014), al moeten we hier de kanttekening bij maken dat dit eerder om 'instructiecycli' gaat die een gelijkaardig patroon hebben als de NEDC voor personenwagens. Voor stadsbussen, die typisch een snelheidsprofiel met veel starten en stoppen kennen, hoeft zo'n SORT cyclus echter niet noodzakelijk te betekenen dat ze een onderschatting van de realiteit is, al zullen de dynamischere profielen van de vier eerder besproken cycli een beter inzicht geven. De snelheidsprofielen en de belangrijkste kenmerken van SORT zijn samengevat in Figuur 63 tot Figuur 66. De testresultaten voor de ladingstoestand van de batterij (SoC) voor de drie cycli ziet men in Tabel 38.



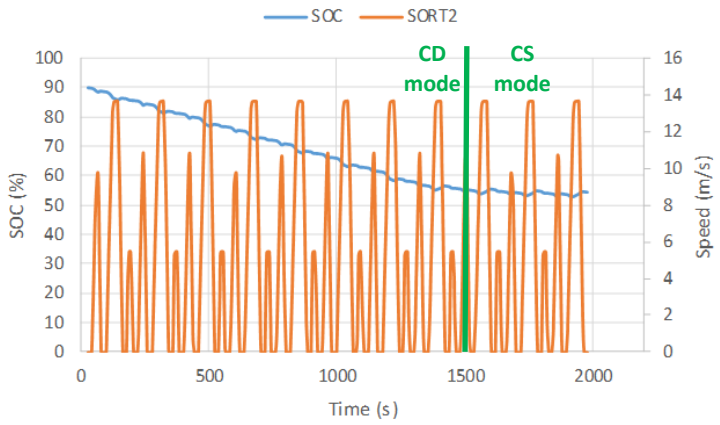

Figuur 63 SORT driving cycles speed profiles

Tabel 38 Main characteristics of the SORT driving cycles

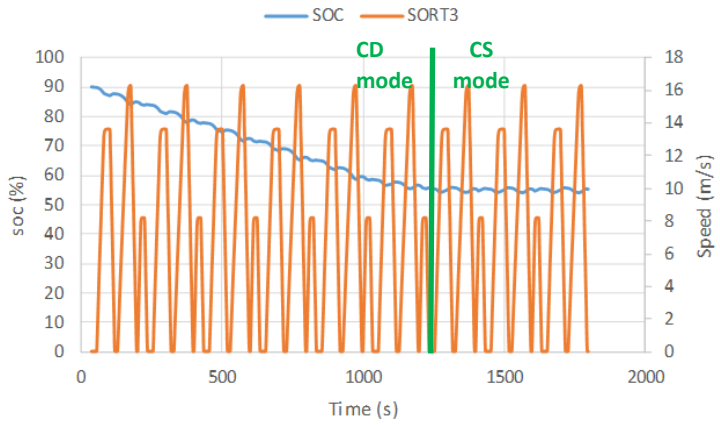
| Cyclus | Duur (s) | Afstand (km) | Gemiddelde snelheid (km/u) |
|---|---|---|---|
| **SORT 1** | 152 s | 0,505 km | 12,02 |
| **SORT 2** | 180 s | 0,893 km | 17,86 |
| **SORT 3** | 200 s | 1,409 km | 25,38 |




Figuur 64: De SORT 1 cyclus met het snelheidsprofiel en de evolutie van de batterijlading




Figuur 65: De SORT 2 cyclus met het snelheidsprofiel en de evolutie van de batterijlading




Figuur 66: De SORT 3 cyclus met het snelheidsprofiel en de evolutie van de batterijlading

Zoals we zien in Figuur 64 tot Figuur 66 gaat de aandrijflijn over naar CS-modus wanneer de SoC rond de 50% komt te liggen. Gezien de SORT 1 cyclus meer veeleisend is ligt het elektriciteitsverbruik tijdens CD-modus, en het brandstofverbruik tijdens CS-modus hoger dan bij de andere twee SORT cycli. Voor de gesimuleerde plug-in serie-hybride elektrische bus met een batterijcapaciteit van 48,8 Ah kan een elektrische actieradius van 5,576 km bereikt worden voor SORT 1, 6,812 km voor SORT 2 en 7,534 km voor SORT 3 wanneer de SoC rond de 50% wordt gehouden.

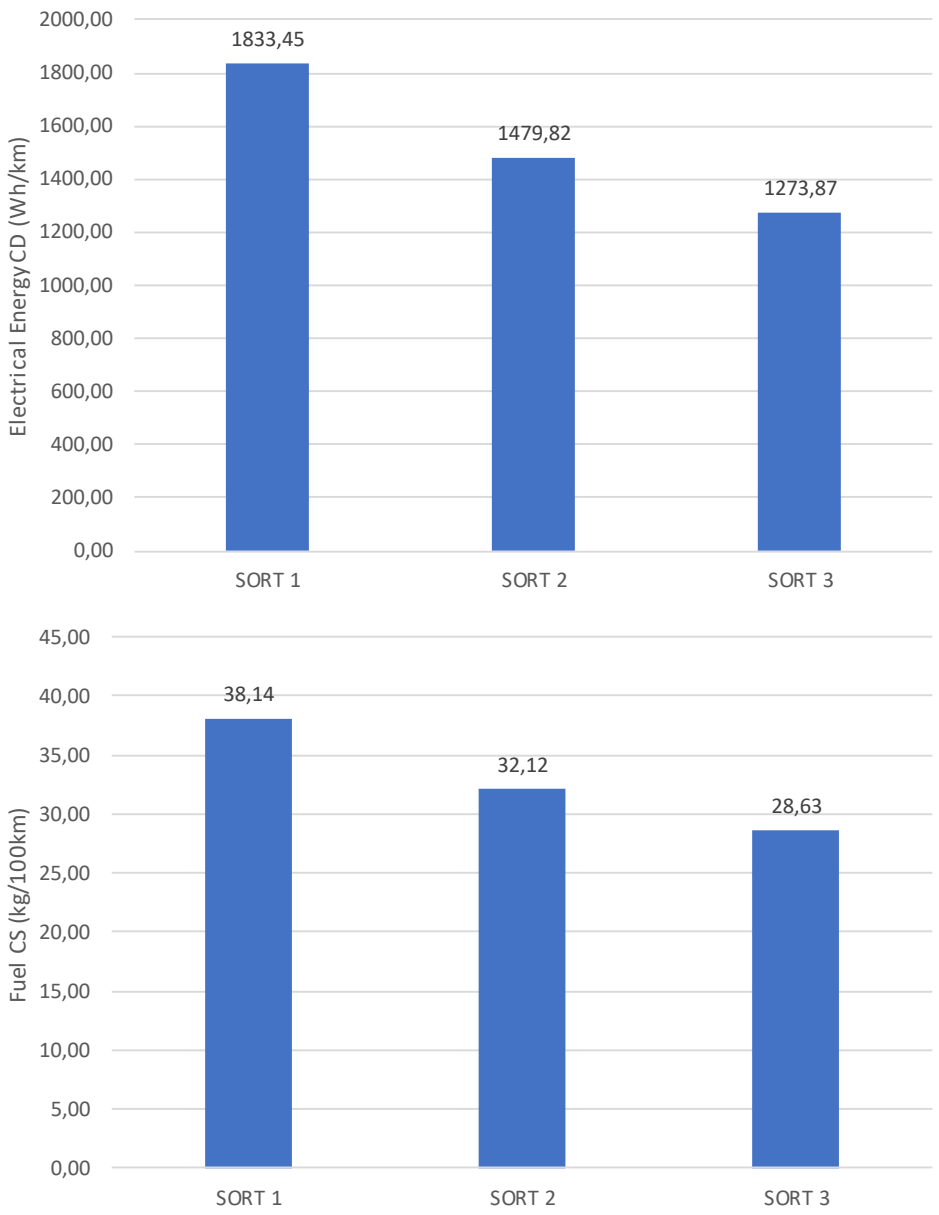



Figure 67: Electrical energy in the CD mode and fuel consumption in the CS mode for the SORT cycles

#### 4.4.4.4 Conclusies

Met behulp van het simulatiemodel hebben we inzichten verkregen in het energieverbruik van een serie-hybride elektrische bus voor verschillende testcycli. De resultaten wijzen uit dat dit type bus zowel in CD- als CS-modus kan worden aangestuurd. De behaalde actieradii tonen het potentieel aan om dit type bus volledig elektrisch te laten rijden in een stedelijke omgeving, zij het voor een beperkt aantal kilometers. Deze reikwijdte kan vergroot worden indien de bus op haar route zou kunnen snelladen, bijvoorbeeld via tactisch geplaatste pantograaflaadstations. Wanneer er in CS-modus wordt gereden, kan het bustype met sterk verminderde emissies van polluenten voorleggen omdat tijdens accelereren de verbrandingsmotor als assisterende krachtbron dient i.p.v. de hoofdbron.

Een andere belangrijke conclusie van deze studie is dat hybride bussen kunnen bijdragen aan het verminderen van het brandstofverbruik en aanverwante verontreinigende stoffen als ze een deel van de conventionele stadsbusvloot vervangen. Er werd met name opgemerkt dat ze een vermindering van ongeveer 12% kunnen opleveren, maar de omvang van dit voordeel hangt af van de bedrijfssnelheid in de modus voor het ontladen van lading en daarom van veel gerelateerde parameters zoals frequentie en duur van opladen, de afstand van de routes die gebruikt zullen worden etc.

# 5 IMPACTANALYSE

Op basis van de monitoringscampagne en het simulatiewerk dat in de voorafgaande hoofdstukken werd toegelicht kunnen we een nieuwe kerndataset aan emissiefactoren (EF) afleiden voor plug-in personenwagens. Waar de focus voornamelijk ligt op klimaat – en dus de uitstoot van $CO_2$, werden er voor de plug-ins ook emissiefactoren doorgerekend voor de polluenten koolstofmonoxide (CO), vluchtige organische stoffen (VOS, zijnde onverbrande koolwaterstoffen HC), stikstofoxiden (NOx), koolstofmonoxide (CO) en uitlaat-gerelateerd fijnstof (PM). Ook presenteren we in dit hoofdstuk een herziening van het energieverbruik. Om de impact van deze nieuwe emissiefactoren na te kunnen gaan in het Vlaamse FASTRACE rekenmodel, wordt in het aan dit rapport toegevoegde rekenmodel gewerkt met instelbare snelheden voor wegtypes stedelijk, ruraal en snelweg. Daarnaast laat het model toe om de utiliteitsfactor, welke de verhouding is tussen het aandeel elektrisch gereden kilometers tot het totaal aantal kilometers per trip, per wegtype aan te passen. Op die manier kan de gebruiker van het model de impact nagaan van een verhoogde utiliteitsfactor, hetgeen opportuun is in het kader van een verdere reductie van $CO_2$ emissies door PHEV's. Het is belangrijk om weten dat de nieuwe emissiefactoren de situatie anno 2020 weergeven, en dus geen verdere technologische verbeteringen die kunnen leiden tot lagere emissies. Voorts houden de emissiefactoren die we hieronder presenteren rekening met een utiliteitsfactor van 50% voor stedelijk en ruraal rijden, en 20% voor snelwegtrips, hetgeen voortvloeit uit de SEMS meetcampagne besproken in hoofdstuk 3. De volgende vergelijking toont nogmaals de invloed van de utiliteitsfactor. Hierin is $EF_{CS\ modus}$ de oorspronkelijk berekende emissiefactor waarbij géén rekening werd gehouden met een aandeel elektrisch rijden, hetgeen overeenkomt met het rijden in CS modus. UF staat voor de utiliteitsfactor volgens het wegtype. De $EF_{CS\ modus}$ komt voort uit het simulatiewerk waarbij verschillende testcycli werden herhaald, en waarbij de SEMS data ter validatie van het eindresultaat werden gehanteerd.

$$EF_{U/R/H} = EF_{U/R/H,CS\ modus} \times (1 - UF_{U/R/H})$$

In het bestaande emissiemodel van FASTRACE wordt voor PHEV's verondersteld dat hun emissies 30% lager liggen dan een conventioneel voertuig uit hetzelfde segment (klein, medium, groot). Hierbij baseert men zich op de gemiddelde utiliteitsfactor van 30% volgens het grootschalig Nederlands monitorings-onderzoek dat in 2.3 'Rapport 2: Monitoring van PHEV's april 2012 t/m maart 2016 (TNO, 2016)' beschreven wordt. Voor de emissiefactoren die in dit rapport worden besproken zijn we, zoals hierboven vermeld, fijnmaziger te werk gegaan met een utiliteitsfactor per wegtype. Ook maken voor Euronorm 6 een onderverdeling. We onderscheiden:

- 'Euro 6 <2017' overeenkomt met Euro 6a, 6b en 6c;
- 'Euro 6 2017-19' met Euro 6d-TEMP, en;
- 'Euro 6d 2020+' met de huidige, meest recente emissienorm Euro 6d

## 5.1 KOOLSTOFDIOXIDE ($CO_2$)

Wat blijkt uit Tabel 39 is dat de huidige emissiefactoren binnen FASTRACE een beduidende onderschatting weergeven van de $CO_2$ uitstoot op snelwegen, en dit voor alle vier de besproken PHEV segmenten. Voor stedelijk en ruraal rijden geven de nieuwe emissiefactoren dan weer aan dat PHEV's aanzienlijk minder uitstoten (en dus verbruiken) dan waar men aanvankelijk rekening mee hield. Meest opvallend is dat grote benzine PHEV's het in stedelijk verkeer opvallend beter doen volgens onze berekeningen, hetgeen blijkt uit een twee-derde lagere emissie.

Tabel 39: Overzicht van de huidige en nieuwe emissiefactoren voor $CO_2$ voor PHEV personenwagens

| $CO_2$ (g/km) | | Huidige EFs | | | Nieuwe EFs | | | Rel. % | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Urban | Rural | Highway | Urban | Rural | Highway | Urban | Rural | Highway |
| Benzine PHEV klein | Euro 6 <2017 | 167,13 | 93,39 | 103,82 | 68,93 | 51,24 | 121,87 | -58,8% | -45,1% | 25,2% |
| | Euro 6 2017-19 | 161,97 | 90,51 | 100,61 | 68,93 | 51,24 | 121,87 | -57,4% | -43,4% | 29,2% |
| | Euro 6 2020+ | 161,97 | 90,51 | 100,61 | 68,93 | 51,24 | 121,87 | -57,4% | -43,4% | 29,2% |
| Benzine PHEV medium | Euro 6 <2017 | 196,77 | 113,67 | 119,03 | 78,08 | 56,49 | 138,48 | -60,3% | -50,3% | 24,1% |
| | Euro 6 2017-19 | 190,51 | 110,05 | 115,25 | 78,08 | 56,49 | 138,48 | -59,0% | -48,7% | 28,2% |
| | Euro 6 2020+ | 190,51 | 110,05 | 115,25 | 78,08 | 56,49 | 138,48 | -59,0% | -48,7% | 28,2% |
| Benzine PHEV groot | Euro 6 <2017 | 278,06 | 152,60 | 140,10 | 92,01 | 66,92 | 164,29 | -66,9% | -56,1% | 25,1% |
| | Euro 6 2017-19 | 269,25 | 147,78 | 135,68 | 92,01 | 66,92 | 164,29 | -65,8% | -54,7% | 29,2% |
| | Euro 6 2020+ | 269,25 | 147,78 | 135,68 | 92,01 | 66,92 | 164,29 | -65,8% | -54,7% | 29,2% |
| Diesel PHEV Groot | Euro 6 <2017 | 192,59 | 124,07 | 142,84 | 91,29 | 66,10 | 163,63 | -52,6% | -46,7% | 22,2% |
| | Euro 6 2017-19 | 186,50 | 120,16 | 138,33 | 91,29 | 66,10 | 163,63 | -51,1% | -45,0% | 26,2% |
| | Euro 6 2020+ | 186,50 | 120,16 | 138,33 | 91,29 | 66,10 | 163,63 | -51,1% | -45,0% | 26,2% |

Ook voor niet-stekker hybrides en conventionele benzine- en dieselvoertuigen werd een herberekening uitgevoerd voor de vermelde polluenten en $CO_2$. Dit omdat in het FASTRACE model wordt gewerkt met emissiefactoren volgens COPERT versie 11.4, terwijl de nieuwe waarden ook de inzichten volgens de recentste COPERT versie (5.3) weerspiegelen. Dit zien we in Tabel 40. Wat opvalt zijn de lagere emissies tijdens stedelijk, en dus trager, rijden voor de benzinewagens, hetgeen zich ook in mindere mate toont voor de medium en grote dieselwagens. Voor kleinere dieselwagens zien we dan weer een beduidend hogere verbruikscijfers (gezien $CO_2$ nagenoeg recht evenredig is met het brandstofverbruik) en dit voor alle wegtypes. Voor wat betreft de benzine hybridemodellen (CS staat voor *charge-sustaining*), zien we dat de herziening volgens COPERT 5.3 leidt tot belangrijke stijgingen voor ieder wegtype, met bijna 50% hogere emissies tijdens stedelijke en rurale trips. Dit maakt deze technologie minder aantrekkelijk in het klimaatvraagstuk dan eerder gedacht. Om te staven in welke mate elektrificatie van aandrijflijnen gunstig kan zijn inzake $CO_2$ uitstoot plaatsen we in

Tabel 42 en Tabel 43 zowel niet-stekker en plug-in hybrides naast hun conventionele equivalenten.

Tabel 40: Overzicht van de $CO_2$ emissiefactoren voor conventionele benzine- en dieselwagens, aangevuld met nieuwe emissiefactoren voor 'conventionele' benzine CS hybrides.

| $CO_2$ (g/km) | | Huidige EFs | | | Nieuwe EFs | | | Rel. % | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Urban | Rural | Highway | Urban | Rural | Highway | Urban | Rural | Highway |
| Benzine klein | Euro 6 <2017 | 244,23 | 136,39 | 151,64 | 180,59 | 137,01 | 153,90 | -26,1% | 0,5% | 1,5% |
| | Euro 6 2017-19 | 231,21 | 129,12 | 143,56 | 180,59 | 137,01 | 153,90 | -21,9% | 6,1% | 7,2% |
| | Euro 6 2020+ | 231,21 | 129,12 | 143,56 | 180,59 | 137,01 | 153,90 | -21,9% | 6,1% | 7,2% |
| Benzine medium | Euro 6 <2017 | 287,17 | 165,81 | 173,64 | 211,30 | 167,11 | 176,49 | -26,4% | 0,8% | 1,6% |
| | Euro 6 2017-19 | 271,98 | 157,05 | 164,47 | 211,30 | 167,11 | 176,49 | -22,3% | 6,4% | 7,3% |
| | Euro 6 2020+ | 271,98 | 157,05 | 164,47 | 211,30 | 167,11 | 176,49 | -22,3% | 6,4% | 7,3% |
| Benzine groot | Euro 6 <2017 | 406,98 | 223,27 | 204,97 | 311,76 | 225,20 | 208,04 | -23,4% | 0,9% | 1,5% |
| | Euro 6 2017-19 | 384,48 | 210,94 | 193,65 | 311,76 | 225,20 | 208,04 | -18,9% | 6,8% | 7,4% |
| | Euro 6 2020+ | 384,48 | 210,94 | 193,65 | 311,76 | 225,20 | 208,04 | -18,9% | 6,8% | 7,4% |
| Diesel klein | Euro 6 <2017 | 130,90 | 96,26 | 119,00 | 172,31 | 140,72 | 151,29 | 31,6% | 46,2% | 27,1% |
| | Euro 6 2017-19 | 122,66 | 90,21 | 111,51 | 172,31 | 140,72 | 151,29 | 40,5% | 56,0% | 35,7% |
| | Euro 6 2020+ | 122,66 | 90,21 | 111,51 | 172,31 | 140,72 | 151,29 | 40,5% | 56,0% | 35,7% |
| Diesel medium | Euro 6 <2017 | 209,29 | 137,60 | 147,09 | 172,31 | 140,72 | 151,29 | -17,7% | 2,3% | 2,9% |
| | Euro 6 2017-19 | 197,04 | 129,55 | 138,48 | 172,31 | 140,72 | 151,29 | -12,6% | 8,6% | 9,3% |
| | Euro 6 2020+ | 197,04 | 129,55 | 138,48 | 172,31 | 140,72 | 151,29 | -12,6% | 8,6% | 9,3% |
| Diesel groot | Euro 6 <2017 | 285,06 | 183,58 | 211,38 | 233,87 | 186,74 | 216,18 | -18,0% | 1,7% | 2,3% |
| | Euro 6 2017-19 | 266,24 | 171,46 | 197,43 | 233,87 | 186,74 | 216,18 | -12,2% | 8,9% | 9,5% |
| | Euro 6 2020+ | 266,24 | 171,46 | 197,43 | 233,87 | 186,74 | 216,18 | -12,2% | 8,9% | 9,5% |
| Benzine CS hybride klein | Euro 6 <2017 | 97.28 | 93.94 | 126.90 | 97.89 | 94.51 | 127.82 | 0.6% | 0.6% | 0.7% |
| | Euro 6 2017-19 | 90.96 | 87.84 | 118.64 | 97.89 | 94.51 | 127.82 | 7.6% | 7.6% | 7.7% |
| | Euro 6 2020+ | 90.96 | 87.84 | 118.64 | 97.89 | 94.51 | 127.82 | 7.6% | 7.6% | 7.7% |
| Benzine CS hybride medium | Euro 6 <2017 | 96,41 | 93,10 | 125,76 | 135,00 | 123,30 | 159,90 | 40,0% | 32,4% | 27,1% |
| | Euro 6 2017-19 | 90,96 | 87,84 | 118,64 | 135,00 | 123,30 | 159,90 | 48,4% | 40,4% | 34,8% |
| | Euro 6 2020+ | 90,96 | 87,84 | 118,64 | 135,00 | 123,30 | 159,90 | 48,4% | 40,4% | 34,8% |
| Benzine CS hybride groot | Euro 6 <2017 | 96,88 | 93,55 | 126,37 | 145,10 | 130,70 | 167,20 | 49,8% | 39,7% | 32,3% |
| | Euro 6 2017-19 | 90,96 | 87,84 | 118,64 | 145,10 | 130,70 | 167,20 | 59,5% | 48,8% | 40,9% |
| | Euro 6 2020+ | 90,96 | 87,84 | 118,64 | 145,10 | 130,70 | 167,20 | 59,5% | 48,8% | 40,9% |

Zoals we zien in

Tabel 42 en Tabel 43 blijven zowel niet-stekker als plug-in hybrides wel degelijk een valabel alternatief voor de conventionele auto in het kader van de beoogde reductie van broeikasgassen. Waar niet-stekker hybrides vooral voor grote benzinemodellen sterke reducties kunnen teweegbrengen in stedelijk en ruraal verkeer, zien we dat PHEV's volgens de huidige utiliteitsfactoren (U:50/R:50/H:20%) hierin nog verder gaan én er nog potentieel tot grotere reducties bestaat indien de utiliteitsfactoren groter worden. Ook bij de PHEV's zien we dat het grote benzinesegment een uitzonderlijk potentieel bij een sterk doorgedreven elektrificatie, terwijl we dit in iets mindere mate ook zien voor de grote dieselmodellen en de resterende benzinesegmenten. Ook op snelwegen zien we een belangrijke invloed, terwijl we maar een klein verschil optekenen tussen grote niet-oplaadbare en plug-in hybrides. Dit is voornamelijk te wijten aan de impact van de luchtwrijving bij hogere snelheden, waaraan ieder voertuig – ongeacht zijn aandrijflijn – onderhevig is.

Tabel 41: Relatieve $CO_2$ reducties voor niet-stekker (CS) hybride- versus conventionele benzinetechnologie

| $CO_2$ (g/km) | | Conventioneel | | | CS Hybride | | | Rel. % | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Urban | Rural | Highway | Urban | Rural | Highway | Urban | Rural | Highway |
| **Benzine klein** | **Euro 6 <2017** | 180.59 | 137.01 | 153.90 | 97.89 | 94.51 | 127.82 | -45.8% | -31.0% | -16.9% |
| | **Euro 6 2017-19** | 180.59 | 137.01 | 153.90 | 97.89 | 94.51 | 127.82 | -45.8% | -31.0% | -16.9% |
| | **Euro 6 2020+** | 180.59 | 137.01 | 153.90 | 97.89 | 94.51 | 127.82 | -45.8% | -31.0% | -16.9% |
| **Benzine medium** | **Euro 6 <2017** | 211,30 | 167,11 | 176,49 | 135,00 | 123,30 | 159,90 | -36,1% | -26,2% | -9,4% |
| | **Euro 6 2017-19** | 211,30 | 167,11 | 176,49 | 135,00 | 123,30 | 159,90 | -36,1% | -26,2% | -9,4% |
| | **Euro 6 2020+** | 211,30 | 167,11 | 176,49 | 135,00 | 123,30 | 159,90 | -36,1% | -26,2% | -9,4% |
| **Benzine groot** | **Euro 6 <2017** | 311,76 | 225,20 | 208,04 | 145,10 | 130,70 | 167,20 | -53,5% | -42,0% | -19,6% |
| | **Euro 6 2017-19** | 311,76 | 225,20 | 208,04 | 145,10 | 130,70 | 167,20 | -53,5% | -42,0% | -19,6% |
| | **Euro 6 2020+** | 311,76 | 225,20 | 208,04 | 145,10 | 130,70 | 167,20 | -53,5% | -42,0% | -19,6% |

Tabel 42: Relatieve $CO_2$ reductie voor PHEV's versus conventionele benzine- en dieseltechnologie

| $CO_2$ (g/km) | | Conventioneel | | | PHEV | | | Rel. % | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Urban | Rural | Highway | Urban | Rural | Highway | Urban | Rural | Highway |
| Benzine klein | Euro 6 <2017 | 180,59 | 137,01 | 153,90 | 68,93 | 51,24 | 130,00 | -61,8% | -62,6% | -15,5% |
| | Euro 6 2017-19 | 180,59 | 137,01 | 153,90 | 68,93 | 51,24 | 130,00 | -61,8% | -62,6% | -15,5% |
| | Euro 6 2020+ | 180,59 | 137,01 | 153,90 | 68,93 | 51,24 | 130,00 | -61,8% | -62,6% | -15,5% |
| Benzine medium | Euro 6 <2017 | 211,30 | 167,11 | 176,49 | 78,08 | 56,49 | 147,71 | -63,0% | -66,2% | -16,3% |
| | Euro 6 2017-19 | 211,30 | 167,11 | 176,49 | 78,08 | 56,49 | 147,71 | -63,0% | -66,2% | -16,3% |
| | Euro 6 2020+ | 211,30 | 167,11 | 176,49 | 78,08 | 56,49 | 147,71 | -63,0% | -66,2% | -16,3% |
| Benzine groot | Euro 6 <2017 | 311,76 | 225,20 | 208,04 | 92,01 | 66,92 | 175,25 | -70,5% | -70,3% | -15,8% |
| | Euro 6 2017-19 | 311,76 | 225,20 | 208,04 | 92,01 | 66,92 | 175,25 | -70,5% | -70,3% | -15,8% |
| | Euro 6 2020+ | 311,76 | 225,20 | 208,04 | 92,01 | 66,92 | 175,25 | -70,5% | -70,3% | -15,8% |
| Diesel Groot | Euro 6 <2017 | 233,87 | 186,74 | 216,18 | 91,29 | 66,10 | 174,54 | -61,0% | -64,6% | -19,3% |
| | Euro 6 2017-19 | 233,87 | 186,74 | 216,18 | 91,29 | 66,10 | 174,54 | -61,0% | -64,6% | -19,3% |
| | Euro 6 2020+ | 233,87 | 186,74 | 216,18 | 91,29 | 66,10 | 174,54 | -61,0% | -64,6% | -19,3% |

## 5.2 STIKSTOFOXIDEN ($NO_X$)

Een belangrijk polluent inzake lokale luchtkwaliteit is $NO_x$. Ook hier wordt zowel een update gegeven voor nieuwe emissiefactoren factoren voor PHEV's als een update voor de conventionele personenwagens. Tabel 43 toont ons de nieuwe $NO_x$ emissiefactoren voor de plug-ins, waarvoor we onze bespreking kunnen beperken tot het grote dieselsegment, gezien de emissies voor benzinevarianten (volgens ons model) heel laag liggen. Wat opvalt is hoe men in FASTRACE te optimistisch omging met de $NO_x$ uitstoot door Euro 6d-TEMP modellen, en dit voornamelijk tijdens snelwegtrips. Deze onderschatting is wellicht te verklaren aan de verwachtingen die niet werden ingelost, ondanks de invoering van de RDE-tests tijdens typegoedkeuring van nieuwe modellen sinds intrede van deze emissienorm. Desondanks deze misvatting voorzien we voor Euro 6d een minder sterke wijziging voor stedelijk en ruraal rijden, terwijl ook voor snelwegtrips de nieuwe emissiefactor beduidend hoger ligt. Algemeen wordt verwacht dat, met de invoering van Verordening 2018/858 voor de typegoedkeuring van nieuwe modellen, de werkelijke $NO_x$ emissies steeds dichter bij de testwaarde zal komen te liggen. De reden hiervoor is dat bij intrede in september 2020 ook onafhankelijke instituten Euro 6d voertuigen mogen gaan testen in het kader van *in-service conformity* en markttoezicht. Hierdoor zullen de autoconstructeurs veel minder geneigd zijn om de emissiewetgeving te omzeilen met allerhande emissiestrategieën.

Tabel 43: Overzicht van de nieuwe $NO_x$ emissiefactoren voor PHEV personenwagens

| NOx (g/km) | | Huidige EFs | | | Nieuwe EFs | | | Rel. % | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Urban | Rural | Highway | Urban | Rural | Highway | Urban | Rural | Highway |
| Benzine PHEV klein | Euro 6 <2017 | 0,076 | 0,018 | 0,008 | 0,003 | 0,007 | 0,013 | -96,2% | -58,5% | 56,7% |
| | Euro 6 2017-19 | 0,076 | 0,018 | 0,008 | 0,003 | 0,007 | 0,013 | -96,2% | -58,5% | 56,7% |
| | Euro 6 2020+ | 0,076 | 0,018 | 0,008 | 0,003 | 0,007 | 0,013 | -96,2% | -58,5% | 56,7% |
| Benzine PHEV medium | Euro 6 <2017 | 0,075 | 0,018 | 0,008 | 0,003 | 0,007 | 0,013 | -96,1% | -58,3% | 56,7% |
| | Euro 6 2017-19 | 0,075 | 0,018 | 0,008 | 0,003 | 0,007 | 0,013 | -96,1% | -58,3% | 56,7% |
| | Euro 6 2020+ | 0,075 | 0,018 | 0,008 | 0,003 | 0,007 | 0,013 | -96,1% | -58,3% | 56,7% |
| Benzine PHEV groot | Euro 6 <2017 | 0,063 | 0,018 | 0,008 | 0,003 | 0,007 | 0,013 | -95,4% | -58,3% | 56,7% |
| | Euro 6 2017-19 | 0,063 | 0,018 | 0,008 | 0,003 | 0,007 | 0,013 | -95,4% | -58,3% | 56,7% |
| | Euro 6 2020+ | 0,063 | 0,018 | 0,008 | 0,003 | 0,007 | 0,013 | -95,4% | -58,3% | 56,7% |
| Diesel PHEV groot | Euro 6 <2017 | 0,455 | 0,296 | 0,354 | 0,281 | 0,211 | 0,404 | -38,1% | -28,7% | 14,3% |
| | Euro 6 2017-19 | 0,150 | 0,098 | 0,117 | 0,215 | 0,161 | 0,309 | 43,4% | 65,0% | 164,6% |
| | Euro 6 2020+ | 0,107 | 0,070 | 0,083 | 0,104 | 0,078 | 0,150 | -2,6% | 12,1% | 79,7% |

Voor de conventionele modellen zien we eenzelfde trend terugkomen, met name dat de verbeteringen gepaard aan de introductie van subnorm Euro 6d-TEMP overschat waren in FASTRACE. In dit geval spreken we echter wel minstens van een verdubbeling van uitstoot voor alle dieselsegmenten, terwijl de pre-Euro 6d-TEMP emissies redelijk accuraat waren. Ook voor de huidige Euro 6d norm zien we voor de conventionele dieselsegmenten een beduidend hogere emissiefactor. Wel zien we dat de uitstoot tijdens stedelijke trips verder afneemt, hetgeen te wijten is aan een betere AdBlue-doseringsstrategie en ten goede komt voor lokale luchtkwaliteit. Toch blijft het afwachten hoe goed deze nazuiveringstechnologie blijft functioneren naarmate het voertuig veroudert én in welke mate de lopende post-Euro 6 discussie strengere $NO_x$ limieten zal opleveren. Deze wellicht laatste verstrenging van de emissielimieten zal namelijk bepalend zijn voor de toekomst van dieseltechnologie als toepassing in de kleine en middelgrote voertuigsegmenten, gezien lagere limieten kunnen leiden tot een verdubbeling van de geïnstalleerde nabehandelingstechnologieën. Hier gaat immers een prijs mee gepaard die voor deze segmenten steeds moeilijker te rechtvaardigen zal zijn door de constructeur.

Tabel 44: Overzicht van de nieuwe $NO_x$ emissiefactoren voor conventionele personenwagens

| NOx (g/km) | | Huidige EFs | | | Nieuwe EFs | | | Rel. % | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Urban | Rural | Highway | Urban | Rural | Highway | Urban | Rural | Highway |
| Benzine klein | Euro 6 <2017 | 0,109 | 0,026 | 0,012 | 0,039 | 0,026 | 0,012 | -64,6% | 0,0% | 0,0% |
| | Euro 6 2017-19 | 0,109 | 0,026 | 0,012 | 0,043 | 0,028 | 0,012 | -60,9% | 8,9% | 2,9% |
| | Euro 6 2020+ | 0,109 | 0,026 | 0,012 | 0,043 | 0,028 | 0,012 | -60,9% | 8,9% | 2,9% |
| Benzine medium | Euro 6 <2017 | 0,107 | 0,025 | 0,012 | 0,039 | 0,026 | 0,012 | -63,9% | 0,4% | 0,0% |
| | Euro 6 2017-19 | 0,107 | 0,025 | 0,012 | 0,043 | 0,028 | 0,012 | -60,2% | 9,4% | 2,9% |
| | Euro 6 2020+ | 0,107 | 0,025 | 0,012 | 0,043 | 0,028 | 0,012 | -60,2% | 9,4% | 2,9% |
| Benzine groot | Euro 6 <2017 | 0,090 | 0,025 | 0,012 | 0,039 | 0,026 | 0,012 | -57,0% | 0,4% | 0,0% |
| | Euro 6 2017-19 | 0,090 | 0,025 | 0,012 | 0,043 | 0,028 | 0,012 | -52,5% | 9,4% | 2,9% |
| | Euro 6 2020+ | 0,090 | 0,025 | 0,012 | 0,043 | 0,028 | 0,012 | -52,5% | 9,4% | 2,9% |
| Diesel klein | Euro 6 <2017 | 0,649 | 0,423 | 0,505 | 0,563 | 0,422 | 0,505 | -13,3% | -0,2% | 0,0% |
| | Euro 6 2017-19 | 0,214 | 0,140 | 0,167 | 0,430 | 0,323 | 0,386 | 100,7% | 131,0% | 131,5% |
| | Euro 6 2020+ | 0,153 | 0,100 | 0,119 | 0,209 | 0,157 | 0,187 | 36,3% | 56,9% | 57,2% |
| Diesel medium | Euro 6 <2017 | 0,649 | 0,423 | 0,505 | 0,563 | 0,422 | 0,505 | -13,3% | -0,2% | 0,0% |
| | Euro 6 2017-19 | 0,214 | 0,140 | 0,167 | 0,430 | 0,323 | 0,386 | 100,7% | 131,0% | 131,5% |
| | Euro 6 2020+ | 0,153 | 0,100 | 0,119 | 0,209 | 0,157 | 0,187 | 36,3% | 56,9% | 57,2% |
| Diesel groot | Euro 6 <2017 | 0,649 | 0,423 | 0,505 | 0,563 | 0,422 | 0,505 | -13,3% | -0,2% | 0,0% |
| | Euro 6 2017-19 | 0,214 | 0,140 | 0,167 | 0,430 | 0,323 | 0,386 | 100,7% | 131,0% | 131,5% |
| | Euro 6 2020+ | 0,153 | 0,100 | 0,119 | 0,209 | 0,157 | 0,187 | 36,3% | 56,9% | 57,2% |

Tabel 45: Overzicht van de nieuwe $NO_x$ emissiefactoren voor niet-stekker (CS) hybride personenwagens

| NOx (g/km) | | Huidige EFs | | | Nieuwe EFs | | | Rel. % | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Urban | Rural | Highway | Urban | Rural | Highway | Urban | Rural | Highway |
| Benzine klein | Euro 6 <2017 | 0,109 | 0,026 | 0,012 | 0,039 | 0,026 | 0,012 | -64,6% | 0,0% | 0,0% |
| | Euro 6 2017-19 | 0,109 | 0,026 | 0,012 | 0,043 | 0,028 | 0,012 | -60,9% | 8,9% | 2,9% |
| | Euro 6 2020+ | 0,109 | 0,026 | 0,012 | 0,043 | 0,028 | 0,012 | -60,9% | 8,9% | 2,9% |
| Benzine medium | Euro 6 <2017 | 0,107 | 0,025 | 0,012 | 0,039 | 0,026 | 0,012 | -63,9% | 0,4% | 0,0% |
| | Euro 6 2017-19 | 0,107 | 0,025 | 0,012 | 0,043 | 0,028 | 0,012 | -60,2% | 9,4% | 2,9% |
| | Euro 6 2020+ | 0,107 | 0,025 | 0,012 | 0,043 | 0,028 | 0,012 | -60,2% | 9,4% | 2,9% |
| Benzine groot | Euro 6 <2017 | 0,090 | 0,025 | 0,012 | 0,039 | 0,026 | 0,012 | -57,0% | 0,4% | 0,0% |
| | Euro 6 2017-19 | 0,090 | 0,025 | 0,012 | 0,043 | 0,028 | 0,012 | -52,5% | 9,4% | 2,9% |
| | Euro 6 2020+ | 0,090 | 0,025 | 0,012 | 0,043 | 0,028 | 0,012 | -52,5% | 9,4% | 2,9% |

## 5.3 KOOLSTOFMONOXIDE (CO)

Voor deze polluent rekenden we eveneens nieuwe emissiefactoren door, al kunnen we deze niet vergelijken met de huidige FASTRACE dataset gezien hiervan geen data beschikbaar was. Dit is echter geen probleem gezien praktijktests met draagbare emissiemeetsystemen (PEMS) tijdens typegoed-keuring (en daarbuiten) geen indicatie geven van problematische CO emissies, noch bij benzine- noch bij dieselvoertuigen. Dit is ook zo voor plug-in hybrides.

Tabel 46: Overzicht van de nieuwe CO emissiefactoren voor PHEV's

| CO (g/km) | | Nieuwe EFs | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Urban | Rural | Highway |
| **Benzine PHEV klein** | **Euro 6 <2017** | 0,033 | 0,015 | 0,011 |
| | **Euro 6 2017-19** | 0,033 | 0,015 | 0,011 |
| | **Euro 6 2020+** | 0,033 | 0,015 | 0,011 |
| **Benzine PHEV medium** | **Euro 6 <2017** | 0,033 | 0,015 | 0,011 |
| | **Euro 6 2017-19** | 0,033 | 0,015 | 0,011 |
| | **Euro 6 2020+** | 0,033 | 0,015 | 0,011 |
| **Benzine PHEV groot** | **Euro 6 <2017** | 0,033 | 0,015 | 0,011 |
| | **Euro 6 2017-19** | 0,033 | 0,015 | 0,011 |
| | **Euro 6 2020+** | 0,033 | 0,015 | 0,011 |
| **Diesel PHEV groot** | **Euro 6 <2017** | 0,031 | 0,023 | 0,043 |
| | **Euro 6 2017-19** | 0,031 | 0,023 | 0,043 |
| | **Euro 6 2020+** | 0,031 | 0,023 | 0,043 |

## 5.4 VLUCHTIGE ORGANISCHE STOFFEN (VOS)

Voor wat betreft de uitstoot aan vluchtige organische stoffen, waaronder onverbrande koolwaterstoffen vallen, tonen Tabel 47 en Tabel 48 een nagenoeg complete terugval van de emissies door benzine PHEV's bij de herziening van de emissiefactoren. Voor diesel-PHEV's is deze terugval ook aanwezig, zij het in een lichtere vorm. Voor de conventionele voertuigen zijn het voornamelijk de benzinevoertuigen die tijdens stedelijk rijden eveneens een nagenoeg complete terugval laten optekenen, waar voor de andere wegtypes deze minder groot is. Merk op dat deze zeer lage emissies van VOS overeenstemmen met wat er tijdens RDE praktijktests wordt gemeten, hetgeen erop wijst dat deze uitstoot niet langer zorgwekkend is voor moderne (Euro 6) personenwagens.

Tabel 47: Overzicht van de VOS emissiefactoren voor PHEV personenwagens

| VOS (g/km) | | Huidige EFs | | | Nieuwe EFs | | | Rel. % | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Urban | Rural | Highway | Urban | Rural | Highway | Urban | Rural | Highway |
| Benzine PHEV klein | Euro 6 <2017 | 0,2816 | 0,0134 | 0,0148 | 0,0006 | 0,0003 | 0,0008 | -99,8% | -97,5% | -94,8% |
| | Euro 6 2017-19 | 0,2816 | 0,0134 | 0,0148 | 0,0006 | 0,0003 | 0,0008 | -99,8% | -97,5% | -94,8% |
| | Euro 6 2020+ | 0,2816 | 0,0134 | 0,0148 | 0,0006 | 0,0003 | 0,0008 | -99,8% | -97,5% | -94,8% |
| Benzine PHEV medium | Euro 6 <2017 | 0,2954 | 0,0110 | 0,0126 | 0,0006 | 0,0003 | 0,0008 | -99,8% | -97,0% | -93,9% |
| | Euro 6 2017-19 | 0,2954 | 0,0110 | 0,0126 | 0,0006 | 0,0003 | 0,0008 | -99,8% | -97,0% | -93,9% |
| | Euro 6 2020+ | 0,2954 | 0,0110 | 0,0126 | 0,0006 | 0,0003 | 0,0008 | -99,8% | -97,0% | -93,9% |
| Benzine PHEV groot | Euro 6 <2017 | 0,2081 | 0,0085 | 0,0102 | 0,0006 | 0,0003 | 0,0008 | -99,7% | -96,1% | -92,5% |
| | Euro 6 2017-19 | 0,2081 | 0,0085 | 0,0102 | 0,0006 | 0,0003 | 0,0008 | -99,7% | -96,1% | -92,5% |
| | Euro 6 2020+ | 0,2081 | 0,0085 | 0,0102 | 0,0006 | 0,0003 | 0,0008 | -99,7% | -96,1% | -92,5% |
| Diesel PHEV groot | Euro 6 <2017 | 0,0018 | 0,0006 | 0,0005 | 0,0006 | 0,0004 | 0,0005 | -65,7% | -29,6% | 14,2% |
| | Euro 6 2017-19 | 0,0018 | 0,0006 | 0,0005 | 0,0006 | 0,0004 | 0,0005 | -65,7% | -29,6% | 14,2% |
| | Euro 6 2020+ | 0,0018 | 0,0006 | 0,0005 | 0,0006 | 0,0004 | 0,0005 | -65,7% | -29,6% | 14,2% |

Tabel 48: Overzicht van de VOS emissiefactoren voor conventionele personenwagens

| VOS (g/km) | | Huidige EFs | | | Nieuwe EFs | | | Rel. % | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Urban | Rural | Highway | Urban | Rural | Highway | Urban | Rural | Highway |
| Benzine klein | Euro 6 <2017 | 0,4023 | 0,0191 | 0,0211 | 0,0070 | 0,0061 | 0,0091 | -98,3% | -68,0% | -57,0% |
| | Euro 6 2017-19 | 0,4023 | 0,0191 | 0,0211 | 0,0074 | 0,0068 | 0,0104 | -98,2% | -64,7% | -50,7% |
| | Euro 6 2020+ | 0,4023 | 0,0191 | 0,0211 | 0,0074 | 0,0068 | 0,0104 | -98,2% | -64,7% | -50,7% |
| Benzine medium | Euro 6 <2017 | 0,4220 | 0,0157 | 0,0180 | 0,0070 | 0,0061 | 0,0091 | -98,4% | -61,2% | -49,5% |
| | Euro 6 2017-19 | 0,4220 | 0,0157 | 0,0180 | 0,0074 | 0,0068 | 0,0104 | -98,3% | -57,1% | -42,0% |
| | Euro 6 2020+ | 0,4220 | 0,0157 | 0,0180 | 0,0074 | 0,0068 | 0,0104 | -98,3% | -57,1% | -42,0% |
| Benzine groot | Euro 6 <2017 | 0,2972 | 0,0121 | 0,0146 | 0,0070 | 0,0061 | 0,0091 | -97,7% | -49,6% | -37,9% |
| | Euro 6 2017-19 | 0,2972 | 0,0121 | 0,0146 | 0,0074 | 0,0068 | 0,0104 | -97,5% | -44,3% | -28,8% |
| | Euro 6 2020+ | 0,2972 | 0,0121 | 0,0146 | 0,0074 | 0,0068 | 0,0104 | -97,5% | -44,3% | -28,8% |
| Diesel klein | Euro 6 <2017 | 0,0026 | 0,0009 | 0,0007 | 0,0012 | 0,0009 | 0,0007 | -52,0% | -1,5% | 0,0% |
| | Euro 6 2017-19 | 0,0026 | 0,0009 | 0,0007 | 0,0012 | 0,0009 | 0,0007 | -52,0% | -1,5% | 0,0% |
| | Euro 6 2020+ | 0,0026 | 0,0009 | 0,0007 | 0,0012 | 0,0009 | 0,0007 | -52,0% | -1,5% | 0,0% |
| Diesel medium | Euro 6 <2017 | 0,0026 | 0,0009 | 0,0007 | 0,0012 | 0,0009 | 0,0007 | -52,0% | -1,5% | 0,0% |
| | Euro 6 2017-19 | 0,0026 | 0,0009 | 0,0007 | 0,0012 | 0,0009 | 0,0007 | -52,0% | -1,5% | 0,0% |
| | Euro 6 2020+ | 0,0026 | 0,0009 | 0,0007 | 0,0012 | 0,0009 | 0,0007 | -52,0% | -1,5% | 0,0% |
| Diesel groot | Euro 6 <2017 | 0,0026 | 0,0009 | 0,0007 | 0,0012 | 0,0009 | 0,0007 | -52,0% | -1,5% | 0,0% |
| | Euro 6 2017-19 | 0,0026 | 0,0009 | 0,0007 | 0,0012 | 0,0009 | 0,0007 | -52,0% | -1,5% | 0,0% |
| | Euro 6 2020+ | 0,0026 | 0,0009 | 0,0007 | 0,0012 | 0,0009 | 0,0007 | -52,0% | -1,5% | 0,0% |

## 5.5 UITLAAT-FIJNSTOF (PM)

Nog zo'n belangrijk polluent in het kader van lokale luchtkwaliteit is fijnstof, al moeten we zeggen dat deze sinds de introductie van de roetfilter een *non-issue* is geworden wanneer er sprake is van een goed werkend (en aanwezig!) exemplaar. Tabel 49 en Tabel 50 tonen de nieuwe emissiefactoren in milligram per kilometer. Wat opvalt is dat over alle segmenten van de benzine- en diesel-PHEV's heen er sprake is van een licht verhoogde uitstoot bij snelweg rijden. Voor zowel stedelijke als rurale trips zien we een afname t.o.v. wat momenteel wordt aangenomen voor FASTRACE, hoewel we over zéér lage emissiefactoren spreken. Voor de conventionele modellen tekenen we een lichte toename op voor de benzinesegmenten, al blijven we ook hier ruim onder de limiet van 5 mg/km.

Tabel 49: Overzicht van de emissiefactoren voor uitlaat-fijnstof voor de gemiddelde PHEV's

| PM (mg/km) | | Huidige EFs | | | Nieuwe EFs | | | Rel. % | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Urban | Rural | Highway | Urban | Rural | Highway | Urban | Rural | Highway |
| Benzine PHEV klein | Euro 6 <2017 | 1,18 | 0,97 | 1,17 | 0,84 | 0,69 | 1,33 | -28,3% | -28,8% | 14,0% |
| | Euro 6 2017-19 | 1,18 | 0,97 | 1,17 | 0,93 | 0,76 | 1,44 | -20,8% | -22,1% | 23,6% |
| | Euro 6 2020+ | 1,18 | 0,97 | 1,17 | 0,93 | 0,76 | 1,44 | -20,8% | -22,1% | 23,6% |
| Benzine PHEV medium | Euro 6 <2017 | 1,18 | 0,97 | 1,17 | 0,84 | 0,69 | 1,33 | -28,3% | -28,8% | 14,0% |
| | Euro 6 2017-19 | 1,18 | 0,97 | 1,17 | 0,93 | 0,76 | 1,44 | -20,8% | -22,1% | 23,6% |
| | Euro 6 2020+ | 1,18 | 0,97 | 1,17 | 0,93 | 0,76 | 1,44 | -20,8% | -22,1% | 23,6% |
| Benzine PHEV groot | Euro 6 <2017 | 1,18 | 0,97 | 1,17 | 0,84 | 0,69 | 1,33 | -28,3% | -28,8% | 14,0% |
| | Euro 6 2017-19 | 1,18 | 0,97 | 1,17 | 0,93 | 0,76 | 1,44 | -20,8% | -22,1% | 23,6% |
| | Euro 6 2020+ | 1,18 | 0,97 | 1,17 | 0,93 | 0,76 | 1,44 | -20,8% | -22,1% | 23,6% |
| Diesel PHEV groot | Euro 6 <2017 | 2,90 | 0,96 | 0,64 | 1,04 | 0,68 | 0,73 | -64,1% | -29,7% | 14,3% |
| | Euro 6 2017-19 | 2,90 | 0,96 | 0,64 | 1,04 | 0,68 | 0,73 | -64,1% | -29,7% | 14,3% |
| | Euro 6 2020+ | 2,90 | 0,96 | 0,64 | 1,04 | 0,68 | 0,73 | -64,1% | -29,7% | 14,3% |

Tabel 50: Overzicht van de emissiefactoren voor uitlaat-fijnstof voor de conventionele modellen in mg/km

| PM (mg/km) | | Huidige EFs | | | Nieuwe EFs | | | Rel. % | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Urban | Rural | Highway | Urban | Rural | Highway | Urban | Rural | Highway |
| Benzine klein | Euro 6 <2017 | 1,6823 | 1,3918 | 1,6664 | 1,6890 | 1,3880 | 1,6624 | 0,4% | -0,3% | -0,2% |
| | Euro 6 2017-19 | 1,6823 | 1,3918 | 1,6664 | 1,8642 | 1,5177 | 1,8026 | 10,8% | 9,0% | 8,2% |
| | Euro 6 2020+ | 1,6823 | 1,3918 | 1,6664 | 1,8642 | 1,5177 | 1,8026 | 10,8% | 9,0% | 8,2% |
| Benzine medium | Euro 6 <2017 | 1,6823 | 1,3918 | 1,6664 | 1,6890 | 1,3880 | 1,6624 | 0,4% | -0,3% | -0,2% |
| | Euro 6 2017-19 | 1,6823 | 1,3918 | 1,6664 | 1,8642 | 1,5177 | 1,8026 | 10,8% | 9,0% | 8,2% |
| | Euro 6 2020+ | 1,6823 | 1,3918 | 1,6664 | 1,8642 | 1,5177 | 1,8026 | 10,8% | 9,0% | 8,2% |
| Benzine groot | Euro 6 <2017 | 1,6823 | 1,3918 | 1,6664 | 1,6890 | 1,3880 | 1,6624 | 0,4% | -0,3% | -0,2% |
| | Euro 6 2017-19 | 1,6823 | 1,3918 | 1,6664 | 1,8642 | 1,5177 | 1,8026 | 10,8% | 9,0% | 8,2% |
| | Euro 6 2020+ | 1,6823 | 1,3918 | 1,6664 | 1,8642 | 1,5177 | 1,8026 | 10,8% | 9,0% | 8,2% |
| Diesel klein | Euro 6 <2017 | 4,1452 | 1,3771 | 0,9143 | 2,0842 | 1,3556 | 0,9148 | -49,7% | -1,6% | 0,1% |
| | Euro 6 2017-19 | 4,1452 | 1,3771 | 0,9143 | 2,0842 | 1,3556 | 0,9148 | -49,7% | -1,6% | 0,1% |
| | Euro 6 2020+ | 4,1452 | 1,3771 | 0,9143 | 2,0842 | 1,3556 | 0,9148 | -49,7% | -1,6% | 0,1% |
| Diesel medium | Euro 6 <2017 | 4,1452 | 1,3771 | 0,9143 | 2,0842 | 1,3556 | 0,9148 | -49,7% | -1,6% | 0,1% |
| | Euro 6 2017-19 | 4,1452 | 1,3771 | 0,9143 | 2,0842 | 1,3556 | 0,9148 | -49,7% | -1,6% | 0,1% |
| | Euro 6 2020+ | 4,1452 | 1,3771 | 0,9143 | 2,0842 | 1,3556 | 0,9148 | -49,7% | -1,6% | 0,1% |
| Diesel groot | Euro 6 <2017 | 4,1452 | 1,3771 | 0,9143 | 2,0842 | 1,3556 | 0,9148 | -49,7% | -1,6% | 0,1% |
| | Euro 6 2017-19 | 4,1452 | 1,3771 | 0,9143 | 2,0842 | 1,3556 | 0,9148 | -49,7% | -1,6% | 0,1% |
| | Euro 6 2020+ | 4,1452 | 1,3771 | 0,9143 | 2,0842 | 1,3556 | 0,9148 | -49,7% | -1,6% | 0,1% |

## 5.6 ENERGIECONSUMPTIE

Tot slot bespreken we de herziening van de factoren voor energieconsumptie van PHEV's en conventionele personenwagens. Tabel 51 toont hoe over alle segmenten voor de gemiddelde PHEV's heen, het energieverbruik tijdens een snelwegrit werd onderschat met ongeveer 25%. Voor stedelijke en rurale trips tekenen we echter reducties op, welke voor de grote benzine PHEV's groter zijn dan 55%. Merk op dat voor PHEV's het energieverbruik de som is van de consumptie t.g.v. het brandstofverbruik en van het elektriciteitsverbruik. In geval van conventionele voertuigen vertegenwoordigt deze indicator enkel het brandstofverbruik. In Tabel 52 zien we de nieuwe factoren voor deze voertuigen, waarbij voornamelijk opvalt hoe kleine dieselwagens onderschat worden in het huidige FASTRACE model. Dit stemt overeen met wat we eerder zagen in Tabel 40.

Tabel 51: Overzicht van de nieuwe factoren voor energieverbruik voor gemiddelde PHEV's

| FC + EC (MJ/km) | | Huidige EFs | | | Nieuwe EFs | | | Rel. % | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Urban | Rural | Highway | Urban | Rural | Highway | Urban | Rural | Highway |
| Benzine PHEV klein | Euro 6 <2017 | 2,52 | 1,49 | 1,64 | 1,22 | 0,96 | 2,03 | -51,5% | -35,9% | 24,1% |
| | Euro 6 2017-19 | 2,44 | 1,44 | 1,58 | 1,22 | 0,96 | 2,03 | -49,9% | -33,7% | 28,3% |
| | Euro 6 2020+ | 2,44 | 1,44 | 1,58 | 1,22 | 0,96 | 2,03 | -49,9% | -33,7% | 28,3% |
| Benzine PHEV medium | Euro 6 <2017 | 2,93 | 1,77 | 1,85 | 1,42 | 1,09 | 2,31 | -51,6% | -38,8% | 25,0% |
| | Euro 6 2017-19 | 2,83 | 1,71 | 1,79 | 1,42 | 1,09 | 2,31 | -49,9% | -36,6% | 29,4% |
| | Euro 6 2020+ | 2,83 | 1,71 | 1,79 | 1,42 | 1,09 | 2,31 | -49,9% | -36,6% | 29,4% |
| Benzine PHEV groot | Euro 6 <2017 | 4,06 | 2,32 | 2,14 | 1,71 | 1,31 | 2,72 | -57,9% | -43,5% | 26,7% |
| | Euro 6 2017-19 | 3,93 | 2,24 | 2,07 | 1,71 | 1,31 | 2,72 | -56,5% | -41,6% | 31,1% |
| | Euro 6 2020+ | 3,93 | 2,24 | 2,07 | 1,71 | 1,31 | 2,72 | -56,5% | -41,6% | 31,1% |
| Diesel PHEV groot | Euro 6 <2017 | 2,79 | 1,86 | 2,12 | 1,61 | 1,22 | 2,58 | -42,4% | -34,5% | 21,9% |
| | Euro 6 2017-19 | 2,69 | 1,80 | 2,05 | 1,61 | 1,22 | 2,58 | -40,4% | -32,2% | 26,1% |
| | Euro 6 2020+ | 2,69 | 1,80 | 2,05 | 1,61 | 1,22 | 2,58 | -40,4% | -32,2% | 26,1% |

Tabel 52: Overzicht van de nieuwe factoren voor energieverbruik voor conventionele personenwagens

| FC (MJ/km) | | Huidige EFs | | | Nieuwe EFs | | | Rel. % | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Urban | Rural | Highway | Urban | Rural | Highway | Urban | Rural | Highway |
| Benzine klein | Euro 6 <2017 | 3,39 | 1,89 | 2,10 | 2,58 | 1,96 | 2,20 | -23,9% | 3,6% | 4,6% |
| | Euro 6 2017-19 | 3,21 | 1,79 | 1,99 | 2,58 | 1,96 | 2,20 | -19,6% | 9,4% | 10,5% |
| | Euro 6 2020+ | 3,21 | 1,79 | 1,99 | 2,58 | 1,96 | 2,20 | -19,6% | 9,4% | 10,5% |
| Benzine medium | Euro 6 <2017 | 3,99 | 2,30 | 2,41 | 3,02 | 2,39 | 2,52 | -24,3% | 3,8% | 4,7% |
| | Euro 6 2017-19 | 3,78 | 2,18 | 2,28 | 3,02 | 2,39 | 2,52 | -20,0% | 9,7% | 10,6% |
| | Euro 6 2020+ | 3,78 | 2,18 | 2,28 | 3,02 | 2,39 | 2,52 | -20,0% | 9,7% | 10,6% |
| Benzine groot | Euro 6 <2017 | 5,65 | 3,10 | 2,84 | 4,46 | 3,22 | 2,97 | -21,2% | 3,9% | 4,5% |
| | Euro 6 2017-19 | 5,34 | 2,93 | 2,69 | 4,46 | 3,22 | 2,97 | -16,6% | 9,9% | 10,7% |
| | Euro 6 2020+ | 5,34 | 2,93 | 2,69 | 4,46 | 3,22 | 2,97 | -16,6% | 9,9% | 10,7% |
| Diesel klein | Euro 6 <2017 | 1,76 | 1,29 | 1,60 | 2,34 | 1,91 | 2,05 | 33,2% | 48,1% | 28,7% |
| | Euro 6 2017-19 | 1,65 | 1,21 | 1,50 | 2,34 | 1,91 | 2,05 | 42,2% | 58,1% | 37,4% |
| | Euro 6 2020+ | 1,65 | 1,21 | 1,50 | 2,34 | 1,91 | 2,05 | 42,2% | 58,1% | 37,4% |
| Diesel medium | Euro 6 <2017 | 2,81 | 1,85 | 1,97 | 2,34 | 1,91 | 2,05 | -16,8% | 3,5% | 4,1% |
| | Euro 6 2017-19 | 2,65 | 1,74 | 1,86 | 2,34 | 1,91 | 2,05 | -11,6% | 10,0% | 10,6% |
| | Euro 6 2020+ | 2,65 | 1,74 | 1,86 | 2,34 | 1,91 | 2,05 | -11,6% | 10,0% | 10,6% |
| Diesel groot | Euro 6 <2017 | 3,83 | 2,47 | 2,84 | 3,18 | 2,54 | 2,94 | -17,1% | 2,9% | 3,4% |
| | Euro 6 2017-19 | 3,58 | 2,30 | 2,65 | 3,18 | 2,54 | 2,94 | -11,2% | 10,2% | 10,7% |
| | Euro 6 2020+ | 3,58 | 2,30 | 2,65 | 3,18 | 2,54 | 2,94 | -11,2% | 10,2% | 10,7% |

Een vergelijking tussen conventionele en plug-in hybride elektrische personenwagens op vlak van energieverbruik gaat slechts op wanneer het elektrisch verbruik van de laatstgenoemde ook in rekening wordt gebracht. In Tabel 53 zien we dat PHEV's voor alle wegtypes een efficiëntere en dus energievriendelijkere oplossing zijn, vooral wanneer hogere snelheden vermeden worden. Zo tekenen we voor stedelijk en ruraal rijden een energiewinst van 50% en meer op.

Tabel 53: Vergelijking tussen het energieverbruik tussen conventionele en PHEV segmenten

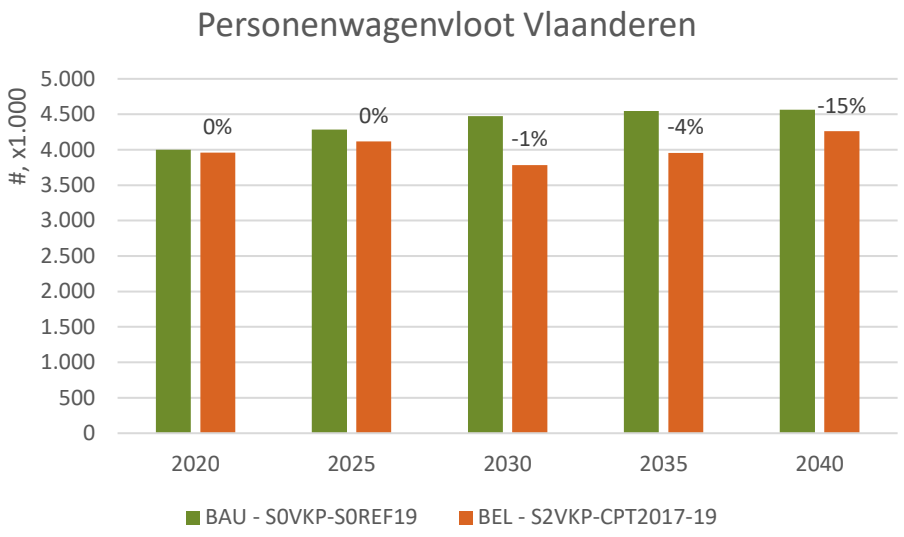
| FC (+ EC) (MJ/km) | | Conventioneel | | | PHEV | | | Rel. % | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Urban | Rural | Highway | Urban | Rural | Highway | Urban | Rural | Highway |
| Benzine klein | Euro 6 <2017 | 2,58 | 1,96 | 2,20 | 1,22 | 0,96 | 2,03 | -52,7% | -51,2% | -7,6% |
| | Euro 6 2017-19 | 2,58 | 1,96 | 2,20 | 1,22 | 0,96 | 2,03 | -52,7% | -51,2% | -7,6% |
| | Euro 6 2020+ | 2,58 | 1,96 | 2,20 | 1,22 | 0,96 | 2,03 | -52,7% | -51,2% | -7,6% |
| Benzine medium | Euro 6 <2017 | 3,02 | 2,39 | 2,52 | 1,42 | 1,09 | 2,31 | -53,0% | -54,5% | -8,3% |
| | Euro 6 2017-19 | 3,02 | 2,39 | 2,52 | 1,42 | 1,09 | 2,31 | -53,0% | -54,5% | -8,3% |
| | Euro 6 2020+ | 3,02 | 2,39 | 2,52 | 1,42 | 1,09 | 2,31 | -53,0% | -54,5% | -8,3% |
| Benzine groot | Euro 6 <2017 | 4,46 | 3,22 | 2,97 | 1,71 | 1,31 | 2,72 | -61,7% | -59,4% | -8,7% |
| | Euro 6 2017-19 | 4,46 | 3,22 | 2,97 | 1,71 | 1,31 | 2,72 | -61,7% | -59,4% | -8,7% |
| | Euro 6 2020+ | 4,46 | 3,22 | 2,97 | 1,71 | 1,31 | 2,72 | -61,7% | -59,4% | -8,7% |
| Diesel groot | Euro 6 <2017 | 3,18 | 2,54 | 2,94 | 1,61 | 1,22 | 2,58 | -49,4% | -51,9% | -12,1% |
| | Euro 6 2017-19 | 3,18 | 2,54 | 2,94 | 1,61 | 1,22 | 2,58 | -49,4% | -51,9% | -12,1% |
| | Euro 6 2020+ | 3,18 | 2,54 | 2,94 | 1,61 | 1,22 | 2,58 | -49,4% | -51,9% | -12,1% |

## 5.7 VLOOTREDUCTIE $CO_2$

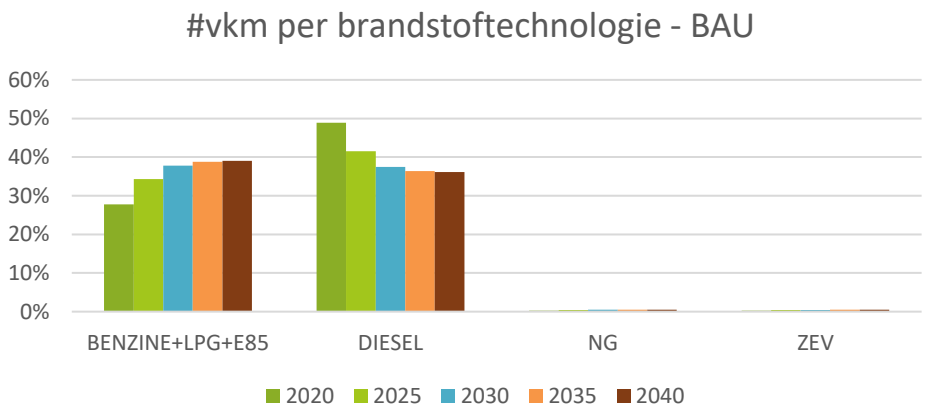
Om na te gaan wat de impact van een herziening/aanvulling van de kerndataset aan emissiefactoren is voor de Vlaamse personenwagenvloot, is het belangrijk om de Vlaamse prognoses voor haar vloot tot en met 2040 eerst te schetsen. Zo rekenen we voor twee scenario's de veranderingen door op vlootniveau, terwijl we ook gaan kijken naar de specifieke bijdrage van de plug-in segmenten per brandstoftype.

Voor de twee scenario's, *business as usual* (BAU) en een progressiever scenario (BEL), zien we hun verschil op vlak van voertuigregistraties in Figuur 68, voor het aantal voertuigkilometers (vkm) afgelegd in Figuur 69 en Figuur 70, en tot slot op vlak van registraties per brandstoftype in Figuur 71 en Figuur 72. Wat opvalt is dat volgens het BEL-scenario de vloot minder sterk toeneemt dan in het BAU-scenario, terwijl het BEL-scenario wél een progressieve omschakeling naar elektrische voertuigkilometers aanneemt. Dit leiden we ook af uit het overzicht van de nieuwe inschrijvingen in Figuur 72, waarbij er na 2035 enkel nog elektrische voertuigen worden verkocht. Dit scenario ligt in lijn met de richting die we uit moeten, willen we voldoen aan de klimaatdoelstellingen volgens het akkoord van de VN in Parijs (Nils Hooftman et al. 2020). Merk op dat in het BEL-scenario tegen datzelfde jaar ook PHEV's verdwijnen uit de verkoopscijfers voor Vlaanderen. Voorts valt in diezelfde figuur op dat er amper diesel-PHEV's worden verondersteld vertegenwoordigd te zijn op de Vlaamse markt, terwijl er voor CNG-technologie alsnog een verkoopspercentage van 10% wordt voorspeld, ondanks de wetenschappelijke bewijslast ertegen, waarin men de methaanlekkages stroomopwaarts in het productieproces van de brandstof aankaart (Alvarez et al. 2018)(Riddick et al. 2019). Hiermee wordt duidelijk dat CNG enkel alleen een duurzamere transitietechnologie kan zijn wanneer het probleem van de lekkages wordt aangepakt en/of men overschakelt op biomethaan. Het CNG aandeel in Vlaanderen zal daarom in grote mate afhangen van het al dan niet herzien van het fiscale gunstregime dat consumenten momenteel genieten, die een nieuw CNG voertuig aanschaffen, alsook van de algemene perceptie van de technologie door het grote publiek. Voor benzine-PHEV's wordt in het BEL-scenario wel een gestage opmars van 5% in 2020 naar 20% tegen 2030 verwacht. In dit opzicht zijn de nieuwe inzichten die voortvloeien uit deze studie zeer relevant,

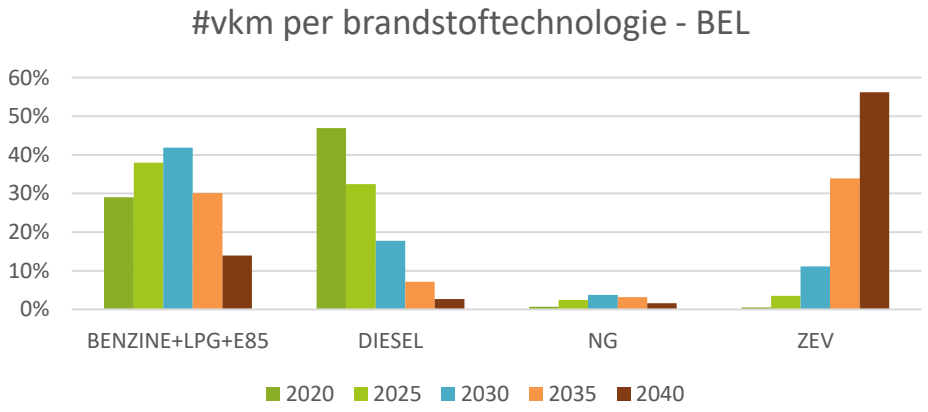
mocht het Vlaamse beleid effectief inzetten op het BEL-scenario. In het BAU-scenario wordt er geen wijziging verwacht voor wat betreft de verdeling van verkoopspercentages per brandstoftechnologie (Figuur 71).



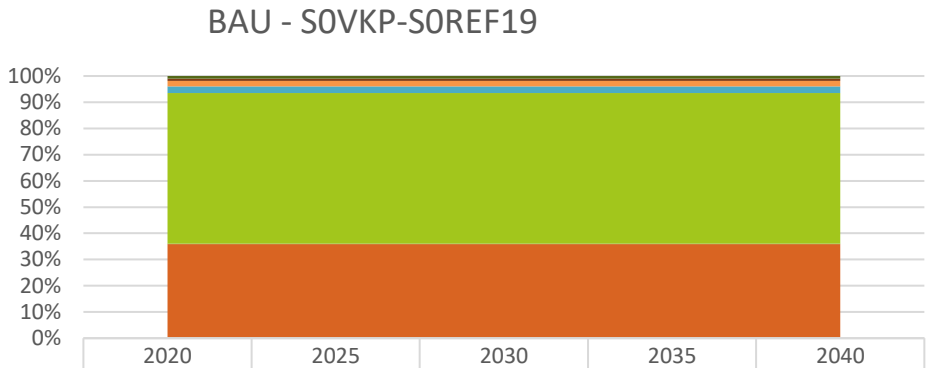

Figuur 68: Verdeling van totale Vlaamse personenwagenvloot volgens de twee scenario's




Figuur 69: Verdeling van het aantal afgelegde voertuigkilometers (vkm) volgens het BAU scenario

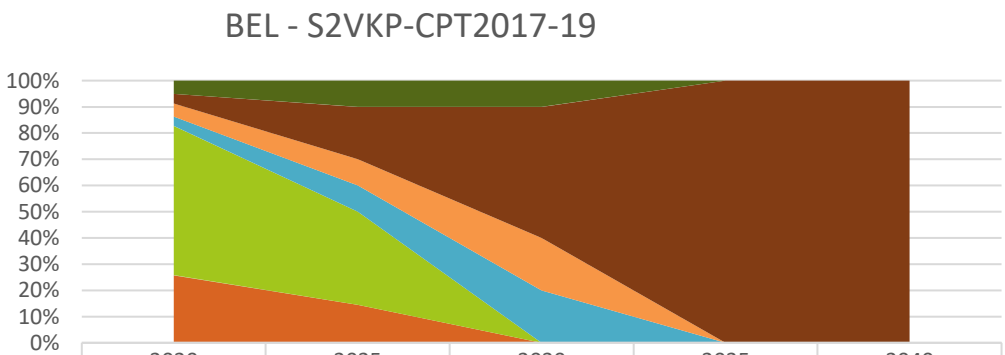



Figuur 70: Verdeling van het aantal afgelegde voertuigkilometers (vkm) volgens het BEL scenario




| | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 |
|---|---|---|---|---|---|
| CNG | 0.98% | 0.98% | 0.98% | 0.98% | 0.98% |
| LPG | 0.04% | 0.04% | 0.04% | 0.04% | 0.04% |
| ELECTRIC | 0.85% | 0.85% | 0.85% | 0.85% | 0.85% |
| PETROL HYBRID PHEV | 2.09% | 2.09% | 2.09% | 2.09% | 2.09% |
| PETROL HYBRID CS | 2.53% | 2.53% | 2.53% | 2.53% | 2.53% |
| PETROL | 57.39% | 57.39% | 57.39% | 57.39% | 57.39% |
| DIESEL HYBRID PHEV | 0.21% | 0.21% | 0.21% | 0.21% | 0.21% |
| DIESEL HYBRID CS | 0.02% | 0.02% | 0.02% | 0.02% | 0.02% |
| DIESEL | 35.89% | 35.89% | 35.89% | 35.89% | 35.89% |

Figuur 71: Vlaamse prognoses tot 2040 voor nieuwe aangekochte personenwagens volgens brandstoftype, volgens BAU scenario




| | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 |
|---|---|---|---|---|---|
| CNG | 5.00% | 10.00% | 10.00% | 0.00% | 0.00% |
| LPG | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| ELECTRIC | 3.70% | 20.00% | 50.00% | 100.00% | 100.00% |
| PETROL HYBRID PHEV | 5.00% | 10.00% | 20.00% | 0.00% | 0.00% |
| PETROL HYBRID CS | 3.60% | 10.00% | 20.00% | 0.00% | 0.00% |
| PETROL | 56.90% | 35.47% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| DIESEL HYBRID PHEV | 0.10% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| DIESEL HYBRID CS | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| DIESEL | 25.70% | 14.53% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |

Figuur 72: Vlaamse prognoses tot 2040 voor nieuwe aangekochte personenwagens volgens brandstoftype, volgens het BEL scenario

In deze oefening kijken we eerst naar de $CO_2$ reducties die teweeg worden gebracht per brandstof-technologie, om vervolgens de impact van de nieuwe emissiefactoren voor de gehele Vlaamse personenwagenvloot te becijferen. Tabel 54 en Tabel 55 tonen hoe de herziening van de emissiefactoren voor de medium en grote benzine CS hybrides leiden tot een algemene stijging van de totale $CO_2$ emissie met gemiddeld 30%, en dit zowel voor het BAU- als het BEL-scenario. Hou echter in het achterhoofd dat ondanks deze toename niet-stekker hybrides inzake de klimaatkwestie een beter alternatief zijn hun conventionele tegenhangers (zie Tabel 41). Merk bovendien op dat de absolute emissies over de jaartallen heen beduidend hoger liggen in het BEL-scenario, gezien de brandstoftechnologie in dit scenario beter vertegenwoordigd is.

Tabel 54: Absolute toename van de totale $CO_2$ emissies voor de diesel en benzine CS hybridevloot volgens het BAU-scenario

| $CO_2$ (kg) | | Huidige EFs | Nieuwe EFs | Delta % | Delta abs. |
|---|---|---|---|---|---|
| CS Hybridevloot | 2020 | 154.520.430,65 | 195.985.047,98 | 26,8% | 41.464.617,34 |
| | 2025 | 176.053.893,76 | 234.729.317,61 | 33,3% | 58.675.423,85 |
| | 2030 | 178.435.503,14 | 245.029.438,05 | 37,3% | 66.593.934,91 |
| | 2035 | 174.815.373,35 | 242.965.316,77 | 39,0% | 68.149.943,42 |
| | 2040 | 174.732.043,58 | 243.499.064,08 | 39,4% | 68.767.020,49 |
| | | | | | |
| | Totaal | 858.557.244,48 | 1.162.208.184,50 | 35,4% | 303.650.940,01 |

Tabel 55: Absolute toename van de totale $CO_2$ emissies voor de diesel en benzine CS hybridevloot volgens het BEL-scenario

| $CO_2$ (kg) | | Huidige EFs | Nieuwe EFs | Delta % | Delta abs. |
|---|---|---|---|---|---|
| CS Hybridevloot | 2020 | 170.805.999,06 | 219.137.197,42 | 28,3% | 48.331.198,36 |
| | 2025 | 331.230.589,96 | 430.169.928,54 | 29,9% | 98.939.338,58 |
| | 2030 | 528.739.326,54 | 691.978.578,04 | 30,9% | 163.239.251,50 |
| | 2035 | 510.001.494,74 | 668.655.088,60 | 31,1% | 158.653.593,85 |
| | 2040 | 269.001.756,77 | 354.108.730,43 | 31,6% | 85.106.973,66 |
| | | | | | |
| | Totaal | 1.809.779.167,07 | 2.364.049.523,03 | 30,6% | 554.270.355,96 |

Kijken we naar de impact van de emissiefactorherziening voor PHEV's in de hele vloot van PHEV's, dan zien we volgens het BAU-scenario eveneens een gemiddelde reductie van net geen 30%. Voor het BEL-scenario komt dit percentage iets hoger te liggen, ondanks het feit dat er gevoelig meer PHEV's ingeschreven zouden worden volgens dit scenario, hetgeen opvalt aan de absolute totalen.

Tabel 56: Absolute impact op de totale $CO_2$ emissies voor benzine- en diesel plug-in hybridevloot volgens het BAU-scenario

| $CO_2$ (kg) | | Huidige EFs | Nieuwe EFs | Delta % | Delta abs. |
|---|---|---|---|---|---|
| PHEV | 2020 | 77.448.498,39 | 55.416.602,86 | -28,4% | - 22.031.895,53 |
| | 2025 | 151.802.269,44 | 110.388.316,92 | -27,3% | - 41.413.952,52 |
| | 2030 | 195.540.341,12 | 141.654.954,31 | -27,6% | - 53.885.386,81 |
| | 2035 | 211.018.980,99 | 153.468.661,94 | -27,3% | - 57.550.319,05 |
| | 2040 | 215.273.225,73 | 156.709.591,09 | -27,2% | - 58.563.634,64 |
| | | | | | |
| | Totaal | 851.083.315,66 | 617.638.127,11 | -27,4% | - 233.445.188,55 |

Tabel 57: Absolute impact van de totale $CO_2$ emissies voor benzine- en diesel plug-in hybridevloot volgens het BEL-scenario

| $CO_2$ (kg) | | Huidige EFs | Nieuwe EFs | Delta % | Delta abs. |
|---|---|---|---|---|---|
| PHEV | 2020 | 135.455.658,32 | 96.807.999,11 | -28,5% | 48.331.198,36 |
| | 2025 | 423.860.293,88 | 306.495.170,90 | -27,7% | - 117.365.122,98 |
| | 2030 | 738.511.057,40 | 520.877.133,66 | -29,5% | - 217.633.923,73 |
| | 2035 | 717.065.747,69 | 508.963.616,05 | -29,0% | - 208.102.131,64 |
| | 2040 | 374.561.736,67 | 266.885.935,88 | -28,7% | - 107.675.800,79 |
| | | | | | |
| | Totaal | 2.389.454.493,96 | 1.700.029.855,60 | -28,9% | - 689.424.638,36 |

Ook de Euro 6 emissiefactoren voor benzine- en dieselwagens kregen een update. De impact hiervan is echter heel wat kleiner dan wat we hiervoor noteerden voor de hybridetechnologieën. Zo neemt de impact af naarmate de vloot verouderd en de pre-Euro 6d voertuigen de markt weer verlaten. Globaal gezien resulteert de update in een reductie van nog geen 2% voor het BAU-scenario en amper 1% voor het BEL-scenario.

Tabel 58: Absolute $CO_2$ reductie van de totale emissies voor Euro 6 benzine- en dieselwagens volgens het BAU-scenario

| $CO_2$ (kg) | | Huidige EFs | Nieuwe EFs | Delta % | Delta abs. |
|---|---|---|---|---|---|
| Benzine en diesel Euro 6a, 6b, 6c 6d-TEMP en 6d | 2020 | 4.128.904.696,51 | 3.939.321.731,55 | -4,6% | - 189.582.964,96 |
| | 2025 | 5.867.101.930,13 | 5.731.998.619,38 | -2,3% | - 135.103.310,75 |
| | 2030 | 6.657.466.186,58 | 6.565.457.620,55 | -1,4% | - 92.008.566,03 |
| | 2035 | 6.837.301.567,47 | 6.781.507.126,05 | -0,8% | - 55.794.441,41 |
| | 2040 | 6.894.567.082,65 | 6.848.315.372,46 | -0,7% | - 46.251.710,20 |
| | | | | | |
| | Totaal | 30.385.341.463,34 | 29.866.600.469,99 | -1,7% | - 518.740.993,35 |

Tabel 59: Absolute $CO_2$ reductie van de totale emissies voor Euro 6 benzine- en dieselwagens volgens het BEL-scenario

| $CO_2$ (kg) | | Huidige EFs | Nieuwe EFs | Delta % | Delta abs. |
|---|---|---|---|---|---|
| Benzine en diesel Euro 6a, 6b, 6c 6d-TEMP en 6d | 2020 | 4.032.297.906,86 | 4.008.230.018,52 | -0,6% | - 24.067.888,35 |
| | 2025 | 2.515.534.143,22 | 2.497.001.166,43 | -0,7% | - 18.532.976,79 |
| | 2030 | 1.243.779.534,80 | 1.230.642.853,49 | -1,1% | - 13.136.681,31 |
| | 2035 | 339.433.101,43 | 335.218.436,97 | -1,2% | - 4.214.664,46 |
| | 2040 | 67.083.440,13 | 66.574.006,49 | -0,8% | - 509.433,64 |
| | | | | | |
| | Totaal | 8.198.128.126,45 | 8.137.666.481,90 | -0,7% | - 60.461.644,55 |

Wanneer we alle updates in het perspectief zetten van de totale Vlaamse personenwagenvloot, dan bekomen de resultaten uit Tabel 60 en Tabel 61. Hieruit leiden we zeer gelijkaardige totale reducties af, zij het dat het zwaartepunt ervan verschilt per scenario. Zo zal in het BAU-scenario de grootste reductie plaatsvinden in steekjaar 2020, waar dit voor het BEL-scenario net tussen 2035 en 2040 gebeurt. Dit laatste ten gevolge van de uitfasering van de verkoop niet-elektrische modellen vanaf 2035. Het verschil in absolute emissies per steekjaar wordt pas echt duidelijk wanneer we kijken naar Figuur 73 en Figuur 74. Hiermee wordt aangetoond dat het BEL-scenario typerend is voor een beleid dat mikt op

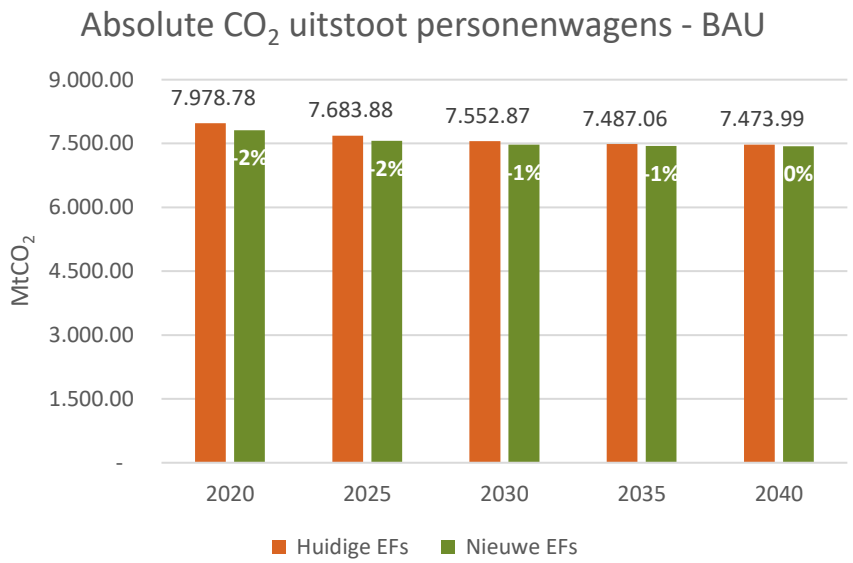
klimaatneutraliteit tegen 2050, als we veronderstellen dat dezelfde reductie zich verderzet naar zichtjaar 2050.

Tabel 60: Overzicht van de absolute $CO_2$ emissiereductie voor de Vlaamse personenwagenvloot volgens het BAU-scenario

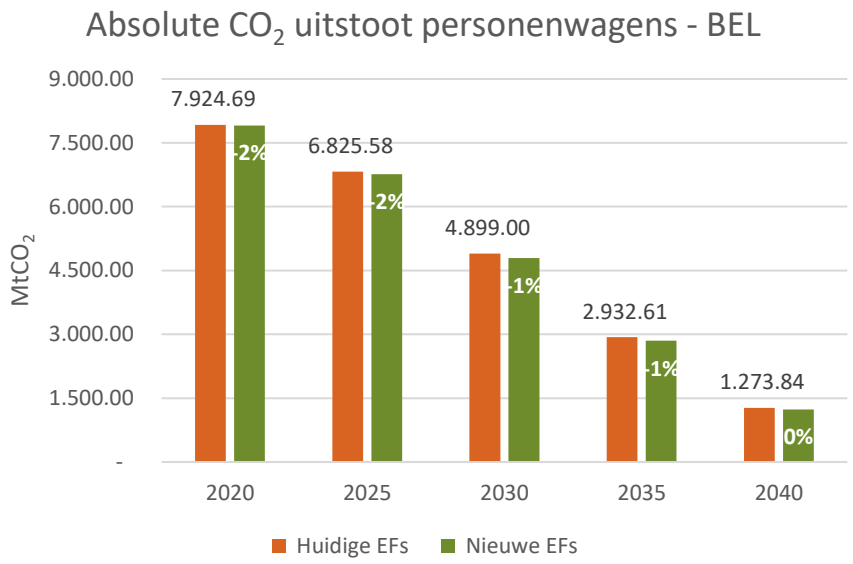
| $CO_2$ (kg) | | Huidige EFs | Nieuwe EFs | Delta % | Delta abs. |
|---|---|---|---|---|---|
| Totale personen-wagenvloot Vlaanderen | 2020 | 7.978.782.628,00 | 7.808.632.384,84 | -2,1% | - 170.150.243,15 |
| | 2025 | 7.683.876.577,13 | 7.566.034.737,71 | -1,5% | - 117.841.839,42 |
| | 2030 | 7.552.874.494,70 | 7.473.574.476,77 | -1,0% | - 79.300.017,93 |
| | 2035 | 7.487.055.788,57 | 7.441.860.971,52 | -0,6% | - 45.194.817,05 |
| | 2040 | 7.473.987.200,45 | 7.437.938.876,11 | -0,5% | - 36.048.324,34 |
| | | | | | |
| | Totaal | 38.176.576.688,84 | 37.728.041.446,95 | -1,2% | - 448.535.241,89 |

Tabel 61: Overzicht van de absolute $CO_2$ emissiereductie voor de Vlaamse personenwagenvloot volgens het BEL-scenario

| $CO_2$ (kg) | | Huidige EFs | Nieuwe EFs | Delta % | Delta abs. |
|---|---|---|---|---|---|
| Totale personen-wagenvloot Vlaanderen | 2020 | 7.924.692.373,02 | 7.910.308.023,81 | -0,2% | - 14.384.349,20 |
| | 2025 | 6.825.584.644,44 | 6.776.420.203,24 | -0,7% | - 49.164.441,19 |
| | 2030 | 4.898.995.470,89 | 4.813.396.785,54 | -1,7% | - 85.598.685,35 |
| | 2035 | 2.932.610.824,61 | 2.867.156.217,51 | -2,2% | - 65.454.607,10 |
| | 2040 | 1.273.835.628,30 | 1.246.614.805,78 | -2,1% | - 27.220.822,52 |
| | | | | | |
| | Totaal | 23.855.718.941,25 | 23.613.896.035,88 | -1,0% | - 241.822.905,37 |




Figuur 73: Totale $CO_2$ uitstoot van de Vlaamse personenwagenvloot volgens het BAU-scenario




Figuur 74: Totale $CO_2$ uitstoot van de Vlaamse personenwagenvloot volgens het BEL-scenario

## 5.8 VLOOTREDUCTIE $NO_X$

Ook voor stikstofoxides rekenen we de impact van de nieuwe emissiefactoren, zowel voor PHEV's als conventionele dieselwagens, door voor de hele Vlaamse vloot. Tabel 62 en Tabel 63 tonen de totale $NO_x$-uitstoot van de Vlaamse dieselvloot over verschillende zichtjaren heen, en dit voor beide scenario's. Deze cijfers zijn gebaseerd op de nieuwe emissiefactoren uit Tabel 43 en Tabel 44, welke voornamelijk een hogere $NO_x$-uitstoot laten optekenen voor dieselwagens van emissieklasse Euro 6dTEMP ('Euro 6 2017-2019') en Euro 6d. Deze impact toont zich hieronder in de dieselvloottotalen waarbij het BEL scenario een progressieve uitfasering van de verkoop van dieselwagens weerspiegelt, alsook een vermindering van het aantal voertuigkilometers. Resultaten tonen aan dat, over de zichtjaren heen, 14% extra $NO_x$ emissies zullen plaatsvinden volgens de nieuwe emissiefactoren. Gezien het BAU-scenario geen uitfasering van diesel voorziet, neemt de impact toe met de jaren. In het BEL-scenario is deze impact veel kleiner, over de zichtjaren heen slechts 1,3%.

Tabel 62 - Overzicht van de absolute NOx emissiereductie voor de Vlaamse dieselwagenvloot volgens het BAU-scenario

| $NO_x$ (kg) | | Huidige EFs | Nieuwe EFs | Delta % | Delta abs. |
|---|---|---|---|---|---|
| Totale diesel-wagenvloot Vlaanderen | 2020 | 15,875,725.59 | 16,237,758.11 | 2.3% | 362,032.52 |
| | 2025 | 8,621,407.25 | 9,506,457.32 | 10.3% | 885,050.07 |
| | 2030 | 4,879,354.22 | 6,072,977.44 | 24.5% | 1,193,623.22 |
| | 2035 | 3,474,485.02 | 4,769,896.44 | 37.3% | 1,295,411.42 |
| | 2040 | 3,092,673.66 | 4,403,347.57 | 42.4% | 1,310,673.91 |
| | | | | | |
| | Totaal | 35,943,645.74 | 40,990,436.88 | 14.0% | 5,046,791.13 |

Tabel 63 - Overzicht van de absolute NOx emissiereductie voor de Vlaamse dieselwagenvloot volgens het BEL-scenario

| $NO_x$ (kg) | | Huidige EFs | Nieuwe EFs | Delta % | Delta abs. |
|---|---|---|---|---|---|
| Totale diesel-wagenvloot Vlaanderen | 2020 | 15,621,820.48 | 15,399,698.96 | -1.4% | - 222,121.52 |
| | 2025 | 7,766,094.56 | 7,983,053.94 | 2.8% | 216,959.37 |
| | 2030 | 3,096,351.94 | 3,306,072.86 | 6.8% | 209,720.92 |
| | 2035 | 1,177,223.26 | 1,293,347.64 | 9.9% | 116,124.38 |
| | 2040 | 554,376.49 | 588,674.17 | 6.2% | 34,297.68 |
| | | | | | |
| | Totaal | 28,215,866.73 | 28,570,847.57 | 1.3% | 354,980.84 |

Gezien over de hele personenwagenvloot, en dus met inbegrip van de lichte wijzigingen voor de emissiefactoren voor niet-dieselwagens, ligt de impact van de nieuwe emissiefactoren iets lager. Dit bevestigt dat in het huidige Vlaamse wagenpark (zichtjaar 2020 in het BAU-scenario) de $NO_x$ emissies gedomineerd worden door de dieselvloot.

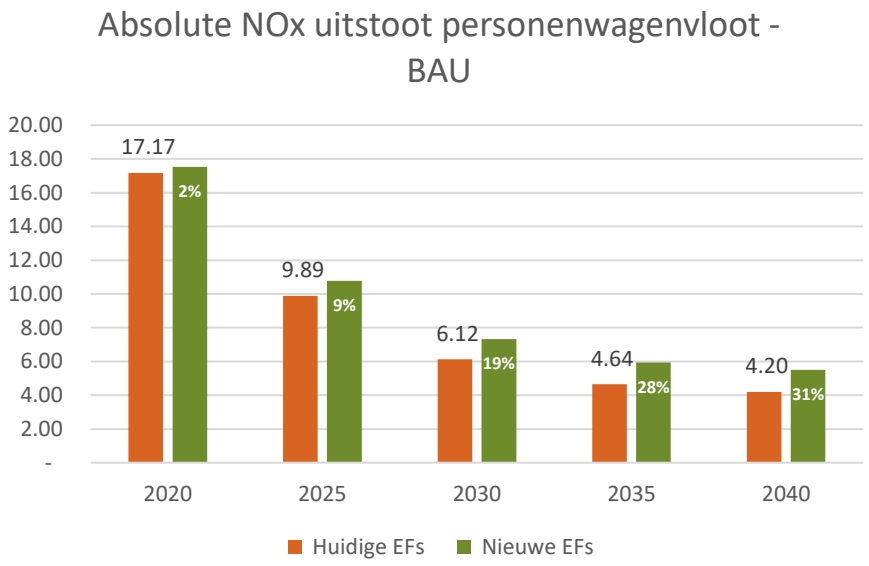
Tabel 64: Overzicht van de absolute $NO_x$ emissiereductie voor de Vlaamse personenwagenvloot volgens het BAU-scenario

| $NO_x$ (kg) | | Huidige EFs | Nieuwe EFs | Delta % | Delta abs. |
|---|---|---|---|---|---|
| Totale personen-wagenvloot Vlaanderen | 2020 | 17,172,180.63 | 17,534,213.15 | 2.1% | 362,032.52 |
| | 2025 | 9,890,582.60 | 10,775,632.67 | 8.9% | 885,050.07 |
| | 2030 | 6,123,828.46 | 7,317,451.68 | 19.5% | 1,193,623.22 |

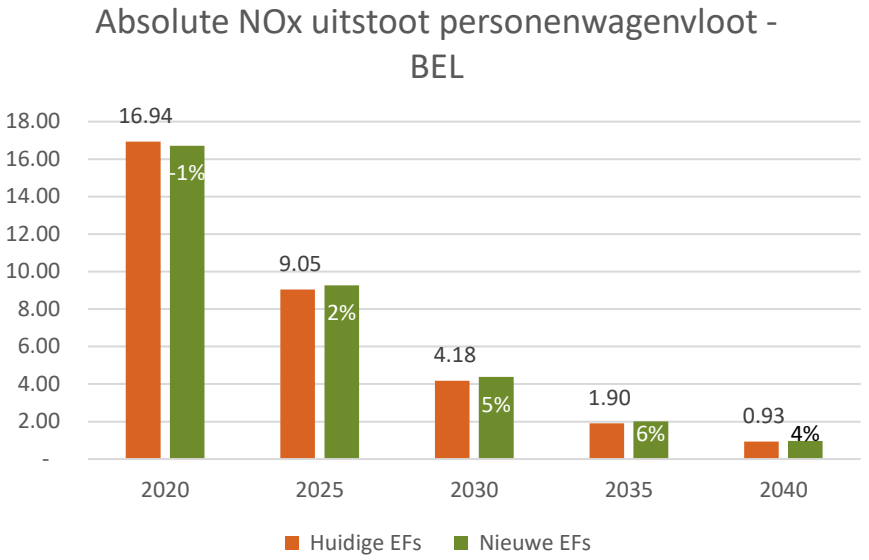
| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | **2035** | 4,642,787.97 | 5,938,199.39 | 27.9% | 1,295,411.42 |
| | **2040** | 4,196,932.44 | 5,507,606.36 | 31.2% | 1,310,673.91 |
| | | | | | |
| | **Totaal** | 42,026,312.11 | 47,073,103.25 | 12.0% | 5,046,791.13 |

Tabel 65: Overzicht van de absolute $NO_x$ emissiereductie voor de Vlaamse personenwagenvloot volgens het BEL-scenario

| $NO_x$ (kg) | | Huidige EFs | Nieuwe EFs | Delta % | Delta abs. |
|---|---|---|---|---|---|
| **Totale personen-wagenvloot Vlaanderen** | **2020** | 16,937,019.88 | 16,714,898.37 | -1.3% | - 222,121.52 |
| | **2025** | 9,049,721.10 | 9,266,680.47 | 2.4% | 216,959.37 |
| | **2030** | 4,177,131.99 | 4,386,852.90 | 5.0% | 209,720.92 |
| | **2035** | 1,900,815.94 | 2,016,940.32 | 6.1% | 116,124.38 |
| | **2040** | 927,785.62 | 962,083.30 | 3.7% | 34,297.68 |
| | | | | | |
| | **Totaal** | 32,992,474.52 | 33,347,455.36 | 1.1% | 354,980.84 |




Figuur 75: Totale $NO_x$ uitstoot van de Vlaamse personenwagenvloot volgens het BAU-scenario




Figuur 76: Totale $NO_x$ uitstoot van de Vlaamse personenwagenvloot volgens het BEL-scenario

## 5.9 CONCLUSIE IMPACTANALYSE

In dit hoofdstuk gaven we een overzicht van de nieuwe emissiefactoren voor $CO_2$, $NO_x$, CO, VOS, PM en FC. Hierbij beperkten we ons niet tot PHEV's, maar kwamen ook 'conventionele' benzine CS hybrides en conventionele benzine- en dieselmodellen aan bod. Een onderscheid werd gemaakt tussen emissienormen Euro 6 a,b,c, Euro 6d-TEMP en Euro 6d.

Wat de nieuwe inzichten ons leren is dat PHEV's op snelwegen zo'n kwart méér $CO_2$ uitstoten dan waar men voorlopig rekening mee houdt bij het modelleren met FASTRACE. Tijdens stedelijk en ruraal rijden stoten ze dan weer gemiddeld de helft tot twee-derde minder $CO_2$ uit. 'Conventionele', niet stekker hybrides bleken dan weer méér uit te stoten dan werd gedacht, hoewel ze een beter alternatief zijn voor conventionele benzine- en dieselwagens. Qua energetische efficiëntie scoren kleine en medium benzine PHEV's echter het beste, al zijn deze voertuigtypes begin 2020 amper vertegenwoordigd op de Vlaamse automarkt. Het wordt afwachten of deze modellen ook effectief in Vlaanderen en hun intrede zullen doen, gezien batterijtechnologie dusdanig goedkoop wordt dat op korte termijn de productiekost voor een conventionele benzinewagen gelijk zal komen te liggen met die van een volledig elektrisch voertuig. Voor lange-afstandsrijders blijft echter PHEV's op middellange termijn een beter alternatief dan conventionele benzine- en dieselwagens, in afwachting dat de actieradius vergroot bij elektrische voertuigen. Algemeen gezien leggen PHEV's een 30% lagere $CO_2$ voor dan conventionele voertuigen. Hier zit nog een behoorlijke marge op, mocht de utiliteitsfactor verder verhoogd kunnen worden.

Verdere interessante inzichten uit deze oefening zijn dat kleine dieselwagens na de herziening van de emissiefactoren bijna de helft méér verbruik tijdens stedelijke en rurale trips, hetgeen verder in hun nadeel speelt. De uitstoot van CO en VOS ligt volgens de herziening dusdanig laag dat ze bijna verwaarloosbaar wordt. Dit inzicht stemt overeen met praktijktests van bestaande modellen met draagbare emissiemeetapparatuur (PEMS). Op vlak van $NO_x$ uitstoot zien we tenslotte dat binnen FASTRACE een onderschatting werd gedaan van de diesel Euro 6d-TEMP technologie, terwijl de huidige emissiefactoren voor de meest recente Euro 6d technologie nagenoeg gelijk blijft na de herziening.

# 6 CONCLUSIES

Plug-in hybride elektrische voertuigen (PHEV's) zijn een duurzamer alternatief voor conventionele voertuigen met een verbrandingsmotor. Bovendien effenen ze het pad voor een grootschalige marktopname van zero-emissievoertuigen, zij het batterij-elektrisch of waterstof-elektrisch. Deze technologieën zijn noodzakelijk om vóór 2050 ook in de transportsector een klimaatneutraliteit te kunnen garanderen, zoals dit wordt nagestreefd via het Klimaatakkoord van Parijs.

Voorafgaand aan deze studie moest de Vlaamse overheid voor haar jaarlijkse becijfering in het emissie-inventaris van de koolstofdioxide ($CO_2$) uitstoot van haar voertuigenvloot bestemd voor de weg terugvallen op veronderstellingen voor wat betreft PHEV technologie. In de studie die we hier voorstellen geven we een update van de gehanteerde emissiefactoren. Hiervoor baseren we ons zowel op inzichten uit de vakliteratuur, een eerste Vlaamse SEMS-meetcampagne als sterk doorgedreven simulatiewerk voor PHEV personenwagens en een stadsbus. Uit de relevante vakliteratuur blijkt dat er wereldwijd verrassend weinig aandacht wordt geschonken aan de werkelijke uitstoot van PHEV's. Wat kon worden teruggevonden gaat voornamelijk over personenwagens. Voor de sector van het zwaar vervoer is er tot heden weinig onderzoek gedaan naar alternatieven voor de dieselmotor, al tonen de beschikbare simulaties wel aan dat er een behoorlijke optimalisatie mogelijk is via (gedeeltelijke) elektrificatie van de aandrijflijn (tot 8% efficiëntiewinst per tonkilometer). Bovendien kan men in de nabije toekomst voor deze specifieke sector nog grote stappen naar een hogere efficiëntie (met een tot 30% lager energieverbruik) zetten via een doorgedreven optimalisatie van de aerodynamica en belading.

Om alsnog tot een herziening van de kerndataset aan emissiefactoren voor (voornamelijk) plug-in hybride voertuigen op de proppen te kunnen komen, voerden we aansluitend op het literatuuronderzoek eigen meet- en simulatiewerk uit. Zo installeerden we draagbare emissiemeet-apparatuur (SEMS) in drie stekkerhybrides, die werden geselecteerd op basis van hun populariteit op de Vlaamse markt. Anderhalve maand lang werden de emissies van stikstofoxiden ($NO_x$) en $CO_2$ per seconde geregistreerd, alsook de energiebalansen om zo het laadgedrag van de eigenaars na te kunnen gaan. Een belangrijke parameter die we uit deze data afgeleid hebben is de utiliteitsfactor, welke de verhouding is tussen het rijden in *charge depleting* (CD) en *charge-sustaining* (CS) modus tussen twee laadbeurten. Waar eerder Nederlands onderzoek door partner TNO aantoonde dat de Nederlandse zakelijke PHEV-gebruiker gemiddeld 30% van de tijd in CD modus (dus elektrisch) rijdt, bleek uit de gepresenteerde meetcampagne dat de gemiddelde utiliteitsfactor in Vlaanderen slechts 25% bedraagt. Wanneer we per wegtype gaan kijken, dan bedragen de gemiddelde utiliteitsfactoren 50%, 50% en 20% voor respectievelijk stedelijke, rurale en snelwegtrips. Deze factoren zijn belangrijk voor de simulaties die partner Emisia uitvoerde voor PHEV personenwagens, om zo tot een nieuwe kerndataset te komen. Deze toont voor $CO_2$ voornamelijk aan dat de nieuwe emissiefactoren voor benzine plug-ins beduidend lager liggen dan oorspronkelijk werd aangenomen in het Vlaamse FASTRACE model. Algemeen gezien verbruiken PHEV's volgens de nieuwste inzichten zo'n 30% minder, terwijl er nog een behoorlijke marge is indien de utiliteitsfactoren verder kunnen worden opgekrikt. Dit vereist een beleid dat inzet op kleinere/lichtere PHEV's met een grote batterijcapaciteit, maar even goed op een wenselijk laadgedrag en de beschikbaarheid van laadinfrastructuur. Ook het soort trips is bepalend voor het $CO_2$-reductiepotentieel van PHEV's, gezien ze het beste scoren op kortere ritten met een volgeladen batterijenpakket. Wanneer ze onvoldoende geladen worden, gaan dit type wagens veelal hogere concentraties aan $CO_2$ en polluenten uitstoten gezien ze zwaarder dan hun conventionele varianten. PHEV-gebruikers stimuleren om frequenter hun voertuig op te laden is echter geen sinecure, al zou de invoering van een $CO_2$-taks een belangrijke drijfveer kunnen zijn.

In deze studie werden enkel emissiefactoren berekend voor grote diesel-PHEV's, gezien we weinig potentieel zien voor een toepassing van de dure technologie in de andere segmenten. Qua energetische efficiëntie scoren kleine en medium benzine PHEV's uiteindelijk het beste, al zijn deze voertuigtypes begin 2020 amper vertegenwoordigd op de Vlaamse automarkt. Het wordt afwachten of deze modellen ook effectief komen, gezien batterijtechnologie dusdanig goedkoop wordt dat op korte termijn de productiekost voor een conventionele benzinewagen gelijk zal komen te liggen met die van een volledig elektrisch voertuig. Voor langeafstandsrijders blijven echter PHEV's op middellange termijn een beter alternatief dan conventionele benzine- en dieselwagens, in afwachting dat de actieradius vergroot bij elektrische voertuigen.

Bij het doorrekenen van de nieuwe emissiefactoren in het kader van de Vlaamse vlootemissies van $CO_2$ door personenwagens kwam het potentieel van PHEV's duidelijk naar voren. Voor 'conventionele' hybrides was dit ook het geval, maar in mindere mate. De sterke $CO_2$-reducties die dankzij PHEV's mogelijk worden onderstrepen het feit dat beleid er goed aan doet om, naast het stimuleren van de *modal shift* en puur elektrische voertuigen, ook in te zetten op PHEV's. Indien Vlaanderen dit doet om luchtkwaliteits- en klimaatvoordelen te halen is het belangrijk om het elektrisch gebruik te monitoren en zo na te gaan of er tijdig en voldoende wordt geladen. Het brandstofverbruik is een goede manier om het gemiddelde verbruik te monitoren, maar een SEMS of een aparte OBD monitor is noodzakelijk om het elektrisch rijden binnenstedelijk te controleren. Gezien de meerkosten van een plug-in oplossing, zeker voor zwaardere voertuigen, zoals vrachtwagens en bussen, is dergelijke controle beperkt in meerkosten en zeker op zijn plaats. Tot dusverre is niet gebleken dan voor PHEV's aandrijflijnen de elektromotor de standaard aandrijving is. Wat verder blijkt uit de Vlaamse vlootemissies is een gecontroleerde uitfasering van alle verbrandingsmotoren voor personenwagens tegen 2035 een cruciale factor is om tegen 2050 de totale $CO_2$-emissie binnen deze sector (zo goed als) naar nul te herleiden.

Naast personenwagens werd ook gekeken naar hybride bussen. Hiervoor hebben we in deze studie aangetoond dat ze in vergelijking met conventionele bussen een significante verbruiksreductie kunnen voorleggen in een stedelijke context. De brandstofbesparing van plug-ins hangt voornamelijk af van de frequentie van het opladen van het batterijpakket. Een voordeel van de hybride bussen in vergelijking met elektrische bussen op korte termijn, is dat er geen afstandsangst is, wat voor puur elektrische bussen nog steeds een groot probleem kan zijn indien er onvoldoende laadinfrastructuur voorhanden is. Waar het voorgestelde model voor een plug-in hybride bus belangrijke inzichten geeft in het potentieel van de technologie voor een inzet in Vlaanderen, hebben we doorheen dit rapport echter amper geschreven over bestelwagens en vrachtwagens. Voor bestelwagens verwachten we eigenlijk een gelijklopende impact als bij het elektrificeren van personenwagens, gezien ze in feite over dezelfde motorisatie beschikken. Hier blijft het echter koffiedik kijken of plug-in hybride bestelwagens de markt zullen overrompelen of ook hier volledige elektrificatie meteen aan de orde zal zijn. Voor vrachtwagens liggen de kaarten echter anders, gezien de grote vraag naar vermogen. In deze sector is er echter nog een grote marge voor $CO_2$-reducties wanneer ingezet wordt op elektrificatie van de aandrijflijn en optimalisatie van de aerodynamica. Hierdoor krijgt de sector nog enige tijd respijt alvorens ook hier batterijtechnologie op grote schaal kan worden ingezet.

# 7 AANBEVELINGEN VOOR TOEKOMSTIG WERK

Vlaanderen staat voor een enorme opdracht als het aankomt op de reductie van broeikasgassen en concentraties van luchtverontreinigende stoffen. Simulaties van hoe het wegverkeer hieraan bijdraagt en zal bijdragen in de jaren die voor ons liggen vragen om accurate metingen van de nieuwste technologieën, waarmee voorspellingsmodellen kunnen worden geijkt. Waar de SEMS-campagne belangrijke inzichten heeft gegeven in het rijgedrag van een kleine selectie aan Vlaamse PHEV-gebruikers, kan een systematisch (eenvoudiger) onderzoek op grotere schaal het Vlaamse kennisveld verruimen. Dit geldt niet alleen voor personenwagens, maar evengoed voor bestel- en vrachtwagens, alsook stads- en reisbussen. Ook inzake het laadgedrag van Vlaamse PHEV-gebruikers hebben we momenteel slechts een eerste beeld gekregen, om dit beeld scherp te stellen dient er uitvoerig getest te worden op een significante voertuigvloot.

Inzake elektromobiliteit dringen zich ook nieuwe studies op over de strategische uitrol van laadpunten en hun impact op het (lokale) stroomnet, zodat we ons kunnen wapenen tegen wanneer de technologie de markt begint over te nemen. Dit zal in de komende jaren gebeuren. Via een levenscyclusanalyse kan Vlaanderen zich tot slot verder verdiepen in de actuele, totale impact van elektrische voertuigen binnen haar grondgebied. Europa dringt aan op een evaluatie van vervoersmiddelen op basis van hun levenscyclus, terwijl de kennis om hierin een voortrekkersrol op te nemen voorhanden is.

Andere deelsectoren van het wegvervoer, zoals lichte bedrijfsvoertuigen en zware transport, kunnen ook bijdragen tot de vermindering van broeikasgassen en concentraties van luchtverontreinigende stoffen. Het elektrificeren van deze categorieën kan grote milieuvoordelen opleveren. Daarnaast worden alternatieve brandstoffen zoals LNG steeds populairder in de categorie zware vrachtwagens en hetzelfde kan gebeuren met waterstof in personenauto's (FCEV). Al deze veranderingen in het wegvervoer-landschap moeten worden overwogen om strategische beslissingen te nemen op weg naar een schonere en duurzame toekomst.

# 8 REFERENTIES


Alvarez, Ramón A. et al. 2018. “Assessment of Methane Emissions from the U.S. Oil and Gas Supply Chain.” *Science* 361(6398): 186–88.

André, Michel. 2004. “The ARTEMIS European Driving Cycles for Measuring Car Pollutant Emissions.” *The Science of the total environment* 334–335: 73–84. http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969704003584 (January 15, 2015).

BAE. 2020. “Hybrid Bus | Electric Bus | Hybrid Auxiliary Power Unit | BAE Systems | United States.” https://www.baesystems.com/en-us/product/series-e (March 13, 2020).

Bridgestone. 2020. “Lower Rolling Resistance Tires for Improved Fuel Economy.” https://www.bridgestone.com/responsibilities/environment/reduce_co2/fuel_efficiency/index.html (January 16, 2020).

Dornoff, Jan, Joshua Miller, Peter Mock, and Uwe Tietge. 2018. *The European Commission Regulatory Proposal for Post-2020 CO2 Targets for Cars and Vans: A Summary and Evaluation*. Berlin. https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_EU-CO2-proposal_briefing_20180109.pdf.

“Ecoscore.” 2017. http://ecoscore.be/ (October 1, 2017).

EEA. 2019. *Monitoring CO2 Emissions from New Passenger Cars and Vans in 2017*. Copenhagen. https://www.eea.europa.eu/publications/monitoring-co2-emissions-from-new-2.

Ehrenberger, S I, J Qiao, M Konrad, and F Philipps. 2017. “Analysis of Tail-Pipe Emissions of a Plug-in Hybrid Vehicle and Its Average Emissions for Different Test Cycles.” In , 15–16.

“Emission Test Cycles: WLTC.” https://dieselnet.com/standards/cycles/wltp.php (January 16, 2020).

ERTRAC. 2016. *Future Light and Heavy Duty ICE Powertrain Technologies*. Brussels.

Franco, Vicente et al. 2016. “Evaluation of Exhaust Emissions from Three Diesel-Hybrid Cars and Simulation of After-Treatment Systems for Ultralow Real-World $NO_x$ Emissions.” *Environmental Science & Technology* 50(23): 13151–59. https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.6b03585 (January 14, 2020).

Gowrisankar, Vignesh. 2018. *Assessment on Emission Factors of HDV over Mission Profiles*. Eindhoven.

Henze, Veronika. 2019. “Battery Pack Prices Fall As Market Ramps Up With Market Average At $156/KWh In 2019 | BloombergNEF.” https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-as-market-ramps-up-with-market-average-at-156-kwh-in-2019/ (March 10, 2020).

Hooftman, N., M. Messagie, J. Van Mierlo, and T. Coosemans. 2018. “A Review of the European Passenger Car Regulations – Real Driving Emissions vs Local Air Quality.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 86.

Hooftman, Nils. 2018. “The Road towards a Zero-Carbon Transportation System by 2050 - A Comprehensive Study for Belgium in a European Context.” Vrije Universiteit Brussel.

Hooftman, Nils, Maarten Messagie, Joeri Van Mierlo, and Thierry Coosemans. 2020. “The Paris Agreement and Zero-Emission Vehicles in Europe: Scenarios for the Road Towards a Decarbonised Passenger Car Fleet.” In eds. Beate Müller and Gereon Meyer. Springer, Cham, 151–68.

Kadijk, Gerrit, Edo Buskermolen, and Jordy Spreen. 2015. *Emission Performance of a Diesel Plug-in Hybrid Vehicle*. Den Haag.

Keramydas, Christos et al. 2018. “Real-World Measurement of Hybrid Buses’ Fuel Consumption and Pollutant Emissions in a Metropolitan Urban Road Network.” *Energies* 11(10): 2569. http://www.mdpi.com/1996-1073/11/10/2569 (January 14, 2020).

Kollamthodi, Sujith et al. *The Potential for Mass Reduction of Passenger Cars and Light Commercial Vehicles in Relation to Future CO2 Regulatory Requirements*.

Ligterink, Norbert, and Arjan Eijk. 2014. *Update Analysis of Real-World Fuel Consumption of Business Passenger Cars Based on Travelcard Nederland Fuelpass Data*. Delft.

Ligterink, Norbert, and Richard Smokers. 2016. *Monitoring van Plug-in Hybride Voertuigen (PHEVs) April 2012 t/m Maart 2016*. Den Haag.

Mascarin, Anthony et al. 2016. *Vehicle Lightweighting: Mass Reduction Spectrum Analysis and Process Cost Modeling*. Idaho Falls, ID (United States). http://www.osti.gov/servlets/purl/1363637/ (January 16, 2020).

Mukut, A N M Mominul Islam, and Mohammad Zoynal Abedin. 2019. "Review on Aerodynamic Drag Reduction of Vehicles." *International Journal of Engineering Materials and Manufacture* 4(1): 1–14.

Rashid, Muhammad H. 2017. *"Power Electronics Handbook: Optimization Based Strategies for EMS."* https://books.google.com.my/books?id=HxdHDgAAQBAJ&pg=PA1107&lpg=PA1107&dq=If+the+optimization+is+performed+over+a+fixed+drive+cycle,+a+global+optimum+solution+can+be+found&source=bl&ots=4mIXKshOzM&sig=ACfU3U25HvTx8tVLI3MAVGOC5a9fxP4_Bw&hl=en&sa=X&ved=2ahU (January 16, 2020).

Riddick, Stuart N. et al. 2019. "Methane Emissions from Oil and Gas Platforms in the North Sea." *Atmospheric Chemistry and Physics* 19(15): 9787–96. https://www.atmos-chem-phys.net/19/9787/2019/ (February 12, 2020).

Soulopoulos, Nikolas. 2017. "When Will Electric Vehicles Be Cheaper than Conventional Vehicles?" : 1–15. https://data.bloomberglp.com/bnef/sites/14/2017/06/BNEF_2017_04_12_EV-Price-Parity-Report.pdf (September 24, 2017).

Spreen, J.S. et al. 2016. *Assessment of Road Vehicle Emissions: Methodology of the Dutch in-Service Testing Programmes*. The Hague. file:///C:/Users/nhooftma/Downloads/TNO-2016-R11178.pdf (March 17, 2017).

Srinivasa Raghavan, Seshadri, and Gil Tal. 2019. "Influence of User Preferences on the Revealed Utility Factor of Plug-In Hybrid Electric Vehicles." *World Electric Vehicle Journal* 11(1): 6. https://www.mdpi.com/2032-6653/11/1/6 (March 13, 2020).

Thielmann, Axel, Andreas Sauer, Ralf Isenmann, and Martin Wietschel. 2013. *Technology Roadmap Energy Storage for Electric Mobility 2030*.

UITP. 2014. *UITP Project "SORT" - Standardised on-Road Test Cycles*.

Vermeulen, R.J., S. Van Goethem, et al. 2014. *SEMS Operating as a Proven System for Screening Real-World NOx and NH3 Emissions*. Den Haag.

Vermeulen, R.J., S. van Goethem, et al. 2014. "SEMS Operating as a Proven System for Screening Real-World NOx and NH3 Emissions." In *20th International Transport and Air Pollution Conference 2014, Graz, Austria, 18-19 September, 1-8,*.

Vermeulen, R.J., N.E. Ligterink, W.A. Vonk, and H.L. Baarbe. 2012. "A Smart and Robust NOx Emission Evaluation Tool for the Environmental Screening of Heavy-Duty Vehicles." In *19th International Transport and Air Pollution Conference 2012, Thessaloniki, Greece, 26-27 November 2012., 1-11,*.

VMM. 2018. *Jaarrapport Lucht - Emissies 2000-2016 En Luchtkwaliteit in 2017 in Vlaanderen*. Aalst. https://www.vmm.be/bestanden/VMM-2017-LKT_TW.pdf (September 18, 2019).

Wu, Guoyuan, Kanok Boriboonsomsin, and Matthew J. Barth. 2014. "Development and Evaluation of an Intelligent Energy-Management Strategy for Plug-in Hybrid Electric Vehicles." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 15(3): 1091–1100.

Van Zyl, Stephan et al. 2017. *Transformers - Configurable and Adaptable Trucks and Trailers for Optimal Transport Efficiency: Deliverable D6.4*.

# 9 APPENDIX

Gemiddelde snelheid van de fasen van elke cyclus. In de WLTC lage fase is de gemiddelde snelheid bijvoorbeeld 19,7 km/h. Op deze manier hebben we veel snelheid-energieverbruik punten gevonden om de snelheidsafhankelijke energieverbruik functie te berekenen.

Tabel 66: Brandstof en elektrisch energieverbruik van gemiddelde PHEV's in WLTC

| WLTC | | | Laag | Medium | Hoog | Extra hoog |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Mode | **Gem. snelheid (km/h)** | **19,7** | **39,2** | **56,2** | **91,3** |
| | Gem. snelheid over de fases (km/u) | | | | | 46.5 |
| **Kleine benzine** | Charge sustaining | FC (l/100km) | 6,0 | 5,0 | 4,3 | 5,6 |
| | Charge sustaining | FC (MJ/km) | 1,9 | 1,6 | 1,4 | 1,8 |
| | Charge depleting | El EC (Wh/km) | 109,9 | 113,2 | 132,9 | 179,1 |
| | Charge depleting | El EC (MJ/km) | 0,4 | 0,4 | 0,5 | 0,6 |
| **Medium gasoline** | Charge sustaining | FC (l/100km) | 6,4 | 5,3 | 4,9 | 6,4 |
| | Charge sustaining | FC (MJ/km) | 2,0 | 1,7 | 1,6 | 2,0 |
| | Charge depleting | El EC (Wh/km) | 143,3 | 151,4 | 161,1 | 213,8 |
| | Charge depleting | El EC (MJ/km) | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,8 |
| **Grote benzine** | Charge sustaining | FC (l/100km) | 7,8 | 6,3 | 5,8 | 7,5 |
| | Charge sustaining | FC (MJ/km) | 2,5 | 2,0 | 1,9 | 2,4 |
| | Charge depleting | El EC (Wh/km) | 184,2 | 189,0 | 206,8 | 230,2 |
| | Charge depleting | El EC (MJ/km) | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,8 |
| **Grote diesel** | Charge sustaining | FC (l/100km) | 7,2 | 5,7 | 5,4 | 7,0 |
| | Charge sustaining | FC (MJ/km) | 2,3 | 1,8 | 1,7 | 2,2 |
| | Charge depleting | El EC (Wh/km) | 172,1 | 177,2 | 189,3 | 225,0 |
| | Charge depleting | El EC (MJ/km) | 0,6 | 0,6 | 0,7 | 0,8 |

Tabel 67: Brandstof en elektrisch energieverbruik van gemiddelde PHEV's in CADC

| Artemis | | | Stad | Platteland | Snelweg |
|---|---|---|---|---|---|
| | Mode | **Gem. snelheid (km/h)** | **17,6** | **57,4** | **96,5** |
| **Kleine benzine** | Charge sustaining | FC (l/100km) | 6,7 | 4,9 | 6,3 |
| | Charge sustaining | FC (MJ/km) | 2,1 | 1,5 | 1,9 |
| | Charge depleting | El EC (Wh/km) | 130,9 | 127,1 | 190,0 |
| | Charge depleting | El EC (MJ/km) | 0,5 | 0,5 | 0,7 |
| **Medium gasoline** | Charge sustaining | FC (l/100km) | 8,7 | 5,8 | 7,3 |
| | Charge sustaining | FC (MJ/km) | 2,7 | 1,8 | 2,2 |
| | Charge depleting | El EC (Wh/km) | 163,7 | 158,2 | 226,4 |
| | Charge depleting | El EC (MJ/km) | 0,6 | 0,6 | 0,8 |
| **Grote benzine** | Charge sustaining | FC (l/100km) | 9,8 | 6,8 | 8,3 |
| | Charge sustaining | FC (MJ/km) | 3,0 | 2,1 | 2,5 |
| | Charge depleting | El EC (Wh/km) | 208,4 | 196,4 | 257,8 |
| | Charge depleting | El EC (MJ/km) | 0,8 | 0,7 | 0,9 |
| **Grote diesel** | Charge sustaining | FC (l/100km) | 9,2 | 6,2 | 7,6 |
| | Charge sustaining | FC (MJ/km) | 3,0 | 2,0 | 2,5 |
| | Charge depleting | El EC (Wh/km) | 200,8 | 182,4 | 248,3 |
| | Charge depleting | El EC (MJ/km) | 0,7 | 0,7 | 0,9 |

Tabel 68: Brandstof en elektrisch energieverbruik van gemiddelde PHEV's in RDE

| RDE | | | Stad 1 | Stad 2 | Platteland | Snelweg |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Mode | **Gem. snelheid (km/h)** | **20,2** | **31,0** | **57,5** | **99,9** |
| | **Gem. snelheid over de modi (km/h)** | | | | | 57,0 |
| **Kleine benzine** | Charge sustaining | FC (l/100km) | 10,4 | 5,5 | 5,2 | 6,0 |
| | Charge sustaining | FC (MJ/km) | 3,2 | 1,7 | 1,6 | 1,9 |
| | Charge depleting | El EC (Wh/km) | 212,5 | 108,9 | 131,1 | 211,0 |
| | Charge depleting | El EC (MJ/km) | 0,8 | 0,4 | 0,5 | 0,8 |
| **Medium gasoline** | Charge sustaining | FC (l/100km) | 11,6 | 5,8 | 5,6 | 6,4 |
| | Charge sustaining | FC (MJ/km) | 3,6 | 1,8 | 1,7 | 2,0 |
| | Charge depleting | El EC (Wh/km) | 272,7 | 135,9 | 161,7 | 240,8 |
| | Charge depleting | El EC (MJ/km) | 1,0 | 0,5 | 0,6 | 0,9 |
| **Grote benzine** | Charge sustaining | FC (l/100km) | 13,8 | 6,8 | 6,6 | 8,0 |
| | Charge sustaining | FC (MJ/km) | 4,3 | 2,1 | 2,0 | 2,5 |
| | Charge depleting | El EC (Wh/km) | 354,6 | 177,5 | 207,5 | 255,7 |
| | Charge depleting | El EC (MJ/km) | 1,3 | 0,6 | 0,7 | 0,9 |
| **Grote diesel** | Charge sustaining | FC (l/100km) | 12,0 | 5,9 | 6,0 | 7,0 |
| | Charge sustaining | FC (MJ/km) | 3,9 | 1,9 | 2,0 | 2,3 |
| | Charge depleting | El EC (Wh/km) | 332,7 | 163,7 | 187,4 | 250,6 |
| | Charge depleting | El EC (MJ/km) | 1,2 | 0,6 | 0,7 | 0,9 |

Tabel 69: Parameters in CS mode voor PHEV

| PHEV Parameters CS mode | | Alfa | Bèta | Gamma | Delta | Epsilon | Zita | Eta | RF |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Kleine benzine** | FC | 4,27E-04 | -5,50E-02 | 3,21E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 1,00E+00 | 0,00E+00 |
| | NOx | -6,24E-05 | 1,08E-02 | -1,66E-01 | -3,98E-11 | 1,00E-14 | -2,05E-12 | 1,66E+01 | 0,00E+00 |
| | CO | -8,91E-07 | 2,76E-03 | 3,55E-01 | 3,44E+00 | 2,27E-03 | 1,88E-01 | 1,12E+00 | 0,00E+00 |
| | HC | 1,72E-06 | -2,54E-04 | 1,26E-02 | -8,33E-11 | -1,17E-12 | 1,20E-10 | 5,72E+00 | 0,00E+00 |
| | PM uitlaat | 7,36E-07 | -1,58E-04 | 9,28E-03 | 4,11E-02 | 2,69E-04 | -7,79E-02 | 6,02E+00 | 0,00E+00 |
| **Medium benzine** | FC | 5,16E-04 | -6,67E-02 | 3,73E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 1,00E+00 | 0,00E+00 |
| | NOx | -6,24E-05 | 1,08E-02 | -1,66E-01 | -3,98E-11 | 1,00E-14 | -2,05E-12 | 1,66E+01 | 0,00E+00 |
| | CO | -8,91E-07 | 2,76E-03 | 3,55E-01 | 3,44E+00 | 2,27E-03 | 1,88E-01 | 1,12E+00 | 0,00E+00 |
| | HC | 1,72E-06 | -2,54E-04 | 1,26E-02 | -8,33E-11 | -1,17E-12 | 1,20E-10 | 5,72E+00 | 0,00E+00 |
| | PM uitlaat | 7,36E-07 | -1,58E-04 | 9,28E-03 | 4,11E-02 | 2,69E-04 | -7,79E-02 | 6,02E+00 | 0,00E+00 |
| **Grote benzine** | FC | 6,06E-04 | -7,81E-02 | 4,38E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 1,00E+00 | 0,00E+00 |
| | NOx | -6,24E-05 | 1,08E-02 | -1,66E-01 | -3,98E-11 | 1,00E-14 | -2,05E-12 | 1,66E+01 | 0,00E+00 |
| | CO | -8,91E-07 | 2,76E-03 | 3,55E-01 | 3,44E+00 | 2,27E-03 | 1,88E-01 | 1,12E+00 | 0,00E+00 |
| | HC | 1,72E-06 | -2,54E-04 | 1,26E-02 | -8,33E-11 | -1,17E-12 | 1,20E-10 | 5,72E+00 | 0,00E+00 |
| | PM uitlaat | 7,36E-07 | -1,58E-04 | 9,28E-03 | 4,11E-02 | 2,69E-04 | -7,79E-02 | 6,02E+00 | 0,00E+00 |
| **Grote diesel** | FC | 5,80E-04 | -7,46E-02 | 4,16E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 1,00E+00 | 0,00E+00 |
| | NOx | 6,67E-05 | -1,14E-02 | 9,46E-01 | 1,92E+00 | -5,15E-05 | 4,26E-03 | 1,00E+00 | 3,71E-01 |
| | CO | 3,31E-05 | -5,73E-03 | 2,82E-01 | 9,43E-01 | 3,54E-04 | -7,05E-02 | 4,61E+00 | 0,00E+00 |
| | HC | 7,44E-04 | 3,65E-02 | -5,08E-02 | 7,63E-02 | 1,57E+00 | 4,54E-01 | 3,08E-01 | 0,00E+00 |
| | PM uitlaat | 4,67E-04 | 6,64E-02 | -3,25E-01 | 9,61E-01 | 1,14E+00 | 5,46E-01 | 2,90E-01 | 0,00E+00 |

Tabel 70: Parameters in CD mode voor PHEV

| PHEV Parameters CD mode | | Alfa | Bèta | Gamma | Delta | Epsilon | Zita | Eta | RF |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Kleine benzine** | EC | 1,08E-04 | -1,01E-02 | 6,76E-01 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 1,00E+00 | 0,00E+00 |
| **Medium benzine** | EC | 1,23E-04 | -1,22E-02 | 8,56E-01 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 1,00E+00 | 0,00E+00 |
| **Grote benzine** | EC | 1,17E-04 | -1,30E-02 | 1,06E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 1,00E+00 | 0,00E+00 |
| **Grote diesel** | EC | 1,32E-04 | -1,44E-02 | 1,04E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 1,00E+00 | 0,00E+00 |

Tabel 71: Parameters voor conventionele voertuigen (**Bron: COPERT 5.3**)

| Conventioneel Parameters | | Alfa | Bèta | Gamma | Delta | Epsilon | Zita | Hta | RF |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Kleine benzine** | FC | 4,80E-03 | -2,53E-01 | 2,10E+01 | 2,54E-13 | 8,01E-04 | 9,13E-02 | 3,51E+00 | 0,00E+00 |
| | NOx | -8,07E-04 | 1,67E-01 | 1,27E-01 | -5,14E-01 | 3,69E-02 | 2,40E+00 | 1,40E-06 | 0,00E+00 |
| | CO | 7,10E-04 | -1,48E-01 | 9,13E+00 | 8,82E+00 | 2,00E-03 | -5,45E-01 | 3,87E+01 | 0,00E+00 |
| | HC | 4,38E-06 | -8,72E-04 | 5,38E-02 | -9,25E-02 | 2,91E-04 | -7,71E-02 | 5,94E+00 | 0,00E+00 |
| | PM uitlaat | 5,60E-07 | -1,17E-04 | 7,46E-03 | 7,40E-03 | 9,33E-05 | -3,49E-02 | 3,51E+00 | 0,00E+00 |
| **Medium benzine** | FC | 1,32E-04 | 5,49E-03 | 2,62E+00 | 1,73E-09 | -8,50E-05 | 2,36E-02 | 3,44E-01 | 0,00E+00 |
| | NOx | -8,07E-04 | 1,67E-01 | 1,27E-01 | -5,14E-01 | 3,69E-02 | 2,40E+00 | 1,40E-06 | 0,00E+00 |
| | CO | 7,10E-04 | -1,48E-01 | 9,13E+00 | 8,82E+00 | 2,00E-03 | -5,45E-01 | 3,87E+01 | 0,00E+00 |
| | HC | 4,38E-06 | -8,72E-04 | 5,38E-02 | -9,25E-02 | 2,91E-04 | -7,71E-02 | 5,94E+00 | 0,00E+00 |
| | PM uitlaat | 5,60E-07 | -1,17E-04 | 7,46E-03 | 7,40E-03 | 9,33E-05 | -3,49E-02 | 3,51E+00 | 0,00E+00 |
| **Grote benzine** | FC | 7,00E-13 | -1,56E-03 | 3,25E+00 | 2,85E-09 | -1,08E-04 | 1,89E-02 | 2,60E-01 | 0,00E+00 |
| | NOx | -8,07E-04 | 1,67E-01 | 1,27E-01 | -5,14E-01 | 3,69E-02 | 2,40E+00 | 1,40E-06 | 0,00E+00 |
| | CO | 7,10E-04 | -1,48E-01 | 9,13E+00 | 8,82E+00 | 2,00E-03 | -5,45E-01 | 3,87E+01 | 0,00E+00 |
| | HC | 4,38E-06 | -8,72E-04 | 5,38E-02 | -9,25E-02 | 2,91E-04 | -7,71E-02 | 5,94E+00 | 0,00E+00 |
| | PM uitlaat | 5,60E-07 | -1,17E-04 | 7,46E-03 | 7,40E-03 | 9,33E-05 | -3,49E-02 | 3,51E+00 | 0,00E+00 |
| **Kleine diesel** | FC | -1,30E-03 | 2,22E-01 | 1,64E+01 | 5,66E-09 | -1,84E-03 | 2,92E-01 | 2,38E+00 | 0,00E+00 |
| | NOx | 6,67E-05 | -1,14E-02 | 9,46E-01 | 1,92E+00 | -5,15E-05 | 4,26E-03 | 1,00E+00 | 3,71E-01 |
| | CO | 3,31E-05 | -5,73E-03 | 2,82E-01 | 9,43E-01 | 3,54E-04 | -7,05E-02 | 4,61E+00 | 0,00E+00 |
| | HC | 7,44E-04 | 3,65E-02 | -5,08E-02 | 7,63E-02 | 1,57E+00 | 4,54E-01 | 3,08E-01 | 0,00E+00 |
| | PM uitlaat | 4,67E-04 | 6,64E-02 | -3,25E-01 | 9,61E-01 | 1,14E+00 | 5,46E-01 | 2,90E-01 | 0,00E+00 |
| **Medium diesel** | FC | -1,30E-03 | 2,22E-01 | 1,64E+01 | 5,66E-09 | -1,84E-03 | 2,92E-01 | 2,38E+00 | 0,00E+00 |
| | NOx | 6,67E-05 | -1,14E-02 | 9,46E-01 | 1,92E+00 | -5,15E-05 | 4,26E-03 | 1,00E+00 | 3,71E-01 |
| | CO | 3,31E-05 | -5,73E-03 | 2,82E-01 | 9,43E-01 | 3,54E-04 | -7,05E-02 | 4,61E+00 | 0,00E+00 |
| | HC | 7,44E-04 | 3,65E-02 | -5,08E-02 | 7,63E-02 | 1,57E+00 | 4,54E-01 | 3,08E-01 | 0,00E+00 |
| | PM uitlaat | 4,67E-04 | 6,64E-02 | -3,25E-01 | 9,61E-01 | 1,14E+00 | 5,46E-01 | 2,90E-01 | 0,00E+00 |
| **Grote diesel** | FC | 7,03E-04 | 1,32E-02 | 1,37E+01 | 3,62E-11 | -5,47E-04 | 1,18E-01 | 1,65E+00 | 0,00E+00 |
| | NOx | 6,67E-05 | -1,14E-02 | 9,46E-01 | 1,92E+00 | -5,15E-05 | 4,26E-03 | 1,00E+00 | 3,71E-01 |
| | CO | 3,31E-05 | -5,73E-03 | 2,82E-01 | 9,43E-01 | 3,54E-04 | -7,05E-02 | 4,61E+00 | 0,00E+00 |
| | HC | 7,44E-04 | 3,65E-02 | -5,08E-02 | 7,63E-02 | 1,57E+00 | 4,54E-01 | 3,08E-01 | 0,00E+00 |
| | PM uitlaat | 4,67E-04 | 6,64E-02 | -3,25E-01 | 9,61E-01 | 1,14E+00 | 5,46E-01 | 2,90E-01 | 0,00E+00 |

Tabel 72: Verwachte verbetering in verschillende parameters van toekomstige PHEV

| Parameter | Scenario | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|
| **Wegbelasting** | Pessimistisch | 0,0% | -1,3% | -2,7% | -4,0% |
| | Matig | 0,0% | -4,0% | -8,0% | -12,0% |
| | Optimistisch | 0,0% | -7,3% | -14,7% | -22,0% |
| **Aerodynamische weerstand** | Pessimistisch | 0,0% | -3,3% | -6,7% | -10,0% |
| | Matig | 0,0% | -6,7% | -13,3% | -20,0% |
| | Optimistisch | 0,0% | -10,0% | -20,0% | -30,0% |
| **ICE eff%** | Pessimistisch | 0,0% | 3,3% | 6,7% | 10,0% |
| | Matig | 0,0% | 6,7% | 13,3% | 20,0% |
| | Optimistisch | 0,0% | 10,0% | 20,0% | 30,0% |
| **Gewicht (%)** | Pessimistisch | 0,0% | -1,3% | -2,7% | -4,0% |
| | Matig | 0,0% | -2,7% | -5,3% | -8,0% |
| | Optimistisch | 0,0% | -4,0% | -8,0% | -12,0% |
| **Electromotor** | Pessimistisch | 0,0% | 1,0% | 2,0% | 3,0% |
| | Matig | 0,0% | 2,0% | 4,0% | 6,0% |
| | Optimistisch | 0,0% | 3,0% | 6,0% | 9,0% |
| **Batterij capaciteit** | Pessimistisch | 0,0% | 6,7% | 13,3% | 20,0% |
| | Matig | 0,0% | 13,3% | 26,7% | 40,0% |
| | Optimistisch | 0,0% | 20,0% | 40,0% | 60,0% |

Tabel 73: Totaal energieverbruik vermindering in vergelijking met nulsituatie (%)

| | Scenario | Totale energieverbruiksvermindering van t.o.v. nulsituatie (%) |
|---|---|---|
| **Medium benzine** | Geval 20 | 13% |
| | Geval 21 | 24% |
| | Geval 22 | 33% |
| **Grote benzine** | Geval 20 | 9% |
| | Geval 21 | 20% |
| | Geval 22 | 30% |
| **Grote diesel** | Geval 20 | 14% |
| | Geval 21 | 17% |
| | Geval 22 | 18% |

Tabel 74: Brandstofverbruik COPERT stadsbus 15- 18t

| Gem. snelheid (km/h) | COPERT brandstofverbruik stadsbussen Standard 15 - 18 t (kg/100km) |
|---|---|
| 17,5 | 43,6 |
| 23,3 | 37,2 |
| 34,0 | 33,2 |
| 48,3 | 27,5 |