

Factsheets

Energiedragers voor

Wegverkeer

TNO 2023 R12023 – 23 oktober 2023

Factsheets

Energiedragers voor Wegverkeer

Auteurs	Ir. A.R.A. (Arjan) Eijk
Exemplaar nummer	2023-STL-RAP-100353010
Aantal pagina's	77 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	1
Opdrachtgever	RWS
Projectnaam	RWS INNOM
Projectnummer	060.52284

Alle rechten voorbehouden

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

© 2023 TNO

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave	3
1 Inleiding.....	6
1.1 Behandelde voertuigen, energiedragers en emissies	7
1.2 Toelichting op de gerapporteerde emissies.....	8
1.2.1 Klimaat (CO ₂)	8
1.2.2 Luchtkwaliteit.....	9
1.3 Informatiebronnen.....	10
1.4 Toelichting op onderscheiden voertuigcategorieën.....	10
1.4.1 Klimaat (CO ₂)	10
1.4.2 Luchtkwaliteit.....	11
1.5 Leeswijzer	12
2 Energiedrager kenmerken.....	13
2.1 Diesel.....	13
2.2 Dieselvevangers uit biomassa.....	13
2.2.1 Herkomst grondstoffen dieselvevangers.....	15
2.3 Benzine en Benzinevervanger.....	17
2.3.1 Herkomst grondstoffen benzinevervangers.....	19
2.4 LPG.....	20
2.5 CNG en LNG.....	21
2.5.1 Herkomst grondstoffen biogas.....	22
2.6 Elektriciteit.....	22
2.7 Waterstof.....	23
3 Personen- en bestelwagen emissies.....	25
3.1 Personen- en bestelauto's diesel.....	25
3.1.1 Klimaat (CO _{2-eq}).....	25
3.1.2 Luchtkwaliteit.....	27
3.2 Personen- en bestelvoertuigen op dieselvevangers	28
3.2.1 Klimaat (CO _{2eq}).....	28
3.2.2 Luchtkwaliteit.....	29
3.3 Personen- en bestelwagens op benzine.....	30
3.3.1 Klimaat (CO ₂)	30
3.3.2 Luchtkwaliteit.....	32
3.4 Personen- en bestelwagens op benzinevervangers.....	33
3.4.1 Klimaat (CO _{2eq}).....	33
3.4.2 Luchtkwaliteit.....	34
3.5 Personen- en bestelwagens op LPG en bio-LPG.....	34
3.5.1 Klimaat (CO ₂)	34
3.5.2 Luchtkwaliteit.....	35
3.6 Personen- en bestelwagens aardgas.....	36
3.6.1 Klimaat (CO ₂)	36
3.7 Personen- en bestelwagens batterij-elektrisch.....	37
3.7.1 Klimaat (CO ₂)	37
3.7.2 Luchtkwaliteit.....	39
3.8 Personen- en bestelwagens op waterstof.....	39
3.8.1 Klimaat (CO ₂)	39

3.8.2	Luchtkwaliteit.....	40
3.9	Personenwagens overzicht.....	40
3.9.1	Klimaat (CO ₂)	40
3.9.2	Luchtkwaliteit.....	44
3.10	Bestelwagens overzicht.....	45
3.10.1	Klimaat (CO ₂)	45
3.10.2	Luchtkwaliteit.....	48
4	Vrachtwagens en trekker oplegger emissies	50
4.1	Vrachtwagens en trekker opleggers op diesel.....	50
4.1.1	Klimaat (CO ₂)	50
4.1.2	Luchtkwaliteit.....	52
4.2	Vrachtwagens en trekker opleggers op dieselvangers uit biomassa.....	53
4.2.1	Klimaat (CO ₂)	53
4.2.2	Luchtkwaliteit.....	55
4.3	Vrachtwagens en trekker opleggers op LNG en bio-LNG.....	55
4.3.1	Klimaat (CO ₂)	56
4.3.2	Luchtkwaliteit.....	57
4.4	Vrachtwagens en trekker opleggers batterij-elektrisch.....	57
4.4.1	Klimaat (CO ₂)	57
4.4.2	Luchtkwaliteit.....	58
4.5	Vrachtwagens en trekker opleggers op waterstof.....	58
4.5.1	Klimaat (CO ₂)	58
4.5.2	Luchtkwaliteit.....	61
4.6	Vrachtwagens overzicht.....	61
4.6.1	Klimaat (CO ₂)	61
4.6.2	Luchtkwaliteit.....	63
5	Bussen.....	65
5.1	Bussen op diesel.....	65
5.1.1	Klimaat (CO ₂)	65
5.1.2	Luchtkwaliteit.....	66
5.2	Bussen op dieselvangers uit biomassa.....	67
5.2.1	Klimaat (CO ₂)	67
5.2.2	Luchtkwaliteit.....	68
5.3	Bussen batterij-elektrisch	68
5.3.1	Klimaat (CO ₂)	68
5.3.2	Luchtkwaliteit.....	69
5.4	Bussen op waterstof	70
5.4.1	Klimaat (CO ₂)	70
5.4.2	Luchtkwaliteit.....	71
5.5	Bussen overzicht.....	71
5.5.1	Klimaat (CO ₂)	71
5.5.2	Luchtkwaliteit.....	72
6	Bronnen	73
6.1	Gebruikte bronnen voor deze studie.....	73
6.1.1	Luchtkwaliteit, Luchtverontreinigende emissies.....	73
6.1.2	Klimaat: CO ₂ -emissies, brandstofverbruik en energiegebruik	73
6.1.3	Emissies in de brandstofproductieketen	74
6.1.4	Overige kenmerken.....	75

Bijlage

[Bijlage A:](#) Overzicht energiedragers

75

1 Inleiding

Dit document beschrijft een update van de 'Factsheets Brandstoffen'¹ voor verschillende modaliteiten en energiedragers uit 2019 en 2021. Deze Factsheets zijn inmiddels door ontwikkelingen en nieuwe inzichten op het gebied van brandstoffen en voertuigtechnologie verouderd. De update is bedoeld om de meest recente inzichten te geven in de CO₂, fijnstof (PM₁₀) en NO_x emissies van moderne voertuig-energiedrager combinaties onder praktijkomstandigheden. Daarnaast worden ook de CO₂-emissies in de brandstofketen beschreven. De behandelde voertuig-energiedrager combinaties staan in de overzichtstabel in paragraaf 1.1 weergegeven.

De in paragraaf 1.1 genoemde voertuig-energiedrager combinaties zijn niet langer in afzonderlijke Factsheets beschreven, maar samengevat in één rapportage. In opeenvolgende hoofdstukken worden personen-, bestel-, vrachtwagens en trekker-opleggers en tenslotte bussen op de meest voorkomende energiedragers beschreven. Ieder hoofdstuk eindigt met een overzicht van de emissies van de behandelde modaliteit. De informatie uit de Factsheets kan worden gebruikt wanneer vlooteigenaren voertuigen gaan aanschaffen en de milieueffecten van het gebruik van deze voertuigen willen meewegen in hun beslissing. Daarnaast kan het beleidsmakers een eerste inzicht geven in de effecten van brandstof-gerelateerde maatregelen ter vermindering van de voertuigemissies.

¹ <https://rwsduurzamemobiliteit.nl/beleid/routeradar/factsheets-energiedragers-wegvervoer/>

De in deze Factsheets gepresenteerde gegevens voor voertuigemissies van verschillende voertuigklassen op diverse energiedragers betreffen gemiddelde praktijkemissies. De gepresenteerde gegevens zijn zoveel mogelijk gebaseerd op de officiële Nederlandse emissiefactoren voor wegverkeer, die in de Taakgroep Verkeer en Vervoer door TNO in samenwerking met o.a. RIVM, PBL en CBS worden vastgesteld voor gebruik in landelijke rekenmodellen en rapportages van PBL en RIVM en in lokale modellen voor berekening van luchtkwaliteit.

Praktijkemissiefactoren

Praktijkemissiefactoren geven weer hoeveel voertuigen binnen een bepaalde categorie onder bepaalde omstandigheden gemiddeld uitstoten van verschillende emissiecomponenten, zoals NO_x, PM₁₀ of CO₂. Deze emissiefactoren zijn zoveel mogelijk gebaseerd op door TNO uitgevoerde emissiemetingen aan voertuigen op de weg onder realistische praktijkomstandigheden. Voor voertuigcategorieën waarvoor geen officiële emissiefactoren beschikbaar zijn, zijn inschattingen van de praktijkemissies op een zo goed mogelijke manier afgeleid uit beschikbare data voor metingen op de weg en/of metingen uitgevoerd in een laboratorium, bij voorkeur gebruik makend van uit de praktijk afgeleide rijpatronen. Daar waar nodig en mogelijk, is deze informatie verder aangevuld met resultaten uit internationale studies op het gebied van voertuigemissies.

Fabrieksopgaven

Door een groot aantal oorzaken kunnen emissies in de praktijk aanzienlijk afwijken van waarden zoals gemeten op de typekeuringstest (ook wel fabrieksopgaven genoemd) en de daarvoor geldende emissielimieten. De afwijking tussen typekeur- en praktijkwaarden kan sterk verschillen per type voertuig, per brandstoftype, per wetgevingsklasse (Euro-norm) en voor verschillende gebruiks- en verkeersomstandigheden, zoals rijden in de stad of op snelweg met of zonder congestie.

Informatie over de resultaten van door TNO uitgevoerde emissiemeetprogramma's, en de onderliggende methodieken, is te vinden op www.tno.nl (zie ook het document "TNO 2020 R10784 - Bronnen en Achtergrondinformatie").

1.1 Behandelde voertuigen, energiedragers en emissies

De voertuigcategorieën en energiedragers die aan bod komen in deze rapportage zijn weergegeven in Tabel 1. Bij elke energiedrager wordt zowel de fossiele als ook de hernieuwbare variant behandeld.

Tabel 1: Combinaties van voertuigcategorieën en energiedragers die worden behandeld in dit rapport.

	Diesel	Dieselvervangers uit biomassa	Plug-in hybride - Diesel	Benzine	Benzinevervangers uit biomassa	Plug-in hybride - Benzine	(Bio)LPG	(Bio)LNG	Elektrisch	Waterstof
Personen- en bestelauto's	X	x	x	x	x	x	x		x	x
Vrachtauto's en trekker opleggers	X	x						x	x	x
Bussen	X	x							x	x

Dit rapport beperkt zich tot combinaties van categorieën wegvoertuigen en brandstoffen die op dit moment in Nederland op de weg rijden of op commerciële basis beschikbaar zijn. Voor de bepaling van emissies is eveneens uitgegaan van de Nederlands situatie, bijvoorbeeld met betrekking tot het gebruik van de voertuigen en de herkomst van de brandstoffen.

1.2 Toelichting op de gerapporteerde emissies

In deze rapportage wordt onderscheid gemaakt tussen emissies die effect hebben op het klimaat en op luchtkwaliteit.

De luchtverontreinigende emissies (NO_x en PM₁₀) in dit rapport betreffen de uitlaatgasemissies en slijtage emissies (PM₁₀) van remmen en banden. Bij broeikasgasemissies worden, in tegenstelling tot de luchtverontreinigende emissies, de emissies in de gehele keten van well-to-wheel (WTW) gerapporteerd. Aangezien in de keten naast CO₂ ook andere broeikasgassen kunnen vrijkomen worden de WTW-broeikasgassen in CO₂ equivalenten gerapporteerd.

In de paragrafen over voertuigemissies worden voor biobrandstoffen wél uitlaatgasemissies gepresenteerd. Deze worden echter bij de rapportage van ketenemissies volgens de richtlijnen van IPPC weer nul verondersteld en aan de keten toegekend.

1.2.1 Klimaat (CO₂)

De uitstoot van CO₂ kan worden onderverdeeld in uitlaatemissies, ook wel 'tank-to-wheel' (TTW) en emissies ten gevolge van productie en distributie van energiedragers, ook wel 'well-to-tank' (WTT) genoemd. De totale ketenemissies worden aangeduid als 'well-to-wheel (WTW).

Ook bij de productie van voertuigen en de verwerking aan het einde van de levensduur komen emissies vrij. Deze emissies worden ook wel 'life cycle' emissies genoemd. Cijfers over indirecte emissies die het gevolg zijn van de productie en verwerking van voertuigen zijn beperkt beschikbaar en omgeven met veel onzekerheid. Dergelijke emissies vallen buiten de scope van deze studie en worden in dit rapport niet behandeld.

Uitlaatemissies (TTW)

CO₂-uitlaatemissies zijn het gevolg van het verbranden van koolstofhoudende brandstof, zoals benzine, diesel, LPG, CNG of LNG. Bij de verbranding van pure biobrandstof geldt dat er wel CO₂ uit de uitlaat komt. Echter, volgens de rekenregels van het IPCC worden de CO₂-emissies uit de uitlaat niet toegerekend aan het voertuig, maar aan de productie van de energiedrager. Elektrische voertuigen en voertuigen op waterstof (met een brandstofcel) stoten zelf geen CO₂ uit.

Ketenemissies (WTW)

Naast CO₂-emissies uit de uitlaat, wordt er ook CO₂ geëmitteerd bij de productie en distributie van energiedragers. Voor fossiele brandstoffen zijn deze onder andere het gevolg van de energie die wordt opgewekt om olie te raffineren. Deze emissies in combinatie met de uitlaatemissies, zijn ook wel bekend als 'well-to-wheel' of ketenemissies.

De emissies voor de productie van de biobrandstof hangen sterk af van de gebruikte grondstof en conversietechniek. Voor fossiele brandstoffen is de diversiteit aan grondstoffen en productiemethoden beperkt, maar treden ook verschillen per productieplant op door bijvoorbeeld verschillen in beheersing in affakkelen van gas. Om die reden wordt er voor deze energiedragers een gemiddelde emissiewaarde per energiedrager gepresenteerd. Door de veelheid aan mogelijke grondstoffen en productiemethoden worden voor biobrandstoffen de meest voorkomende varianten weergegeven en een gemiddelde emissiewaarde indien mogelijk. Deze informatie is gegenereerd op basis van de rapportage van de Nederlandse Emissieautoriteit.

Bij de productie van elektriciteit en waterstof wordt CO₂ uitgestoten wanneer deze worden opgewekt met behulp van fossiele brandstoffen. De CO₂ uitstoot voor de productie van elektriciteit neemt in Nederland de laatste jaren af door de inzet van hernieuwbare energie (biomassa) en door een toename van wind- en zonne-energie.

Bij de productie en distributie van (bio)brandstoffen komen naast CO₂ ook andere broeikasgassen vrij. Het broeikas effect van deze stoffen wordt omgerekend in zogenaamde CO₂ equivalenten. De totale well-to-tank emissies worden daarom uitgedrukt in CO₂ equivalenten.

1.2.2 Luchtkwaliteit

Naast klimaatschade, leidt het gebruik van voertuigen ook tot luchtverontreiniging. In tegenstelling tot CO₂, leiden deze luchtverontreinigende stoffen tot schade aan de menselijke gezondheid en, in het geval van NO_x, ook aan de natuur.

Voertuigemissies bestaan uit verschillende componenten. Relevante luchtverontreinigende componenten zijn stikstofoxiden (NO_x) en fijnstof (PM₁₀). Deze worden beiden behandeld in deze rapportage. Voor fijnstof geldt dat het niet alleen uit de uitlaat komt, maar ook wordt veroorzaakt door slijtage van wegdek, banden en remmen. Andere luchtverontreinigende stoffen worden enkel vermeld als zij in significante mate worden uitgestoten.

In tegenstelling tot klimaat belastende stoffen, geldt voor luchtverontreinigende emissies dat de locatie waar ze worden uitgestoten van groot belang is. Bijvoorbeeld luchtverontreinigende emissies die worden uitgestoten buiten de nabijheid van mensen, hebben slechts in beperkte mate effect op de volksgezondheid. In dit rapport worden van deze stoffen daarom alleen de tank-to-wheel emissies gerapporteerd.

1.3 Informatiebronnen

De emissies die direct afkomstig zijn van het voertuig zijn zoveel mogelijk afgeleid uit metingen van TNO. Vanwege de grote hoeveelheid verschillende voertuigen (voertuigcategorieën, leeftijden, brandstoftypen, gewicht etc.), is er de laatste decennia binnen het testprogramma steeds meer voor gekozen om de inspanningen te richten op de voertuigen die het sterkst bijdragen aan de emissies. Vanwege de historisch hoge uitstoot van luchtverontreinigende stoffen en hun grote aandeel in de gereden kilometers zijn er door de jaren heen vooral veel metingen verricht aan dieselvoertuigen.

Doordat voor dieselvoertuigen de meeste data beschikbaar is, zijn de gerapporteerde emissies van deze voertuigen het meest robuust.

Voor voertuigen op andere brandstoffen zoals benzine of CNG geldt dat TNO ook voldoende metingen heeft uitgevoerd om emissiefactoren te bepalen, eventueel in combinatie met literatuur zoals vermeld in “TNO 2020 R10784 – 22 Bronnen en Achtergrond informatie”. De waarden voor de emissies gerelateerd aan de productie van fossiele brandstoffen (WTT) bestaan in deze studie uit gemiddelden of referentiewaarden uit algemeen erkende bronnen zoals de RED, de NEA rapportages, CBS en/of publicaties van het PBL. Door voortschrijdend inzicht is bijvoorbeeld de referentiewaarde voor fossiele brandstoffen ook verhoogd in de laatste versie van de Richtlijn Hernieuwbare Energie (2018/2001 oftewel REDII). In aanvulling op de RED II is ondertussen ook een RED III (2021/20218) voorstel ontwikkeld. De RED III is echter geen vervanging van de RED II en bevat ook meer actuele referentiewaarden, vandaar dat in dit document naar de RED II verwezen wordt.

De impact van biobrandstoffen op luchtverontreinigende emissies is alleen kwalitatief beschreven op basis van een studie van de Advanced Motor Fuels Technology Collaboration Programme (Nylund et al., 2018). Hoewel er wel een uitgebreide literatuurstudie heeft plaatsgevonden, blijkt dat veel studies over dit onderwerp verouderd zijn, omdat het Nederlandse wagenpark sinds het verschijnen van deze studie vernieuwd is en de strengere emissie-eisen van voertuigen een grote rol spelen bij de uiteindelijke impact. Ook waren veel studies internationaal. In Nederland zijn recent effecten van HVO op uitlaatgasemissies (NO_x) onderzocht. De resultaten van dit onderzoek worden eind 2023 gepubliceerd.

1.4 Toelichting op onderscheiden voertuigcategorieën

1.4.1 Klimaat (CO₂)

In tegenstelling tot de luchtverontreinigende emissies geldt voor de CO₂-emissies wel dat deze sterk worden beïnvloed door de massa van het voertuig. Een zwaarder voertuigen stoot meer CO₂ uit dan een lichter voertuig met dezelfde brandstof en emissie reducerende technologieën. Om die reden wordt er voor de CO₂-emissies onderscheid gemaakt naar verschillende grootteklassen. Voor personenauto's is dit onderscheid gemaakt op basis van marktsegmenten^{2,3,4}.

² <https://raivereniging.nl/artikel/marktinformatie/branche-analyses/marktinformatie-personenautos.html>

³ <https://www.rdc.nl/wp-content/uploads/2019/01/Verklaring-RDC-segmenten-2-personenautos-201803.pdf>

⁴ <https://www.raivereniging.nl/actueel/nieuws/kerncijfers-auto-and-mobiliteit-en-tweewielers-2022-gepubliceerd/>

Voor bestelauto's is er onderscheid gemaakt in drie klassen op basis van het referentiegewicht overeenkomstig met de gewichtsgrenzen die worden gehanteerd in de Europese emissiestandaarden voor bestelauto's (lichter dan 1305 kg, zwaarder dan 1305 kg en lichter dan 1760 kg en zwaarder dan 1760 kg). De meeste bestelauto's vallen tegenwoordig in het zwaardere segment.

Typische oorzaken van een afwijking tussen de gerapporteerde CO₂-emissiefactoren en die van een individueel voertuig binnen dezelfde categorie zijn:

- het voertuiggewicht: ook binnen een voertuigcategorie is de spreiding aanzienlijk;
- variaties in het rijgedrag, zoals hierboven beschreven voor de luchtverontreinigende emissies;
- externe omstandigheden, zoals het weer.

Een groot deel van de emissiefactoren die in dit rapport worden weergegeven, worden ook gebruikt in landelijke rekenmodellen van RIVM en PBL. Er bestaat een landelijke werkgroep waarin de ontwikkeling van emissiefactoren en de gevolgen ervan worden besproken. Ten behoeve van het gebruik van de emissiefactoren in deze doorrekeningen is ook een technisch rapport beschikbaar waarin de robuustheid van de emissiefactoren wordt uiteengezet⁵.

1.4.2 Luchtkwaliteit

Ten aanzien van de luchtverontreinigende emissies (NO_x en PM₁₀) wordt voor de verschillende combinaties van voertuigen en brandstoffen onderscheid gemaakt tussen verschillende Euroklassen. Voertuigen behoren tot een bepaalde Euroklasse afhankelijk van de Europese emissiestandaard waaraan het voertuig bij introductie moest voldoen. De emissiestandaard zijn verschillend voor personenauto's, bestelauto's, vrachtwagens en bussen en worden elke één tot vijf jaar aangescherpt. Dit betekent dat nieuwere voertuigen aan een strengere norm hebben moeten voldoen. Voertuigen die nu op de markt komen, moeten voldoen aan de geldende standaard, te weten Euro 6d voor personen- en bestelauto's en Euro VI E voor vrachtwagens en bussen. Doordat de emissies van voertuigen van verschillende Euroklassen sterk van elkaar verschillen, worden voertuigen van verschillende Euroklassen van elkaar onderscheiden.

De massa van voertuigen binnen dezelfde voertuigcategorie, op dezelfde brandstof en binnen dezelfde Euroklasse heeft geen duidelijk effect op de luchtverontreinigende stoffen. Om die reden wordt er geen onderscheid gemaakt naar de grootte of massa van voertuigen.

De emissies die worden gerapporteerd in deze rapportage zijn representatief voor het gemiddelde van de voertuigcategorie. Voor het vaststellen van de gemiddelde CO₂ uitstoot per categorie (RDC label, personenvoertuigen) of gewichtsklasse (bestelwagens) is op basis van RDW data een gemiddelde per categorie of gewichtsklasse bepaald op basis van de best verkochte voertuigen over 2020-2023. De werkelijke uitstoot van individuele voertuigen kan hier aanzienlijk van afwijken.

⁵ TNO 2017. Uncertainty of the NO_x, SO_x, NH₃, PM₁₀, PM_{2,5}, EC_{2,5} and NMVOC emissions from transport. TNO 2017 R10854. 7 Augustus 2017.

Redenen voor afwijkingen ten aanzien van luchtvervuilende stoffen zoals NO_x en fijnstof (PM₁₀) zijn:

- verschillende motortechnologieën en nabehandelingstechnologieën en de instellingen van beiden;
- verschillen tussen de externe omstandigheden tijdens de test en in werkelijkheid, zoals de buitentemperatuur;
- variaties in het rijgedrag, zoals gereden snelheid (onder andere beïnvloed door het aandeel dat wordt gereden in de stad, buitenwegen of snelwegen) en afstand waardoor bijvoorbeeld de nabehandelingstechnologieën een andere temperatuur hebben;
- gebreken die optreden tijdens de levensduur, zoals kapotte katalysatoren of roetfilters; Overigens is in 2023 een deeltjesaantallen test in de APK opgenomen, waardoor defecten in roetfilters inmiddels snel gedetecteerd kunnen worden.

1.5 Leeswijzer

In deze rapportage wordt achtereenvolgens beschreven:

- **Hoofdstuk 2** - Energiedragers: De algemene karakteristieken van de energiedragers, het gaat bijvoorbeeld om de energiedichtheid en de kwaliteitsrichtlijn(en) waaraan voldaan moet worden.
- **Hoofdstuk 3** - Emissies van de personen- en bestelwagens / energiedrager combinaties De klimaat belastende (CO₂ en waar relevant) en de luchtverontreinigende emissies (zoals NO_x en PM₁₀) beschreven.
- **Hoofdstuk 4** - Emissies van de vrachtwagen en trekker oplegger / energiedrager combinaties. De klimaat belastende (CO₂ en waar relevant) en de luchtverontreinigende emissies (zoals NO_x en PM₁₀) beschreven
- **Hoofdstuk 5** - Emissies van de bussen / energiedrager combinaties. De klimaat belastende (CO₂ en waar relevant) en de luchtverontreinigende emissies (zoals NO_x en PM₁₀) beschreven
- **Hoofdstuk 6** – Bronnen. Hier staan de meest relevante bronnen die voor dit onderzoek gebruikt zijn benoemd.

2 Energiedrager kenmerken

2.1 Diesel

De specificaties waaraan een brandstof moet voldoen om diesel genoemd te mogen worden, zijn in de Europese Unie geregeld in de brandstofkwaliteitsrichtlijn ofwel de Fuel Quality Directive (FQD) (2009/30/EG) en in de EN-normen (EN590).⁶ Daarnaast zijn er andere brandstoffen die kunnen worden toegepast in dieselmotoren, al dan niet vermengd met fossiele diesel. Voorbeelden van dergelijke brandstoffen zijn Gas-to-Liquid (GTL), Fatty Acid Methyl Ester (FAME) en Hydrotreated Vegetable Oil (HVO). GTL wordt geproduceerd uit aardgas, terwijl FAME en HVO-biomassa als grondstof hebben. GTL valt buiten de scope van deze studie.

De energiedichtheid en specifieke energie (hoeveel energie vrijkomt bij verbranding) van diesel is hoog ten opzichte van andere brandstoffen die worden gebruikt voor wegtransport. Dit betekent dat er relatief veel kilometers kunnen worden gereden op een liter brandstof.

2.2 Dieselvervangers uit biomassa

Reguliere diesel' (EN590) kan naast fossiele diesel ook uit aandelen (hernieuwbare) dieselvervangers bestaan.

Voorbeelden van dergelijke vervangers zijn:

- *Fatty acid methyl esters* (FAME): brandstof uit plantaardige vetten en dierlijke oliën en vetten (EN14214);
- *Hydrotreated vegetable oil* (HVO): brandstof uit plantaardige vetten en dierlijke oliën en vetten (EN 15940);
- *Fischer Tropsch* (FT) diesel (drop-in diesel): brandstof uit biomassa zoals lignocellulic materials.

Binnen de EN590-norm mag er volgens bovengenoemde reguleringen maximaal 7 vol% FAME en ongeveer 30 vol% HVO worden bijgemengd. In principe kunnen dergelijke EN590-blends in alle dieselmotoren van personen- en bestelauto's worden gebruikt. De 7% betreft een maximum: in de praktijk kan een blend ook minder FAME bevatten. HVO kan bovenop de 7% worden ingezet, waardoor een blend zowel FAME als HVO kan bevatten.

De motoren zijn ontwikkeld/gehomologeerd op de EN590 norm en getypekeurd. Toepassing van een hogere blend (FAME > 7% en HVO > 30%) is voor nieuwere voertuigen soms toegestaan, maar het kan ook noodzakelijk zijn de typekeuring opnieuw uit te voeren. De normen voor paraffine brandstoffen (HVO) zijn vastgelegd in de EN15940 norm en moeten daar dus aan voldoen.

¹⁶ EN-normen zijn Europese normen. In dit geval brandstofnormen.

De norm limiteert de inzet niet direct tot 30% HVO, maar rond de 30% veranderen de eigenschappen van de brandstof dermate dat het product te licht wordt en niet langer aan de specificaties kan voldoen. In de praktijk kan dit ook boven de 30% zijn.

Motorfabrikanten hebben alleen trucks (Euro V en Euro VI) vrijgegeven voor gebruik van 100% HVO (volgens EN15940). Bij 'oudere' emissienormen vraagt vrijgave mogelijk eerst om aanpassingen van de motoren. Ook hebben bepaalde fabrikanten Euro 5 en Euro 6 blue HDI-motoren vrijgegeven voor gebruik van 100% HVO.

Het gebruik van diesel met hogere aandelen FAME of HVO buiten bovengenoemde normen, kan leiden tot versnelde slijtage en extra benodigd motoronderhoud⁷, zoals smeeroelieveroudering en vervuiling van brandstof/smeeroeliefilters. Door de toepassing van geavanceerdere motorregelingen en emissiecontrolesystemen kunnen modernere motoren (Euro 6/VI) niet automatisch goed overweg met brandstoffen die buiten de EN 590-norm vallen. Voor hogere blends van alternatieven (FAME > 7% en/of HVO > 30%) is daarom soms een aparte typekeuringstest nodig.

In hoeverre motoren zijn vrijgegeven voor het gebruik van alternatieven voor reguliere diesel kan veelal worden achterhaald via de voertuigfabrikant of -leverancier. Daarnaast geldt voor voertuigen met een verbrandingsmotor jonger dan oktober 2018 dat ze conform de eisen van de EU Richtlijn Infrastructuur Alternatieve Brandstoffen (2014/94/EU) nabij de vulmond van de brandstoftank voorzien dienen te zijn van een grafische aanduiding voor alle brandstoffen die in de auto getankt mogen worden. Dezelfde grafische aanduiding wordt sindsdien ook op het vulpistolen bij een tankstation aangebracht.

Er zijn hierbij wel verschillen tussen FAME en paraffine dieselbrandstof, zoals HVO. Het gebruik van paraffine brandstoffen resulteert vaak in een betere en schonere verbranding dan fossiele diesel als gevolg van het hoger cetaangetal (klopvastheid) van deze brandstoffen. Dit geldt niet voor FAME. Een belangrijke reden dat 100% toepassing van paraffine dieselbrandstoffen toch niet onder de EN590-norm valt is de lagere dichtheid van deze brandstoffen, waardoor de dichtheid bij hogere blends niet meer binnen de specificaties valt.

Het grootste deel van de diesel die in Nederland wordt verkocht, is een mengsel van fossiele diesel met maximaal 7% FAME. Dit wordt B7 genoemd en is ook als zodanig gelabeld aan de pompzuil. Ook bieden steeds meer tankstations hogere blends met HVO aan. HVO wordt hierbij vaak aangeduid met merk- en marketingnamen, zoals "blauwe diesel" of "hernieuwbare diesel". Biobrandstoffen in hoge mixen spelen vooral een rol voor het zware transportsegment in de vorm van bijvoorbeeld HVO of diesel met 30% FAME-aandeel.

De energiedichtheid en specifieke energie van diesel en van de verschillende producten die in Nederland voorkomen zijn weergegeven in Tabel 2⁸ en de Richtlijn Hernieuwbare Energie (2018/2001 ofwel RED II). Dieselvervangers in de vorm van biobrandstoffen hebben over het algemeen een lagere energiedichtheid dan diesel.

⁷ ACEA publication, B10 Diesel Vehicle Compatibility list 2022 update, December 2022 (www.acea.auto)

⁸ Renewable energy directive, directive 2018/2001 (RED II)

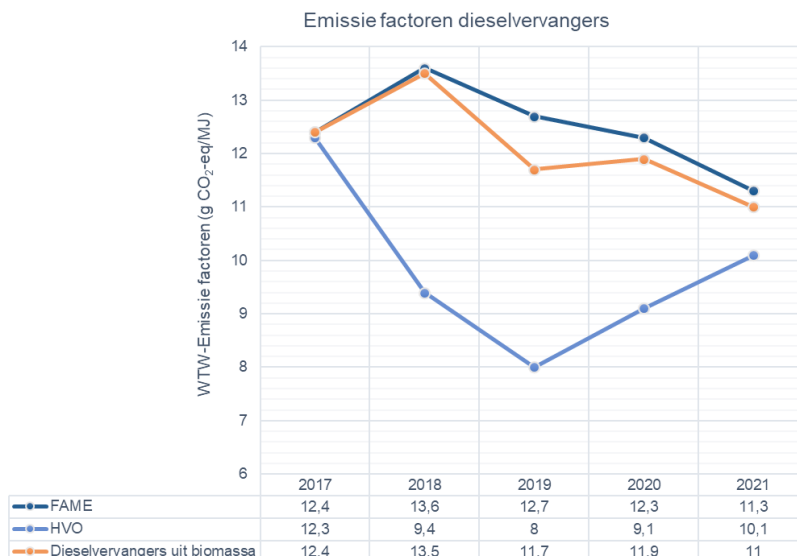
Tabel 2: Energiedichtheid en specifieke energie van diesel en dieselvangers⁸.

Brandstof	Specifieke energie (MJ/kg)	Energiedichtheid (MJ/L)
B0 (100% diesel)	43	36
B7 (FAME)	42,6	35,8
B100 (FAME)	37	33
B30 (FAME)	41.1-42.6	35.1-35.8
RD30 (HVO)	43-43,2	36.2-36.5

* RD30 staat voor renewable diesel en wordt gebruikt om het verschil tussen B30 (FAME) en de HVO-variant aan te duiden. Deze term wordt echter niet aan de pomp gebruikt, maar daar kan men deze varianten herkennen aan het brandstoflabel XTL. Naast XTL bestaan er brandstof labels voor B7, B10 en B100.

2.2.1 Herkomst grondstoffen dieselvangers

Figuur 1 illustreert de gemiddelde WTW emissiefactoren van verschillende dieselvangers zoals gerapporteerd door NEa tussen 2017 en 2021. Figuur 1 toont de emissiefactoren van verschillende op biomassa gebaseerde dieselvangers die zijn geïntroduceerd in de hernieuwbare energierichtlijn (REDII), ter vergelijking. De bereiken in dit Figuur verwijzen naar de maximale en minimale waarden zoals in de bron aangegeven.



Figuur 1: De emissie factoren van dieselvanger ingezet in Nederland⁹ in de jaren 2017 tot en met 2021¹⁰

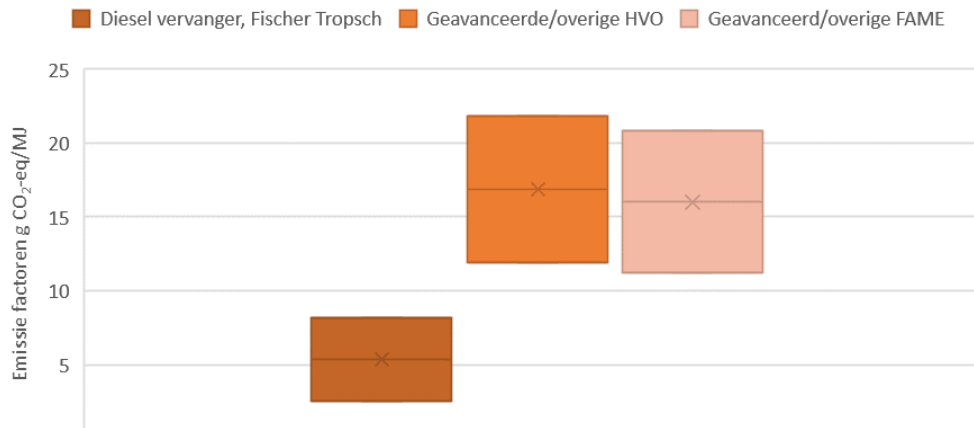
In Nederland gebruikt men biomassa-gebaseerde dieselvangers met gemiddeld 88% lagere WTW CO₂ eq-ketenemissies (FAME 88,1%; HVO 89,4%; Totaal biomassa-gebaseerde dieselvangers 88%¹¹) De waarden in Figuur 1 tellen alleen voor gebruik van pure biobrandstoffen zoals aangegeven in paragraaf 1.2.1.

⁹ In Dieselvanger mix in Nederland zit ook Fatty Acid Ethyl Ester (FAEE), dit is echter <1 % op energiebasis. Hierom hebben wij dit niet geïncludeerd

¹⁰ Rapportage Energie voor Vervoer in Nederland 2017 tot 2021. Naleving verplichtingen wet- en regelgeving Energie voor Vervoer

¹¹ Vergeleken met 95.1 g CO₂-eq/MJ van fossiele diesel.

Naast FAME en HVO kunnen Fischer-Tropsch-diesel of dimethylether (DME) geproduceerd uit biomassa ook fossiele diesel vervangen. Op dit moment worden ze echter niet commercieel geproduceerd, waardoor er geen aanbod is van dergelijke biobrandstoffen. Desalniettemin kunnen de broeikasgasemissiefactoren van deze biobrandstoffen veel lager zijn, zoals Figuur 2 laat zien.



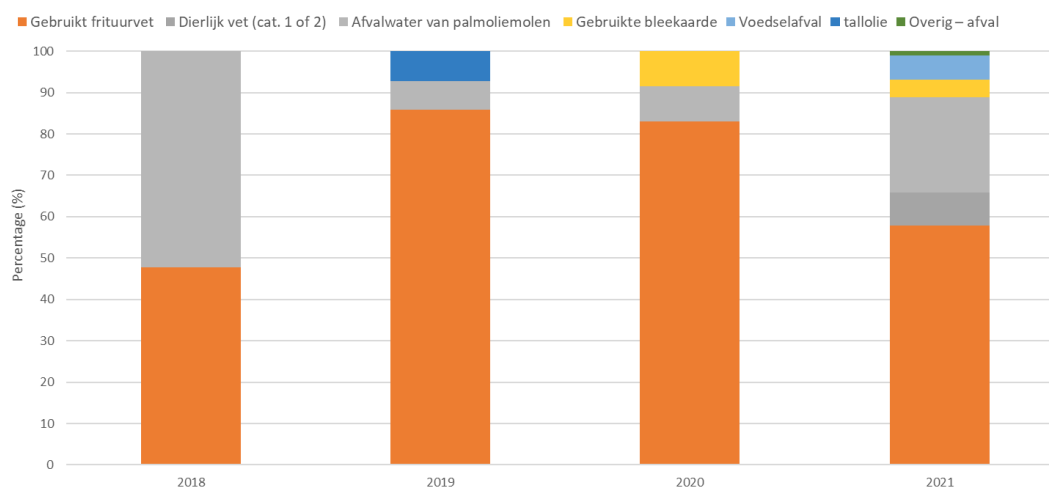
Figuur 2 : Het bereik van WTW CO₂-eq emissiefactoren zoals aangegeven in REDII ¹² voor geavanceerde dieselvervangers. ¹³

De variaties in Figuur 1 en 2 gerapporteerd door NEa tussen 2017 en 2021, kunnen worden verklaard door verschillende soorten biomassa die worden gebruikt voor de productie. Figuren 3 en 4 geven een overzicht uit welke feedstocks de dieselvervangers HVO en FAME bestonden in de jaren 2018 tot 2021 die onder de Nederlandse jaarverplichting op de markt zijn gebracht. FAME en HVO zijn bijna geheel geproduceerd uit afval en residuen, met name gebruikt frituurvet, dierlijk vet en afvalwater van palmoliemolens. De gemiddelde uitstoot in 2021 op basis van deze grondstoffen bedraagt respectievelijk 11, 13, en 13 g CO₂-eq/MJ.

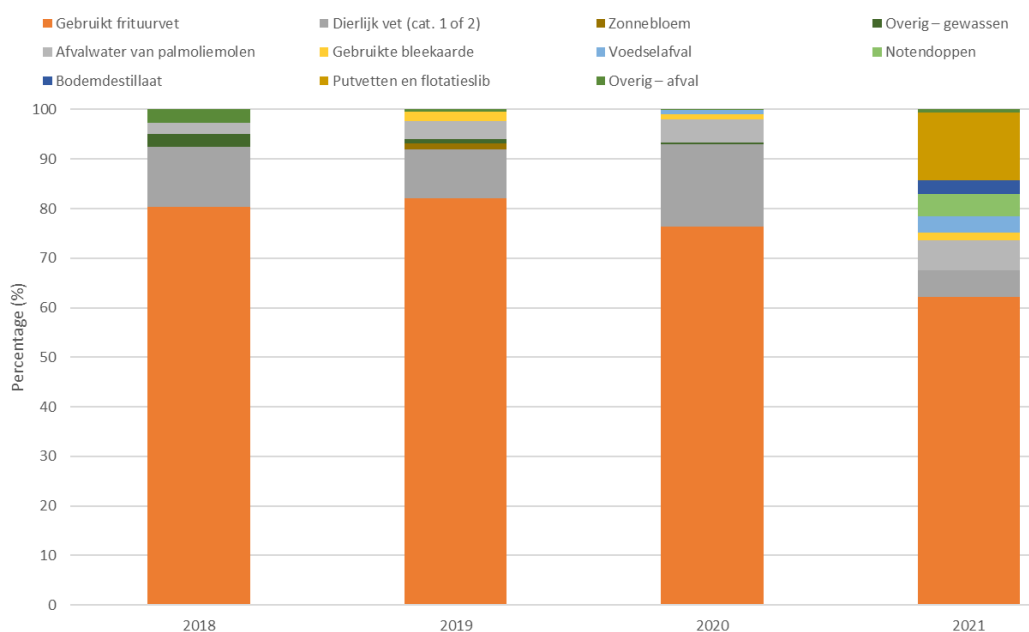
Het gebruik van voedselafval voor HVO is dit jaar voor het eerst sinds 2018 waargenomen, waarbij de gemiddelde uitstoot 15 g CO₂-eq/MJ bedraagt. Voor FAME is het aandeel gebruikt frituurvet en dierlijk vet vervangen door onder andere putvetten en flotatieslib, bodemdestillaat, en er is gebruikgemaakt van notendoppen. De gemiddelde WTW CO₂-eq uitstoot op basis van deze grondstoffen is respectievelijk 12, 13, en 9 g CO₂-eq/MJ. Biobrandstoffen uit afval en residuen kennen geen teeltemissies en geen zogenaamde indirecte emissies als gevolg van indirect landgebruik (ILUC).

¹² Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources.

¹³ Geavanceerde biofuels zijn fuels geproduceerd van verschillende biomassa zoals aangegeven in ANNEX IX, Part A, in REDII. Overige biofuels kunnen gevonden worden in PART B., bijvoorbeeld gebruikt frituurvet of dierlijk vet.



Figuur 3: Grondstoffenverdeling voor de biobrandstoffen ingezet onder de Nederlandse jaarverplichting in van HVO in de jaren 2018 tot 2021¹⁴



Figuur 4: Grondstoffenverdeling voor de biobrandstoffen ingezet onder de Nederlandse jaarverplichting in van FAME in de jaren 2018 tot en met 2021¹⁴

2.3 Benzine en Benzinevervanger

De minimale specificaties voor benzine zijn in de Europese Unie vastgelegd in de FQD (2009/30/EG) en in de Europese EN228-norm. In de meeste tankstations in Nederland wordt het sinds oktober 2019 verkocht als E10-brandstof, wat betekent dat er op volume basis maximaal 10% ethanol aan fossiele benzine is toegevoegd.

¹⁴ Rapportage Energie voor Vervoer in Nederland 2018 tot 2021. Naleving verplichtingen wet- en regelgeving Energie voor Vervoer, NEA jaarlijkse rapportage

Op een beperkt aantal plaatsen kan ook E85 getankt worden. Deze E85 bevat 85vol% ethanol en 15vol% fossiele benzine en kan worden toegepast in speciale flexfuel-motoren, die daarnaast ook kunnen rijden op E5 en E10, omdat 85 enkel het maximum aangeeft. Naast E10 en E85 zijn er ook ethanolmengsels in andere verhoudingen mogelijk, zoals voertuigen die kunnen rijden op E20. Volgens onderzoek van de CEN kunnen voertuigen die sinds 2011 op de markt zijn gekomen E20 als brandstof aan.¹⁵ Deze andere verhoudingen worden in Nederland weinig toegepast.

Tabel 3 toont de energiedichtheid en specifieke energie van benzine (E10) en van enkele hernieuwbare alternatieven die kunnen worden bijgemengd bij benzine. Bio-ethanol, bio-nafta en bio-ETBE worden daarvan het meeste gebruikt in Nederland. Ook bio-methanol kan worden bijgemengd. Bio-ETBE wordt als anti-klopmiddel toegevoegd aan benzine. Een hogere klopvastheid zorgt voor een regelmatigere loop van de motor en komt daarmee de verbranding ten goede. Bio-nafta heeft geen vaste energie-inhoud, maar een variabele: doordat het een restfractie is verschillen de specificaties.

De limieten voor bijmenging van bio-ethanol bij reguliere benzine (EN228) zijn afhankelijk van het maximum van 2,7% zuurstofgehalte voor E5 en 3,7% aan zuurstofgehalte voor E10(massapercentage). De AMVB¹⁶ schrijft voor dat bij E10 minimaal 8,5% biobrandstoffen bijgemengd moet worden, waarvan minimaal 7,5% ethanol. Verder mag aan E10 maximaal 10%vol ethanol worden bijgemengd óf 22%vol aan ethers (ETBE of MTBE).

Tabel 3: Energiedichtheid en specifieke energie voor benzinevervangers (REDII, 2018/2001 and TNO calculations)

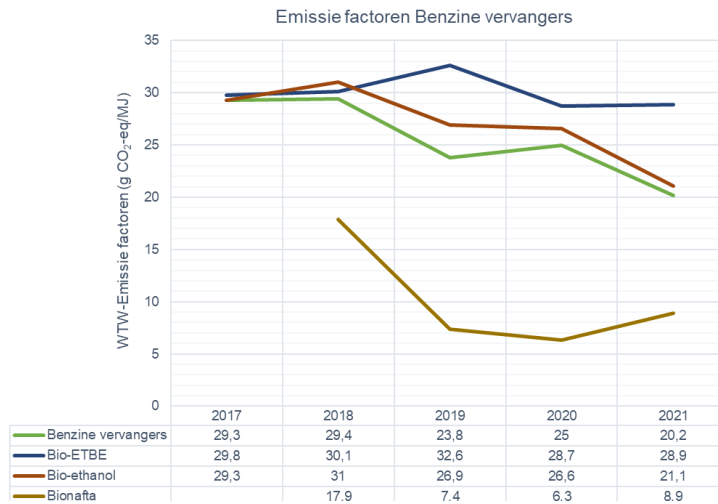
Brandstof	Specifieke energie (MJ/kg)	Energiedichtheid (MJ/L)
Fossiele benzine(E0)	43	32
Referentie benzine (E10)	41,3	30,9
Bioethanol (100%)	27	21
Bio-ETBE*	36	27
Bio-MTBE	35	26
Biomethanol (MEOH)	20	16

* Omdat ETBE en MTBE worden geproduceerd uit de combinatie van een fossiele grondstof (iso-buteen) met respectievelijk ethanol en methanol, worden ze als deels hernieuwbaar gezien (37% en 22%).

¹⁵<https://horizon-magazine.eu/article/why-raising-alcohol-content-europe-s-fuels-could-reduce-carbon-emissions.html>

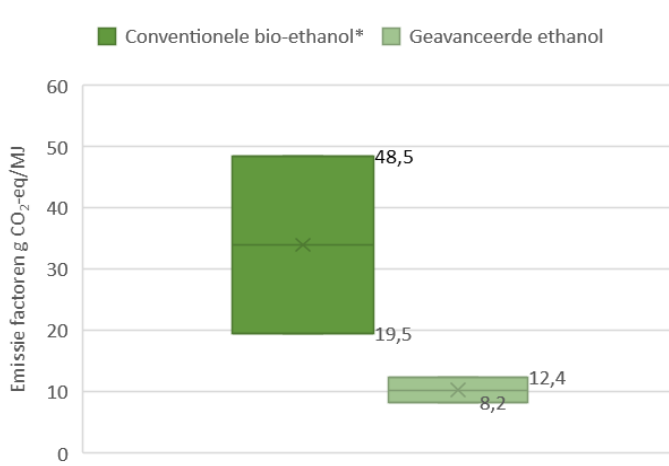
¹⁶ Besluit van 14 juni 2019 tot wijziging van het Activiteitenbesluit milieubeheer en het Besluit brandstoffen luchtverontreiniging in verband met de invoering van E10-benzine en de informatieplicht van leveranciers van brandstoffen - Eerste Kamer der State

2.3.1 Herkomst grondstoffen benzinevervangers



Figuur 5: CO₂-eq ketenemissies van fossiele benzine en benzinevervangers uit biomassa van 2017 tot 2021¹⁷.

Zoals te zien in Figuur 5, gebruikt men in Nederland biomassa-gebaseerde benzinevervangers met gemiddeld 78% lagere CO₂-eq ketenemissies (Bio-ETBE 69%; Bio-ethanol 77%; Bio-nafta, 90%; Totaal benzinevervangers uit biomassa 78%)¹⁸. De waarden in Figuur 5 tellen alleen voor gebruik van pure biobrandstoffen zoals uitgelegd in 2.3.1.



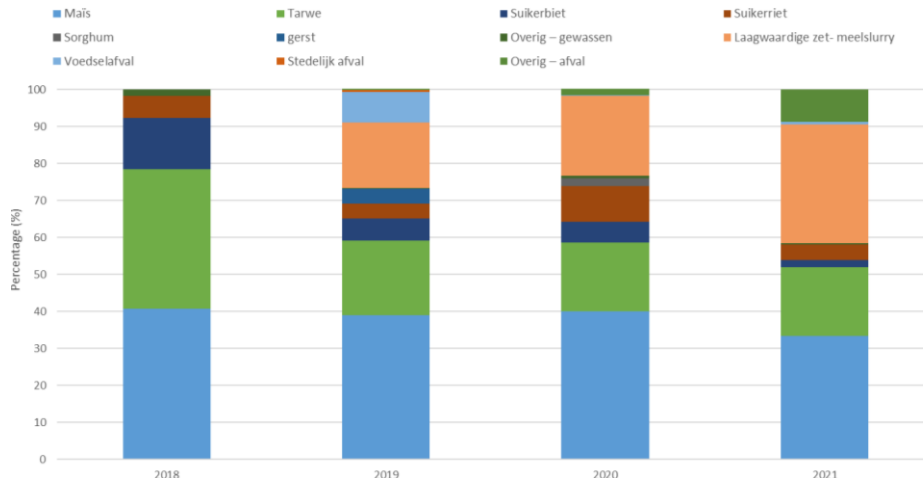
Figuur 6: Het bereik van CO₂-eq emissiefactoren zoals aangegeven in REDII voor conventionele en geavanceerde benzinevervangers¹⁹

¹⁷ "Energie voor Vervoer in Nederland 2018 tot 2021" Naleving verplichtingen wet- en regelgeving Energie voor Vervoer, NEA jaarlijkse rapportage

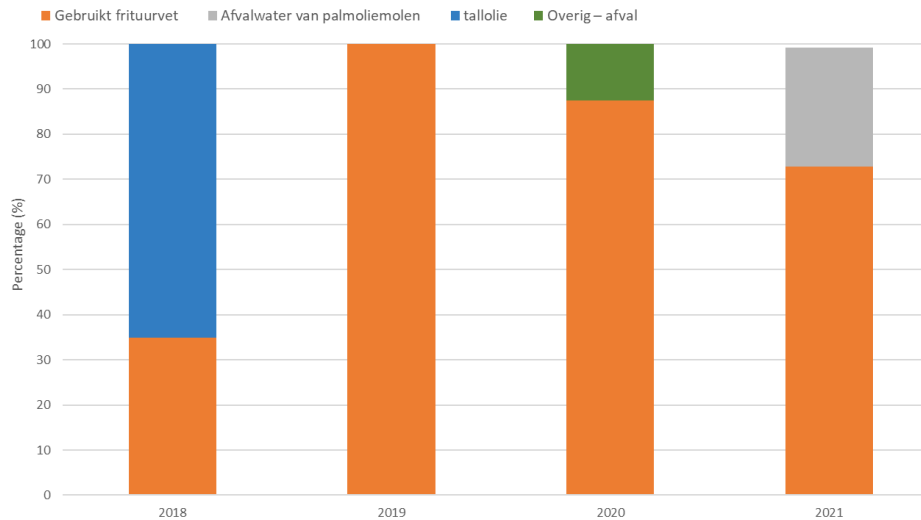
¹⁸ Vergeleken met 93.3 gCO₂-eq/MJ voor fossiele benzine

¹⁹ Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources.

Figuur 7 en Figuur 8 zijn een overzicht opgenomen van de grondstoffen waaruit de benzinevervangers bestonden die tussen 2018 en 2021 onder de Nederlandse jaarverplichting op de markt zijn gebracht. Bio-ETBE is hier buiten beschouwing gelaten omdat het minder dan 1% van de Nederlandse levering bedraagt.



Figuur 7: Grondstoffenverdeling voor de bio-ethanol ingezet onder de Nederlandse jaarverplichting in 2018 tot 2021 (NEa 2018 tot NEa, 2022)



Figuur 8: Grondstoffenverdeling voor de Bio-nafta ingezet onder de Nederlandse jaarverplichting in 2018 tot 2021 (NEa 2018 tot NEa, 2022)

2.4 LPG

LPG is in de Europese Unie gereguleerd als brandstof die bestaat uit een mengsel van koolwaterstofgassen, voornamelijk propaan (C₃H₈) en butaan (C₄H₁₀). LPG-referentiebrandstof heeft een C₃-gehalte van 30% tot 85% en een C₄-gehalte van 70% tot 15% (UN/ECE Reglement no. 83). De exacte samenstelling van LPG verschilt van land tot land. LPG wordt geproduceerd als bijproduct van olieraffinage en aardgasverwerking en kan volledig of gedeeltelijk vervangen worden door bio-LPG (ook wel aangeduid als bio-propaan). In Tabel 4 is de energiedichtheid en specifieke energie van Bio-LPG en LPG weergegeven.

Tabel 4: Energiedichtheid en specifieke energie LPG (RED II)

Brandstof	Specifieke energie (MJ/kg)	Energiedichtheid (MJ/L)
LPG	45 – 46	25 – 28
Bio-LPG	46	24

2.5 CNG en LNG

Aardgas wordt gebruikt als fossiele brandstof in zowel gasvormige toestand (CNG, ofwel ‘*compressed natural gas*’) als vloeibare toestand (LNG, ofwel ‘*liquid/liquefied natural gas*’). De CNG die in Nederland kan worden getankt, wordt getransporteerd door het bestaande aardgasnetwerk en wordt gecompriemd aan de pomp voordat het getankt wordt. Gegeven dat het Nederlandse aardgasnetwerk laagcalorisch aardgas bevat, is ook CNG in Nederland laagcalorisch (ook wel G25). In andere Europese landen is CNG ook beschikbaar als hoogcalorisch gas (ook wel G20). Dit hoogcalorisch gas bevat meer methaan en minder stikstof dan laagcalorisch gas.

In Nederland werd tot voor kort het grootste deel van het laagcalorisch aardgas dat via het gasnet wordt aangevoerd, gewonnen in Groningen en de Noordzee. In de toekomst zal steeds meer aardgas uit het buitenland worden geïmporteerd.

De hernieuwbare tegenhanger van aardgas is groengas dat wordt geproduceerd uit biogas of syngas. Biogas wordt geproduceerd uit vergisting van biomassa zoals mest en mais, of komt als stortgas vrij bij het verwerken van organisch afval. Naast biogas kan groengas ook uit syngas gemaakt worden. Syngas ontstaat bijvoorbeeld na vergassing van biomassa, zoals hout en is in dat geval ook biogeen.

In gecompriemde vorm wordt groengas aangeduid als bio-CNG of CBG (Compressed Bio-gas) en in vloeibare vorm als bio-LNG of LBG (Liquefied Biogas). Bio-LNG wordt niet toegepast in personen- en bestelauto's.

Tabel 5 toont de energiedichtheid en specifieke energie van CNG en LNG. Vooral de energiedichtheid van CNG is lager dan die van vloeibare brandstoffen. Als gevolg hiervan is een ongeveer 3 tot vijf keer grotere brandstoftank nodig dan voor diesel voor een vergelijkbare actieradius. Bio-CNG en Bio-LNG kennen doordat het biogas tot dezelfde kwaliteit wordt opgewerkt dezelfde dichtheid als de fossiele varianten en kunnen deze 1 op 1 vervangen.

Tabel 5 : Energiedichtheid en specifieke energie CNG en LNG²⁰²¹

Brandstof	Specifieke energie (MJ/kg)*	Energiedichtheid (MJ/L)
CNG (G25)	38	-
LNG (G20)	45	21-24

Noot: de waarden voor CNG en LNG hangen sterk af van de herkomst. Recent is de import sterk toegenomen wat een effect heeft op genoemde waarden.

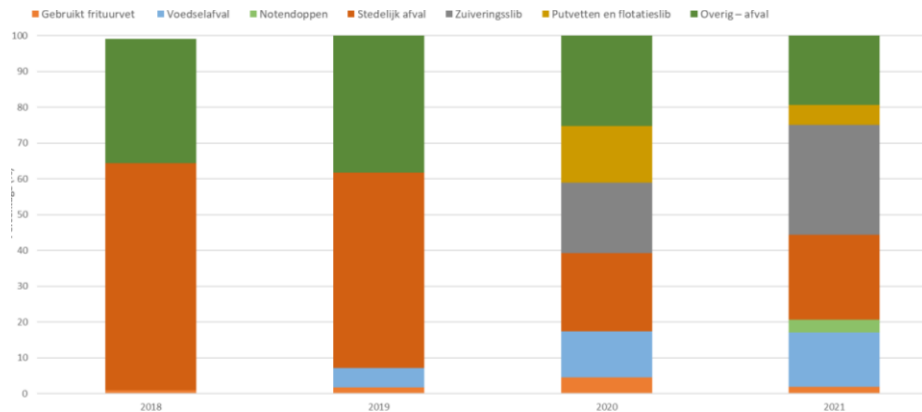
Noot: G25 verwijst naar laagcalorisch (Nederlands) gas, G20 verwijst naar hoogcalorisch gas

²⁰ JRC report, JEC Well to Tank report v5, JRC119036, 2020

²¹ Kampman et al, Bringing biofuels on the market: options to increase EU biofuel volumes beyond the current blending limits, CE Delft publication, July 2013

2.5.1 Herkomst grondstoffen biogas

In het biogas wat onder de Nederlandse jaarverplichting in 2021 op de Nederlandse markt werd gebracht, werd een veel gevarieerdere grondstoffenverdeling gebruikt dan in 2018. In Figuur 9, wordt het verschil duidelijk zichtbaar. In 2021 zijn onder andere zuiveringsslib, voedselafval, putvetten en rotatieslib gegroeid ten opzichte van 2018. Er geldt dat de CO₂-ketenemissies van biogas ongeveer 70% lager zijn dan de CO₂-ketenemissies van fossiele CNG in 2021.



Figuur 9: Grondstoffenverdeling voor de Biogas ingezet onder de Nederlandse jaarverplichting in 2018 tot 2021 (NEa 2018 tot NEa, 2021)

2.6 Elektriciteit

Elektriciteit is de energiedrager die nodig is voor voertuigen met een accupakket die middels een stekker moeten worden opgeladen. De opwekking van elektriciteit die elektrische voertuigen gebruiken vindt hoofdzakelijk plaats in energiecentrales en voor een toenemend deel met windmolens en zonnepanelen. Energiecentrales vallen onder het Europese Emissiehandelssysteem (ETS) dat de CO₂-uitstoot van de productie van elektriciteit reguleert.

Lithium-ion-accu's worden steeds lichter en compacter. Dat is vooral te danken aan grote inspanningen op het gebied van onderzoek en ontwikkeling van accu's. Door nieuwe, verbeterde en dunnere elektrodematerialen zullen hogere celspanningen mogelijk worden, waardoor het volume en gewicht van de accu's afnemen (Grafoid, 2015). Verschillende autofabrikanten en leveranciers verwachten dat de energie-inhoud van accu's in de komende 10-15 jaar met een factor twee zal toenemen (TNO, 2015).

De energiedichtheid van accu's is in vergelijking met benzine veel lager. Dat betekent dat er meer gewicht in de auto gereserveerd moet worden om dezelfde hoeveelheid energie mee te nemen. Li-ion batterijen hebben een energiedichtheid van tussen de 250 en 275 Wh/kg op celniveau (CEI, 2020). Voor benzine ligt die waarde op circa 12.000 Wh/g, grofweg 50 keer hoger dan de batterijen. Met toekomstige varianten van Lithium batterijen met silicium en oxiden kunnen mogelijk energiedichtheden van 400 tot ca. 500 Wh/kg²² worden bereikt.

²² BloombergNEF 2021, the race to produce higher performing batteries
 "https://www.bloomberg.com/news/newsletters/2021-11-09/the-race-to-produce-higher-performing-batteries-kvs4c109"

Wanneer deze technieken precies op de markt komen is lastig te voorspellen, maar volgens Bloomberg¹³ (2021) zal de specifieke energiedichtheid rond 2035 ca. 450 a 500 Wh/kg bedragen.

Tabel 6: Specifieke energie energiedragers per gewicht (RED II 2018/2001)

Brandstof	Specifieke energie (MJ/kg)	Specifieke energie (Wh/kg)
Referentie diesel	42-44	~ 12.000
Referentie benzine	42-44	~ 12.000
Lio-ion op celniveau		250-275
Huidige Li-ion, pakketniveau	0,36 – 0,72	150-200
Toekomstig Li-ion, pakketniveau ²³	1,4 – 1,75	400-500

2.7 Waterstof

Waterstof (H₂) als voertuigbrandstof wordt over het algemeen verkocht met een zeer hoge zuiverheidsgraad van meer dan 99,9% van de molaire massa. De zuiverheid van deze energiedrager is vastgelegd in ISO 14687 en wordt ook benoemd in de AFIR.

De meeste waterstof wordt momenteel geproduceerd door chemische omzetting vanuit methaan (*steam methane reforming* - SMR) met fossiel aardgas en stoom als input (Mulder, Perey, & Moraga, 2019). Bij deze productiemethode komt een aanzienlijke hoeveelheid CO₂ vrij. Wanneer deze CO₂ wordt afgevangen en opgeslagen (CCS, Carbon Capture & Storage) wordt de energiedrager aangeduid als blauwe waterstof. Indien de CO₂ niet wordt afgevangen en opgeslagen wordt gesproken over grijze waterstof. Een andere productiemethode is elektrolyse van water. De CO₂-uitstoot van het elektrolyseproces is in dat geval afhankelijk van de bron van de elektrische energie die wordt gebruikt. Door duurzame energie te gebruiken voor de elektrolyse kan zogenaamde groene waterstof worden geproduceerd. De productie van waterstof leidt op die manier niet tot CO₂-emissies.

Ondanks dat de productie van waterstof, door gebruik van duurzame energie, niet leidt tot CO₂ uitstoot is de ketenemissie van waterstof niet gelijk aan nul CO₂. Afhankelijk van de gekozen distributie (per pijplijn, of vloeibaar onder hoge druk etc.) wordt bij de compressie van waterstof en het tanken van de waterstof ook energie verbruikt. Dit leidt tot een beperkte CO₂ emissie per MJ.

Het grootste deel van de industriële geproduceerde waterstof in Nederland wordt momenteel geproduceerd op basis van fossiel aardgas en niet-hernieuwbare elektriciteit uit het net (Mulder et al., 2019). Echter, de huidige tankstations leveren volgens de waterstofbranche overwegend groene waterstof middels groencertificaten.

Tabel 7 hieronder toont de energiedichtheid en specifieke energie van waterstof. Waterstof heeft een lage energiedichtheid.

²³ <https://www.torquenews.com/15475/first-commercially-viable-solid-state-battery-quantumscape-doubling-teslas-wh-kg-ratio>

Om voldoende (waterstof)energie te kunnen meenemen in een brandstoftank dient waterstof daarom onder hoge druk te worden opgeslagen in een speciale brandstoftank.

Tabel 7: Energiedichtheid en specifieke energie waterstof (RED 2018/2001)

Brandstof	Specifieke energie (MJ/kg)	Energiedichtheid (MJ/L)
Waterstof (H ₂) @350 bar	120,1	2,8
Waterstof (H ₂) @700 bar	120,1	5,1

3 Personen- en bestelwagen emissies

Zoals beschreven in paragraaf 1.2.1, zijn de CO₂-uitlaatemissies bij het gebruik van pure biobrandstoffen nul volgens internationale rekenregels (IPCC). In onderstaande paragraaf zijn uitlaatemissies gedefinieerd als de werkelijke CO₂-emissies uit de uitlaat. De uitlaatemissies als gevolg van biobrandstoffen worden hierin ook meegenomen. Er wordt dus niet de definitie van de IPCC gedefinieerd. In de paragraaf over ketenemissies tellen de biobrandstoffen wel als nul.

3.1 Personen- en bestelauto's diesel

3.1.1 Klimaat (CO₂-eq)

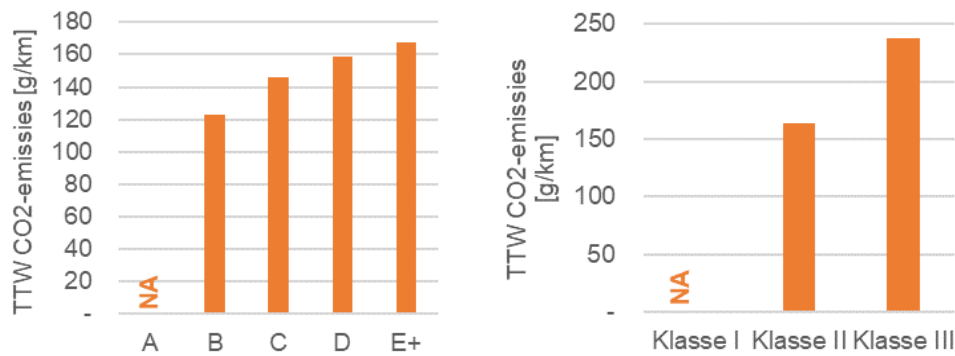
Uitlaatemissies (TTW)

In het afgelopen decennium is er een aantal verbeteringen aan dieselveertuigen doorgevoerd, zoals een hoger motorrendement en verbeterde aerodynamica. Dit heeft geleid tot een vermindering van het brandstofverbruik en daardoor ook lagere CO₂-emissies. De CO₂-emissies van individuele voertuigmodellen kunnen aanzienlijk van elkaar verschillen, ook binnen hetzelfde marktsegment, bijvoorbeeld vanwege het motorrendement en voertuiggewicht.

In onderstaande figuur zijn de CO₂-emissies van de meest verkochte moderne personen- en bestelauto's weergegeven. Voor personenauto's is dit gedaan per marktsegment, voor bestelauto's zijn drie gewichtsklassen onderscheiden die ook worden gehanteerd in Europese regelgeving (zie paragraaf 1.4.1). Een hoger voertuiggewicht leidt tot een hogere CO₂-uitstoot. Om die reden zijn de CO₂-emissies voor voertuigen in hogere segmenten of klassen hoger.

Gemiddeld stoten dieselpersonenauto's ongeveer 10 á 15% minder CO₂ (TTW) uit dan vergelijkbare benzineauto's. De CO₂-emissies van individuele voertuigmodellen²⁴ kunnen echter afwijken van deze 10 á 15%, ook binnen hetzelfde marktsegment. Dit kan bijvoorbeeld komen doordat de voertuigen in een bepaald marktsegment van de ene brandstof gemiddeld wat groter en zwaarder zijn dan de voertuigen in hetzelfde segment op een andere brandstof.

²⁴ Ligterink et al, Real world fuel consumption and electricity consumption of passenger cars and light duty commercial vehicles 2021, TNO report, march 2022



Figuur 10: Gemiddelde TTW CO₂-emissies van dieselauto's op basis van de verkochte voertuigen in de periode 2020-2023. Links: personenauto's, rechts: bestelauto's.

Naast CO₂ stoten dieselveertuigen ook het broeikasgas N₂O uit. Dit kan vrijkomen in de katalysator en wordt uitgestoten via de uitlaat. N₂O is een veel sterker²⁵ broeikasgas (ca. 298 keer) dan CO₂ (op basis van massa). Echter, de hoeveelheid N₂O die wordt uitgestoten per kilometer is zeer veel lager dan die van CO₂. Daarom is het broeikaseffect door N₂O kleiner dan van CO₂ per gereden kilometer²⁶. Vanwege zeer beperkte informatie met betrekking tot de N₂O-uitstoot, is dit niet meegenomen in de broeikasgasemissies zoals gepresenteerd in deze studie.

Ketenemissies (WTW)

Alle emissies over de gehele brandstofketen zijn de well-to-wheel (WTW) emissies. Om een basisinzicht in de ontwikkeling van de WTW-emissies te krijgen, brengen we hier WTW emissies van de diverse energiedragers over de gehele keten in beeld.

Tabel 8: CO₂ equivalente-ketenemissies van fossiele diesel en dieselvangers* uit biomassa in Nederland (NEa, 2022²⁷.)

	WTW CO ₂ equivalente emissies [gCO ₂ /MJ]	CO ₂ -equivalente emissiereductie t.o.v. fossiel equivalent
Fossiele diesel	95,1	
FAME	11,3	88,1%
HVO	10,1	89,0%
Totaal dieselvangers uit biomassa	11,0	88,4%
Diesel, nationale mix (fossiel + dieselvangers)	88,6	6,8%

*In dieselvanger mix in Nederland zit ook Fatty Acid Ethyl Ester (FAEE), dit is echter <1 % op energiebasis. Daarom hebben wij dit niet meegenomen.

Aangezien een beperkt deel van de diesel in Nederland uit biomassa is geproduceerd (6,8% op energiebasis) in 2022²⁸, zijn de totale CO₂-ketenemissies van in Nederland gebruikte diesel lager dan van fossiele diesel.

²⁵ IPCC, 2023: Climate Change 2023: AR6 Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change

²⁶ Ligterink et al, Emissiefactoren wegverkeer: wijzigingen en uitbreidingen 2021, TNO rapport, oktober 2021

²⁷ Rapportage Energie voor Vervoer in Nederland 2022. Naleving verplichtingen wet- en regelgeving Energie voor Vervoer

²⁸ Rapportage hernieuwbare Energie voor Vervoer in Nederland 2022. [Rapportage hernieuwbare Energie voor Vervoer in Nederland 2022 | Publicatie | Nederlandse Emissieautoriteit](#)

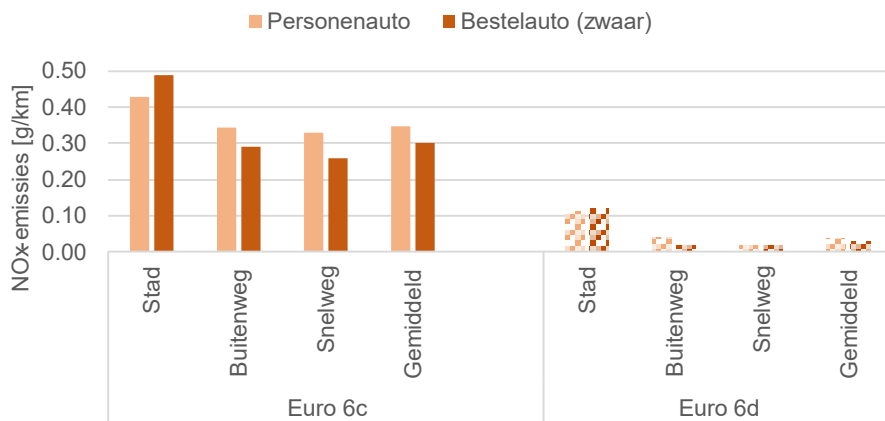
Wanneer pure biobrandstoffen worden gebruikt, bijvoorbeeld door vlooteigenaren met eigen opslag- en tankfaciliteiten, gelden de CO₂-ketenemissiereducties zoals weergegeven in de rechter kolom van bovenstaande tabel.

3.1.2 Luchtkwaliteit

In de laatste decennia zijn de NO_x- en PM₁₀-emissies van dieselpersonen- en bestelauto's afgenomen mede door de invoering en aanscherping van Europese emissienormen. Gedurende deze periode zijn de werkelijke NO_x-emissies aanzienlijk hoger geweest dan de geldende Europese norm. Bij de introductie van de Euro 5 norm in september 2009 namen de gemiddelde NO_x-emissies in praktijk zelfs toe terwijl de emissie-eisen strenger werden.

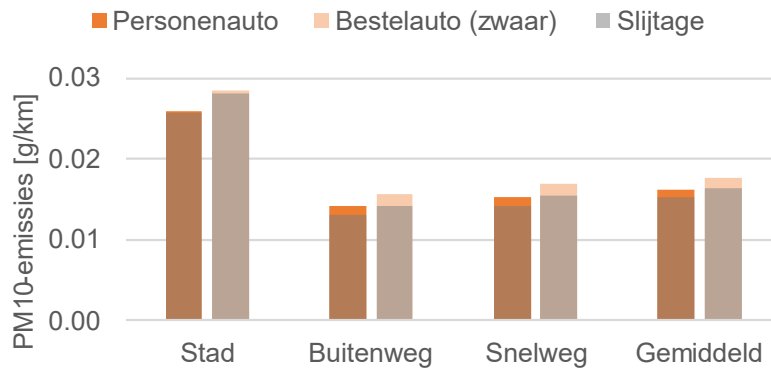
Uit metingen van TNO blijkt dat NO_x-emissies van verschillende moderne (Euro 6 dieselveertuigen) sterk van elkaar verschillen. Gemiddeld geldt dat de NO_x-emissies bij gebruik in stedelijk gebied wat hoger zijn dan op buitenwegen en snelwegen.

Sinds 2015 wordt de testprocedure stapsgewijs aangepast zonder dat de normwaarden worden verlaagd. Het doel hiervan is dat de praktijkemissies minder ver boven de testwaarden zullen uitstijgen. Vanaf januari 2020 moeten alle nieuwe voertuigen aan strengere Euro 6d wetgeving voldoen. Dit leidde ertoe dat de NO_x-emissies van nieuwe dieselpersonen- en bestelauto's aanzienlijk zijn afgenomen. Op basis van metingen is vastgesteld dat de Euro 6d voertuigen tot wel een factor zes minder NO_x uitstoten dan Euro 6 dieselveertuigen van voor deze wetgeving. Ondanks deze sterke afname, zullen dieselpersonen- en bestelauto's nog steeds ongeveer vier keer meer NO_x uitstoten dan equivalente benzinevoertuigen.



Figuur 11: NO_x emissiefactoren voor personen en bestel op diverse wegtypen.

Fijnstofemissies die vrijkomen bij de verbranding van brandstof verlaten het voertuig via de uitlaat. De toepassing van roetfilters heeft vanaf ongeveer 2007 geleid tot een sterke afname van de fijnstofemissies uit de uitlaat. Daarnaast leidt de slijtage van wegdek, banden en remmen tot fijnstof. Het fijnstof veroorzaakt door slijtage is voor moderne voertuigen aanzienlijk groter dan fijnstofemissies door verbranding van brandstof.



Figuur 12: PM₁₀ emissiefactoren voor personen en bestel op diverse wegtypen.

De fijnstofemissies van moderne dieservoertuigen is vergelijkbaar met die van equivalente voertuigen op andere brandstoffen. Enkel wanneer het roetfilter defect is of wanneer het onrechtmatig is verwijderd kunnen de fijnstofemissies van moderne dieselpersonen- en bestelauto's aanzienlijk zijn. Daarom is door het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat in samenwerking met TNO een meetprocedure ontwikkeld om tijdens de APK-keuring te kunnen vaststellen of een roetfilter al dan niet aanwezig of defect is. Deze meetprocedure is sinds 1 januari 2023 officieel onderdeel van de APK test.

3.2 Personen- en bestelvoertuigen op dieselvangers

Zoals beschreven in paragraaf 1.2.1 zijn de CO₂-uitlaatemissies bij het gebruik van pure biobrandstoffen nul volgens internationale rekenregels (IPCC). In onderstaande paragraaf zijn uitlaatemissies gedefinieerd als de werkelijke CO₂-emissies uit de uitlaat. De uitlaatemissies als gevolg van biobrandstoffen worden hierin ook meegenomen. Er wordt dus niet de definitie van de IPCC gedefinieerd. In de paragraaf over ketenemissies tellen de biobrandstoffen wel als nul.

3.2.1 Klimaat (CO_{2eq})

Uitlaatemissies (TTW)

De TTW-emissies van personenauto's en bestelauto's op dieselvangers uit biomassa zijn min of meer vergelijkbaar met dezelfde voertuigen op fossiele diesel. Dit is deels afhankelijk van het type biobrandstof, waardoor een iets zuinigere of minder zuinige verbranding op kan treden.

Ketenemissies (WTT)

Bij de productie en distributie van energiedragers komen broeikasgassen vrij; we noemen dit de zogenaamde Well-to-Tank emissies (WTT). Alle emissies over de gehele brandstofketen zijn de Well-to-wheel (WTW) emissies. Hoewel de TTW-emissies van biobrandstoffen uit biomassa vergelijkbaar zijn met die van fossiele diesel, worden ze als nul beschouwd.

Doordat de biomassa die is gebruikt voor de productie van biobrandstof evenveel CO₂ heeft opgenomen als door het voertuig wordt uitgestoten, zijn er netto geen CO₂-uitlaatemissies (kortcyclische CO₂). Daarom worden hier alleen de WTT-emissies (Well-to-Tank emissies) gepresenteerd.

Tabel 9: CO₂-ketenemissies van fossiele diesel en dieselvangers uit biomassa²⁹.

	WTW CO ₂ -emissies [gCO ₂ /MJ]	CO ₂ -emissiereductie t.o.v. fossiel equivalent
Fossiele diesel	95,1	
FAME	11,3	88,1%
HVO	10,1	89%
Totaal dieselvangers uit biomassa	11	88,4%
Diesel (fossiel + dieselvangers)	88,6	6,8%

De CO₂-ketenemissies van dieselvangers op basis van biomassa die in Nederland worden gebruikt zijn gemiddeld 88,4% lager dan van fossiele diesel (zie bovenstaande tabel). Aangezien maar een beperkt deel van de diesel in Nederland uit biomassa is geproduceerd (7,7% op energiebasis), zijn de totale CO₂-ketenemissies van in Nederland gebruikte diesel 6,8% lager dan van fossiele diesel. Wanneer pure biobrandstoffen worden gebruikt, bijvoorbeeld door vlooteigenaren met eigen opslag- en tankfaciliteiten, gelden de CO₂-ketenemissiereducties zoals weergegeven in de rechter kolom van bovenstaande tabel.

3.2.2 Luchtkwaliteit

Het effect van biobrandstoffen op luchtverontreinigende emissies hangt af van de motor en nabehandelingstechniek aanwezig in een voertuig, maar ook van de eigenschappen van de biobrandstoffen in vergelijking met de fossiele variant. Samen genomen bepalen deze factoren de effecten. Door verbeteringen in de motoren en nabehandelingstechnieken is de impact van de brandstof op emissies (NO_x en PM₁₀) sterk afgenomen, met name bij voertuigen die voldoen aan de laatste voertuigstandaarden. Bij oudere voertuigen met oudere motoren en minder geavanceerde nabehandelingstechnieken is de impact van de brandstof groter. Over het algemeen geldt voor de inzet van FAME dat het in hoge blends CO, VOC en PM kan reduceren. Voor minder geavanceerde motoren kan dit 50% bedragen. Tegelijkertijd kan FAME in hoge blends voor een toename van NO_x-emissies zorgen. Dit komt door het hoger zuurstofgehalte in FAME en daardoor hogere verbrandingstemperaturen. Meer specifieke uitspraken vragen om meer (recente) metingen.

HVO is een paraffine brandstof en verbetert door de hogere ontstekingskwaliteit het verbrandingsproces. Door deze verbetering kunnen de emissies van oudere dieselvoertuigen worden gereduceerd (CO, koolwaterstof en PM emissies) en heeft HVO in tegenstelling tot FAME de potentie om ook NO_x-emissies met ongeveer 10% te reduceren. Voor modernere voertuigen geldt dat de effecten van duurzamere brandstofvarianten op de NO_x en PM₁₀ emissies verwaarloosbaar zijn als gevolg van effectieve nabehandelingstechnologieën (Nylund et al. 2018). Dit vereist wel dat de nabehandelingssystemen continu optimaal functioneren.

²⁹ Rapportage Energie voor Vervoer in Nederland 2019. Naleving verplichtingen wet- en regelgeving Energie voor Vervoer

Recente metingen van TNO (najaar 2023) die nog gepubliceerd moeten worden, bevestigen dat HVO bij modernere motoren NO_x emissies kunnen reduceren indien de uitlaatgasbehandeling niet continue correct functioneert.

3.3 Personen- en bestelwagens op benzine

Zoals beschreven in paragraaf 1.2.1, zijn de CO₂-uitlaatemissies bij het gebruik van pure biobrandstoffen nul volgens internationale rekenregels (IPCC). In onderstaande paragraaf zijn uitlaatemissies gedefinieerd als de werkelijke CO₂-emissies uit de uitlaat. De uitlaatemissies als gevolg van biobrandstoffen worden hierin ook meegenomen. Er wordt dus niet de definitie van de IPCC gedefinieerd. In de paragraaf over ketenemissies tellen de biobrandstoffen wel als nul.

3.3.1 Klimaat (CO₂)

Uitlaatemissies (TTW)

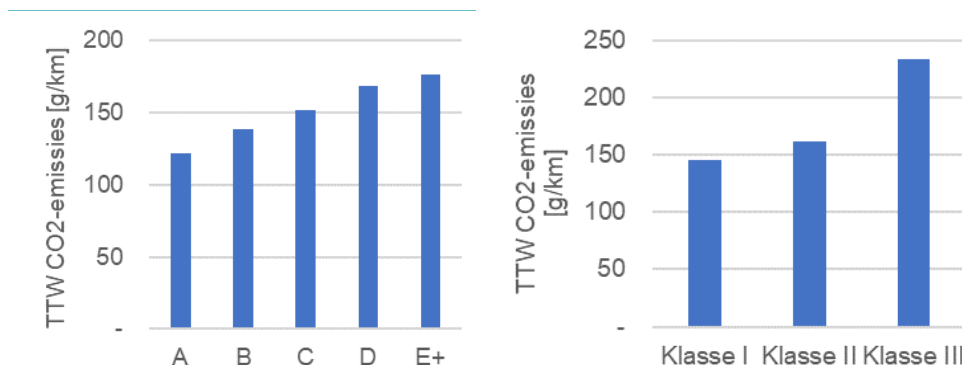
In het afgelopen decennium zijn verschillende verbeteringen aan benzinemotoren doorgevoerd. Zo is de cilinderinhoud verkleind en wordt er gebruik gemaakt van directe insputing. Deze veranderingen hebben geleid tot een afname van het brandstofverbruik en daardoor de CO₂-emissies.

Momenteel zijn de (TTW) CO₂-emissies van benzinevoertuigen ongeveer 10 á 15% hoger dan van equivalente dieselveertuigen³⁰. Dit is het gevolg van een iets lager motorrendement waardoor benzineauto's meer energie gebruiken. Het verschil tussen de gemiddelde CO₂-emissies van benzine- en dieselveertuigen in een bepaald segment kan afwijken van deze 10 á 15%. Dit kan bijvoorbeeld komen doordat de voertuigen in een bepaald marktsegment van de ene brandstof gemiddeld wat groter en zwaarder zijn dan de voertuigen in hetzelfde segment op een andere brandstof.

Verkochte benzineauto's zijn door de jaren heen gemiddeld steeds groter en zwaarder geworden. Dit leidt tot een hoger energiegebruik en daardoor tot een hogere CO₂-uitstoot. Deze toename is de laatste jaren niet meer gecompenseerd door de toegepaste CO₂-reducerende technologieën zoals een toename van het motorrendement, verbeterde aerodynamica en het gebruik van lichtere materialen. Daarom zijn ook CO₂-emissiefactoren van benzinepersonenauto's netto toegenomen in de laatste jaren.

In Figuur 13 zijn de CO₂-eq emissies van de meest verkochte moderne personen- en bestelauto's in de periode 2020-2023 in Nederland, weergegeven. De weergegeven waarden zijn afgeleid door de emissies van het grootste deel van het Nederlands wagenpark, in de betreffende klassen, te wegen. Voor personenauto's is dit gedaan per marktsegment A tot en met E+, voor bestelauto's zijn drie gewichtsklassen onderscheiden die ook worden gehanteerd in Europese regelgeving (zie paragraaf 1.2). Een hoger voertuiggewicht leidt tot een hogere CO₂-uitstoot. Om die reden zijn de CO₂-emissies voor voertuigen in hogere segmenten of klassen hoger.

³⁰ Ligterink et al, Real world fuel consumption and electricity consumption of passenger cars and light duty commercial vehicles 2021, TNO report, march 2022



Figuur 13: Gemiddelde TTW CO₂-eq-emissies van benzineauto's op basis van de bestverkochte voertuigen in de periode 2020-2023. Links: personenauto's, rechts: bestelauto's.

Ketenemissies (WTW)

Ook bij de productie en distributie van energiedragers komen broeikasgassen vrij; we noemen dit de zogenaamde Well-to-Tank emissies (WTT). Alle emissies over de gehele brandstofketen zijn de Well-to-wheel (WTW) emissies. Hoewel de TTW-emissies van biobrandstoffen uit biomassa vergelijkbaar zijn met die van fossiele diesel, worden ze als nul beschouwd. Doordat de biomassa die is gebruikt voor de productie van biobrandstof evenveel CO₂ heeft opgenomen als door het voertuig wordt uitgestoten, zijn er netto geen CO₂-uitlaatemissies (kortcyclische CO₂). Doordat de biomassa die is gebruikt voor de productie van biobrandstof evenveel CO₂ heeft opgenomen als door het voertuig wordt uitgestoten, zijn er netto geen CO₂-uitlaatemissies (kortcyclische CO₂). Daarom worden hier de WTT-emissies (Well-to-Tank emissies) gepresenteerd als WTW-emissies. Om een basisinzicht in de ontwikkeling van de WTW-emissies te krijgen, brengen we hier de CO₂-eq emissies van de diverse energiedragers over de gehele keten in beeld.

Tabel 10: CO₂-ketenemissies van fossiele benzine en benzinevervangers uit biomassa³¹.

	WTW CO ₂ -emissies [gCO ₂ -eq/MJ]	CO ₂ -emissiereductie t.o.v. fossiel equivalent
Benzine	93,3	
Bio-ETBE	28,9	69%
Bio-ethanol	21,1	77%
Bio-nafta	8,9	90%
Totaal benzinevervangers*	20,2	78%
Benzine (fossiel + benzinevervangers)	89	4,6%

* Bio methanol kan ook als benzine vervanger gebruikt worden, echter wordt deze op dit moment niet ingezet in de Nederlandse mix. Hierom hebben wij dit niet geïnccludeerd.

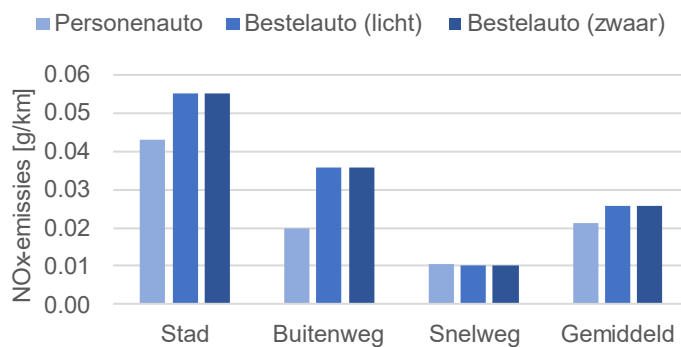
De CO₂-ketenemissies van fossiele benzine zijn al sinds 2018 gemeten³¹ als 93,3 g CO₂-eq/MJ. De CO₂-ketenemissies van benzinevervangers op basis van biomassa die in Nederland worden gebruikt zijn gemiddeld 78% lager dan die van benzine.

³¹ Rapportage Energie voor Vervoer in Nederland 2021. Naleving verplichtingen wet- en regelgeving Energie voor Vervoer, NEA jaarlijkse rapportage

Hierbij geldt dat Bio-ETBE 69%; Bio-ethanol 77%; Bio-nafta 90% lagere ketenemissies dan benzine hebben (zie tabel 10). Aangezien maar een beperkt deel van de benzine in Nederland uit biomassa is geproduceerd (5,9% op energiebasis in 2021), zijn de totale CO₂-ketenemissies van in Nederland gebruikte benzine 4,6% lager dan van fossiele benzine.

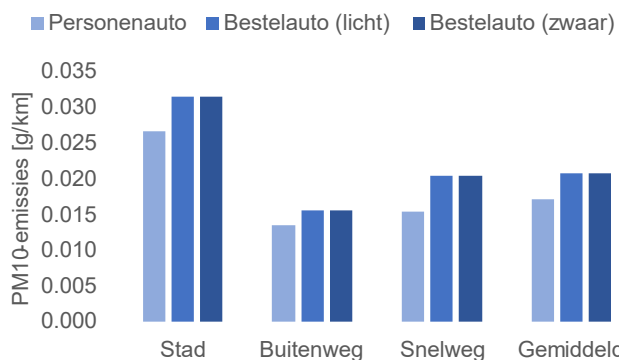
3.3.2 Luchtkwaliteit

Benzinevoertuigen van de laatste decennia stoten relatief weinig NO_x uit. Dit is grotendeels het gevolg van 3-weg-katalysatoren die in nagenoeg alle benzinevoertuigen geproduceerd na 1990 aanwezig zijn. Deze technologie is toegepast zodat de benzinevoertuigen konden voldoen aan de eerste NO_x-emissiestandaarden. Uit recent onderzoek blijkt wel dat de NO_x-emissies toenemen naarmate voertuigen ouder worden en meer kilometers hebben gereden³². Moderne benzinepersonen- en bestelauto's stoten ongeveer vier keer minder NO_x uit dan moderne Euro 6d dieselvoertuigen.



Figuur 14: NO_x emissiefactoren voor personen en bestel op diverse wegtypen

De fijnstof emissies van benzinevoertuigen zijn historisch gezien relatief laag. Moderne direct ingespoten benzine motoren kunnen wel voor hogere uitstoot van deeltjes (aantallen) zorgen, daarom is in de emissiewetgeving een deeltjesaantallen-eis geformuleerd. De betreffende benzinevoertuigen worden tegenwoordig met roetfilter uitgerust. Ook voor moderne benzinevoertuigen geldt daarom dat de fijnstofemissies uit de uitlaat vergelijkbaar zijn met die van equivalente voertuigen op andere brandstoffen.



Figuur 15: PM₁₀ emissiefactoren voor personen en bestel op diverse wegtypen

³² TNO 2023. Emissiefactoren wegverkeer. TNO 2023 R11202. 22 juni 2023

3.4 Personen- en bestelwagens op benzinevervangers

Zoals eerder beschreven, zijn de CO₂-uitlaatemissies bij het gebruik van pure biobrandstoffen nul volgens internationale rekenregels (IPCC). In onderstaande paragraaf zijn uitlaatemissies gedefinieerd als de werkelijke CO₂-emissies uit de uitlaat. De uitlaatemissies als gevolg van biobrandstoffen worden hierin ook meegenomen. Er wordt dus niet de definitie van de IPCC gedefinieerd. In de paragraaf over ketenemissies tellen de biobrandstoffen wel als nul.

3.4.1 Klimaat (CO_{2eq})

Uitlaatemissies (TTW)

De TTW-emissies van personenauto's en bestelauto's op benzinevervangers zijn min of meer vergelijkbaar met dezelfde voertuigen op fossiele benzine.

Ketenemissies (WTW)

Ook bij de productie en distributie van energiedragers komen broeikasgassen vrij; we noemen dit de zogenaamde Well-to-Tank emissies (WTT). Alle emissies over de gehele brandstofketen zijn de Well-to-wheel (WTW) emissies. Hoewel de TTW-emissies van biobrandstoffen uit biomassa vergelijkbaar zijn met die van fossiele diesel, worden ze als nul beschouwd. Daarom worden hier alleen de WTT-emissies (Well-to-Tank emissies) gepresenteerd. Om een basisinzicht in de ontwikkeling van de WTW-emissies te krijgen, brengen we hier de CO_{2-eq} emissies van de diverse energiedragers over de gehele keten in beeld.

Tabel 11: CO₂-ketenemissies van fossiele benzine en benzinevervangers uit biomassa³³.

	WTW CO ₂ -emissies [gCO _{2-eq} /MJ]	CO ₂ -emissiereductie t.o.v. fossiel equivalent
Benzine	93,3	
Bio-ETBE	28,9	69%
Bio-ethanol	21,1	77%
Bio-nafta	8,9	90%
Totaal benzinevervangers*	20,2	78%
Benzine (fossiel + benzinevervangers)	89	4,6%

* Bio methanol kan ook als benzine vervanger gebruikt worden, echter wordt deze op dit moment niet ingezet in de Nederlandse mix. Hierom hebben wij dit niet geïnccludeerd.

De CO₂-ketenemissies van fossiele benzine zijn al sinds 2018 gemeten²⁸ als 93,3 g CO_{2-eq}/MJ. De CO₂-ketenemissies van benzinevervangers op basis van biomassa die in Nederland worden gebruikt zijn gemiddeld 78% lager dan die van benzine. Hierbij geldt dat Bio-ETBE 69%; Bio-ethanol 77%; Bio-nafta 90% lagere ketenemissies dan benzine hebben (zie tabel 11).

³³ Rapportage Energie voor Vervoer in Nederland 2021. Naleving verplichtingen wet- en regelgeving Energie voor Vervoer, NEA jaarlijkse rapportage

Aangezien maar een beperkt deel van de benzine in Nederland uit biomassa is geproduceerd (5,9% op energiebasis in 2021), zijn de totale CO₂-ketenemissies van in Nederland gebruikte benzine 4,6% lager dan van fossiele benzine.

3.4.2 Luchtkwaliteit

Bij moderne benzinevoertuigen (Euro 6) resulteert de inzet van benzineblends met ethanol voor NO_x en PM₁₀ in vergelijkbare emissies als bij de inzet van benzine. Bij de inzet van hoge blends (E85) zijn aanwijzingen³⁴ voor iets verhoogde uitstoot van benzeen en hydrocarbons. Bij lagere blends, zoals E10 zijn de effecten minimaal, zeker bij de moderne Euro 6 voertuigen.

3.5 Personen- en bestelwagens op LPG en bio-LPG

Zoals beschreven in paragraaf 1.2.1, zijn de CO₂-uitlaatemissies bij het gebruik van pure biobrandstoffen nul volgens internationale rekenregels (IPCC). In onderstaande paragraaf zijn uitlaatemissies gedefinieerd als de werkelijke CO₂-emissies uit de uitlaat. De uitlaatemissies als gevolg van biobrandstoffen worden hierin ook meegenomen. Er wordt dus niet de definitie van de IPCC gedefinieerd. In de paragraaf over ketenemissies tellen de biobrandstoffen wel als nul.

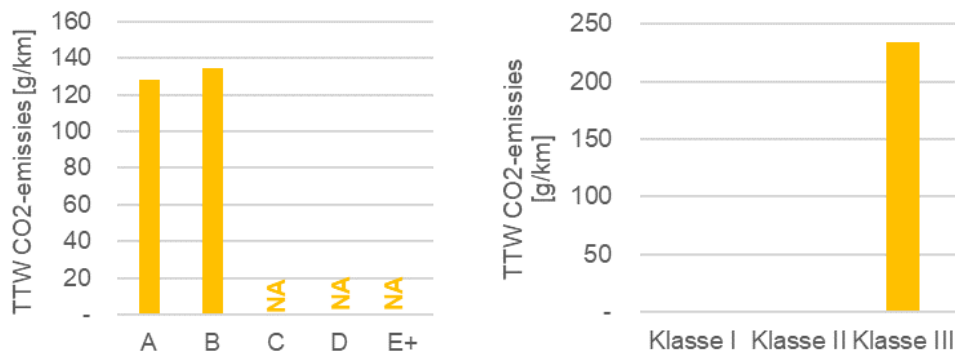
3.5.1 Klimaat (CO₂)

Uitlaatemissies (TTW)

Voor LPG geldt dat de koolstofinhoud lager is dan die van diesel en benzine, in dit geval ongeveer 9%. Net als voor CNG-voertuigen, geldt ook voor LPG-voertuigen dat het gewicht wat hoger is dan van equivalente benzinevoertuigen. Dit leidt ertoe dat het CO₂-voordeel van LPG-voertuigen kleiner is deze 9%. Afhankelijk van het gewicht van de LPG-brandstoftank zijn de CO₂-emissies van LPG-voertuigen 6% tot 9% lager dan van equivalente benzinevoertuigen. Ten opzichte van equivalente dieselauto's kunnen de CO₂-emissies beperkt hoger zijn vanwege het extra gewicht. De verschillen in CO₂-emissies tussen LPG-voertuigen en voertuigen op andere brandstoffen in hetzelfde marktsegment kunnen afwijken van de hierboven genoemde percentages. Dit komt doordat de voertuigen van verschillende brandstoffen van elkaar verschillen bijvoorbeeld in termen van grootte en gewicht, ondanks dat ze tot hetzelfde marktsegment behoren.

In Figuur 16 zijn de CO₂-emissies van de meest verkochte moderne personen- en bestelauto's weergegeven. Voor personenauto's is dit gedaan per marktsegment, voor bestelauto's zijn drie gewichtsklassen onderscheiden die ook worden gehanteerd in Europese regelgeving. Een hoger voertuiggewicht leidt tot een hogere CO₂-uitstoot. Om die reden zijn de CO₂-emissies voor voertuigen in hogere segmenten of klassen hoger.

³⁴ P. Aakko-Saksa et al, Comprehensive emission characterisation of exhaust from alternative fuelled cars, Atmospheric Environment, volume 236, September 2020, 117643



Figuur 16: Gemiddelde TTW CO₂-emissies van LPG-auto's op basis van de bestverkochte voertuigen in de periode 2016-2019. Links: personenauto's, rechts: bestelauto's.

Een (zeer) beperkt gedeelte van de kilometers die worden gereden met LPG-bi-fuel-voertuigen worden gereden op benzine. In dat geval geldt dat de CO₂-emissies ongeveer gelijk zijn aan die van benzinevoertuigen.

Ketenemissies (WTW)

Ook bij de productie en distributie van energiedragers komen broeikasgassen vrij; we noemen dit de zogenaamde Well-to-Tank emissies (WTT). Alle emissies over de gehele brandstofketen zijn de Well-to-wheel (WTW) emissies. Om een basisinzicht in de ontwikkeling van de WTW-emissies te krijgen, brengen we hier de CO_{2-eq} emissies van de diverse energiedragers over de gehele keten in beeld.

Tabel 12: Energiedichtheid en specifieke energie LPG (RED II, 2018/2001)

Brandstof	Specifieke energie (MJ/kg)	Energiedichtheid (MJ/L)
LPG	45 – 46	25 – 28
Bio-LPG	46	24

Volgens een peer-reviewed rapport (Johnson, 2017) zijn de CO₂-ketenemissies van bio-LPG afhankelijk van de grondstof en productiemethode 36% tot 93% lager dan van fossiele LPG. Bio-LPG wordt momenteel al wel in Nederland geproduceerd, maar deze is niet significante hoeveelheden beschikbaar gekomen voor de Nederlandse mobiliteitssector. Daarmee is vrijwel alle in Nederland verkrijgbare LPG momenteel nog geproduceerd uit fossiele grondstoffen. De sector ambieert wel om de afzet van bio-LPG vergroten.

3.5.2 Luchtkwaliteit

In het verleden waren de NO_x-emissies van LPG-voertuigen gemiddeld hoger dan die van benzineauto's. Dit was met name het gevolg van een groot aandeel LPG-voertuigen dat was omgebouwd door garages zonder dat de autofabrikant daarbij betrokken was. Deze ombouw werd vaak uitgevoerd op een manier die leidde tot hoge NO_x-emissies. Dit bleek ook uit emissiemetingen door TNO in 2010.

Dit verschil is sinds 2015 aanzienlijk afgenomen, mede vanwege de invoering van de R115 richtlijn³⁵ en betrokkenheid van de voertuigfabrikanten bij de ombouw.

³⁵ In 2015 is in Nederlandse overheid de R115 richtlijn geïmplementeerd. Dit is een [Europese richtlijn](#) met betrekking tot emissienormen, documentatie en kwaliteitsnormen voor de inbouw van LPG-systemen

Echter, ook uit recente typekeurwaarden blijkt dat de NO_x-emissies van LPG-voertuigen gemiddeld wat hoger zijn dan die van benzinevoertuigen.

De Nederlandse emissiefactoren laten zien dat de NO_x-emissies van LPG-personenauto's vergelijkbaar zijn met die van Euro 6d dieselauto's en ongeveer een factor vier hoger dan van benzineauto's. De NO_x-emissies van LPG-bestelauto's zijn 20% tot 50% lager van dieselbestelauto's en ongeveer 2.7 keer hoger dan die van benzinebestelauto's.

De fijnstofemissies van LPG-voertuigen zijn vergelijkbaar met die van benzinevoertuigen en daarmee laag.

Uit diverse onderzoeken is in het verleden gebleken dat voertuigen met directe benzine-inspuiting op benzine een hoger *aantal deeltjes* kon uitstoten dan voertuigen op LPG. Het gaat hierbij om *deeltjesaantallen* en niet om de massa van de uitgestoten deeltjes. Hierboven wordt steeds over *deeltjesmassa (PM₁₀)* gerapporteerd. Tegenwoordig worden benzinevoertuigen met directe inspuiting daarom af-fabriek voorzien van deeltjesfilters (GPF, Gasoline Particle Filter) en daarmee wordt de *deeltjesaantallen* uitstoot sterk gereduceerd.

3.6 Personen- en bestelwagens aardgas

Zoals beschreven in paragraaf 1.2.1, zijn de CO₂-uitlaatemissies bij het gebruik van pure biobrandstoffen nul volgens internationale rekenregels (IPCC). In onderstaande paragraaf zijn uitlaatemissies gedefinieerd als de werkelijke CO₂-emissies uit de uitlaat. De uitlaatemissies als gevolg van biobrandstoffen worden hierin ook meegenomen. Er wordt dus niet de definitie van de IPCC gedefinieerd. In de paragraaf over ketenemissies tellen de biobrandstoffen wel als nul.

3.6.1 Klimaat (CO₂)

Uitlaatemissies (TTW)

De koolstofinhoud van CNG is ongeveer 23% lager dan die van benzine. Dit betekent dat er 23% minder CO₂-emissies vrijkomen bij dezelfde hoeveelheid geleverde energie. Echter, CNG-voertuigen zijn 10% tot 15% zwaarder dan vergelijkbare benzinevoertuigen, voornamelijk door de zwaardere brandstoftank. Hierdoor gebruikt een CNG-voertuig meer energie dan een equivalent benzinevoertuig. Deze hogere massa beperkt het CO₂-voordeel van CNG-auto's ten opzichte van equivalente benzineauto's 15 % tot ca. 20% afhankelijk van het gewicht van brandstoftank.

Het verschil tussen de gemiddelde CO₂-emissies van CNG-voertuigen in een bepaald marktsegment en andere brandstoffen in hetzelfde marktsegment kunnen afwijken van de hierboven weergegeven verschillen. Dit is het gevolg van het feit dat de gemiddelde kenmerken (zoals grootte en gewicht) van voertuigen op verschillende brandstoffen in hetzelfde marktsegment van elkaar kunnen verschillen.

Voor voertuigen die zijn omgebouwd om op CNG te kunnen rijden geldt dat het rendement wat lager kan liggen waardoor de CO₂-emissie een aantal procenten hoger kan zijn dan die van af-fabriek CNG-voertuigen.

Zakelijke rijders met dual-fuel CNG-voertuigen, rijden een deel van hun kilometers op benzine.

Dit blijkt uit gegevens van tankpashouders. Een mogelijke reden hiervoor is dat het aantal tankstations waar CNG kan worden getankt aanzienlijk kleiner is dan voor benzine. Voor de voertuigkilometers gereden op benzine geldt dat de CO₂-emissies beperkt hoger kunnen zijn dan van equivalente benzinevoertuigen vanwege het extra gewicht van de CNG-brandstoftank.

Ketenemissies (WTW)

Ook bij de productie en distributie van energiedragers komen broeikasgassen vrij; we noemen dit de zogenaamde Well-to-Tank emissies (WTT). Alle emissies over de gehele brandstofketen zijn de Well-to-wheel (WTW) emissies. Om een basisinzicht in de ontwikkeling van de WTW-emissies te krijgen, brengen we hier de CO_{2-eq} emissies van de diverse energiedragers over de gehele keten in beeld.

Tabel 13 : Energiedichtheid en specifieke energie CNG en LNG^{36,37}

Brandstof	Specifieke energie (MJ/kg)*	Energiedichtheid (MJ/L)
CNG (G25)	38	-
LNG (G20)	45	21-24

Noot: de waarden voor CNG en LNG hangen sterk af van de herkomst. Recent is de import sterk toegenomen wat een effect heeft op genoemde waarden.

Noot: G25 verwijst naar laagcalorisch (Nederlands) gas, G20 verwijst naar hoogcalorisch gas

De sector streeft ernaar om 100% van de CNG in Nederland uit bio-CNG te laten bestaan. De markt is hierbij wel afhankelijk van de beschikbaarheid van zogenaamde groengascertificaten. De vergroening vindt namelijk plaats door middel van deze Garanties van oorsprong (GvO's), ook wel 'groengascertificaten' genoemd. Dit zijn certificaten waarmee kan worden bewezen dat geleverde energie duurzaam is geproduceerd. Aangezien CNG wordt geleverd vanuit het aardgasnetwerk, bestaat het aardgas dat fysiek in de voertuigen belandt voor een groot deel uit fossiel aardgas en is een klein gedeelte uit biomassa geproduceerd. Echter, met GvO's kan worden aangetoond dat voor de hoeveelheid energie die wordt getankt een even grote hoeveelheid energie als biogas is geproduceerd en aan vervoer is geleverd.

3.7 Personen- en bestelwagens batterij-elektrisch

Volledig elektrische voertuigen zelf stoten geen broeikasgassen uit. Broeikasgassen kunnen wel uitgestoten worden bij de productie van elektriciteit.

3.7.1 Klimaat (CO₂)

Uitlaatemissies (TTW)

Een volledig elektrisch voertuig veroorzaakt geen uitstoot van CO₂ en andere broeikasgassen tijdens het rijden. Tijdens de productie van elektriciteit wordt wel CO₂ uitgestoten. Dit wordt in de volgende paragraaf toegelicht.

³⁶ JRC report, JEC Well to Tank report v5, JRC119036, 2020

³⁷ Kampman et al, Bringing biofuels on the market: options to increase EU biofuel volumes beyond the current blending limits, CE Delft publication, July 2013

Ketenemissies (WTW)

Ook bij de productie en distributie van energiedragers komen broeikasgassen vrij; we noemen dit de zogenaamde Well-to-Tank emissies (WTT). Alle emissies over de gehele brandstofketen zijn de Well-to-wheel (WTW) emissies. Om een basisinzicht in de ontwikkeling van de WTW-emissies te krijgen, brengen we hier de CO_{2-eq} emissies van de diverse energiedragers over de gehele keten in beeld.

De broeikasgasemissies van elektrische auto's worden voornamelijk bepaald door de productiemethode van elektriciteit, die opgewekt kan worden uit fossiele brandstoffen zoals kolen en gas, maar ook uit hernieuwbare bronnen zoals zonne-energie, windenergie, biogas of biomassa. De vergroening van de elektriciteitsmix in Nederland gaat vrij snel en is van 2018 naar 2020 en 2021 gestegen van 15% (2018) tot 27% (2020) resp. 33%(2021) ^{38, 39}

De elektriciteit die in Nederland uit het stopcontact komt is een mix met hernieuwbare en niet-hernieuwbare herkomst. De well-to-tank uitstoot wordt dus bepaald door het aandeel groene en grijze (fossiele) stroom in de Nederlandse elektriciteitsmix. Als het aandeel hernieuwbare bronnen toeneemt, dan zal de well-to-wheel CO₂-emissie van een elektrische auto dalen. Om de uitstoot van elektrische auto's eerlijk te vergelijken met andere aandrijvingen, dienen bij auto's op fossiele brandstoffen ook de emissies van het raffinage- en distributieproces meegenomen te worden.

In Tabel 14 is weergegeven wat de CO₂-uitstoot is van de totale elektriciteitsmix in Nederland. De eerste regel bevat het totaal van grijs en groen geproduceerde elektriciteit. De emissies zijn exclusief de ketenemissies van de centrale- en productie middelen zelf.

Tabel 14: CO₂-emissie elektriciteitsproductie in kg per kWh(CBS, 2022)

	2018 [kg/kWh]	2019[kg/kWh]	2020[kg/kWh]	2021*[kg/kWh]
Emissies* totale elektriciteitsmix Integrale methode	0,43	0,37	0,29	0,30
Emissies* elektriciteitsmix. Aardgas, koelen en kernenergie, Referentieparkmethode	0,56	0,49	0,42	0,51

Bron: CBS, CO₂ emissie-energieverbruik rendementen elektriciteit 2022

- De cijfers voor 2021 zijn voorlopige cijfers
- Er wordt onderscheid gemaakt tussen de referentieparkmethode en de integrale methode. De eerste is geschikt voor marginale analyses, oftewel bij de vraag hoeveel meer of minder emissies er zouden zijn bij 1 kWh meer of minder vraag. De tweede is geschikt voor integrale analyses over de gehele productie of gehele vraag over een jaar.

De bovenstaande emissies worden uitgestoten door de productie van elektriciteit. De ketenemissies van de centrales en productiemiddelen, grondstoffen etc. zit hier nog niet in. De ketenemissies voor elektriciteitsproductie van de elektriciteitsmix in Nederland⁴⁰ bedragen 63g/kWh.

³⁸ Rapportage Energie voor vervoer in Nederland 2021, NEA rapport, 2022

³⁹ [Meer elektriciteit uit hernieuwbare bronnen, minder uit fossiele bronnen \(cbs.nl\)](https://www.cbs.nl)

⁴⁰ S. van der Niet et al, "Ketenemissies elektriciteit, actualisatie elektriciteitsmix 2019", CE Delft rapport 2022, publicatienummer 22.210436.002

3.7.2 Luchtkwaliteit

Een volledig elektrisch voertuig stoot geen emissies tijdens het rijden (afgezien van de slijtage van wegdek, banden en remmen) uit. Tijdens de productie van de benodigde elektriciteit worden wel luchtverontreinigende emissies uitgestoten.

Elektrische auto's zijn zwaarder dan equivalente voertuigen op andere energiedragers. Dit leidt tot hogere fijnstofemissies door slijtage van banden en remmen. Aan de andere kant remmen deze voertuigen sterker op de motor, wat een positief effect heeft op de fijnstofemissies door remslijtage. Aangenomen wordt dat deze twee tegengestelde effecten elkaar opheffen waardoor de slijtage-emissies gelijk zijn aan die van equivalente voertuigen op andere energiedragers. TNO voert momenteel onderzoek naar methoden om slijtage emissies van remmen daadwerkelijk onder praktijkomstandigheden te meten. Dit onderzoek is nog in een stadium waarbij meetprocedure en meetmethoden ontwikkeld worden. Eerste resultaten worden eind 2024 of begin 2025 verwacht.

3.8 Personen- en bestelwagens op waterstof

Voertuigen met een brandstofcel die rijden op waterstof stoten geen CO₂ emissies uit. Broeikasgassen kunnen alleen bij de productie en distributie van waterstof vrijkomen.

3.8.1 Klimaat (CO₂)

Uitlaatemissies (TTW)

Waterstofvoertuigen met brandstofcel (FCEV) stoten zelf geen CO₂ uit. Echter bij de productie van waterstof kan wel CO₂ vrijkomen. Waterstofvoertuigen met een verbrandingsmotor, waarbij de waterstof in de verbrandingsmotor verbrand wordt, zullen naar verwachting wel (heel) lage hoeveelheden CO₂ uitstoten. Dergelijk motoren zijn nog ontwikkeling.

Ketenemissies (WTW)

Ook bij de productie en distributie van energiedragers komen broeikasgassen vrij; we noemen dit de zogenaamde Well-to-Tank emissies (WTT). Alle emissies over de gehele brandstofketen zijn de Well-to-wheel (WTW) emissies. Om een basisinzicht in de ontwikkeling van de WTW-emissies te krijgen, brengen we hier de CO_{2-eq} emissies van de diverse energiedragers over de gehele keten in beeld.

Voor waterstof-elektrisch geldt:

- De industriële productie van waterstof vindt momenteel voornamelijk plaats op basis van fossiele brandstoffen. Echter, de huidige tankstations leveren overwegend groene waterstof middels groencertificaten;
- Voor het “vergroenen” van energiedragers middels groencertificaten zijn kaders in ontwikkeling (EU/NL);
- In de markt komen we de zogenaamde blauwe waterstof in Nederland niet tegen;

Momenteel wordt waterstof in de meeste gevallen gemaakt via het ‘steam methane reforming’ productiemethode met aardgas als grondstof. Op deze manier wordt ongeveer 25% CO₂-ketenemissiereductie behaald ten opzichte van rijden op fossiele diesel. De emissiereductie kan hoger uitvallen indien de CO₂ wordt afgevangen en opgeslagen (CCS).

Wanneer waterstof wordt geproduceerd via elektrolyse, kan de benodigde elektriciteit op vele verschillende manieren worden opgewekt. Dit kan zowel met fossiele brandstoffen (zoals aardgas en kolen) of met duurzame energiedragers (zoals windturbines en zonnepanelen). Elektrolyse met behulp van elektriciteit uit kolen zonder CCS leidt tot hogere CO₂-ketenemissies dan rijden op diesel. Wanneer de elektriciteit wordt verkregen uit duurzame bronnen, kunnen de CO₂-ketenemissies voor de productie van waterstof zeer laag worden. Momenteel rapport de NEA nog een lage CO_{2eq} ketenemissie voor CO₂ uitstoot voor waterstof. De productie en distributieketen zorgt nog voor een beperkte CO₂ uitstoot in de keten. Afhankelijk van de gekozen productielocatie en/of distributie route varieert deze CO₂ uitstoot. Deze uitstoot komt vrij bij de compressie van waterstof voor transport en/of op locatie voor de opslag en voor het tanken van de waterstof. JRC publiceert deze cijfers in de bijlage van het JRC rapport (JEC Well to Tank report v5, JRC119036, 2020).

3.8.2 Luchtkwaliteit

Bij de omzetting van waterstof naar energie in de brandstofcel vindt geen verbranding plaats, waardoor er ook geen luchtverontreinigende stoffen vrijkomen uit de uitlaat. Bij H₂-ICE motoren, waarbij waterstof in de verbrandingsmotor verbrand wordt, kan een beperkte hoeveelheid CO₂ en mogelijk NO_x vrijkomen. Dit is echter afhankelijk van het gekozen concept. Aangezien dergelijke motoren nog niet commercieel beschikbaar en nog geen metingen onder praktijkomstandigheden uitgevoerd zijn, kan over eventuele niveaus van emissies nog geen uitspraak gedaan worden. Net als bij voertuigen op andere energiedragers zorgen waterstofvoertuigen wel voor emissies van fijnstofdeeltjes als gevolg van remmen- en bandenslijtage. De hoeveelheid is vergelijkbaar met die van conventionele voertuigen.

3.9 Personenwagens overzicht

3.9.1 Klimaat (CO₂)

Het belangrijkste broeikasgas dat wordt uitgestoten door motorvoertuigen is CO₂. De hoogte van de CO₂-emissies uit de uitlaat is afhankelijk van het energiegebruik en het type energiedrager. Doordat het energiegebruik in sterke mate wordt bepaald door het voertuiggewicht, stoot een grotere, zwaardere auto ook meer CO₂ uit. Om die reden is ervoor gekozen om de CO₂-emissies van personenauto's te onderscheiden naar zogenaamde marktsegmenten. Segment A zijn kleinere voertuigen en segment E+ zijn grote auto's.

Ook bij het winnen, produceren en distribueren van energiedragers komt CO₂ vrij. Zo hebben elektrische en waterstofauto's geen uitlaatemissies, maar indien er gebruik wordt gemaakt van fossiele brandstoffen wordt er bij de productie van elektriciteit en waterstof wel CO₂ uitgestoten. Voor de volledigheid worden zowel de uitlaatemissies als de totale ketenemissies gepresenteerd.

Uitlaatemissies (TTW)

Gemiddeld stoten dieselpersonenauto's per kilometer ongeveer 10 á 15% minder CO₂ uit dan equivalente benzineauto's⁴¹. Dit komt doordat dieselmotoren gemiddeld een hoger rendement hebben dan benzineauto's.

⁴¹ Ligterink et al, Real world fuel consumption and electricity consumption of passenger cars and light duty commercial vehicles 2021, TNO report, march 2022

Plug-in hybride auto's hebben lagere CO₂-uitlaatemissies doordat ze deels elektrisch rijden. Doordat het gewicht van plug-in hybride auto's in de segmenten B en E+ aanzienlijk hoger is dan van reguliere benzineauto's, zijn de CO₂-emissies maar beperkt lager.

De koolstofinhoud van CNG is ongeveer 23% lager dan die van benzine. Dit betekent dat er 23% minder CO₂-emissies vrijkomen bij dezelfde hoeveelheid geleverde energie. Echter, CNG-voertuigen zijn 10% tot 15% zwaarder dan vergelijkbare benzinevoertuigen, voornamelijk door de zwaardere brandstoftank. Hierdoor gebruikt een CNG-voertuig meer energie dan een equivalent benzinevoertuig. Deze hogere massa beperkt het CO₂-voordeel van CNG-auto's ten opzichte van equivalente benzineauto's 16% tot 19% afhankelijk van het gewicht van brandstoftank. Voor voertuigen die zijn omgebouwd om op CNG te kunnen rijden geldt dat het rendement wat lager kan liggen waardoor de CO₂-emissie een aantal procenten hoger kan zijn dan die van af-fabriek CNG-voertuigen.

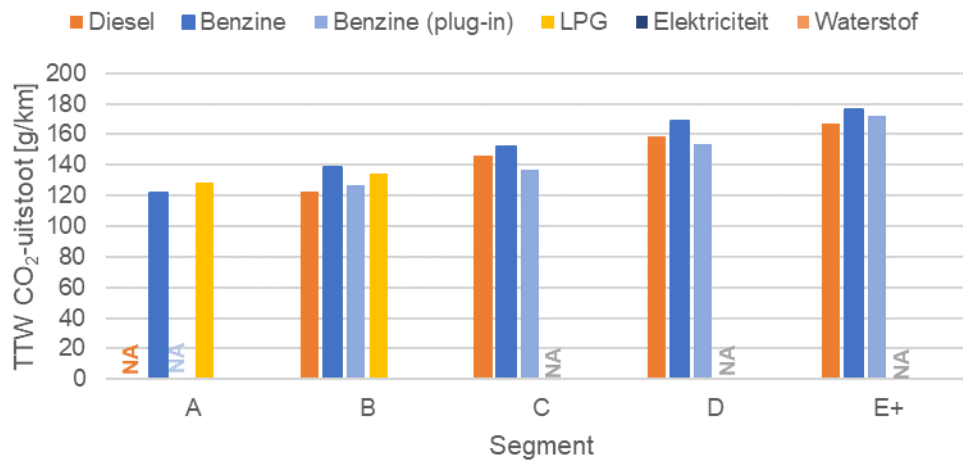
Ook LPG heeft een lagere koolstofinhoud die ongeveer 12% lager is dan van benzine. Net als voor CNG-voertuigen, geldt ook voor LPG-voertuigen dat het gewicht hoger is dan van equivalente benzinevoertuigen. Dit leidt ertoe dat het CO₂-voordeel van LPG-voertuigen kleiner is dan 12%. Afhankelijk van het gewicht van de LPG-brandstoftank zijn de CO₂-uitlaatemissies van LPG-voertuigen 6% tot 9% lager dan van equivalente benzinevoertuigen. Een (zeer) beperkt gedeelte van de kilometers die worden gereden met LPG-bi-fuel-voertuigen worden gereden op benzine. In dat geval geldt dat de CO₂-emissies ongeveer gelijk zijn aan die van benzinevoertuigen.

Elektrische en waterstofauto's (brandstofcel) hebben geen CO₂-uitlaatemissies.

De CO₂-emissies weergegeven in Figuur 17 tonen de gemiddelde CO₂-emissies van de bestverkochte voertuigen in de periode 2020 – 2023⁴². In bepaalde marktsegmenten zijn geen voertuigen beschikbaar van een bepaalde energiedrager, deze zijn aangeduid als 'NA'.

Zoals te zien in Figuur 17, kunnen de verschillen tussen CO₂-emissies van voertuigen op verschillende energiedragers afwijken van de hierboven beschreven waarden. Dit komt voornamelijk doordat de voertuigen op de ene energiedrager gemiddeld wat groter en zwaarder zijn dan de voertuigen op een andere energiedrager (in hetzelfde segment). Zo geldt bijvoorbeeld voor de bestverkochte dieselauto's in segment B en segment E+ dat ze gemiddeld aanzienlijk zwaarder dan de bestverkochte benzineauto's. Om die reden zijn de CO₂-uitlaatemissies van dieselauto's in deze segmenten minder dan 10 á 15% lager dan die van benzineauto's.

⁴² Hiervoor is gekozen omdat de kans groot is dat de lezers van dit rapport die betrokken zijn bij het aanschaffen van voertuigen, zullen kiezen uit deze meest verkochte modellen.

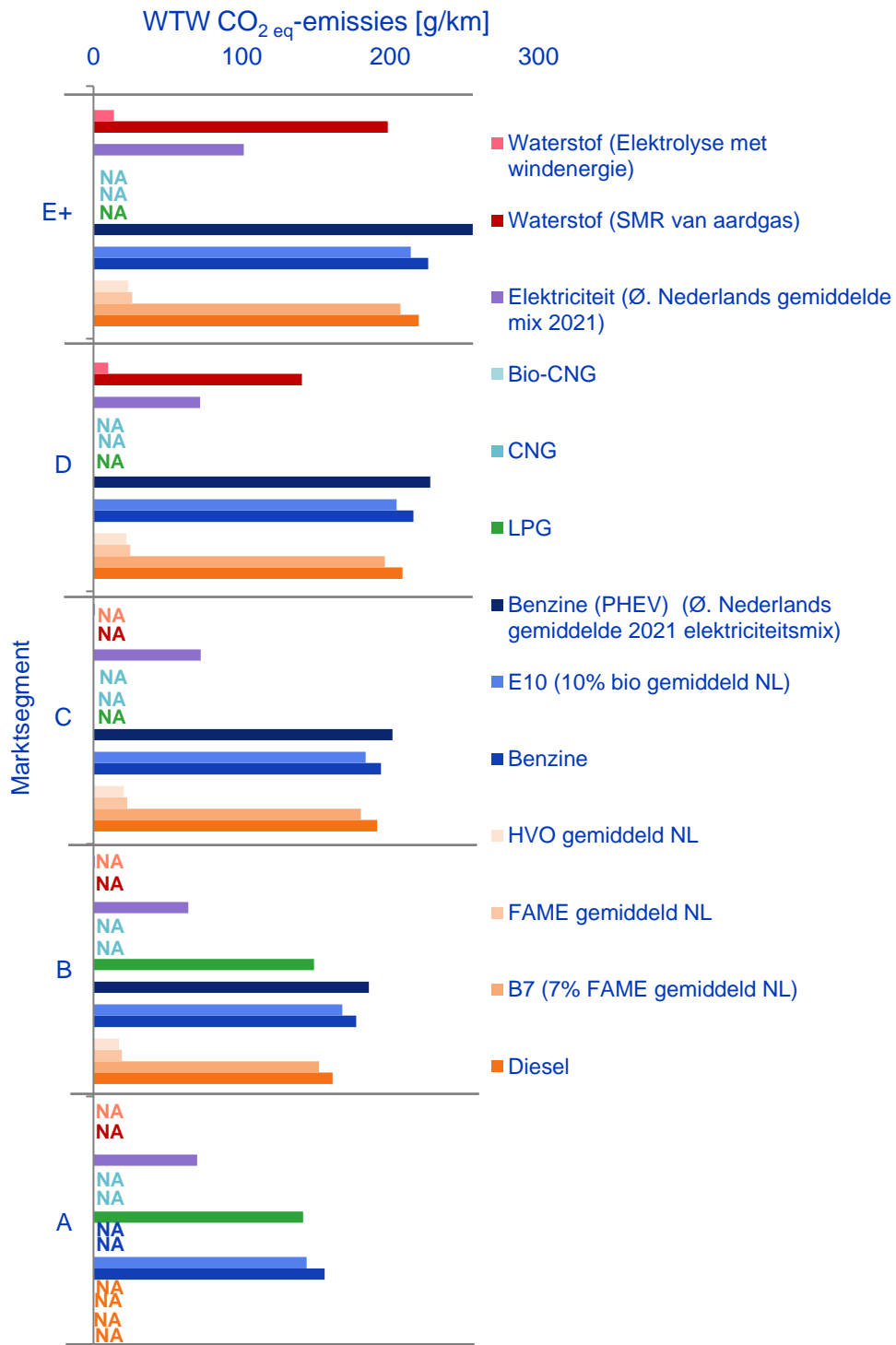


Figuur 17: Gemiddelde CO₂-uitlaatemissies van moderne personenauto's (2020-2023) op verschillende energiedragers. Het gearceerde kolommen geven waarden aan die zijn afgeleid van benzinevoertuigen vanwege gebrek aan voldoende data. In bepaalde marktsegmenten zijn geen voertuigen beschikbaar van een bepaalde energiedrager, deze zijn aangeduid als 'NA'.

Bij het gebruik van pure biobrandstoffen zijn de CO₂-uitlaatemissies nul volgens internationale rekenregels (IPCC).

Ketenemissies (WTW)

Wanneer ook de broeikasgasemissies als gevolg van productie en distributie van energiedragers in ogenschouw wordt genomen, ontstaat een ander beeld.



Figuur 18: Gemiddelde CO₂-ketenemissies (WTW) van moderne personenauto's (2020-2023) op verschillende energiedragers. In bepaalde marktsegmenten zijn geen voertuigen beschikbaar van een bepaalde energiedrager, deze zijn aangeduid als 'NA'.

Het gebruik van biobrandstoffen leidt tot lagere CO₂-ketenemissies, wanneer deze voldoen aan de Europese duurzaamheidscriteria, zoals die ook voor Nederlandse jaarverplichting gehanteerd worden.

Doordat de biomassa die is gebruikt voor de productie van biobrandstof evenveel CO₂ heeft opgenomen als door het voertuig wordt uitgestoten, zijn er netto geen CO₂-uitlaatemissies. Echter, de productie en distributie van biobrandstoffen veroorzaken wel CO₂-emissies. De totale CO₂-ketenemissies zijn daarom wel hoger dan nul. Het gebruik van pure HVO of FAME leidt tot aanzienlijk minder CO₂-ketenemissies dan fossiele diesel.

Het gebruik van B7, waarbij dergelijke biobrandstoffen beperkt worden bijgemengd bij fossiele diesel, leidt tot beperkte (naar rato van bijmenging) CO₂-emissiereductie. Voor het gebruik van benzine met een beperkte hoeveelheid bio-ethanol (E10) geldt hetzelfde.

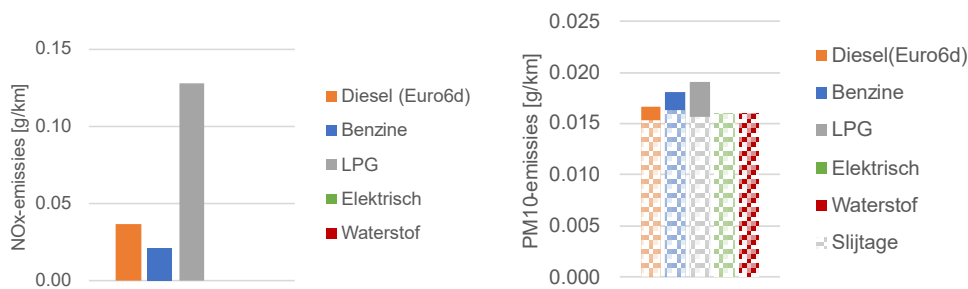
De ketenemissies van elektrische voertuigen is afhankelijk van de wijze waarop de elektriciteit wordt opgewekt. De Nederlandse elektriciteitsmix bevat een toenemend aandeel hernieuwbaar opgewekte elektriciteit. De CO₂ emissies per MJ gaan hierdoor redelijk snel omlaag.

Bij de productie en distributie van waterstof komt meer CO₂ vrij dan bij elektriciteit. Momenteel wordt het leeuwendeel van de waterstof geproduceerd uit aardgas. Deze wijze van productie leidt tot een aanzienlijke hoeveelheid CO₂-emissies waardoor de CO₂-ketenemissies van dezelfde orde zijn als die van fossiele brandstoffen. Bij het gebruik van hernieuwbare elektriciteit rapporteert de NEA en ook het JRC report, JEC Well to Tank report v5, JRC119036, 2020 een beperkte CO₂ uitstoot in de keten van waterstofproductie en -distributie.

3.9.2 Luchtkwaliteit

De landelijk gehanteerde emissiefactoren die door TNO worden opgesteld op basis van de uitgevoerde meetprogramma's laten zien dat de NO_x-emissies in de loop der jaren zijn gedaald. Tot zeer recent waren de NO_x-emissies van dieselpersonenauto's gemiddeld aanzienlijk hoger dan die van andere brandstoffen. Door strengere wetgeving (Euro6d) die momenteel geldt, is de NO_x-emissie van nieuwe dieselauto's vanaf 2020, ook in de praktijk, aanzienlijk gedaald en veel meer vergelijkbaar met die van benzineauto's en auto's op gas. De NO_x-emissies van benzineauto's zullen nog wat lager blijven dan die van de andere energiedragers. Elektrische en waterstofpersonenauto's (FCEV) stoten helemaal geen NO_x-emissies uit, omdat er geen brandstof wordt verbrand.

Voor oudere voertuigen kan het gebruik van biobrandstoffen in plaats van fossiele brandstoffen nog wel leiden tot lagere NO_x-emissies. Voor moderne (Euro 6) auto's geldt dat de nabehandelingstechnologieën al zo effectief zijn dat het gebruik van biobrandstoffen niet leidt tot andere NO_x-emissies voor de verschillende typen energiedragers.



Figuur 19: NO_x-emissies (links) en fijnstofemissies (rechts) van moderne personenauto's (Euro 6) op verschillende energiedragers.

De fijnstofemissies waren voor diesel aanzienlijk hoger dan voor andere brandstoffen. Vanaf 2007 heeft het gebruik van gesloten roetfilters geleid tot een aanzienlijk daling, waardoor de fijnstofemissies uit de uitlaat van moderne dieselpersonenauto's vergelijkbare is met die van voertuigen op benzine, LPG en CNG. Doordat er bij elektrische en waterstofauto's (FCEV) geen verbranding plaatsvindt, hebben deze voertuigen geen uitlaatemissies. Voor alle energiedragers geldt wel dat er fijnstof vrij komt van banden en remmen. Doordat de fijnstofemissies uit de uitlaat bij moderne voertuigen erg laag zijn, zijn deze emissies (gemeten in gewicht) zelfs aanzienlijk hoger dan uit de uitlaat.

Ook voor fijnstof geldt dat het gebruik van biobrandstoffen in plaats van fossiele brandstoffen voor moderne auto's weinig tot geen effect heeft.

3.10 Bestelwagens overzicht

3.10.1 Klimaat (CO₂)

Het belangrijkste broeikasgas dat wordt uitgestoten door motorvoertuigen is CO₂. De hoogte van de CO₂-emissies uit de uitlaat is afhankelijk van het energiegebruik en het type energiedrager. Doordat het energiegebruik in sterke mate wordt bepaald door het voertuiggewicht, stoot een grotere, zwaardere auto ook meer CO₂ uit. Om die reden is ervoor gekozen om de CO₂-emissies van bestelwagens te onderscheiden naar referentiegewichtsklassen die ook worden gehanteerd voor Europese emissiewetgeving, te weten Klasse I (≤1305 kg), Klasse II (1305-1760 kg) en Klasse III (>1760 kg).

Ook bij het winnen, produceren en distribueren van energiedragers komt CO₂ vrij. Zo hebben elektrische en waterstofauto's (brandstofcel) geen uitlaatemissies, maar indien er gebruik wordt gemaakt van fossiele brandstoffen wordt er bij de productie van elektriciteit en waterstof wel CO₂ uitgestoten. Voor de volledigheid worden zowel de uitlaatemissies als de totale ketenemissies gepresenteerd.

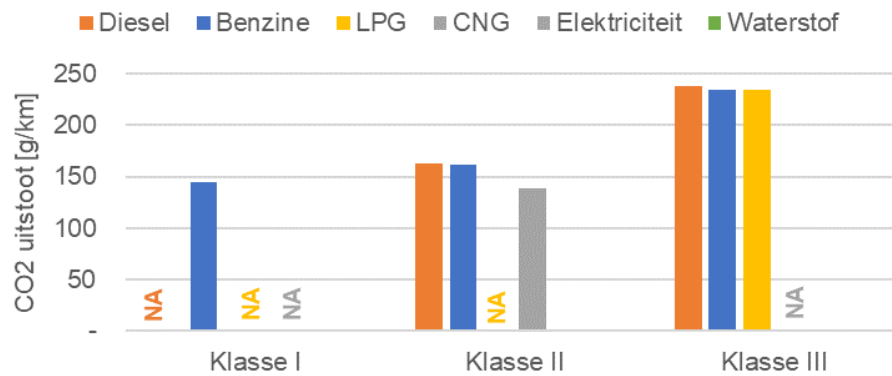
Uitlaatemissies (TTW)

Gemiddeld stoten dieselauto's per kilometer ongeveer 10 á 15% minder CO₂ uit dan equivalente benzineauto's⁴³. Elektrische en waterstofauto's (FCEV) hebben geen CO₂-uitlaatemissies.

De CO₂-emissies weergegeven in Figuur 20 tonen de gemiddelde CO₂-emissies van de verkochte bestelauto's in de periode 2020 – 2023⁴⁴. De gemiddelde CO₂-emissies van nieuw verkochte bestelauto's binnen een marktsegment kunnen afwijken van de hierboven beschreven CO₂-verschillen tussen equivalente voertuigen. Dit komt voornamelijk doordat de voertuigen op de ene brandstof gemiddeld wat groter en zwaarder zijn dan de voertuigen in hetzelfde segment op een andere brandstof.

⁴³ Ligterink et al, Real world fuel consumption and electricity consumption of passenger cars and light duty commercial vehicles 2021, TNO report, march 2022

⁴⁴ Hiervoor is gekozen omdat de kans groot is dat de lezers van dit rapport die betrokken zijn bij het aanschaffen van voertuigen, zullen kiezen uit deze meest verkochte modellen.

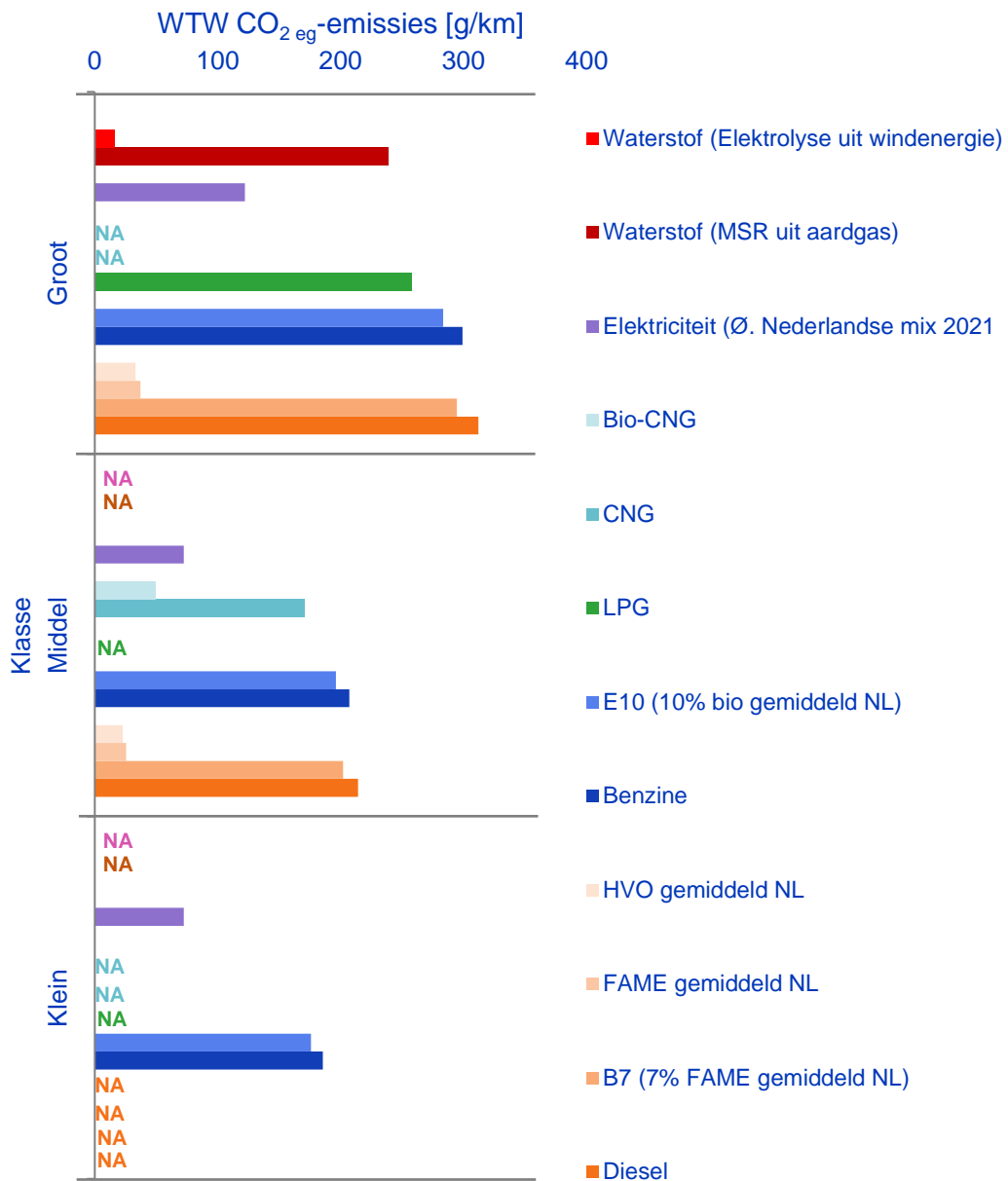


Figuur 20: Gemiddelde CO₂-uitlaatmissies van moderne bestelwagens (2020-2023) op verschillende energiedragers.

Bij het gebruik van pure biobrandstoffen zijn de CO₂-uitlaatmissies nul volgens internationale rekenregels (IPCC).

Ketenemissies (WTW)

Wanneer ook de broeikasgasemissies als gevolg van productie en distributie van energiedragers in ogenschouw wordt genomen, ontstaat een ander beeld.



Figuur 21: CO₂-ketenemissies van verkochte bestelauto's (2020-2023) op verschillende energiedragers voor verschillende marktsegmenten

Het gebruik van biobrandstoffen kan leiden tot lagere CO₂-ketenemissies. Doordat de biomassa die is gebruikt voor de productie van biobrandstof evenveel CO₂ heeft opgenomen als door het voertuig wordt uitgestoten, zijn er netto geen CO₂-uitlaatemissies. Echter, de productie en distributie van biobrandstoffen veroorzaken wel CO₂-emissies. De totale CO₂-ketenemissies zijn daarom wel hoger dan nul. Het gebruik van pure HVO of FAME leidt tot aanzienlijk minder CO₂-ketenemissies dan fossiele diesel. Het gebruik van B7, waarbij dergelijke biobrandstoffen beperkt worden bijgemengd bij fossiele diesel, leidt tot beperkte CO₂-emissiereductie. Voor het gebruik van benzine met een beperkte hoeveelheid bio-ethanol (E10) geldt hetzelfde.

De ketenemissies van elektrische voertuigen is afhankelijk van de wijze waarop de elektriciteit wordt opgewekt. De Nederlandse elektriciteitsmix bevat een toenemend aandeel hernieuwbaar opgewekte elektriciteit. De CO₂ emissies per MJ gaan hierdoor redelijk snel omlaag. Zie ook Tabel 14.

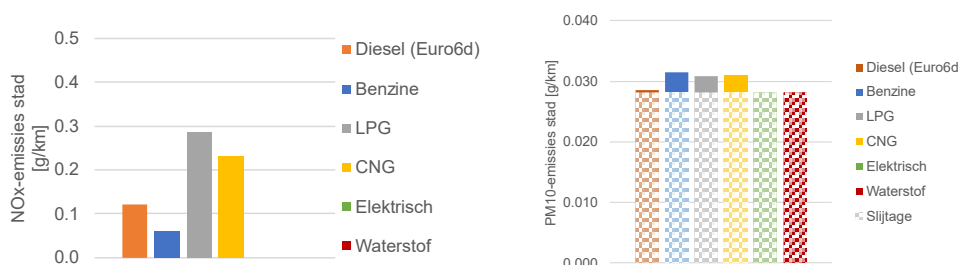
Bij de productie en distributie van waterstof komt meer CO₂ vrij dan bij elektriciteit. Momenteel wordt het leeuwendeel van de waterstof geproduceerd uit aardgas. Deze wijze van productie leidt tot een aanzienlijke hoeveelheid CO₂-emissies waardoor de CO₂-ketenemissies van dezelfde orde zijn als die van fossiele brandstoffen. Wanneer de elektriciteit wordt verkregen uit duurzame bronnen, kunnen de CO₂-ketenemissies voor de productie van waterstof zeer sterk dalen. Bij het gebruik van hernieuwbare elektriciteit rapporteert de NEA en ook het JRC report, JEC Well-to-Tank report v5, JRC119036, 2020 een beperkte CO₂ uitstoot in de keten van waterstofproductie en -distributie.

3.10.2 Luchtkwaliteit

Vanwege de dominantie van diesel in de Nederlandse bestelautovloot, zijn er in het recente verleden maar beperkt NO_x- en PM₁₀-emissiemetingen verricht aan bestelauto's op andere brandstoffen. Om die reden zijn emissiefactoren alleen voor dieselveertuigen beschikbaar voor verschillende gewichtsklassen. Voor andere energiedragers wordt daarmee geen onderscheid gemaakt naar gewichtsklassen. Dit is gerechtvaardigd omdat de uitstoot van NO_x en PM₁₀ maar in beperkte mate afhankelijk is van het voertuiggewicht.

De landelijk gehanteerde emissiefactoren die door TNO worden opgesteld op basis van de uitgevoerde meetprogramma's laten zien dat de NO_x-emissies in de loop der jaren zijn gedaald. Tot zeer recent waren de NO_x-emissies van dieselbestelauto's gemiddeld aanzienlijk hoger dan die van andere brandstoffen. Door strengere wetgeving (Euro6d) die momenteel geldt, is de NO_x-emissie van nieuwe diesel bestelauto's vanaf 2020, ook in de praktijk, aanzienlijk gedaald en veel meer vergelijkbaar met die van benzine bestelauto's en bestelauto's op gas. Elektrische en waterstofbestelauto's (brandstofcel) stoten helemaal geen NO_x-emissies uit, omdat er geen brandstof wordt verbrand.

Voor oudere voertuigen kan het gebruik van biobrandstoffen in plaats van fossiele brandstoffen nog wel leiden tot andere NO_x-emissies. Voor moderne (Euro 6) auto's geldt dat de nabehandelingstechnologieën al zo effectief zijn dat het gebruik van biobrandstoffen niet leidt tot andere NO_x-emissies voor de verschillende typen energiedragers.



Figuur 22: NO_x-emissies (links) en fijnstofemissies (rechts) van moderne bestelauto's (Euro 6) op verschillende energiedragers.

De fijnstofemissies waren voor diesel aanzienlijk hoger dan voor andere brandstoffen. Vanaf 2007 heeft het gebruik van gesloten roetfilters geleid tot een aanzienlijk daling, waardoor de fijnstofemissies uit de uitlaat van moderne dieselbestelauto's vergelijkbare is met die van voertuigen op benzine, LPG en CNG.

Doordat er bij elektrische en waterstofauto's geen verbranding plaatsvindt, hebben deze voertuigen geen uitlaatemissies. Voor alle energiedragers geldt wel dat er fijnstof vrij komt van wegdek, banden en remmen. Doordat de fijnstofemissies uit de uitlaat bij moderne voertuigen erg laag zijn, zijn deze emissies (gemeten in gewicht) zelfs aanzienlijk hoger dan uit de uitlaat.

Ook voor fijnstof geldt dat het gebruik van biobrandstoffen in plaats van fossiele brandstoffen voor moderne auto's heel beperkt of geen effect heeft.

4 Vrachtwagens en trekker oplegger emissies

Zoals beschreven in paragraaf 1.2.1, zijn de CO₂-uitlaatemissies bij het gebruik van pure biobrandstoffen nul volgens internationale rekenregels (IPCC). In onderstaande paragraaf zijn uitlaatemissies gedefinieerd als de werkelijke CO₂-emissies uit de uitlaat. De uitlaatemissies als gevolg van biobrandstoffen worden hierin ook meegenomen. Er wordt dus niet de definitie van de IPCC gedefinieerd. In de paragraaf over ketenemissies tellen de biobrandstoffen wel als nul.

4.1 Vrachtwagens en trekker opleggers op diesel

4.1.1 Klimaat (CO₂)

Uitlaatemissies (TTW)

De CO₂-emissies van vrachtwagens zijn in de laatste decennia slechts beperkt afgenomen. Motoren worden wel zuiniger door de tijd, maar netto lijkt de verbetering beperkt door andere tegenwerkende trends. Door de invoering van Europese wetgeving (EU 2019/1242)⁴⁵, is de verwachting dat dit in de komende jaren wel zal gebeuren.

De CO₂-emissies van dieselvrachtwagens zijn bepaald door TNO op basis van metingen aan moderne, Euro VI trucks^{46, 47, 48} en weergegeven Figuur 23. Hierin is te zien dat de er per gereden kilometer in de stad, meer CO₂ wordt uitgestoten dan op de snelweg.

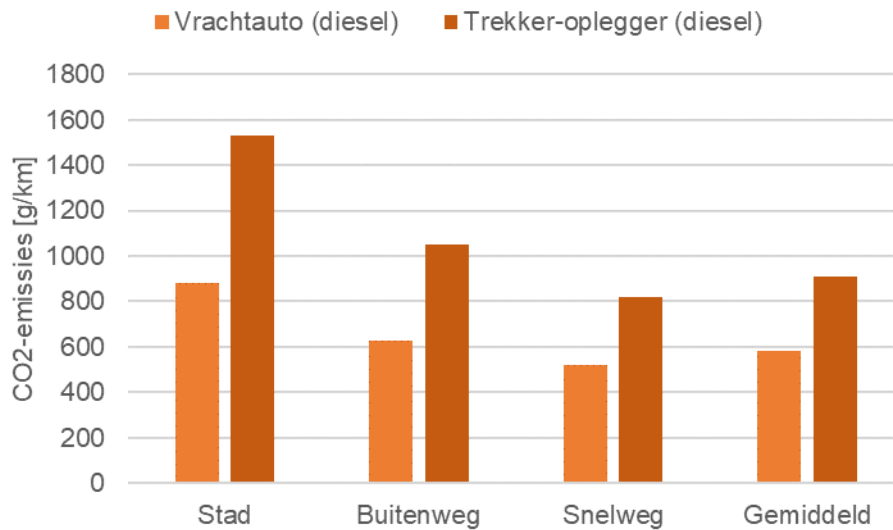
Daarnaast laat de Figuur zien dat trekker-opleggers per kilometer meer CO₂ uitstoten dan vrachtwagens. Dit komt doordat trekker-opleggers zwaarder zijn, vanwege een grotere laadvermogen. Per vervoerd product zijn de CO₂-emissies van trekker-opleggers (over dezelfde afstand) wel lager dan van vrachtwagens.

⁴⁵ De doelstellingen voor 2025 en 2030 zijn respectievelijk 15% en 20% CO₂-reductie ten opzichte van het EU-gemiddelde in de referentieperiode (1 juli 2019-30 juni 2020)

⁴⁶ TNO 2016. 2016 Emission factors for diesel Euro-6 passenger cars, light commercial vehicles and Euro-VI trucks. TNO 2016 R10304v2. 7 March 2016

⁴⁷ Ligterink et al, Emissiefactoren wegverkeer 2023, TNO rapport 2023 R11202, juni 2023

⁴⁸ Vermeulen et al, Dutch in-service emissions testing programma 2015-2018 for heavy duty vehicles: status quo Euro VI NOx emissions, TNO 2019 R10519, April 2019



Figuur 23: Praktijk CO₂-uitlaatmissies van moderne (Euro VI) vrachtauto's en trekker-opleggers op verschillende wegtypen.

Bij de nabehandeling van uitlaatgassen in moderne dieselveertuigen komt N₂O vrij. N₂O is een broeikasgas en heeft een 298 keer⁴⁹ sterker effect dan CO₂. De N₂O-emissies kunnen worden uitgedrukt als CO₂-equivalente emissies door ze te vermenigvuldigen met 298. In Nederland worden emissiefactoren voor N₂O voor o.a. vrachtverkeer door TNO ingebracht in de taakgroep verkeer en Vervoer Van de Emissieregistratie. Ook rapporteert TNO regelmatig over de emissiefactoren.⁵⁰

Ketenemissies (WTW)

Ook bij de productie en distributie van energiedragers komen broeikasgassen vrij; we noemen dit de zogenaamde Well-to-Tank emissies (WTT). Alle emissies over de gehele brandstofketen zijn de Well-to-wheel (WTW) emissies. Om een basisinzicht in de ontwikkeling van de WTW emissies te krijgen, brengen we hier de CO_{2-eq} emissies van de diverse energiedragers over de gehele keten in beeld.

Tabel 15: CO₂-ketenemissies van fossiele diesel en dieselvangers uit biomassa⁵¹.

	WTW CO ₂ -emissies [gCO ₂ /MJ]	CO ₂ -emissiereductie t.o.v. fossiel equivalent
Fossiele diesel	95,1	
FAME	11,3	88,1%
HVO	10,1	89%
Totaal dieselvangers uit biomassa	11	88,4%
Diesel (fossiel + dieselvangers)	88,6	6,8%

⁴⁹ IPCC, 2023: Climate Change 2023: AR6 Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change

⁵⁰ Ligterink et al, Emissiefactoren wegverkeer: wijzigingen en uitbreidingen 2021, TNO 2021 R11981, oktober 2021

⁵¹ Rapportage Energie voor Vervoer in Nederland 2019. Naleving verplichtingen wet- en regelgeving Energie voor Vervoer, NEA jaarlijkse rapportage

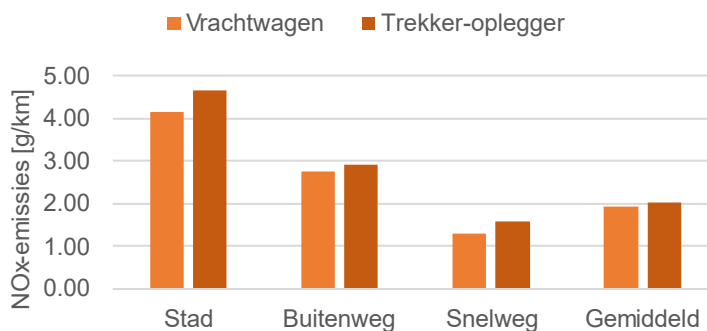
De CO₂-ketenemissies van dieselvangers op basis van biomassa die in Nederland worden gebruikt zijn gemiddeld 88,4% lager dan van fossiele diesel (zie bovenstaande tabel). Aangezien maar een beperkt deel van de diesel in Nederland uit biomassa is geproduceerd (7,7% op energiebasis), zijn de totale CO₂-ketenemissies van in Nederland gebruikte diesel 6,8% lager dan van fossiele diesel. Wanneer pure biobrandstoffen worden gebruikt, bijvoorbeeld door vlooteigenaren met eigen opslag- en tankfaciliteiten, gelden de CO₂-ketenemissiereducties zoals weergegeven in de rechter kolom van bovenstaande tabel.

4.1.2 Luchtkwaliteit

Historisch waren de NO_x-emissies van dieselvoertuigen hoog. Dit gold ook voor zware voertuigen zoals vrachtwagens en trekker-opleggers. Door de jaren heen heeft de introductie van nieuwe emissie reducerende technologieën geleid tot een afname van deze emissies.

Daarnaast is recent de Europese testmethode voor de typegoedkeuring van trucks aangepast. Als gevolg van nieuwe technologieën en een uitgebreidere emissietest, zijn de NO_x-emissies met de tijd afgenomen.

Op basis van een aantal recente metingen aan moderne Euro VI dieselvrachtwagens blijkt dat de NO_x-emissies sterk afhangen van de wijze waarop het voertuig wordt ingezet⁵² (zie onderstaande tabel). Bij inzet in stedelijk gebied, waar de snelheden laag liggen, zijn de NO_x-emissies aanzienlijk hoger dan bij inzet op de snelweg. Dit komt doordat de katalysator bij lage last (typisch voor inzet in stedelijk gebied) niet goed opwarmt waardoor deze niet goed functioneert. Bij hoge last (typisch voor inzet op snelwegen) warmt de katalysator wel voldoende op, waardoor deze wel effectief de NO_x-emissies reduceert.



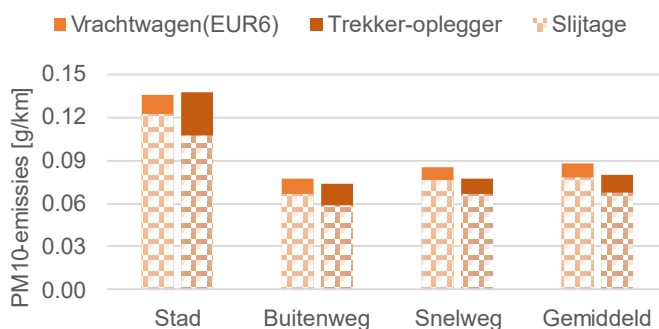
Figuur 24: NO_x-emissies van moderne, Euro VI diesel vrachtauto's en trekker-opleggers bij typisch gebruik om stedelijke omgeving en op snelwegen.

Het roetfilter is de belangrijkste technologie om de uitstoot van deeltjes door verbranding te verminderen. Als gevolg van de introductie van roetfilters is de fijnstofuitstoot aanzienlijk afgenomen. Dit is terug te zien in de emissiefactoren die zijn gebaseerd op emissiemeting van TNO. Net als bij de personen- en bestelauto's geldt ook voor de zware voertuigen dat de fijnstofemissies als gevolg van slijtage van banden en remmen veel groter is dan fijnstofemissies uit de uitlaat.

⁵² TNO 2019. Emissions testing of a Euro VI LNG-diesel dual fuel truck in the Netherlands. TNO 2019 R10193. 8 April 2019

Een verhoogde uitstoot kan theoretisch nog wel optreden wanneer het roetfilter beschadigd raakt of door onrechtmatig verwijderen van het filter. Er zijn geen aanwijzingen dat dit laatste momenteel op grote schaal plaatsvindt.

Het effect van het gebruik van biobrandstoffen op luchtverontreinigende emissies hangt af van de motor- en nabehandelingstechniek aanwezig in een voertuig, maar ook van de eigenschappen van de biobrandstoffen in vergelijking met de fossiele variant. Door verbeteringen in de motoren en nabehandelingstechnieken is de impact van de brandstof op de emissies sterk afgenomen, met name bij voertuigen die voldoen aan de laatste voertuigstandaarden. Bij oudere voertuigen met oudere motoren en minder geavanceerde nabehandelingstechnieken is de impact van de brandstof groter.



Figuur 25: PM₁₀-emissies van moderne, Euro VI diesel vrachtauto's en trekker-opleggers bij typisch gebruik om stedelijke omgeving en op snelwegen. Het gearceerde deel zijn emissies als gevolg van slijtage van banden en remmen.

4.2 Vrachtwagens en trekker opleggers op dieselvevangers uit biomassa

Zoals beschreven in paragraaf 1.2.1, zijn de CO₂-uitlaatemissies bij het gebruik van pure biobrandstoffen nul volgens internationale rekenregels (IPCC). In onderstaande paragraaf zijn uitlaatemissies gedefinieerd als de werkelijke CO₂-emissies uit de uitlaat.

De uitlaatemissies als gevolg van biobrandstoffen worden hierin ook meegenomen. Er wordt dus niet de definitie van de IPCC gedefinieerd. In de paragraaf over ketenemissies tellen de biobrandstoffen wel als nul.

4.2.1 Klimaat (CO₂)

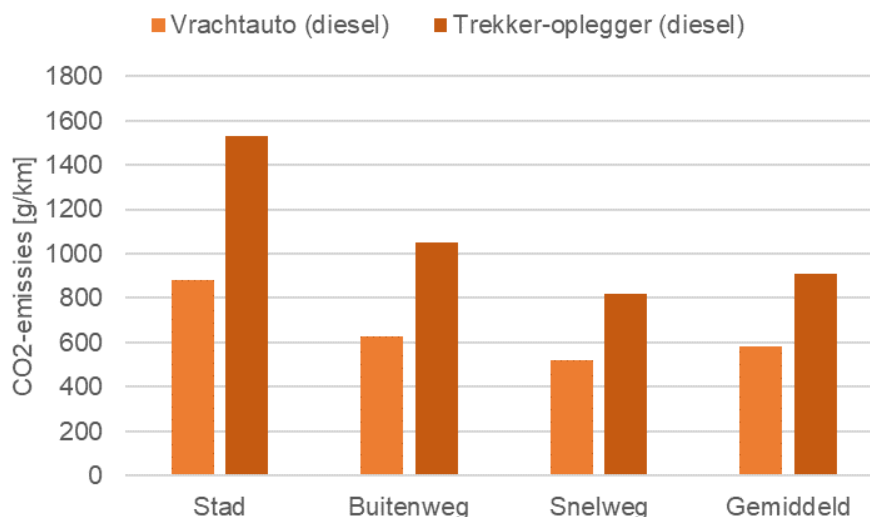
Uitlaatemissies (TTW)

De CO₂-emissies van vrachtwagens zijn in de laatste decennia slechts beperkt afgenomen. Motoren worden wel zuiniger door de tijd, maar netto lijkt de verbetering beperkt door andere tegenwerkende trends. Door de recente invoering van Europese wetgeving (EU 2019/1242)⁵³, is de verwachting dat dit in de komende jaren wel zal gebeuren.

⁵³ De doelstellingen voor 2025 en 2030 zijn respectievelijk 15% en 20% CO₂-reductie ten opzichte van het EU-gemiddelde in de referentieperiode (1 juli 2019-30 juni 2020)

De CO₂-emissies van dieselvrachtwagens zijn bepaald door TNO op basis van metingen aan moderne, Euro VI trucks⁵⁴ en weergegeven in onderstaande Figuur. Hierin is te zien dat de er per gereden kilometer in de stad, meer CO₂ wordt uitgestoten dan op de snelweg.

Daarnaast laat de Figuur zien dat trekker-opleggers per kilometer meer CO₂ uitstoten dan vrachtwagens. Dit komt doordat trekker-opleggers zwaarder zijn, vanwege een groter laadvermogen. Per vervoerd product zijn de CO₂-emissies van trekker-opleggers (over dezelfde afstand) wel lager dan van vrachtwagens.



Figuur 26: Praktijk CO₂-emissies van moderne (Euro VI) vrachtauto's en trekker opleggers op verschillende wegtypen.

Bij de nabehandeling van uitlaatgassen in moderne dieselveertuigen komt N₂O vrij. N₂O is een broeikasgas en heeft een 298 keer⁵⁵ sterker effect dan CO₂. De N₂O-emissies kunnen worden uitgedrukt als CO₂-equivalente emissies door ze te vermenigvuldigen met 298. Er zijn (Europees) beperkt gegevens van de NO₂ uitstoot door voertuigen beschikbaar.

Ketenemissies (WTW)

Ook bij de productie en distributie van energiedragers komen broeikasgassen vrij; we noemen dit de zogenaamde Well-to-Tank emissies (WTT). Alle emissies over de gehele brandstofketen zijn de Well-to-wheel (WTW) emissies. Om een basisinzicht in de ontwikkeling van de WTW-emissies te krijgen, brengen we hier de CO_{2-eq} emissies van de diverse energiedragers over de gehele keten in beeld.

⁵⁴ TNO 2016. 2016 Emission factors for diesel Euro-6 passenger cars, light commercial vehicles and Euro-VI trucks. TNO 2016 R10304v2. 7 March 2016

⁵⁵ IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp

Tabel 16: CO₂-eq ketenemissies⁵³ van fossiele diesel en dieselvangers uit biomassa

	WTW CO ₂ -emissies [gCO ₂ /MJ]	CO ₂ -emissiereductie t.o.v. fossiel equivalent
Fossiele diesel	95,11	
FAME	11,3	88,1%
HVO	10,1	89%
Totaal dieselvangers uit biomassa	11	88,4%
Diesel (fossiel + dieselvangers)	88,6	6,8%

Nadere toelichting op de getallen en gebruikte feedstock staat beschreven in paragraaf 2.2.1.

4.2.2 Luchtkwaliteit

Het effect van het gebruik van biobrandstoffen op luchtverontreinigende emissies hangt af van de motor- en nabehandelingstechniek aanwezig in een voertuig, maar ook van de eigenschappen van de biobrandstoffen in vergelijking met de fossiele variant. Door verbeteringen in de motoren en nabehandelingstechnieken is de impact van de brandstof op de emissies sterk afgenomen, met name bij voertuigen die voldoen aan de laatste voertuigstandaarden. Bij oudere voertuigen met oudere motoren en minder geavanceerde nabehandelingstechnieken is de impact van de brandstof groter.

Over het algemeen geldt voor de inzet van FAME dat het in hoge blends CO, VOC en PM kan reduceren. Voor minder geavanceerde motoren kan dit 50% bedragen. Tegelijkertijd kan FAME in hoge blends voor een toename van NO_x-emissies zorgen. Dit komt door het hoger zuurstofgehalte in FAME en daardoor hogere verbrandingstemperaturen.

HVO is een paraffine brandstof en verbetert door de hogere ontstekingskwaliteit het verbrandingsproces. Door deze verbetering worden bij oudere motoren emissies gereduceerd (CO, koolwaterstof en PM emissies) en heeft HVO in tegenstelling tot FAME de potentie om bij oudere motoren ook NO_x-emissies met ongeveer 10% te reduceren.

Voor oudere truckmotoren (Euro III of lager) geldt dat FAME en HVO luchtverontreinigende emissies kunnen reduceren. Bij nieuwe motoren die voldoen aan de laatste emissiestandaarden zijn de emissies laag ongeacht de brandstofkeuze (Nylund et al. 2018). Uit recente metingen van TNO, die in het najaar van 2023 gepubliceerd worden, blijkt dat bij niet (continu) goed functioneren van moderne uitlaatgasnabehandeling, HVO emissies kan reduceren.

4.3 Vrachtwagens en trekker opleggers op LNG en bio-LNG

Zoals beschreven in paragraaf 1.2.1, zijn de CO₂-uitlaatemissies bij het gebruik van pure biobrandstoffen nul volgens internationale rekenregels (IPCC). In onderstaande paragraaf zijn uitlaatemissies gedefinieerd als de werkelijke CO₂-emissies uit de uitlaat.

De uitlaatemissies als gevolg van biobrandstoffen worden hierin ook meegenomen. Er wordt dus niet de definitie van de IPCC gedefinieerd. In de paragraaf over ketenemissies tellen de biobrandstoffen wel als nul.

4.3.1 Klimaat (CO₂)

Uitlaatemissies (TTW)

Naast CO₂ komt er bij LNG-trucks ook het broeikasgas methaan (CH₄) uit de uitlaat. Een gram methaan heeft een 298 keer⁵⁶ sterker broeikaseffect dan CO₂. De methaanemissies kunnen worden uitgedrukt in CO₂-equivalente emissies door ze te vermenigvuldigen met 298. Doordat trucks veel minder methaan uitstoten dan CO₂, is het broeikaseffect van methaan per gereden kilometer veel lager dan van CO₂.

Wanneer de uitstoot van methaan wordt meegenomen in CO₂-equivalente emissies, stoten LNG-trucks met vonkontsteking 5% tot 10% minder CO_{2,eq} uit dan dieseltrucks (op basis van twee door TNO gemeten LNG-trucks)⁵⁷. De CO_{2,eq} van een LNG-truck met een motor op basis van het zelfontbrandingsprincipe waren bij TNO-metingen ongeveer 19% lager⁵⁸.

Naast uitlaatemissies kunnen LNG-voertuigen op andere manieren broeikasgasemissies veroorzaken, namelijk:

- N₂O-uitlaatemissies (een derde broeikasgas, 298 sterker⁴⁹ dan CO₂) geproduceerd in de katalysator;
- ‘boil-off’: het afblazen van de brandstoftank wanneer de druk daarin te hoog wordt;
- Afblazen, bewust ontluchten van gas om de druk in de tank te verlagen, de tank te legen voor reparatie, om restgas uit de tank te laten ontsnappen of om het voertuig aan het einde van de levensduur te demonteren.
- Lekkage van methaan uit buizen die niet (meer) gasdicht zijn

Over de uitstoot van broeikasgassen als gevolg van lekkage, afblazen en boil-off zijn slechts beperkt gegevens beschikbaar. Om die reden is het niet mogelijk om met voldoende zekerheid te stellen wat het effect ervan is op de totale broeikasgasemissies van LNG-trucks.

Ketenemissies (WTW)

Ook bij de productie en distributie van energiedragers komen broeikasgassen vrij; we noemen dit de zogenaamde Well-to-Tank emissies (WTT). Alle emissies over de gehele brandstofketen zijn de Well-to-wheel (WTW) emissies. Om een basisinzicht in de ontwikkeling van de WTW-emissies te krijgen, brengen we hier de CO_{2-eq} emissies van de diverse energiedragers over de gehele keten in beeld.

In tegenstelling tot CNG, dat wordt gedistribueerd via het aardgasnetwerk, wordt LNG (aardgas in vloeibare vorm) vervoerd per truck. De LNG die momenteel in Nederland wordt gebruikt is nog bijna volledig van fossiele oorsprong. De CO₂-ketenemissies van fossiele LNG zijn ongeveer 32% hoger dan de uitlaatemissies^{59,60}. De sector zet in op een groei van het aandeel bio-LNG.

⁵⁶ IPCC, 2023: Climate Change 2023: AR6 Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change

⁵⁷ TNO 2019 R10193 Emissions testing of a Euro VI LNG-diesel dual fuel truck in the Netherlands

⁵⁸ TNO 2017 R11336 Emissions testing of two Euro VI LNG heavy-duty vehicles in the Netherlands: tank-to-wheel emissions

⁵⁹ Nederlandse lijst van energiedragers en standaard CO₂ emissiefactoren, versie januari 2020.

⁶⁰ Rapportage Energie voor Vervoer in Nederland 2019. Naleving verplichtingen wet- en regelgeving Energie voor Vervoer.

Bij het gebruik van de juiste grondstoffen en productiemethoden, leidt het gebruik van dergelijke bio-LNG tot aanzienlijk lagere CO₂-ketenemissies dan het gebruik van fossiele LNG. In een recente studie van CE Delft is deze CO₂-ketenemissiereductie voor een aantal routes bepaald⁶¹. Wanneer gebruik wordt gemaakt van GFT-afval, zal deze reductie ongeveer 65% zijn ten opzichte van fossiele LNG.

4.3.2 Luchtkwaliteit

TNO heeft emissietests uitgevoerd op een aantal Euro VI LNG-vrachtwagens^{62,63}. De gemeten NO_x-emissieniveaus van deze LNG-voertuigen zijn tijdens langeafstandsritten vergelijkbaar met die van dieselloertuigen. Bij gebruik in de stad is het verschil tussen de verschillende LNG-voertuigen aanzienlijk en liggen in de buurt van de NO_x-emissies van vergelijkbare dieselloertuigen. Het aandeel NO₂ in de totale NO_x-uitstoot is voor de geteste LNG-vrachtauto's veel lager dan voor vergelijkbare dieseltrucks. Als gevolg hiervan kan de lokale bijdrage van een LNG-truck aan de NO₂-concentratie in de buitenlucht onder bepaalde omstandigheden lager zijn dan van een equivalente dieseltruck. Voor een gemiddelde lange-afstandsrit liggen de gemeten emissies van NO_x en deeltjesaantallen op een vergelijkbaar niveau als van een groep van reeds geteste Euro VI trucks met een dieselmotor. De effecten zijn voor bio-LNG hetzelfde aangezien het opgewerkt is tot minimaal dezelfde aardgaskwaliteit.

4.4 Vrachtwagens en trekker opleggers batterij-elektrisch

Zoals beschreven in paragraaf 1.2.1, zijn de CO₂-uitlaatemissies bij het gebruik van pure biobrandstoffen nul volgens internationale rekenregels (IPCC). In onderstaande paragraaf zijn uitlaatemissies gedefinieerd als de werkelijke CO₂-emissies uit de uitlaat. De uitlaat-emissies als gevolg van biobrandstoffen worden hierin ook meegenomen. Er wordt dus niet de definitie van de IPCC gedefinieerd. In de paragraaf over ketenemissies tellen de biobrandstoffen wel als nul.

4.4.1 Klimaat (CO₂)

Ook bij de productie en distributie van energiedragers komen broeikasgassen vrij; we noemen dit de zogenaamde Well-to-Tank emissies (WTT). Alle emissies over de gehele brandstofketen zijn de Well-to-wheel (WTW) emissies. Om een basisinzicht in de ontwikkeling van de WTW-emissies te krijgen, brengen we hier de CO_{2-eq} emissies van de diverse energiedragers over de gehele keten in beeld.

De broeikasgasemissies van elektrische vrachtauto's worden voornamelijk bepaald door de productiemethode van elektriciteit, die opgewekt kan worden uit fossiele brandstoffen zoals kolen en gas, maar ook uit hernieuwbare bronnen zoals zonne-energie, windenergie, biogas of biomassa.

⁶¹ CO₂-balansen groengasketens Vergisting en vergassing. Delft, CE Delft, juni 2019.

⁶² TNO 2019. Emissions testing of a Euro VI LNG-diesel dual fuel truck in the Netherlands. TNO 2019 R10193. 8 April 2019

⁶³ TNO 2017 R11336. Emissions testing of two Euro VI LNG heavy-duty vehicles in the Netherlands: tank-to-wheel emissions. 10 November 2017

De vergroening van de elektriciteitsmix in Nederland gaat vrij snel en is van 2018 naar 2020 en 2021 gestegen van 15% (2018) tot 27% (2020) respectievelijk 33%(2021) ⁶⁴, ⁶⁵

De elektriciteit die in Nederland uit het stopcontact komt is een mix met hernieuwbare en niet-hernieuwbare herkomst. De well-to-tank uitstoot wordt dus bepaald door het aandeel groene en grijze (fossiele) stroom in de Nederlandse elektriciteitsmix. Als het aandeel hernieuwbare bronnen toeneemt, dan zal de well-to-wheel CO₂-emissie van een elektrische vrachtauto dalen. Om de uitstoot van elektrische vrachtauto's eerlijk te vergelijken met andere aandrijvingen, dienen bij auto's op fossiele brandstoffen ook de emissies van het raffinage- en distributieproces meegenomen te worden.

4.4.2 Luchtkwaliteit

Een volledig elektrisch voertuig heeft geen emissies tijdens het rijden (afgezien van de slijtage van banden en remmen). Tijdens de productie van de benodigde elektriciteit worden wel luchtverontreinigende emissies uitgestoten.

Elektrische auto's zijn zwaarder dan equivalente voertuigen op andere energiedragers. Dit leidt tot hogere fijnstofemissies door slijtage van banden en remmen. Aan de andere kant remmen deze voertuigen sterker op de motor, wat een positief effect heeft op de fijnstofemissies door remslijtage. Aangenomen wordt dat deze twee tegengestelde effecten elkaar opheffen waardoor de slijtage-emissies gelijk zijn aan die van equivalente voertuigen op andere energiedragers. In 2024 en 2025 voert TNO onderzoek uit naar slijtage emissies van remsystemen. Nieuwe inzichten in de samenstelling en hoeveelheid remstof worden in 2025 verwacht.

4.5 Vrachtwagens en trekker opleggers op waterstof

Zoals beschreven in paragraaf 1.2.1, zijn de CO₂-uitlaatemissies bij het gebruik van pure biobrandstoffen nul volgens internationale rekenregels (IPCC). In onderstaande paragraaf zijn uitlaatemissies gedefinieerd als de werkelijke CO₂-emissies uit de uitlaat.

De uitlaatemissies als gevolg van biobrandstoffen worden hierin ook meegenomen.

Er wordt dus niet de definitie van de IPCC gedefinieerd. In de paragraaf over ketenemissies tellen de biobrandstoffen wel als nul.

4.5.1 Klimaat (CO₂)

Uitlaatemissies (TTW)

Net als elektrische trucks, stoten ook waterstoftrucks (brandstofcel) uit de uitlaat geen CO₂-emissies uit. Vrachtwagens die waterstof verbranden in de motor stoten wel een beperkte hoeveelheid CO₂ uit, omdat naast waterstof ook een kleine hoeveelheid diesel verbrand wordt. Deze motoren zijn nog niet commercieel beschikbaar, maar nog in de ontwikkelingsfase. Bij de productie van waterstof kan ook CO₂ vrijkomen afhankelijk van het gebruikte proces.

⁶⁴ Rapportage Energie voor vervoer in Nederland 2021, NEA rapport, 2022

⁶⁵ [Meer elektriciteit uit hernieuwbare bronnen, minder uit fossiele bronnen \(cbs.nl\)](#)

Ketenemissies (WTW)

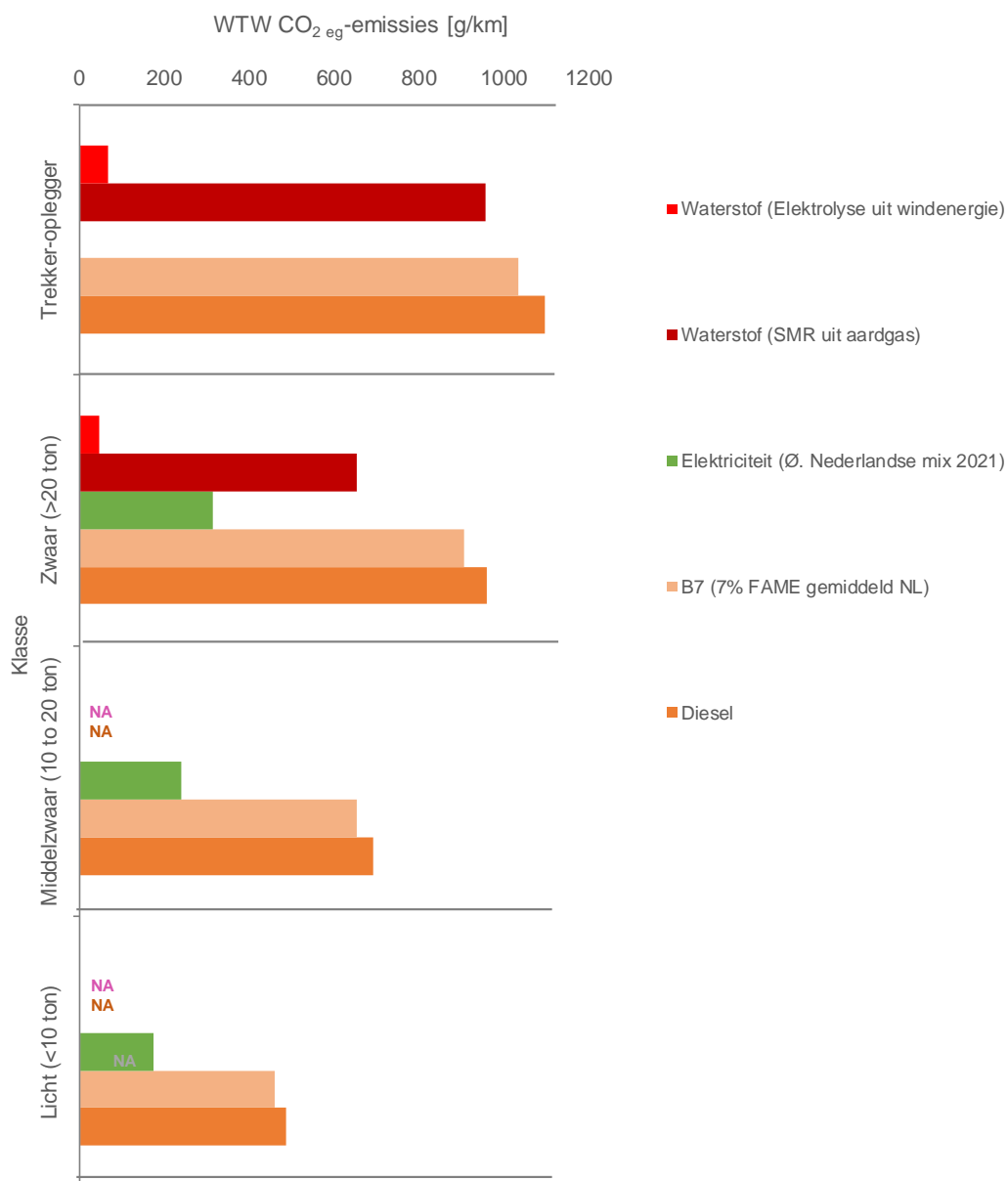
Ook bij de productie en distributie van energiedragers komen broeikasgassen vrij; we noemen dit de zogenaamde Well-to-Tank emissies (WTT). Alle emissies over de gehele brandstofketen zijn de Well-to-wheel (WTW) emissies. Om een basisinzicht in de ontwikkeling van de WTW-emissies te krijgen, brengen we hier de mate van hernieuwbaarheid van de diverse energiedragers over de gehele keten in beeld.

Voor waterstof-elektrisch (FCEV) geldt:

- De industriële productie van waterstof vindt voornamelijk plaats op basis van fossiele brandstoffen. Echter, de huidige tankstations leveren overwegend groene waterstof middels groencertificaten;
- Voor het vergroenen van energiedragers middels groencertificaten worden inmiddels kaders ontwikkeld (EU/NL);
- In de markt komen we de zogenaamde blauwe waterstof in Nederland niet tegen;
- De vergroening van de elektriciteitsmix in Nederland is van 2017 naar 2022 gestegen van 14 naar ca. 26%.

Momenteel wordt waterstof in de meeste gevallen gemaakt via het 'steam methane reforming' productiemethode met aardgas als grondstof. Op deze manier wordt ongeveer 25% CO₂-ketenemissiereductie behaald ten opzichte van rijden op fossiele diesel. De emissiereductie kan hoger uitvallen indien de CO₂ wordt afgevangen en opgeslagen (CCS).

Wanneer waterstof wordt geproduceerd via elektrolyse, kan de benodigde elektriciteit op vele verschillende manieren worden opgewekt. Dit kan zowel met fossiele brandstoffen (zoals aardgas en kolen) of met duurzame energiedragers (zoals windturbines en zonnepanelen). Elektrolyse met behulp van elektriciteit uit kolen zonder CCS leidt tot veel hogere CO₂-ketenemissies dan rijden op diesel. Wanneer de elektriciteit wordt verkregen uit duurzame bronnen, kunnen de CO₂-ketenemissies voor de productie in principe naar nul gaan. Momenteel wordt in Nederland een deel van de waterstofvulstations voor mobiliteit met behulp van trailertubes van waterstof voorzien. Deze distributie zorgt nog wel voor enige CO₂ uitstoot in de keten.



Figuur 27: CO₂-ketenemissies van lichte, middelzware, zware vrachtauto's en trekker-opleggers op verschillende energiedragers. Het energieverbruik voor batterij elektrische en waterstofvrachtwagens per kilometer, de basis voor de gepresenteerde cijfers in deze figuur, is gedetailleerd berekend met behulp van TNO-simulatiemodellen⁶⁶ (Advance) en geven een best mogelijke benadering van het praktijkverbruik.

⁶⁶ M. Verbeek et al, Techno-economic uptake potential of zero-emission trucks in Europe, TNO report TNO 2022 R11862, October 2022

4.5.2 Luchtkwaliteit

Voor waterstoftrucks met een brandstofcel geldt dat er geen NO_x-emissies plaatsvinden, aangezien er ook geen verbranding plaatsvindt.

Voertuigen met een waterstofverbrandingsmotor zullen wel NO_x uitstoten, maar dergelijke vrachtwagens zijn commercieel nog niet beschikbaar.

Fijnstofemissies (zoals PM₁₀) uit de uitlaat zijn er bij brandstofcelvoertuigen evenmin. Waterstoftrucks met een verbrandingsmotor die waterstof (en een beetje diesel) verbranden stoten uiteraard wel fijnstof uit. Slijtage van banden en remmen vindt wel plaats en zal naar verwachting vergelijkbaar zijn met die van diesellootvoertuigen. Aan de ene kant is de brandstofcel en waterstoftank zwaarder dan een dieselmotor en dieseltank. Aan de andere kant zal het gemiddelde massa van de waterstof aan boord lager zijn dan die van diesel. Voorlopig wordt ervan uitgegaan dat deze tegengestelde effecten elkaar ongeveer zullen opheffen.

4.6 Vrachtwagens overzicht

4.6.1 Klimaat (CO₂)

Het belangrijkste broeikasgas dat wordt uitgestoten door motorvoertuigen is CO₂. De hoogte van de CO₂-emissies uit de uitlaat is afhankelijk van het energiegebruik en het type energiedrager. Doordat het energiegebruik in sterke mate wordt bepaald door het voertuiggewicht, stoot een grotere, zwaardere auto ook meer CO₂ uit. Om die reden is ervoor gekozen om de CO₂-emissies van vrachtwagens en trekker-opleggers van elkaar te onderscheiden.

Ook bij het winnen, produceren en distribueren van energiedragers komt CO₂ vrij. Zo hebben elektrische en waterstofauto's geen uitlaatemissies, maar indien er gebruik wordt gemaakt van fossiele brandstoffen wordt er bij de productie van elektriciteit en waterstof wel CO₂ uitgestoten. Voor de volledigheid worden zowel de uitlaatemissies als de totale ketenemissies gepresenteerd.

Uitlaatemissies (TTW)

LNG kan worden gebruikt in twee typen motoren, met vonkontsteking of zelfontbranding. De motoren op basis van het zelfontbrandingsprincipe hebben een hoger rendement en daardoor lagere CO₂-uitlaatemissies dan motoren die gebruik maken van vonkontsteking.

Naast CO₂ komt er bij LNG-trucks ook het broeikasgas methaan (CH₄) uit de uitlaat. Een gram methaan heeft een 28 keer⁶⁷ sterker broeikaseffect dan CO₂. De methaanemissies kunnen worden uitgedrukt in CO₂-equivalente emissies door ze te vermenigvuldigen met 28. Doordat trucks veel minder methaan uitstoten dan CO₂, is het broeikaseffect van methaan per gereden kilometer veel lager dan van CO₂.

⁶⁷ IPCC, 2023: Climate Change 2023: AR6 Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change

Wanneer de uitstoot van methaan wordt meegenomen in CO₂-equivalente emissies, stoten LNG-trucks met vonkontsteking 5% tot 10% minder CO_{2,eq} uit dan dieseltrucks (op basis van twee door TNO gemeten LNG-trucks)⁶⁸. De CO_{2,eq} van een LNG-truck met een motor op basis van het zelfontbrandingsprincipe waren bij TNO-metingen ongeveer 19% lager⁶⁹.

Naast uitlaatemissies kunnen LNG-voertuigen op andere manieren broeikasgasemissies veroorzaken, namelijk:

- N₂O-uitlaatemissies geproduceerd in de katalysator;
- ‘boil-off’: het afblazen van de brandstoftank wanneer de druk daarin te hoog wordt;
- Afblazen, bewust ontluchten van gas om de druk in de tank te verlagen, de tank te legen voor reparatie, om restgas uit de tank te laten ontsnappen of om het voertuig aan het einde van de levensduur te demonteren.
- Lekkage van methaan uit buizen die niet (meer) gasdicht zijn

Over de uitstoot van broeikasgassen als gevolg van lekkage, afblazen en boil-off zijn slechts beperkt gegevens beschikbaar. Om die reden is het niet mogelijk om met voldoende zekerheid te stellen wat het effect ervan is op de totale broeikasgasemissies van LNG-trucks.

Elektrische en waterstofauto's (brandstofcel) hebben geen CO₂-uitlaatemissies.

Bij het gebruik van pure biobrandstoffen zijn de CO₂-uitlaatemissies nul volgens internationale rekenregels (IPCC). Bij gebruik van blends geldt dit naar rato van de bijmenging.

Ketenemissies (WTW)

Wanneer ook de broeikasgasemissies als gevolg van productie en distributie van energiedragers in ogenschouw wordt genomen, ontstaat een ander beeld. Voor diesel geldt dat de CO₂-emissies ten gevolge van productie en distributie ruim 31% bedragen van de totale ketenemissies⁷⁰. Voor LNG is dat ongeveer 32%⁷⁰. Voor elektrische en waterstoftrucks geldt dat alle ketenemissies vrijkomen bij productie en distributie.

Het gebruik van biobrandstoffen kan leiden tot lagere CO₂-ketenemissies. Doordat de biomassa die is gebruikt voor de productie van biobrandstof evenveel CO₂ heeft opgenomen als door het voertuig wordt uitgestoten, zijn er netto geen CO₂-uitlaatemissies. Echter, de productie en distributie van biobrandstoffen veroorzaken wel CO₂-emissies. De totale CO₂-ketenemissies zijn daarom wel hoger dan nul. Het gebruik van pure FAME of HVO (op basis van de momenteel in Nederland gebruikte productieketens) leidt tot respectievelijk 87% en 92% minder CO₂-ketenemissies dan fossiele diesel. Het gebruik van B7, waarbij dergelijke biobrandstoffen beperkt worden bijgemengd bij fossiele diesel, leidt tot ongeveer 6,8% CO₂-emissiereductie.

Ook het gebruik van bio-LNG in plaats van fossiele LNG kan de ketenemissies verlagen. De mate waarin dat gebeurt is afhankelijk van de grondstof en de productiemethode.

⁶⁸ TNO 2019 R10193 Emissions testing of a Euro VI LNG-diesel dual fuel truck in the Netherlands

⁶⁹ TNO 2017 R11336 Emissions testing of two Euro VI LNG heavy-duty vehicles in the Netherlands: tank-to-wheel emissions

⁷⁰ Rapportage Energie voor Vervoer in Nederland 2019. Naleving verplichtingen wet- en regelgeving Energie voor Vervoer.

Bij gebruik van GFT-afval, zouden de CO₂-ketenemissies ongeveer 69% lager zijn dan van het fossiele equivalent⁷¹. Doordat er bij de diesel die in Nederland wordt getankt wél dieselvangers uit biomassa zijn bijgemengd, wordt een deel van het CO₂-voordeel van LNG-voertuigen hebben bij de uitlaatemissies, teniet gedaan wanneer de hele energieketen wordt beschouwd. Daarom geldt dat, wanneer de uitstoot van methaan wordt meegenomen in CO₂-equivalente emissies, LNG-trucks met vonkontsteking ongeveer evenveel CO₂-ketenemissies uitstoten als dieseltrucks. Voor de door TNO gemeten LNG-truck met een motor op basis van het zelfontbrandingsprincipe zijn het CO₂-ketenemissies nog ongeveer 12% lager.

De ketenemissies van elektrische voertuigen is afhankelijk van het energiegebruik van het voertuig en de wijze waarop de elektriciteit wordt opgewekt. Doordat er momenteel maar zeer beperkt elektrische vrachtwagens op de weg zijn, is het nog niet mogelijk om een eerlijke en exacte vergelijking te maken van de ketenemissies van broeikasgassen. In een recent Nederlands pilotproject waarin de inzet van elektrische vrachtvoertuigen is geëvalueerd, waren de CO₂-ketenemissies van elektrische vrachtwagens bijna 60% lager bij de huidige Nederlandse energiemix. Voor de geëvalueerde trekker-oplegger was dat ruim 30%. Een andere studie waarin het energiegebruik van trucks op verschillende energiedragers is vergeleken laat een CO₂-ketenemissiereductie zien van ongeveer 40% bij de huidige Nederlandse elektriciteitsmix⁷². Gegeven het beperkte aantal voertuigen waaraan is gemeten en het feit dat de gemeten voertuigen niet equivalent zijn aan de gemiddelde dieselveertuigen in termen van laadcapaciteit en actieradius, kunnen er nog geen algemene conclusies aan worden verbonden.

Gegeven het beperkte aantal voertuigen waaraan is gemeten en het feit dat de gemeten voertuigen niet equivalent zijn aan de gemiddelde dieselveertuigen in termen van laadcapaciteit en actieradius, kunnen er nog geen algemene conclusies aan worden verbonden.

Ook voor waterstoftrucks geldt dat er nog in Nederland nog geen uitgebreid onafhankelijk onderzoek is gedaan naar het energiegebruik. Wel lopen momenteel meerdere Europese projecten waarin het verbruik van eerste waterstoftrucks gemonitord zal worden, bijvoorbeeld het ZEFS project (<https://zefes.eu/project/>).

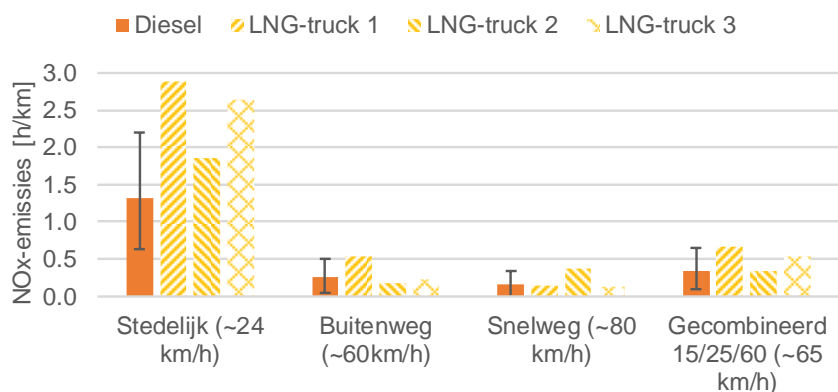
4.6.2 Luchtkwaliteit

Vanwege de dominantie van diesel in de Nederlandse vrachtautovloot, zijn er in het recente verleden maar beperkt NO_x- en PM₁₀-emissiemetingen verricht aan vrachtwagens op andere brandstoffen. Wel zijn bijvoorbeeld drie LNG-trucks gemeten. Voor deze gemeten LNG-trucks geldt dat de NO_x-emissieniveaus tijdens langeafstandsritten vergelijkbaar zijn met die van dieselveertuigen. Ook bij gebruik in de stad is dat het geval, echter het verschil tussen de verschillende gemeten LNG-voertuigen is bij deze toepassing aanzienlijk. Het aandeel NO₂ in de totale NO_x-uitstoot is voor de geteste LNG-vrachtauto's veel lager dan voor vergelijkbare dieseltrucks. Als gevolg hiervan kan de lokale bijdrage van een LNG-truck aan de NO₂-concentratie in de buitenlucht onder bepaalde omstandigheden (bv. ozonconcentratie) lager zijn dan van een equivalente dieseltruck.

De uitstoot van fijnstofdeeltjes van de gemeten LNG-trucks is vergelijkbaar met die van dieseltrucks.

⁷¹ CO₂-balansen groengasketens Vergisting en vergassing. Delft, CE Delft, juni 2019

⁷² FCH 2, 2017. Fuel Cells and Hydrogen Applications for Regions and Cities Vol. 2. Development of Business Cases for Fuel Cells and Hydrogen Applications for European Regions and Cities. Reference Number FCH JU 2017 D4259



Figuur 28: Gemeten NO_x -emissies van drie gemeten moderne Euro VI LNG trucks in vergelijking met gemeten NO_x -emissies van dieseltrucks. De 'error bars' representeren de minimale en maximale waarden van de gemeten dieselvoertuigen⁷³

Vrachtwagens en trekker-oplegger op elektriciteit en waterstof (brandstofcel) stoten geen NO_x uit en ook geen fijnstof uit de uitlaat. Bij slijtage van banden en remmen komt wel fijnstof vrij. Die is van dezelfde orde als die van voertuigen op diesel of LNG. Vrachtwagens met een H₂-ICE motor (verbranding van waterstof in de motor) zijn in ontwikkeling maar nog niet commercieel beschikbaar.

⁷³ TNO 2019 R10519 Dutch In-service emissions testing programme 2015-2018 for heavy-duty vehicles: status quo Euro VI NO_x emissions

5 Bussen

Bussen worden gebruikt voor verschillende doeleinden. De belangrijkste doeleinden die kunnen worden onderscheiden zijn lijnbussen (openbaar vervoer) en touringcars. Omdat voor deze verschillende typen inzet geen verschillende emissiewetgeving bestaat, worden beide categorieën in dit document niet onderscheiden.

5.1 Bussen op diesel

5.1.1 Klimaat (CO₂)

Uitlaatemissies (TTW)

Het energiegebruik van bussen is in de loop der jaren beperkt afgenomen. Uit een omvangrijke studie⁷⁴ volgt een efficiencyverbetering van ongeveer 8% in 20 jaar. Dit betekent een even grote afname van de CO₂-emissies. Moderne standaard bussen hebben volgens deze studie een CO₂-uitstoot ruim 1100 g/km. Voor gelede bussen (met drie assen) is dat ongeveer 1400 g/km.

Ketenemissies (WTW)

Ook bij de productie en distributie van energiedragers komen broeikasgassen vrij; we noemen dit de zogenaamde Well-to-Tank emissies (WTT). Alle emissies over de gehele brandstofketen zijn de Well-to-wheel (WTW) emissies. Om een basisinzicht in de ontwikkeling van de WTW-emissies te krijgen, brengen we hier de CO_{2-eq} emissies van de diverse energiedragers over de gehele keten in beeld.

Tabel 17: CO_{2-eq} ketenemissies van fossiele diesel en dieselvevangers uit biomassa⁷⁵

	WTW CO ₂ -emissies [gCO ₂ /MJ]	CO ₂ -emissiereductie t.o.v. fossiel equivalent
Fossiele diesel	95,1	
FAME	11,3	88,1%
HVO	10,1	89%
Totaal dieselvevangers uit biomassa	11	88,4%
Diesel (fossiel + dieselvevangers)	88,6	6,8%

Aangezien maar een beperkt deel van de diesel in Nederland uit biomassa is geproduceerd (7,7% op energiebasis), zijn de totale CO₂-ketenemissies van in Nederland gebruikte diesel 6,8% lager dan van fossiele diesel.

⁷⁴ City bus performance evaluation. Söderena, Petri; Nylund, Nils-Olof; Mäkinen, Reijo. Published: 27/12/2019

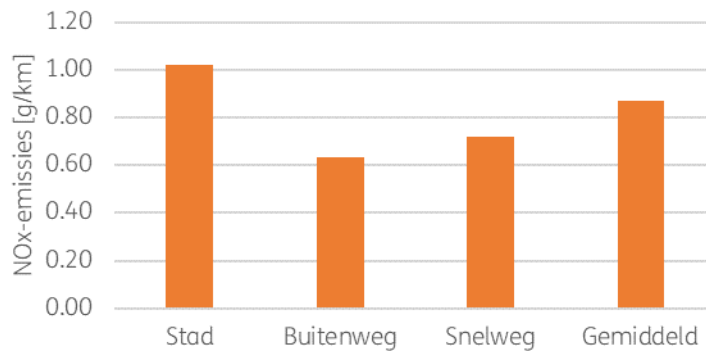
⁷⁵ Rapportage Energie voor Vervoer in Nederland 2021. Naleving verplichtingen wet- en regelgeving Energie voor Vervoer

Wanneer pure biobrandstoffen worden gebruikt, bijvoorbeeld door vlooteigenaren met eigen opslag- en tankfaciliteiten, gelden de CO₂-ketenemissiereducties zoals weergegeven in de rechter kolom van bovenstaande tabel.

Meer details over de productie en emissiefactoren van HVO en FAME staat beschreven in paragraaf 2.2.1

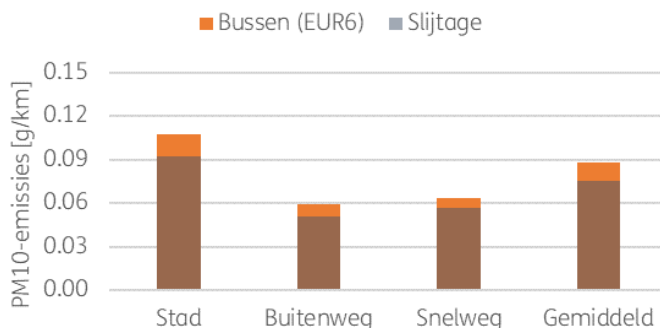
5.1.2 Luchtkwaliteit

De NO_x-emissies van dieselbussen zijn de laatste decennia aanzienlijk afgenomen, vooral door het gebruik van emissiereductiesystemen zoals roetfilter en SCR systemen. De hoeveelheid NO_x-uitstoot van moderne bussen varieert aanzienlijk tijdens dagelijkse inzet en hangt af van de manier waarop elke bus wordt ingezet en de omstandigheden. Bij recente metingen door TNO⁷⁶ varieerden de NO_x-emissies tussen 0,3 g/km en 2,9 g/km. Deze metingen zijn input geweest voor het bepalen van de NO_x-emissiefactor voor bussen. Deze bedraagt ca. 1 g/km in de stad (zie onderstaande Figuur).



Figuur 29: NO_x-emissies van moderne, Euro VI dieselbussen bij typisch gebruik in stedelijke omgeving, op buitenwegen en op snelwegen.

Voor dieselbussen geldt net als voor andere dieselveertuigen dat de toepassing van gesloten roetfilters heeft geleid tot zeer lage uitstoot van fijnstof uit de uitlaat. De grootste bijdrage aan de emissie van fijnstof komt bij moderne bussen van slijtage van banden en remmen (zie onderstaande Figuur)



Figuur 30: PM₁₀-emissies van moderne, Euro VI dieselbussen bij typisch gebruik in stedelijke omgeving, op buitenwegen en op snelwegen.

⁷⁶ TNO 2018. Tail-pipe NO_x emissions of Euro VI buses in daily operation in the Netherlands. TNO 2018 R11328. 15 November 2018.

5.2 Bussen op dieselvevangers uit biomassa

Zoals beschreven in paragraaf 1.2.1, zijn de CO₂-uitlaatemissies bij het gebruik van pure biobrandstoffen nul volgens internationale rekenregels (IPCC). In onderstaande paragraaf zijn uitlaatemissies gedefinieerd als de werkelijke CO₂-emissies uit de uitlaat.

De uitlaatemissies als gevolg van biobrandstoffen worden hierin ook meegenomen. Er wordt dus niet de definitie van de IPCC gedefinieerd. In de paragraaf over ketenemissies tellen de biobrandstoffen wel als nul.

5.2.1 Klimaat (CO₂)

Uitlaatemissies (TTW)

De TTW-emissies van bussen op dieselvevangers uit biomassa zijn min of meer vergelijkbaar met dezelfde voertuigen op fossiele diesel. Dit is deels afhankelijk van het type biobrandstof en de blend, waardoor een iets zuinigere of minder zuinige verbranding op kan treden.

Ketenemissies (WTW)

Ook bij de productie en distributie van energiedragers komen broeikasgassen vrij; we noemen dit de zogenaamde Well-to-Tank emissies (WTT). Alle emissies over de gehele brandstofketen zijn de Well-to-wheel (WTW) emissies. Om een basisinzicht in de ontwikkeling van de WTW emissies te krijgen, brengen we hier de CO_{2-eq} emissies van de diverse energiedragers over de gehele keten in beeld.

Tabel 18: CO₂-ketenemissies van fossiele diesel en dieselvevangers uit biomassa⁷⁷.

	WTW CO ₂ -emissies [gCO ₂ /MJ]	CO ₂ -emissiereductie t.o.v. fossiel equivalent
Fossiele diesel	95,1	
FAME	11,3	88,1%
HVO	10,7	92%
Totaal dieselvevangers uit biomassa	11	88,4%
Diesel (fossiel + dieselvevangers)	88,6	6,8%

Aangezien maar een beperkt deel van de diesel in Nederland uit biomassa is geproduceerd (7,7% op energiebasis), zijn de totale CO₂-ketenemissies van in Nederland gebruikte diesel 6,8% lager dan van fossiele diesel.

Wanneer pure biobrandstoffen worden gebruikt, bijvoorbeeld door vlooteigenaren met eigen opslag- en tankfaciliteiten, gelden de CO₂-ketenemissiereducties zoals weergegeven in de rechter kolom van bovenstaande tabel.

⁷⁷ Rapportage Energie voor Vervoer in Nederland 2019. Naleving verplichtingen wet- en regelgeving Energie voor Vervoer

In Paragraaf 3.2.1 staat meer informatie over de in Nederland ingezette feedstock voor de productie van HVO en FAME en emissiefactoren.

5.2.2 Luchtkwaliteit

Het effect van het gebruik van biobrandstoffen op luchtverontreinigende emissies hangt af van de motor- en nabehandelingstechniek aanwezig in een voertuig, maar ook van de eigenschappen van de biobrandstoffen in vergelijking met de fossiele variant.

Door verbeteringen in de motoren en nabehandelingstechnieken is de impact van de brandstof op de emissies sterk afgenomen, met name bij voertuigen die voldoen aan de laatste voertuigstandaarden. Bij oudere voertuigen met oudere motoren en minder geavanceerde nabehandelingstechnieken is de impact van de brandstof groter.

Over het algemeen geldt voor de inzet van FAME dat het in hoge blends CO, VOC en PM kan reduceren. Voor minder geavanceerde (oudere) motoren kan dit 50% bedragen. Tegelijkertijd kan FAME in hoge blends voor een toename van NO_x emissies (oudere motoren) zorgen. Dit komt door het hoger zuurstofgehalte in FAME en daardoor hogere verbrandingstemperaturen. Meer specifieke uitspraken vragen om meer (recente) metingen. Het is wel aannemelijk dat de emissies van moderne voertuigen (Euro VI) veel minder beïnvloed worden door HVO en FAME.

HVO is een paraffine brandstof en verbetert door de hogere ontstekingskwaliteit het verbrandingsproces. Door deze verbetering kunnen bij oudere motoren emissies gereduceerd worden (CO, koolwaterstof en PM emissies) en heeft HVO in tegenstelling tot FAME de potentie om bij oudere motoren ook NO_x-emissies met ongeveer 10% te reduceren.

Voor oudere motoren (Euro III of lager) geldt dat FAME en HVO luchtverontreinigende emissies kunnen reduceren. Bij nieuwe motoren die voldoen aan de laatste emissiestandaarden zijn de emissies laag ongeacht de brandstofkeuze (Nylund et al. 2018).

5.3 Bussen batterij-elektrisch

CO₂-equivalente emissies kunnen op verschillende manieren worden berekend:

- Well-to-tank (WTT) - de emissies van de bron tot aan het vervoermiddel. Dit zijn bijvoorbeeld de emissies die ontstaan bij de exploitatie van olievelden en het transport tot aan het tankstation;
- Tank-to-wheel (TTW) - de emissies van het vervoermiddel zelf. Dit zijn bijvoorbeeld de emissies van een diesel- of een elektrische auto op de weg. Voor scheepvaart is ook de term TTP gangbaar: tank-to-propellor emissies;
- Well-to-wheel (WTW) - de som van WTT en TTW. Dit beschrijft dus de emissies van de hele keten. Voor scheepvaart is ook de term WTP gangbaar: well-to-propellor emissies.

5.3.1 Klimaat (CO₂)

Uitlaatemissies (TTW)

Een volledig elektrisch voertuig veroorzaakt geen uitstoot van CO₂ en andere broeikasgassen tijdens het rijden. Tijdens de productie van elektriciteit wordt wel CO₂ uitgestoten. Dit wordt in de volgende paragraaf toegelicht.

Ketenemissies (WTW)

Ook bij de productie en distributie van energiedragers komen broeikasgassen vrij; we noemen dit de zogenaamde Well-to-Tank emissies (WTT).

Alle emissies over de gehele brandstofketen zijn de Well-to-wheel (WTW) emissies. Om een basisinzicht in de ontwikkeling van de WTW-emissies te krijgen, brengen we hier de CO_{2-eq} emissies van de diverse energiedragers over de gehele keten in beeld.

De broeikasgasemissies van elektrische bussen worden voornamelijk bepaald door de productiemethode van elektriciteit, die opgewekt kan worden uit fossiele brandstoffen zoals kolen en gas, maar ook uit hernieuwbare bronnen zoals zonne-energie, windenergie, biogas of biomassa. De vergroening van de elektriciteitsmix in Nederland is van 2017 naar 2022 gestegen van 14% naar ca. 26%. Met de toename van het gebruik van hernieuwbare energiebronnen in de Nederlandse elektriciteitsproductie, neemt de gemiddelde emissiefactor in de loop der tijd af, zoals te zien in Tabel 19.

Als het aandeel hernieuwbare bronnen toeneemt, dan zal de well-to-wheel CO₂-emissie van een elektrisch voertuig dalen. Om de uitstoot van elektrische voertuigen eerlijk te vergelijken met andere aandrijvingen, dienen bij voertuigen op fossiele brandstoffen ook de emissies van het raffinage- en distributieproces meegenomen te worden.

In Tabel 19 is weergegeven wat de CO₂-uitstoot is van de totale elektriciteitsmix in Nederland. Dit betreft dus het totaal van grijs en groen geproduceerde elektriciteit.

Tabel 19: CO₂emissie elektriciteitsproductie per kWh (CBS, 2022)

	2018 [kg/kWh]	2019[kg/kWh]	2020[kg/kWh]	2021*[kg/kWh]
Emissies* totale elektriciteitsmix (100%) Grijs én hernieuwbaar	0,43	0,37	0,29	0,30
Emissies* grijze elektriciteitsmix. Aardgas, koelen en kernenergie	0,56	0,49	0,42	0,51

Bron: CBS, CO₂ emissie-energieverbruik rendementen elektriciteit 2022

- De cijfers voor 2021 zijn voorlopige cijfers
- Er wordt onderscheid gemaakt tussen de referentieparkeringsmethode en de integrale methode. De eerste is geschikt voor marginale analyses, oftewel bij de vraag hoeveel meer of minder emissies er zouden zijn bij 1 kWh meer of minder vraag. De tweede is geschikt voor integrale analyses over de gehele productie of gehele vraag over een jaar.

De bovenstaande emissies worden uitgestoten door de productie van elektriciteit. De ketenemissies van de centrales en productiemiddelen, grondstoffen etc. zit hier nog niet in. De ketenemissies voor elektriciteitsproductie van de elektriciteitsmix in Nederland⁷⁸ bedragen 63g/kWh.

5.3.2 Luchtkwaliteit

Een volledig elektrisch voertuig heeft geen emissies tijdens het rijden (afgezien van de slijtage van banden en remmen). Tijdens de productie van de benodigde elektriciteit worden mogelijk wel luchtverontreinigende emissies uitgestoten.

⁷⁸ S. van der Niet et al, "Ketenemissies elektriciteit, actualisatie elektriciteitsmix 2019", CE Delft rapport 2022, publicatienummer 22.210436.002

5.4 Bussen op waterstof

CO₂-equivalente emissies kunnen op verschillende manieren worden berekend:

- Well-to-tank (WTT) - de emissies van de bron tot aan het vervoermiddel. Dit zijn bijvoorbeeld de emissies die ontstaan bij de exploitatie van olievelden en het transport tot aan de tankstation;
- Tank-to-wheel (TTW) - de emissies van het vervoermiddel zelf. Dit zijn bijvoorbeeld de emissies van een diesel- of een elektrische auto op de weg. Voor scheepvaart is ook de term TTP gangbaar: tank-to-propellor emissies;
- Well-to-wheel (WTW) - de som van WTT en TTW. Dit beschrijft dus de emissies van de hele keten. Voor scheepvaart is ook de term WTP gangbaar: well-to-propellor emissies.

5.4.1 Klimaat (CO₂)

Uitlaatemissies (TTW)

Tijdens het rijden stoot een waterstofvoertuig (brandstofcel) geen broeikasgassen uit. Tijdens de productie van waterstof kan dit wel het geval zijn (zie paragraaf 2.1).

Ketenemissies (WTW)

Ook bij de productie en distributie van energiedragers komen broeikasgassen vrij; we noemen dit de zogenaamde Well-to-Tank emissies (WTT). Alle emissies over de gehele brandstofketen zijn de Well-to-wheel (WTW) emissies. Om een basisinzicht in de ontwikkeling van de WTW emissies te krijgen, brengen we hier de CO_{2-eq} emissies van de diverse energiedragers over de gehele keten in beeld.

Voor waterstof-elektrisch geldt:

- De industriële productie van waterstof vindt voornamelijk plaats op basis van fossiele brandstoffen. Echter, de huidige tankstations leveren overwegend groene waterstof middels groencertificaten;
- Voor het vergroenen van energiedragers middels groencertificaten worden kaders ontwikkeld (EU/NL);
- In de markt komen we de zogenaamde blauwe waterstof in Nederland niet tegen;

Momenteel wordt waterstof in de meeste gevallen gemaakt via het 'steam methane reforming' productiemethode met aardgas als grondstof. Op deze manier wordt ongeveer 25% CO₂-ketenemissiereductie behaald ten opzichte van rijden op fossiele diesel. De emissiereductie kan hoger uitvallen indien de CO₂ wordt afgevangen en opgeslagen (CCS).

Wanneer waterstof wordt geproduceerd via elektrolyse, kan de benodigde elektriciteit op vele verschillende manieren worden opgewekt. Dit kan zowel met fossiele brandstoffen (zoals aardgas en kolen) of met duurzame energiedragers (zoals windturbines en zonnepanelen). Elektrolyse met behulp van elektriciteit uit kolen zonder CCS leidt tot veel hogere CO₂-ketenemissies dan rijden op diesel. Wanneer de elektriciteit wordt verkregen uit duurzame bronnen, kunnen de CO₂-ketenemissies voor de productie in principe naar nul gaan. Momenteel wordt in Nederland een deel van de waterstofvulstations voor mobiliteit met behulp van trailertubes van waterstof voorzien. Deze distributie zorgt nog wel voor enige CO₂ uitstoot in de keten.

5.4.2 Luchtkwaliteit

Waterstofvoertuigen (brandstofcel) stoten geen luchtverontreinigende emissies uit de uitlaat. Net als voor andere voertuigtypen geldt ook voor waterstofbussen dat er wel slijtage aan banden en remmen plaatsvindt. Als gevolg hiervan is de fijnstofuitstoot van waterstofbussen niet veel lager dan die op andere energiedragers.

5.5 Bussen overzicht

5.5.1 Klimaat (CO₂)

CO₂ komt vrij uit de uitlaat door de verbranding van koolstofhoudende brandstoffen. Daarnaast komt er ook CO₂ vrij bij het winnen, produceren en distribueren van energiedragers. Zo hebben elektrische en waterstofvoertuigen geen uitlaatemissies, maar indien er gebruik wordt gemaakt van fossiele brandstoffen wordt er bij de productie van elektriciteit en waterstof wel CO₂ uitgestoten. Voor de volledigheid worden zowel de uitlaatemissies als de totale ketenemissies gepresenteerd.

Uitlaatemissies (TTW)

Het energiegebruik van bussen is in de loop der jaren maar beperkt afgenomen. Uit een studie⁷⁹ volgt een efficiencyverbetering van ongeveer 8% in 20 jaar. Dit betekent een even grote afname van de CO₂-emissies. Moderne standaard bussen hebben volgens deze studie een CO₂-uitstoot ruim 1100 g/km. Voor gelede bussen (met drie assen) is dat ongeveer 1400 g/km.

Aardgas heeft een relatief lage koolstofinhoud. Dit betekent dat het opwekken van een bepaalde hoeveelheid energie tot ongeveer 23% minder CO₂-emissies leidt dan wanneer dezelfde hoeveelheid energie was opgewekt door het gebruik van diesel. Uit dezelfde publicatie⁷⁹ blijkt dat de CO₂-emissies van CNG-bussen tot ongeveer 5% lager kunnen zijn dan die van moderne dieselbussen. Het CO₂-voordeel is daarmee aanzienlijk kleiner dan de hierboven genoemde 23%. Dit komt doordat het voordeel van lagere koolstofinhoud van CNG ten opzichte van diesel grotendeels teniet wordt gedaan door de hogere energiegebruik van CNG-bussen.

Bussen op elektriciteit of waterstof (FCEV) hebben geen CO₂-uitlaatemissies.

Ketenemissies (WTW)

Wanneer ook de broeikasgasemissies als gevolg van productie en distributie van energiedragers in ogenschouw wordt genomen, ontstaat een ander beeld. Voor fossiele diesel geldt dat de CO₂-emissies ten gevolge van productie en distributie ruim 31% bedragen van de totale ketenemissies⁸⁰. Voor fossiele CNG is dat ongeveer 23%⁶⁹. Voor elektrische en waterstofbussen geldt dat alle ketenemissies vrijkomen bij productie en distributie.

Ervan uitgaande dat de CO₂-uitlaatemissies van CNG-bussen 5% lager zijn, geldt dat de totale CO₂-ketenemissies van CNG-bussen 11% lager zijn op basis van fossiele brandstoffen.

⁷⁹ City bus performance evaluation. Söderena, Petri; Nylund, Nils-Olof; Mäkinen, Reijo. Published: 27/12/2019

⁸⁰ Rapportage Energie voor Vervoer in Nederland 2019. Naleving verplichtingen wet- en regelgeving Energie voor Vervoer.

Het gebruik van biobrandstoffen kan leiden tot lagere CO₂-ketenemissies. Zo leidt het gebruik van pure FAME of HVO (op basis van de momenteel in Nederland gebruikte productieketens) tot resp. 87% en 92% minder CO₂-ketenemissies dan fossiele diesel. Het gebruik van B7, waarbij dergelijke biobrandstoffen beperkt worden bijgemengd bij fossiele diesel, leidt tot ongeveer 6,8% CO₂-emissiereductie.

Ook het gebruik van bio-CNG in plaats van fossiele CNG kan de ketenemissies verlagen. De mate waarin dat gebeurt is afhankelijk van de grondstof en de productiemethode. De CO₂-ketenemissies van in Nederland geproduceerd gas liggen 65% lager dan dat van fossiel gas.

De ketenemissies van elektrische voertuigen is afhankelijk van het energiegebruik van het voertuig en de wijze waarop de elektriciteit wordt opgewekt. De CO₂ emissies van de gemiddelde elektriciteitsmix in Nederland daalt al jaren, en daarmee neemt ook de CO₂ emissie van elektrische voertuigen af. Wanneer bussen op volledig hernieuwbare elektriciteit rijden, bijvoorbeeld uit windenergie, kunnen de CO₂-ketenemissies tot bijna nul dalen.

Momenteel wordt waterstof in de meeste gevallen gemaakt via het 'steam methane reforming' productiemethode met aardgas als grondstof. Op deze manier wordt ongeveer 25% CO₂-ketenemissiereductie behaald ten opzichte van rijden op fossiele diesel. De emissiereductie kan hoger uitvallen indien de CO₂ wordt afgevangen en opgeslagen (CCS).

Wanneer waterstof wordt geproduceerd via elektrolyse, kan de benodigde elektriciteit op vele verschillende manieren worden opgewekt. Dit kan zowel met fossiele brandstoffen (zoals aardgas en kolen) of met duurzame energiedragers (zoals windturbines en zonnepanelen). Elektrolyse met behulp van elektriciteit uit kolen zonder CCS leidt tot veel hogere CO₂-ketenemissies dan rijden op diesel. Wanneer de elektriciteit wordt verkregen uit duurzame bronnen, kunnen de CO₂-ketenemissies voor de productie in principe naar nul gaan. Momenteel wordt in Nederland een deel van de waterstofvulstations voor mobiliteit met behulp van trailertubes van waterstof voorzien. Deze distributie zorgt nog wel voor enige CO₂ uitstoot in de keten.

5.5.2 Luchtkwaliteit

De fijnstof-emissies van CNG-bussen zijn al decennia lang relatief laag. Echter met de introductie van de Euro VI emissienormen, zijn fijnstofemissies van bussen op andere brandstoffen zoals diesel, aanzienlijk gedaald. Voor moderne CNG-bussen geldt daarom dat de fijnstof emissies vergelijkbaar zijn met die van moderne dieselbussen. De effecten zijn voor bioCNG hetzelfde aangezien het opgewerkt is tot dezelfde aardgaskwaliteit.

Bussen die rijden op elektrisch of waterstof (brandstofcel) hebben geen emissies tijdens het rijden, afgezien van de fijnstofemissies als gevolg van slijtage van banden en remmen. Dit laatste is vergelijkbaar met dat van bussen op andere energiedragers.

6 Bronnen

6.1 Gebruikte bronnen voor deze studie

6.1.1 Luchtkwaliteit, Luchtverontreinigende emissies

Voor de uitstoot van luchtverontreinigende emissies door verschillende voertuigcategorieën, die zijn opgenomen in dit rapport, zijn de emissiefactoren gebruikt die jaarlijks door TNO worden geleverd aan het ministerie van Infrastructuur en Milieu. Deze emissiefactoren worden door het ministerie gepubliceerd en gebruikt in nationale luchtkwaliteitsmodellen. Deze emissiefactoren worden typisch uitgedrukt in grammen uitstoot per gereden kilometer. De emissiefactoren worden opgesteld op basis van emissiemetingen door TNO waar nodig aangevuld met gegevens uit de literatuur.

In 2016 heeft TNO een rapport gepubliceerd waarin de methode voor de totstandkoming van emissiefactoren in detail is toegelicht⁸¹. Het rapport gaat in op de wijze waarop voertuigen worden geselecteerd en geprepareerd, de emissiemetingen, de analyse van de verkregen data en de wijze waarop de geanalyseerde data wordt verwerkt tot emissiefactoren.

De literatuur die wordt gebruikt voor de totstandkoming van de emissiefactoren is in alle gevallen volledig transparant, bijvoorbeeld ten aanzien van de wijze waarop voertuigen zijn geprepareerd voor metingen, de meetcondities en de analysemethode. Zo is er voor het bepalen van de NO_x-emissies van CNG en LPG voertuigen gebruik gemaakt van typekeuremissies. TNO heeft een studie uitgevoerd waarin deze emissies zijn vergeleken met die van andere brandstoffen⁸².

Naast de TNO-emissiefactoren wordt in dit rapport ook aandacht besteed aan studies en gegevens die zijn aangeleverd door verschillende stakeholders.

6.1.2 Klimaat: CO₂-emissies, brandstofverbruik en energiegebruik

De CO₂-emissiewaarden van verschillende voertuigcategorieën zijn voornamelijk afkomstig uit twee bronnen. De eerste bron is de emissiemetingen die TNO verricht aan voertuigen. Deze metingen dienen ook als input voor het genereren van emissiefactoren voor luchtverontreinigende emissies. De tweede belangrijke databron voor het bepalen van brandstofverbruik en CO₂-emissies is de voertuigadministratie van (zakelijke) rijders ten aanzien van gereden kilometers en verbruikte brandstof. Dergelijke data wordt door TNO sinds 2008 periodiek verkregen via bedrijven die tank- en laadpassen beheren. Wanneer de chemische samenstelling van de brandstof bekend is, kan de hoeveelheid CO₂-uitstoot worden afgeleid uit dit brandstofverbruik.

⁸¹ TNO, 2016. Assessment of road vehicle emissions: methodology of the Dutch in-service testing programmes. TNO 2016 R11178v2. 20 October 2016

⁸² TNO, 2014. Emission factors for alternative drivelines and alternative fuels. TNO 2014 R11309. 23 September 2014.

In dit proces wordt rekening gehouden met de ontwikkeling van de brandstofsamenstelling, bijvoorbeeld als gevolg van de groei van het aandeel biobrandstoffen die vaak een lagere energiedichtheid hebben.

Ook ten aanzien van deze tweede databron zijn verschillende publicaties verschenen^{83,84}. Dit geldt ook voor de wijze waarop deze data wordt geanalyseerd en gebruikt voor het afleiden van formules waarmee de typische CO₂-emissies van voertuigen kunnen worden bepaald op basis van een beperkt aantal voertuigenmerken^{85,86}.

Het energiegebruik van elektrische voertuigen is ontleend aan verschillende bronnen. Een van de relevante bronnen is de analyse van laadpassen. Sinds 2022 meet TNO ook het praktijkverbruik van elektrische voertuigen. Dit vindt nog op kleine schaal plaats, omdat de meetmethode ontwikkeld moest worden. Metingen aan elektrische voertuigen blijken door tal van redenen redelijk complex, bijvoorbeeld omdat voertuigen schakelen tussen 1-fase en 3-fase laden.

6.1.3 Emissies in de brandstofproductieketen

Voor de well-to-tank emissies wordt alleen naar broeikasgasemissies gekeken en niet naar luchtverontreinigende emissies. Voor de emissies over de gehele keten, dus inclusief de brandstofproductieketen, wordt in deze studie verwezen naar de gemiddelde waarden volgens de FQD-methodiek, zoals gerapporteerd door de Nederlandse Emissieautoriteit in de jaarrapportage over 2018. Ook wordt zoveel mogelijk bij de REDII en de NEA aangesloten om consistentie met de relevante (inter)nationale rapportages te waarborgen.

ILUC-emissies zijn in deze studie niet meegenomen. ILUC-emissies zijn het gevolg van indirect landgebruiksveranderingen en kunnen er voor zorgen dat een biobrandstof tot meer CO₂-emissies leidt dan de fossiele variant. Dit geldt voor de categorie biobrandstoffen uit voedsel- en veevoedergewassen, maar hoeft niet altijd het geval te zijn. De Europese Commissie heeft bepaald welke biobrandstoffen een hoog ILUC-risico hebben. Ook wordt gewerkt aan de certificering van biobrandstoffen, die wel landgebonden zijn, maar juist een laag risico op ILUC hebben.

Daarnaast zijn tabellen opgenomen met de standaardwaarden en typische waarden uit de RED 2. De typische waarden zijn representatief voor de productieketen in de EU en de standaardwaarden zijn op de typische waarden gebaseerd. Doordat partijen met de standaardwaarden mogen rekenen worden de administratieve lasten verlaagd, maar wanneer men wil aantonen dat een specifieke productieketen lagere emissies bereikt mag een partij altijd een feitelijke waarde aanleveren op basis van berekeningen volgens de RED-methodiek.

Waar de NEa-rapportage of de RED-bijlagen niet voldoende of minder gedetailleerde informatie bevatten, is gebruikt gemaakt van eigen bronnen of door de platforms aangeleverde bronnen (mits de bronnen voldoende onafhankelijk werden geacht). Dit was het geval bij bioLPG en bioCNG/bioLNG.

⁸³ TNO 2018. Real-world fuel consumption of passenger cars based on monitoring of Dutch fuel pass data 2017. TNO 2018 R10371. 17 May 2018

⁸⁴ TNO 2014. Update analysis of real-world fuel consumption of business passenger cars based on Travelcard Nederland fuelpass data. TNO 2014 R11063. 21 July 2014

⁸⁵ TNO 2016. Dutch CO₂ emission factors for road vehicles. TNO 2016 R10449. 14 April 2016.

⁸⁶ TNO 2019. More information, Less emissions: Estimating the real-world CO₂ emissions of passenger cars based on vehicle properties. TNO 2019 R10872. 27 June 2019

Voor waterstof is gebruik gemaakt van de publicatie JEC/JRC WTT/WTW 2020 v5. De WTT CO₂-emissiefactoren voor conventionele brandstoffen zijn sterk afhankelijk van lokale wetgeving omtrent winning en raffinage. In de EU is affakkelen behalve bij hoge uitzondering verboden en zijn raffinaderijen vele malen efficiënter dan buiten de EU. Hierdoor kan de WTT-CO₂-emissiefactor van ruwe aardolie wereldwijd uiteenlopen. Daarnaast verschillen WTT emissiefactoren door verschillen in modellering en berekeningsmethodieken. Door voortschrijdend inzicht is bijv. de referentiewaarde voor fossiele brandstoffen ook verhoogd in de laatste versie van de Richtlijn Hernieuwbare Energie (2018/2001). De waarden in deze studie zijn voornamelijk gebaseerd op NEa-rapportages, omdat deze het best aansluiten bij de Nederlandse situatie.

6.1.4 Overige kenmerken

Naast bovenstaande parameters, komen in dit rapport nog andere kenmerken van energiedragers en voertuigen aan bod, zoals energiedichtheid van energiedragers en de actieradius en beschikbaarheid van voertuigen. Dergelijke informatie is afkomstig uit verschillende externe bronnen, welke in de tekst zijn vermeld.

Bijlage A

Overzicht energiedragers

Eigenschappen energiedragers, specifieke energie, energiedichtheid en WTW emissies

Brandstof	Specifieke energie (MJ/kg)	Energiedichtheid (MJ/L)	WTW CO ₂ -equi emissies [gCO ₂ /MJ]
B0 (100% diesel)	43	36	95,1
B7 (FAME)	42,6	35,8	
B100 (FAME)	37	33	11,3
B30 (FAME)	41.1-42.6	35.1-35.8	
RD30 (HVO)	43-43,2	36.2-36.5	
HVO 100			10,1
Diesel, Dutch mix 2021			88,6
Fossiele benzine(E0)	43	32	93,3
Referentie benzine (E10)	41,3	30,9	
Bio-ethanol (100%)	27	21	21,1
Bio-ETBE*	36	27	28,9
Bio-MTBE	35	26	8,9
Bio-methanol (MEOH)	20	16	
Petrol, Dutch mix 2021			89
LPG	45 – 46	25 – 28	
Bio-LPG	46	24	
LPG	45 – 46	25 – 28	
Bio-LPG	46	24	
Waterstof (H ₂) @350 bar	120,1	2,8	
Waterstof (H ₂) @700 bar	120,1	5,1	8 - 9

CO₂-emissie elektriciteitsproductie per kWh (CBS, 2022)

	2018 [kg/kWh]	2019[kg/kWh]	2020[kg/kWh]	2021*[kg/kWh]
Emissies* totale elektriciteitsmix (100%) Grijs én hernieuwbaar	0,43	0,37	0,29	0,30
Emissies* grijze elektriciteitsmix. Aardgas, koelen en kernenergie	0,56	0,49	0,42	0,51

Bron: CBS, CO₂ emissie-energieverbruik rendementen elektriciteit 2022

- De cijfers voor 2021 zijn voorlopige cijfers
- Er wordt onderscheid gemaakt tussen de referentieparkmethode en de integrale methode. De eerste is geschikt voor marginale analyses, oftewel bij de vraag hoeveel meer of minder emissies er zouden zijn bij 1 kWh meer of minder vraag. De tweede is geschikt voor integrale analyses over de gehele productie of gehele vraag over een jaar.

De bovenstaande emissies worden uitgestoten door de productie van elektriciteit. De ketenemissies van de centrales en productiemiddelen, grondstoffen etc. zit hier nog niet in. De ketenemissies voor elektriciteitsproductie van de elektriciteitsmix in Nederland⁸⁷ bedragen 63g/kWh.

⁸⁷ S. van der Niet et al, "Ketenemissies elektriciteit, actualisatie elektriciteitsmix 2019", CE Delft rapport 2022, publicatienummer 22.210436.002

Mobility & Built Environment

Anna van Buerenplein 1
2595 DA Den Haag
www.tno.nl

TNO innovation
for life