

TNO-rapport

www.tno.nl

TNO 2021 R10784V2 - 22

T +31 88 866 50 10

**Factsheet vergelijking bussen op
verschillende energiedragers**

Datum	25 november 2021
Auteur(s)	Maarten Verbeek (TNO) Anouk van Grinsven (CE Delft)
Exemplaarnummer	21-STL-RAP-100332807v_V2
Aantal pagina's	19 (incl. bijlagen)
Opdrachtgever	Ministerie van Infrastructuur & Waterstaat Postbus 20901 2500 EX DEN HAAG
Projectnaam	IenW Update brandstoffen factsheets
Projectnummer	060.39258

Alle rechten voorbehouden.

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

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	3
1.1	Doelstelling	3
1.2	Wijzigingen ten opzichte van de Factsheets 2020	4
1.3	Voertuig-energiedrager combinaties	5
1.4	Toelichting op de gerapporteerde emissies	5
1.5	Voertuigcategorieën per emissietype	7
1.6	Informatiebronnen.....	7
1.7	Leeswijzer.....	8
2	Energiedrager gerelateerde emissies	10
2.1	Broeikasgas (CO ₂).....	10
2.2	Luchtkwaliteit	11
3	Infrastructuur	13
4	Vervoermiddel.....	14
4.1	Aantal voertuigen en beschikbaarheid modellen in Nederland	14
4.2	Betaalbaarheid.....	15
4.3	Voertuigkenmerken.....	17
5	Ondertekening	19

1 Inleiding

1.1 Doelstelling

Dit document betreft een zogenaamde vergelijking-factsheet (zie ook scope) voor bussen. Doel van deze vergelijkings-factsheets is om de relevante delen uit de onderliggende diverse factsheets voor bussen, aangevuld met informatie uit de Routeradar Innovatie marktontwikkeling 2020 rapportage snel toegankelijk te maken voor private en publieke inkopers van transport.

Scope

De basis voor een vergelijking-factsheet wordt gevormd door de onderliggende factsheets voor specifieke voertuig-energiedrager combinaties (in totaal 18). In iedere vergelijking-factsheet worden voor één type voertuig zoals bijvoorbeeld bussen specifieke kenmerken per energiedrager vergeleken. De specifieke factsheets geven de onderbouwing voor de vergelijking-factsheets en zijn te vinden op: <https://www.pianoo.nl/nl/document/18246/factsheets-energiedragers-wegvervoer>

De vergelijkings-factsheets geven een snel overzicht voor vier geselecteerde voertuigtypen: -personenwagens; -bestelwagens; -vrachtwagens; -bussen. Hiermee kan de lezer de kenmerken van voertuigen op verschillende energiedragers met elkaar vergelijken.

Aanpak

Voor bussen worden verschillende product markt combinaties (PMC's) onderscheiden. Per PMC wordt aandacht gegeven aan de drie basisvelden:

- 1) De energiedrager.
 - a. focus ligt op de zogenaamde praktijkemissies
- 2) De laad/tank infrastructuur.
 - a. betreft aantallen tank/laad voorzieningen in Nederland
- 3) De voertuigen.
 - a. aantallen voertuigen in het Nederlandse wagenpark
 - b. beschikbaarheid qua variatie in typen en modellen
 - c. betaalbaarheid in de vorm van "Total Cost of Ownership" (TCO)
 - d. voertuigkenmerken
 - i. Actieradius
 - ii. Laadvultijd

Versie uit 2020

Ook in 2020 zijn er al factsheets en vergelijking-factsheets gepubliceerd. Dit document is een update van "Factsheet vergelijking bussen", TNO 2020 R10784 uit 2020. Ook in deze vergelijking factsheet "Bussen" vormen de zogenaamde praktijkemissies een belangrijk onderdeel.

Voertuig praktijkemissies

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").

Meer informatie over de berekeningen, de gehanteerde methoden en aanvullende toelichting op de diverse emissies, TCO's en cijfers over infrastructuur en aantallen voertuigen is beschreven in de Routeradar Innovatie monitoring 2020, in de Routeradar DEM 2020 en in de afzonderlijke Factsheets voor Personen, Bestelwagens, vrachtwagens en bussen uit 2020.

1.2 Wijzigingen ten opzichte van de Factsheets 2020

In 2021 is onderzoek gedaan naar de Total Cost of Ownership (TCO) van diverse voertuig-energiedragercombinaties. De methodiek hiervan staat beknopt beschreven in hoofdstuk 4 van dit rapport (zie "Routeradar Innovatie 2020).

Marktontwikkeling” voor meer detail). In deze 2021 vergelijking-factsheet wordt een overzicht van TCO's van diverse PMC's (voertuig-energiedrager combinaties) gegeven.

Tevens zijn nu ook meer gegevens over de laadinfrastructuur (hoofdstuk 3) geactualiseerd en wordt in hoofdstuk 4 de beschikbaarheid van voertuigen weergegeven. Het hoofdstuk over emissies is niet geupdate, aangezien de wijzigingen ten opzichte van 2020 zeer beperkt zijn.

1.3 Voertuig-energiedrager combinaties

De voertuigcategorieën en energiedragers die aan bod komen in de diverse Factsheets 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. De nummers in de tabel representeren de nummers van de factsheets.

	Diesel	Dieselvervangers uit biomassa	Benzine	Benzinevervangers uit biomassa	(Bio)LPG	(Bio)CNG	(Bio)LNG	Elektrisch	Waterstof
Personen- en bestelauto's	1	2	3	4	5	6		7	8
Vrachtauto's en trekker opleggers	9	10					11	12	13
Bussen	14	15				16		17	18

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.

1.4 Toelichting op de gerapporteerde emissies

In de Factsheets wordt onderscheid gemaakt tussen emissies die effect hebben op het klimaat (broeikasgas) en op luchtkwaliteit (fijnstof en stikstofoxiden).

1.4.1 Broeikasgas (CO₂)

In de uitstoot van voertuigen heeft CO₂ het grootste effect heeft op het klimaat. Daarom ligt de focus in deze Factsheets op deze stof. De bijdrage van andere stoffen aan klimaatverandering worden alleen opgemerkt wanneer dit relevant wordt geacht. Dit geldt onder andere voor de uitstoot van methaan.

De uitstoot van CO₂ kan worden onderverdeeld in uitlaatmissies, 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 is '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. 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 wel CO₂ uitgestoten wanneer deze worden opgewekt met behulp van fossiele brandstoffen. Wanneer ze volledig duurzaam worden opgewekt, bijvoorbeeld door middel van wind- of zonne-energie zijn de CO₂-ketenemissies van de voertuigen nul.

1.4.2 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 de natuur.

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

1.5 Voertuigcategorieën per emissietype

1.5.1 *Broeikasgas (CO₂)*

In tegenstelling tot de luchtverontreinigende emissies geldt voor de CO₂-emissies wel dat deze sterk worden beïnvloed door de massa van het voertuig. Om die reden wordt er voor de CO₂-emissies onderscheid gemaakt naar verschillende grootteklassen. Bij bussen wordt deze grootteklasse gebaseerd op de bus lengte.

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.

1.5.2 *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.

De emissies die worden gerapporteerd in deze factsheets zijn representatief voor het gemiddelde van de voertuigcategorie. De werkelijke uitstoot van individuele voertuigen kan hier aanzienlijk van afwijken. 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;
- het verwijderen van nabehandelingstechnologieën, zoals katalysatoren of roetfilters.

1.6 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.) en afnemende beschikbare middelen, 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 dieselveertuigen. Doordat voor dieselveertuigen 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”. Voor voertuigen op waterstof is nog zeer beperkt meetdata beschikbaar en moeten de cijfers nog als indicatief gezien worden.

De waarden voor de emissies gerelateerd aan de productie van fossiele brandstoffen (WTT) bestaan in deze studie uit gemiddelden of referentiewaarden. 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).

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. Recente Nederlandse meetprogramma's ontbreken.

Meer informatie over de gebruikte informatiebronnen is te vinden in een apart document “TNO 2020 R10784 - Bronnen en Achtergrondinformatie”.

1.7 Leeswijzer

In deze Factsheet worden bussen op verschillende energiedragers (product markt combinaties/ PMC's) met elkaar vergeleken. Daarbij wordt aandacht gegeven aan drie relevante hoofdonderwerpen:

- **Hoofdstuk 2 - Emissies per energiedrager**
Hier worden de klimaatbelastende (CO₂ en waar relevant) en de luchtverontreinigende emissies (zoals NO_x en PM₁₀) beschreven.
- **Hoofdstuk 3 - Kenmerken van de infrastructuur** voor de verschillende energiedragers.
- **Hoofdstuk 4 – Voertuigen**
 - a) Aantallen voertuigen in het Nederlandse wagenpark
 - b) Beschikbaarheid qua modellen
 - c) Betaalbaarheid in de vorm van Total Cost of Ownership (TCO)
 - d) Voertuigkenmerken
 - a. Actieradius
 - b. Laad- en vultijd

De kenmerken van de infrastructuur, de betaalbaarheid en voertuigkenmerken zijn meer uitvoerig beschreven in RouteRadar Innovatie monitoring 2020.

2 Energiedrager gerelateerde emissies

2.1 Broeikasgas (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, zwaarder voertuig ook meer CO₂ uit.

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)

Het energiegebruik van bussen is in de loop der jaren maar beperkt afgenomen. Uit een recente studie¹ 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 publicatie¹ 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 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 ketenemissies². Voor fossiele CNG is dat ongeveer 23%². Voor elektrische en waterstofbussen geldt dat alle ketenemissies vrijkomen bij productie en distributie.

¹ City bus performance evaluation. Söderena, Petri; Nylund, Nils-Olof; Mäkinen, Reijo. Published: 27/12/2019

² Rapportage Energie voor Vervoer in Nederland 2019. Naleving verplichtingen wet- en regelgeving Energie voor Vervoer.

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.

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 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 7,3% 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. Op basis van de huidige gemiddelde elektriciteitsmix, zijn de CO₂-ketenemissies vergelijkbaar met die van bussen op fossiele CNG. Wanneer bussen echter 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 wel 95% lager zijn dan van dieselveertuigen.

2.2 Luchtkwaliteit

Uit een recente publicatie³ blijkt dat de NO_x-emissies van moderne CNG-bussen vergelijkbaar zijn met die van moderne dieselmotoren, bij een lage kilometerstand. Hoe een hogere kilometerstand de prestaties van CNG-bussen beïnvloedt, is onduidelijk.

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

³ City bus performance evaluation. Söderena, Petri; Nylund, Nils-Olof; Mäkinen, Reijo
Published: 27/12/2019

dieselbussen. De effecten zijn voor bioCNG hetzelfde aangezien het opgewerkt is tot dezelfde aardgaskwaliteit.

Bussen die rijden op elektrisch of waterstof 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.

3 Infrastructuur

Dieselvoertuigen, waaronder ook de dieselbussen zijn al zeer lang in grote hoeveelheden aanwezig. Diesel is bij bijna elk tankstation te verkrijgen. Eigenaren van grotere wagenpark, bijvoorbeeld concessiehouders van gemeenten maken ook gebruik van niet-openbare vulstations in eigen beheer.

CNG kan worden gedistribueerd door de bestaande gasinfrastructuur die ook wordt gebruikt om bijvoorbeeld woningen te voorzien van aardgas, maar vereist verdere compressie tot 200 of 250 bar bij levering aan het voertuig. In Nederland zijn momenteel 178 CNG-tanklocaties (EAFO, 2019).

Bussen kunnen 's nachts op de remise en overdag op knooppunten en eindhaltes worden opgeladen. 's Nachts kan er gebruik gemaakt worden van normale laders met een vermogen tussen de 30 en 75 kW, overdag kunnen er snelladers ingezet worden met een vermogen tussen de 150 en 450 kW. Laden kan via de stekker, via een pantograaf of via inductieplaten. Door gemeentes, concessieverleners en netbeheerders wordt gezamenlijk onderzoek gedaan naar uitbreiding van laadlocaties.

Waterstof wordt over het algemeen bij een lage druk opgeslagen bij tankstations en wordt geleverd aan personenauto's en vrachtwagens/bussen met 350 of 700 bar. Dit betekent dat het gas bij de tankstations moet worden gecompriëerd.

In Nederland zijn er zeven openbare waterstoftanklocaties (RouteRadar 2020) operationeel. Het Klimaatakkoord heeft als doel vijftig waterstof tankstations te realiseren tot en met 2025.

Tabel 2: Aantallen vul en laadpunten per energiedrager (Bron: Routeradar 2020)

	Aantal infrastructuur
Benzine-/Dieseltankstations	4.143
(Snel)-laadpalen	65.604*
Waterstoftankstations	7
CNG-tankstations	178

*Let op: dit betreft het totaal aantal laadpalen voor elektrische voertuigen in Nederland. Het aantal beschikbare laadpalen voor bussen is niet gespecificeerd.

In de Routeradar DEM rapportage 2020 wordt meer informatie over laadinfrastructuur beschreven, zoals ook kaartjes met de locaties van laadinfrastructuur. Verder zijn op de website van RWS "<https://rwsduurzamemobiliteit.nl/beleid/duurzame-energiedragers-mobiliteit/>" alle Routeradar rapportages én Factsheets te vinden.

4 Vervoermiddel

4.1 Aantal voertuigen en beschikbaarheid modellen in Nederland

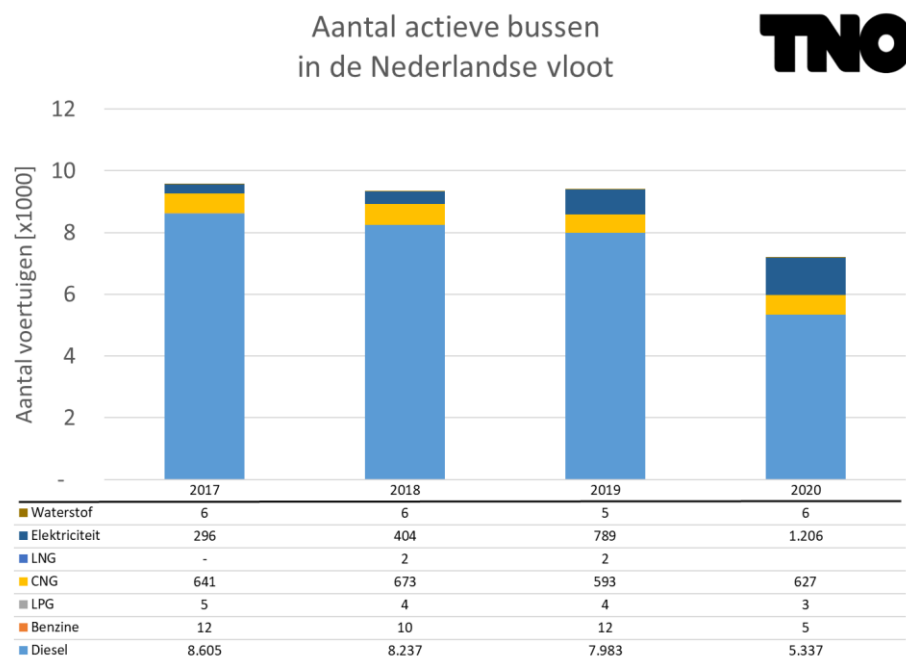
4.1.1 Aantal voertuigen per energiedrager

Er zijn eind 2020 ca. 5337 dieselbussen in Nederland, die 74% van de totale bussenvloot uitmaken. Dieselbussen zijn op grote schaal beschikbaar in Nederland en er is geen beperking op de levering van deze voertuigen.

Er zijn momenteel ongeveer 627 CNG-bussen in Nederland, die 8,7% van de totale vloot uitmaken. De beschikbare modellen worden door IVECO, MAN, Mercedes, Scania, Solaris en Castrosua gebouwd. LNG-bussen rijden momenteel niet rond in Nederland en zijn maar zeer beperkt beschikbaar.

Eind 2020 waren er in ca. 1206 elektrische bussen geregistreerd. Het gaat hierbij uitsluitend om OV-bussen. Het aantal stijgt snel onder meer door invloed van het Bestuursakkoord Zero emissie bussen. Hierin zijn de betrokken partijen overeengekomen dat zij gezamenlijk streven naar een volledig emissievrij regionaal busvervoer in 2030. Vanaf 2025 moeten alle nieuwe OV-bussen zero emissie zijn.

Bussen met brandstofcellen op waterstof zijn nog niet op grote schaal verkrijgbaar op de markt. Wel hebben verschillende merken prototypen brandstofcelvoertuigen beschikbaar. Eind 2020 reden er ca. 6 waterstofbussen in Nederland. In 2021 komen er vijftig nieuwe waterstofbussen bij in het openbaar vervoer in Groningen, Drenthe en Zuid-Holland. De eerste 20 van deze bussen zijn al besteld. [Rijksoverheid, 2019].



Figuur 1: Samenstelling de Nederlandse bussenvloot (OV) naar energiedragers

4.1.2 Beschikbaarheid voertuigmodellen

De beschikbare modellen per energiedrager staan in onderstaande tabel weergegeven. Voor de conventionele energiedragers zijn een zeer groot aantal modellen beschikbaar, voor batterij elektrische voertuigen is het aantal modellen nog beperkt maar sterk in opkomst.

Tabel 3: Aantal beschikbare modellen bussen op de Nederlandse markt

Energiedrager	Aantal modellen
EV	Ca. 13 modellen
Waterstof	Ca. 2 modellen
CNG	Ca. 18 modellen

4.2 Betaalbaarheid

4.2.1 Betaalbaarheid 12 meter bussen: rekenmethodiek en aannames

De betaalbaarheid van voertuigen is vastgesteld door de total-cost-of-ownership (TCO) te berekenen. De TCO wordt bepaald door de investeringskosten (CAPEX) met de operationele/variabele kosten (OPEX) te verrekenen. Dit geeft een ordegrrootte inschatting van de gemiddelde kosten van het gebruik van een voertuig in Euro's per kilometer (€/km).

Voor de berekening wordt gebruik gemaakt van zogenaamde representatieve-voertuigen per energiedrager. De voor de TCO relevante eigenschappen van de representatieve-voertuigen, de energiedrager-specifieke aannames, aannames over de brandstofprijzen en algemene aannames worden in detail beschreven in de rapportage "Routeradar 2020 Innovatiemonitor, marktontwikkeling wegvervoer".

De TCO voor bussen wordt per energiedrager berekend. De kosten voor aanschaf en afschrijving van voertuig en infrastructuur worden berekend met behulp van de annuïteiten-methode en worden uitgedrukt in Euro's per kilometer. Hiervoor wordt zoveel mogelijk gebruik gemaakt van informatie en kentallen uit de TCO voor bussen van CE Delft (CE Delft, 2018).

4.2.2 representatieve voertuigen voor TCO berekeningen

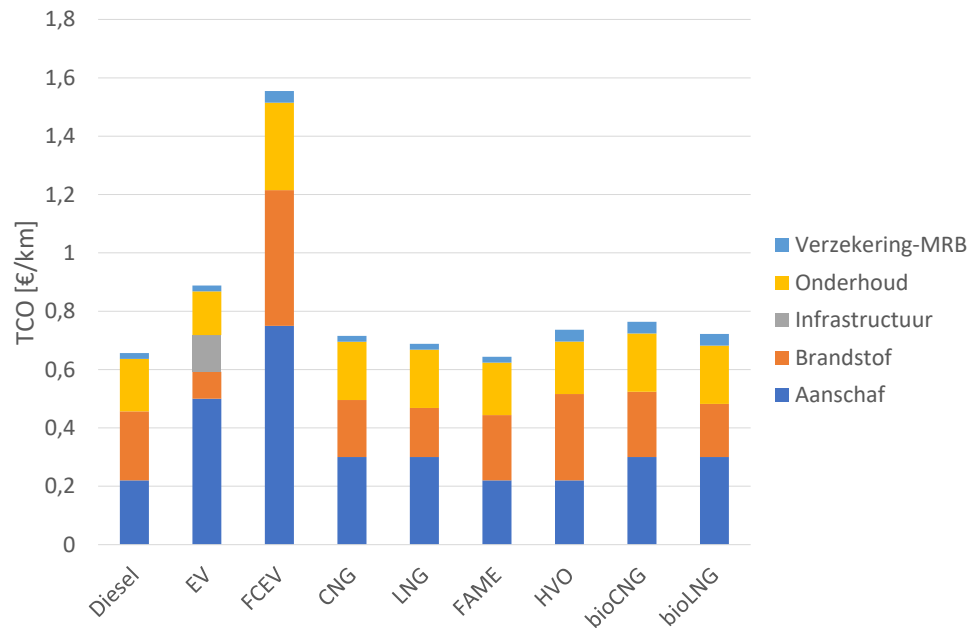
Tabel 4: representatieve voertuigen voor het 12 meter bussen

	Eenheid	Diesel	Elektrisch	Waterstof	CNG	LNG
Merk & Model		VDL Citea LLE-120	VDL Citea SLE-120 Electric	Van Hool A330	Mercedes-Benz Citara (G) NGT	
Uitvoering		12m	12m	12m	12m	
Vervoers-capaciteit	#zitplaatsen / #staanplaatsen / #rolstoelplaatsen	Circa 100	Circa 82	Circa 75	Circa 103	

4.2.3 *TCO bussen*

De TCO is voor 12 meter bussen voor de energiedragers diesel, elektrisch, waterstof (fuel cel), CNG, LNG en dieselvevangers FAME, HVO, bioCNG en bioLNG bepaald. De belangrijke kostencomponenten waaruit de TCO is opgebouwd, te weten voertuig(afschrijving), BTW, BPM, brandstof, MRB, onderhoud en verzekeringen zijn met aparte kleuren weergegeven.

Figuur 2: TCO van 12 meter OV bus voor alle beschouwde energiedragers



4.3 Voertuigkenmerken

De actieradius van bussen op diesel is groot ten opzichte van de meeste andere energiedragers en kan wel 1500 km bedragen.

CNG-bussen hebben typisch een actieradius van 500 – 600 km. De CNG-bussen die momenteel beschikbaar zijn, werken als *mono-fuel* voertuigen die alleen op CNG kunnen rijden. *Dual-fuel* varianten zijn echter ook mogelijk maar momenteel niet beschikbaar.

De aandrijving van een volledig elektrische bus bestaat uit een elektromotor, vermogenselektronica, een regelunit en elektrische energieopslag door middel van accu's. Gemiddeld heeft een bus een laadbehoefte van 200 kWh. De actieradius is onder gunstige omstandigheden ongeveer 200 km, maar afhankelijk van de inzet en bijvoorbeeld lage buitentemperatuur kan dit makkelijk halveren. Batterijen worden wel steeds beter waardoor de verwachting is dat de actieradius zal toenemen in de toekomst.

Waterstof kan op twee manieren worden gebruikt om een voertuig aan te drijven. De meest gebruikte methode op dit moment is de omzetting van waterstof naar elektrische energie in een brandstofcel. De actieradius van waterstofbussen is ongeveer 300-400 km en daarmee groter dan die van elektrische voertuigen, maar kleiner dan die van dieselbussen.

4.3.1 Laad- en vultijd

De laad- en vultijd voor de meeste energiedragers is globaal enkele minuten. Voor batterij elektrisch is de laadtijd aanzienlijk langer. Door het grotere accupakket van bussen in vergelijking met personenauto's zijn laadtijden bij het gebruik van gelijkende laders ook proportioneel groter. Echter, in de praktijk kan onderweg vaak volstaan worden met het deels laden van een accu én kan ook gebruik gemaakt

worden van snellaadstations waardoor de laadtijd beperkt blijft. De ontwikkelingen van laadstations gaan naar steeds hogere laadvermogens waardoor de laadtijd in de toekomst waarschijnlijk nog zal afnemen.

Tabel 5: Functionele specificaties voor elektrische voertuigen met een vergelijking t.o.v. andere alternatieve energiedragers. De weging is op basis van een benzine referentie, met 0 gelijk presterend, -;- slechter en +;+ beter.

Functionele specificatie	Conventioneel diesel	Elektrisch	Waterstof	CNG*
Actieradius	Ca. 700 km	150-200 km	300-400 km	500-600 km
Laad- /vulsnelheid	Ca. 5 minuten	40-200 min	6-10 min	Ca. 5 min

Noot: Veel CNG voertuigen worden ondersteund door een extra benzine tank. Hiermee is in veel gevallen de actieradius door deze extra benzine tank vergelijkbaar met die van conventionele voertuigen.

5 Ondertekening

Den Haag, 25 november 2021



Arjan Eijk
Projectleider

TNO



Maarten Verbeek
Auteur