Externe kosten van ketenemissies van transport

Een verkennende analyse

CE Delft

Committed to the Environment

Externe kosten van ketenemissies van transport

Een verkennende analyse

Dit rapport is geschreven door:
Arno Schroten, Denise Hilster, Peter Scholten, Julius Kiraly

Delft, CE Delft, mei 2021

Publicatienummer: 21.200293.071

Opdrachtgever: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
Uw kenmerk: 31164750

Alle openbare publicaties van CE Delft zijn verkrijgbaar via www.ce.nl

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider Arno Schroten (CE Delft)

© copyright, CE Delft, Delft

CE Delft
Committed to the Environment

CE Delft draagt met onafhankelijk onderzoek en advies bij aan een duurzame samenleving. Wij zijn toonaangevend op het gebied van energie, transport en grondstoffen. Met onze kennis van techniek, beleid en economie helpen we overheden, NGO's en bedrijven structurele veranderingen te realiseren. Al 40 jaar werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.

Inhoud

	Samenvatting	4
	Begrippenlijst	11
1	Inleiding	13
	1.1 Aanleiding	13
	1.2 Doelstelling	14
	1.3 Uitgangspunten voor het onderzoek	14
	1.4 Relatie met de studie ‘De prijs van een vliegreis’	16
	1.5 Leeswijzer	17
2	Ketenemissies	18
	2.1 Inleiding	18
	2.2 Definitie ketenemissies	18
	2.3 Methodiek bepalen ketenemissies	21
	2.4 Overzicht ketenemissies bij de voorbeeldreizen	25
	2.5 Gevoeligheidsanalyses	32
3	Waardering ketenemissies	38
	3.1 Inleiding	38
	3.2 Overzicht externe kosten als gevolg van ketenemissies	38
	3.3 Methodiek voor waardering ketenemissies	39
	3.4 Externe kosten van ketenemissies voor de voorbeeldreizen	49
	3.5 Gevoeligheidsanalyses	51
4	Belastingen/heffingen gerelateerd aan ketenemissies	55
	4.1 Inleiding	55
	4.2 Overzicht relevante belastingen en heffingen	56
	4.3 Methodiek voor bepalen omvang belastingen en heffingen	56
	4.4 Resultaten voor de voorbeeldreizen	58
	4.5 Gevoeligheidsanalyses	59
5	Overall resultaten voorbeeld-reizen	61
	5.1 Inleiding	61
	5.2 Vergelijking van kosten met belastingen/heffingen	62
	5.3 Resultaten voorbeeldreizen	63
	5.4 Vergelijking resultaten met ‘De prijs van een vliegreis’	72
6	Conclusies	74
	6.1 Verkenning van de externe kosten van ketenemissies	74
	6.2 Vergelijking van de mate van internalisatie van externe en infrastructuurkosten	75
	6.3 Onzekerheden en aanbevelingen voor vervolgonderzoek	76

	Bibliografie	78
A	Data voorbeeldreizen	82
	A.1 Inleiding	82
	A.2 Route en afstanden	82
	A.3 Kenmerken infrastructuur	82
B	Overzicht en selectie bronnen	84
	B.1 Inleiding	84
	B.2 Overzicht bronnen	84
	B.3 Vergelijking bronnen	86
C	Nadere toelichting ketenemissies mobiliteit	88
	C.1 Inleiding	88
	C.2 Overzicht van de verschillende ketenstappen	88
	C.3 De belangrijkste factoren die van invloed zijn op omvang ketenemissies	90
	C.4 Materiaalgebruik in voertuigen	91
D	Methodiek bepaling ketenemissies van infrastructuur	93
	D.1 Inleiding	93
	D.2 Overzicht mogelijke methoden	93
	D.3 Nadere toelichting toegepaste methodiek	94
E	Bepalen ketenemissies van voertuigen	102
	E.1 Inleiding	102
	E.2 Kentallen CO_2-ketenemissies voor voertuigen	102
	E.3 Kentallen NO_x- en PM-ketenemissies voor voertuigen	104
F	Externe en infrastructuurkosten en belastingen/heffingen in de gebruiksfase	105
	F.1 Inleiding	105
	F.2 Externe kosten en infrastructuurkosten	105
	F.3 Belastingen en heffingen	107
	F.4 Subsidies	109

Samenvatting

Mobiliteit levert een belangrijke bijdrage aan onze welvaart. Voor de maatschappij zijn er echter ook kosten mee gemoeid, waaronder infrastructuurkosten. Daarnaast zijn er minder zichtbare kosten als gevolg van ongevallen, luchtvervuiling of geluidsoverlast. Dit zijn externe kosten. Zowel de infrastructuurkosten als de externe kosten van mobiliteit zijn uitvoerig onderzocht in verschillende studies. Een kostenpost die daarbij meestal buiten beschouwing blijft zijn de kosten als gevolg van emissies die vrijkomen bij de productie, het onderhoud, en afdanking van voertuigen en de aanleg, onderhoud, beheer, en afdanking van infrastructuur. In deze studie vatten we deze samen in een enge invulling van 'keten-emissies' (zie het tekstkader). Net als bij uitlaatemissies, kunnen ook deze emissies bijdragen aan het broeikaseffect (CO_2) of leiden tot gezondheidsschade als gevolg van luchtvervuiling (NO_x, fijnstof).

Definitie ketenemissies in deze studie
In deze studie verstaan we onder ketenemissies de CO_2-, NO_x- en fijnstofemissies die vrijkomen over de levensduur van een voertuig, *exclusief* de gebruiksfase (maar inclusief onderhoud), en over álle levensfasen van de transportinfrastructuur. Feitelijk behoren de emissies die vrijkomen bij het gebruik van het voertuig (in het bijzonder uitlaatemissies) en bij de productie van brandstoffen (en/of opwekking van elektriciteit) tot de ketenemissies. In deze studie hanteren we echter een engere definitie van deze term, aangezien deze laatste emissies niet centraal staan in deze studie.

In deze studie hebben we een verkennende analyse uitgevoerd naar de omvang van de externe kosten van ketenemissies voor verschillende vervoerswijzen. Vanwege het verkennende karakter hebben we in deze studie verschillende aannames gemaakt en nieuwe methodieken toegepast. Dit leidt tot onzekerheden in de uitkomsten, die bij de interpretatie ervan in het achterhoofd gehouden moeten worden. De resultaten van deze studie geven echter wel een goede eerste inschatting van de omvang van de externe kosten van ketenemissies omdat de aannames gebaseerd zijn op uitvoerig literatuuronderzoek en de uitkomsten in lijn der verwachting zijn met de bestudeerde bronnen.

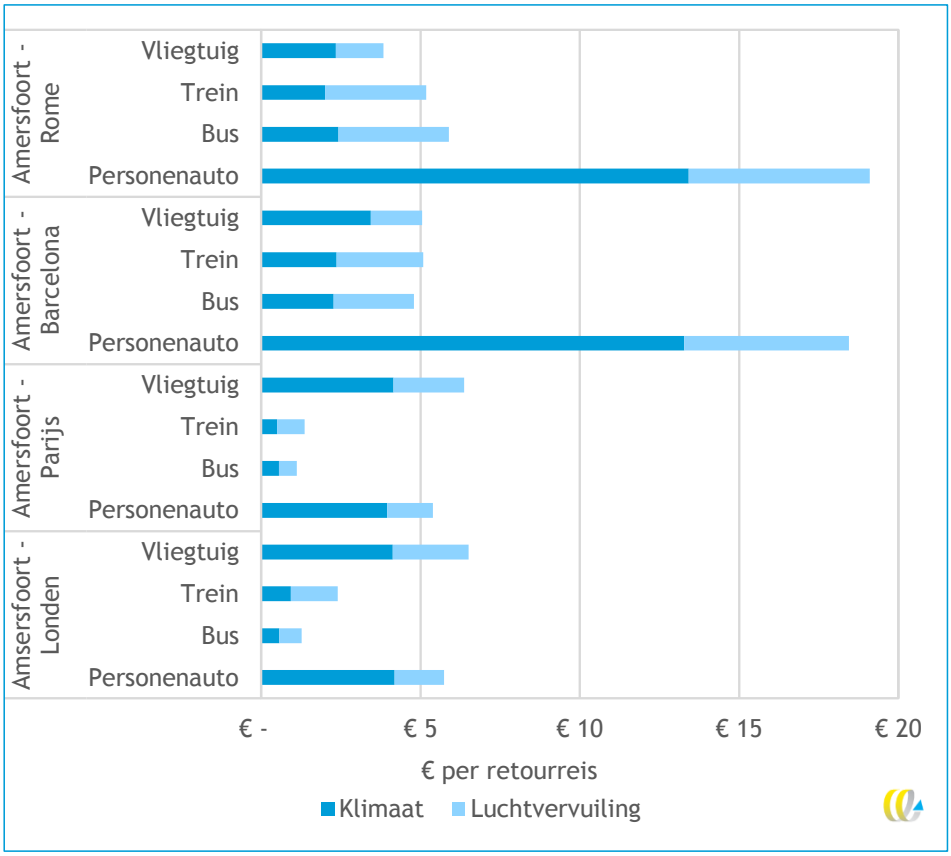
Overzicht externe kosten van ketenemissies

Figuur 1 geeft een overzicht van de externe kosten van ketenemissies voor vier voorbeeldreizen[1]. Gemiddeld genomen liggen deze kosten het hoogst voor een reis met een personenauto. Op de relatief korte reizen (naar Parijs en Londen) zijn de kosten voor een vliegreis hoger. De infrastructuur gerelateerde ketenemissies tellen voor deze reizen relatief zwaar mee. Bij langere vluchten worden deze emissies verdeeld over meer kilometers en meer personen per vliegtuig, waardoor de kosten per reiziger voor het vliegtuig op de vluchten naar Rome en Barcelona aanzienlijk lager zijn. Ze zijn dan van dezelfde ordegrootte als bij de bus en de trein.

[1] Bij de reizen per vliegtuig en bus gaat het hierbij om samengestelde reizen, waarbij in het voor- en/of natransport gebruik wordt gemaakt van de trein. Bij een vliegreis gaat het bijvoorbeeld in het voortraject om de treinreis van Amersfoort Centraal naar Schiphol.

De externe kosten van ketenemissies zijn onder andere afhankelijk van specifieke kenmerken van de voorbeeldreizen (naast de lengte van reis). Zo zorgen bijvoorbeeld de emissies die zijn uitgestoten bij de aanleg van de Eurotunnel voor relatief hoge kosten van ketenemissies op de treinreis naar Londen. Ook het relatief grote aantal tunnels en bruggen op het traject naar Rome leidt tot hogere kosten van ketenemissies voor deze reis per personenauto, bus of trein. Bij de aanleg (en het onderhoud) van tunnels en bruggen komen namelijk relatief veel emissies vrij.

Figuur 1 - Externe kosten van ketenemissies per voorbeeldreis (€ per reiziger per retourreis)



Aandeel ketenemissies in de totale externe kosten van mobiliteit

De externe kosten van ketenemissies hebben een substantieel aandeel in de totale externe kosten van mobiliteit. Op de onderzochte vier voorbeeldreizen, hebben deze kosten bij de personenauto een aandeel van 15-20% in de totale externe kosten, bij de bus 13-23%, bij de trein 8-14% en bij korte vluchten met het vliegtuig 7-9%. Bij de langere vluchten (naar Rome en Barcelona) met het vliegtuig neemt het aandeel af tot 4-5%. Bij het wegverkeer en het spoor zou dit relatieve aandeel de komende jaren verder kunnen stijgen, doordat door de instroom van emissievrije voertuigen en een verdere vergroening van de elektriciteits-productie de externe kosten van de emissies in de gebruiksfase naar verwachting gaan dalen.

Kosten ketenemissies versus belastingen/heffingen

Tegenover de externe kosten van ketenemissies staan ook belastingen en heffingen die betaald dienen te worden[2]. Zo wordt er in de meeste landen bijvoorbeeld energiebelasting geheven over de elektriciteit die wordt gebruikt bij de productie van voertuigen, en geldt er een accijns voor de diesel die wordt gebruikt door graafmachines bij de aanleg van een weg. Een eerste globale inschatting is dat de opbrengst van deze belastingen ca. 10-30% bedragen van de omvang van de externe kosten van ketenemissies. Hiermee wordt duidelijk dat deze kosten nog niet gedekt worden door belastingen of heffingen die worden geheven door de overheid.

Alle externe en infrastructuurkosten versus alle belastingen/heffingen

Terwijl deze studie specifiek kijkt naar de externe kosten van ketenemissies volgens een enge definitie, exclusief de voertuiggebruiksfase (zie de tekstkader), en daarbij een inschatting maakt van de belastingen en heffingen die daartegenover staan, hebben we ook een bredere, aanvullende analyse gemaakt. Voor de vier voorbeeldreizen zijn de inkomsten van relevante belastingen/heffingen namelijk ook vergeleken met alle externe (en infrastructuur)kosten, dus met inbegrip van alle kosten tijdens de gebruiksfase (kosten van uitlaatemissies, ongevallen, geluidsoverlast, etc.). Bij de belastingen/heffingen nemen we in de vergelijking zowel overheidsinstrumenten (bijv. accijnzen, voertuigbelastingen) als heffingen opgelegd door (private) infrastructuurbeheerders (bijv. luchthavengelden, tolgelden) mee.

Bij deze vergelijking zijn twee perspectieven gehanteerd:

1. Een vergelijking van alle externe en infrastructuurkosten met alle relevante belastingen en heffingen. Dit biedt inzicht in hoeverre er sprake is van het principe ‘de vervuiler/gebruiker betaalt’.
2. Een vergelijking van de variabele externe en infrastructuurkosten met alle variabele belastingen en heffingen. Dit perspectief is vooral interessant voor beleidsvorming waarbij geen aanleg van nieuwe infrastructuur is voorzien.

De resultaten van deze analyse zijn terug te vinden in Tabel 1. De externe en infrastructuurkosten voor de auto zijn bij alle voorbeeldreizen ruim lager dan de betaalde belastingen en heffingen. Bij het vliegtuig liggen de ratio’s tussen de 35 en 85%. Bij de trein zijn de vaste infrastructuurkosten erg hoog, wat resulteert in ratio’s van 19 tot 36% voor het totale kosten perspectief. Laten we de vaste kosten buiten beschouwing, dan worden de kosten van de trein op alle reizen ruimschoots gedekt. De relatief lage belastingen/heffingen voor de bus leiden tenslotte tot lage ratio’s voor het busvervoer.

[2] Naast de externe kosten van ketenemissies kunnen de productie/aanleg, onderhoud en afdanking van voertuigen en infrastructuur ook leiden tot andere externe kosten. Hierbij kan bijvoorbeeld gedacht worden aan kosten van geluidsoverlast of trillingen. In vergelijking met de kosten van emissies zijn deze externe kostenposten naar verwachting klein. Vandaar dat we deze kosten niet hebben ingeschat en dus ook niet meenemen in deze vergelijking. Dit leidt weliswaar tot een (gedeeltelijk) incomplete vergelijking van externe kosten en belastingen/heffingen, maar heeft geen grote invloed op de resultaten van die vergelijking.

Tabel 1 - Ratio van belastingen/heffingen en kosten voor twee verschillende perspectieven

	Vliegtuig		Trein		Bus		Auto	
	Totaal	Variabel	Totaal	Variabel	Totaal	Variabel	Totaal	Variabel
Amersfoort – Parijs	35%	68%	19%	196%	18%	34%	143%	132%
Amersfoort – Londen	49%	84%	36%	386%	18%	34%	187%	200%
Amersfoort – Barcelona	36%	57%	25%	155%	25%	46%	159%	165%
Amersfoort - Rome	43%	66%	16%	117%	16%	30%	129%	125%

Summary

Mobility is a key part of our prosperity. There are costs to society too, though, including those associated with infrastructure as well as the less visible costs of accidents, air pollution and noise nuisance. These two cost categories – infrastructure costs and external costs – have been extensively researched in numerous studies. One category that is generally ignored, however, are the costs of the emissions associated with vehicle production, maintenance and end-of-life disposal and infrastructure construction, maintenance, operation and demolition. In this study we use a narrow definition of the term 'lifecycle emissions' to refer to these emissions (see the textbox). Just like tailpipe emissions, they can contribute to the greenhouse gas effect (CO_2) or cause health damage due to air pollution (NO_x, particulates).

'Lifecycle emissions' as defined in this study
In this study the term 'lifecycle emissions' is used to refer to the CO_2, NO_x and particulate matter (PM) emissions occurring during the lifetime of vehicles, *excluding* the use phase (but including maintenance), and during all lifecycle phases of transport infrastructure The lifecycle emissions should in fact include those occurring during vehicle use (particularly tailpipe emissions) and in fuel production (and/or power generation). In this study, though, we employ a narrower definition of the term, since these last emissions are not the focus of the present study.

This study presents an exploratory analysis of the external costs of the lifecycle emissions for various modes of transport. Given the exploratory nature, a series of assumptions were made and novel methods employed. This means there are uncertainties in the results that need to be borne in mind in interpretating them. This said, though, the results do provide a robust initial indication of the magnitude of these costs because the assumptions are based on an extensive literature study and the results are in line with what the sources studied would lead one to expect.

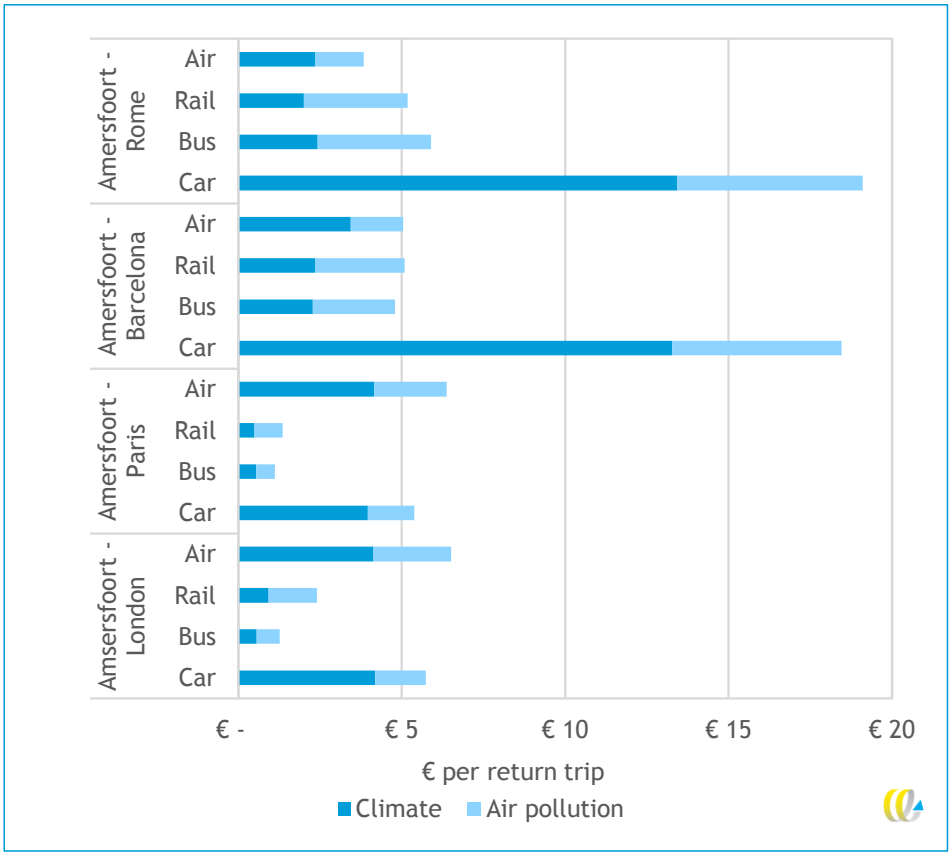
Synopsis of external costs of lifecycle emissions

Figure 2 shows the external costs of lifecycle emissions for four illustrative trips[3].
On average, these costs are highest for car travel. On the relatively short trips to Paris and London, air travel scores higher, since the lifecycle emissions associated with infrastructure knock on more significantly. On longer flights, these emissions are spread out over more kilometres and more passengers per aircraft, making per-passenger costs on flights to Rome and Barcelona far lower and comparable with those for bus and rail.

The external costs of lifecycle emissions are determined among other things by the specific features of the trips (besides trip length). For example, the emissions associated with construction of the Eurotunnel lead to relatively high lifecycle emission costs on the rail trip to London, as can be seen in Figure 2. The relatively large number of tunnels and bridges on the route to Rome means higher lifecycle emission costs for this trip by car, bus or rail, since construction (and maintenance) of this infrastructure is relatively emission-intense.

[3] The air and bus trips are in fact multimodal, with rail being used for the first and last legs. The plane trip, for example, starts with a train ride from Amersfoort Centraal to Schiphol.

Figure 2 - External costs of lifecycle emissions for four illustrative trips (€ per passenger per return trip)



Share of lifecycle emissions in total external costs

The external costs of lifecycle emissions make up a substantial share of overall external costs. On the four illustrative trips examined, these costs make up 15-20% of the total external costs for car travel, 13-23% for bus travel, 8-14% for rail travel and 7-9% for short-haul air travel. On the longer flights to Rome and Barcelona, the share falls to 4-5%. For road and rail this relative share seems likely to increase in the years ahead, since the external costs of use-phase emissions will decline with further uptake of zero-emission vehicles and greener electricity production.

Costs of lifecycle emission versus taxes/charges

Over and against the external costs of lifecycle emissions stand the taxes and charges paid[4]. In most countries, for example, an energy tax is paid on the electricity consumed during vehicle production and fuel duty paid on the diesel used by excavators during road construction. An initial rough estimate is that the revenue from these taxes is around

[4] Production/construction, maintenance and disposal of vehicles and infrastructure can lead to other external costs besides those of lifecycle emissions – nuisance costs due to noise or vibration, for example. Compared with the costs of emissions, these external cost items are likely to be modest, though, and have not been estimated and thus not been included in this comparison. Although this means (partially) incomplete comparison of external costs and taxes/charges, it has no major impact on the overall results of that comparison.

10-30% of the total external costs of lifecycle emissions, pointing to these costs not yet being covered by government-levied taxes and charges.

All external and infrastructure costs versus all taxes/charges

While this study looks specifically at the external costs of lifecycle emissions in a narrow definition, excluding the vehicle use phase (see the text box), and estimates the taxes/charges over and against them, an additional, broader analysis was also made. For the four illustrative trips, the revenues from relevant taxes/charges were compared with *all* the external (and infrastructure) costs, i.e. including all the costs during the use phase (costs of tailpipe emissions, accidents, noise nuisance, etc.). On the taxes/charges side, the comparison includes both government instruments (e.g. fuel duty, vehicle taxes) and charges levied by (private) infrastructure operators (e.g. airport dues, tolls).

In this comparison two perspectives were adopted:

1. Comparison of all the external and infrastructure costs with all relevant taxes and charges, providing insight into the extent to which the 'the polluter/user pays' principle is adhered to.
2. Comparison of the variable external and infrastructure costs with all variable taxes and charges, of particular interest for policy plans involving no construction of new infrastructure.

The results of this analysis are shown in Table 2. On all four illustrative trips, the external and infrastructure costs for car travel are substantially lower than the taxes/charges paid. For air travel the ratios are between 35% and 85%. For rail, the fixed infrastructure costs are very high, resulting in ratios from 19% to 36% from a total-cost perspective. If the fixed costs are ignored, the costs of rail are more than covered on all the trips. The relatively low taxes/charges for buses, finally, lead to low ratios for bus travel.

Table 2 - Ratio of taxes/charges to costs from two different perspectives

	Air		Rail		Bus		Car	
	Total	Variable	Total	Variable	Total	Variable	Total	Variable
Amersfoort – Paris	35%	68%	19%	196%	18%	34%	143%	132%
Amersfoort – London	49%	84%	36%	386%	18%	34%	187%	200%
Amersfoort – Barcelona	36%	57%	25%	155%	25%	46%	159%	165%
Amersfoort - Rome	43%	66%	16%	117%	16%	30%	129%	125%

Begrippenlijst

Begrip	Uitleg
BDU (Brede Doel Uitkering)	Rijkssubsidies voor de bekostiging van uitgaven op het gebied van verkeer en vervoer in de regio. Het gaat dan vaak om laag bezette, niet commerciële OV-verbindingen.
Bruto ton kilometer	Het vervoer van één ton over één kilometer, waarbij naast het gewicht van de lading ook het gewicht van het voertuig wordt meegenomen.
CO_2	Koolstofdioxide.
Effectieve koolstofbelasting	De CO_2-prijs zoals die gemiddeld geldt in de praktijk, waarbij rekening wordt gehouden met de tarieven van de relevante belastingen en heffingen en mogelijke uitzonderingen daarop.
Externe kosten	De kosten voor derden die worden veroorzaakt door een bepaalde partij maar waarvoor andere (geschade) partijen niet vergoed worden. Zonder overheids-ingrijpen komen deze effecten niet tot uitdrukking in de kosten voor de veroorzaker, waardoor hij/zij deze kosten niet meeneemt in de beslissing over de actie die de kosten veroorzaakt.
EU ETS (European Emission Trading System)	Een systeem voor het verhandelen van uitstootrechten van broeikasgassen in de wereld. Deelnemers aan het EU ETS zijn onder andere de energie-intensieve industrie, elektriciteitsproducenten en luchtvaartmaatschappijen.
Infrastructuurkosten	Alle kosten voor aanleg, vernieuwing, onderhoud en beheer van transport-infrastructuur. Ze bestaan uit de directe uitgaven aan infrastructuur plus de financieringskosten.
IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)	Organisatie van de Verenigde Naties om de risico's van klimaatverandering te evalueren.
Ketenemissies	Alle emissies die vrijkomen over de levensduur van een voertuig of de transport-infrastructuur, exclusief de gebruiksfase.
Ketenstap	Stap in de levenscyclus van een product of proces. Voor transportinfrastructuur onderscheiden we de volgende ketenstappen: constructie, onderhoud, beheer, en afdanking. Voor voertuigen zijn dit: productie, onderhoud, en afdanking. Deze ketenstappen kunnen weer verder onderverdeeld worden in verschillende deelstappen.
LCA (Levenscyclusanalyse)	Methodiek om de totale milieubelasting te bepalen van een product (of proces) gedurende de gehele levenscyclus, dat wil zeggen: winning van de benodigde grondstoffen, product, transport, gebruik, en afvalverwerking.
LTO (Landing and Take-off)	Volledige cyclus van landen en opstijgen van een vliegtuig.
Milieuprijs	Waarde die wordt toegerekend aan een goed of dienst, waarvoor geen prijs tot stand komt op een markt waar vraag en aanbod elkaar ontmoeten.
NO_x	Stikstofoxiden.
PAE (Personenauto-equivalent)	Parameter die aangeeft hoeveel ruimte een voertuig inneemt in vergelijking met een personenauto.
Procesemissies	Emissies die vrijkomen tijdens de verwerking van materialen.
PM	Fijnstofemissies.
$PM_{2,5}$	Fijnstofemissies met een diameter kleiner dan 2,5 millimeter.
Productemissies	Emissies die vrijkomen tijdens de productie van basismaterialen.
Reizigerskilometer (rkm)	Het vervoer van één reiziger over één kilometer.
SimaPro	Softwareprogramma voor de uitvoer van levenscyclusanalyses (zie: LCA).

Begrip	Uitleg
Totale ketenemissies (incl. gebruiksfase)	Alle emissies die vrijkomen over de levensduur van een voertuig of de transport-infrastructuur. In aanvulling op ketenemissies (zie Ketenemissies) worden hier dus ook de uitlaatemissies, slijtage-emissies en emissies gerelateerd aan de productie van brandstoffen en elektriciteit meegenomen.
Voertuigkilometer (vkm)	De verplaatsing van één voertuig over één kilometer.
VOLY (Value of a Life Year)	Economische waardering voor een levensjaar.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Verkeer en vervoer leveren een belangrijke bijdrage aan onze welvaart. Het stelt mensen in staat om te profiteren van een groot aanbod van werkgelegenheid, scholingsmogelijkheden en recreatieve bezigheden. Daarnaast draagt het bij aan de efficiëntie van het productie-proces, onder andere doordat het regionale specialisatie mogelijk maakt. Tegenover deze baten van transport staan echter ook kosten. Voor een deel gaat het hierbij om kosten die gedragen worden door de transportgebruikers zelf, zoals brandstofkosten, kosten van aanschaf van het voertuig en onderhoudskosten. Daarnaast zijn er echter ook kosten waar-voor er op de markt geen prijs tot stand komt en die (zonder overheidsinterventie) door transportgebruikers niet worden meegenomen in hun transportbeslissing. Het gaat dan om de infrastructuur- en externe kosten. Voorbeelden van de laatste categorie kosten zijn de kosten van luchtvervuilende emissies, geluid of ongevallen.

Doordat individuen en bedrijven externe en infrastructuurkosten (zonder overheids-interventie) vaak niet meenemen in hun mobiliteitsbeslissingen[5], komt er een suboptimale omvang/samenstelling van het transport tot stand. Door de externe kosten te internaliseren worden ze wel onderdeel van het beslissingsproces van verkeersdeelnemers. Dit kan bijvoorbeeld worden gedaan met behulp van economische instrumenten, zoals belastingen, heffingen en emissiehandelssystemen. De mate waarin de externe (en infrastructuur)kosten van mobiliteit worden geïnternaliseerd verschilt sterk tussen modaliteiten, landen en routes (CE Delft, et al., 2019d). In CE Delft (2019) is voor de personenauto, bus (touringcar), trein en het vliegtuig voor specifieke internationale voorbeeldreizen in beeld gebracht in welke mate de externe en infrastructuurkosten geïnternaliseerd worden. Ook deze analyse liet zien dat er belangrijke verschillen bestaan tussen modaliteiten en routes.

Betrouwbare data over de omvang van de externe en infrastructuurkosten en de omvang van belastingen/heffingen is noodzakelijk om modaliteiten correct te kunnen vergelijken voor de mate waarin ze hun externe en infrastructuurkosten internaliseren. De studie CE Delft et al. (2019c) geeft een uitgebreid overzicht van de belastingen en heffingen die voor de verschillende modaliteiten in de Europese lidstaten betaald moeten worden. Ook de externe en infrastructuurkosten van mobiliteit zijn de afgelopen twee decennia uitgebreid onderzocht, zowel voor Nederland als voor Europa als geheel[6]. Externe kosten die hierbij vaak buiten beschouwing gelaten worden, vanwege een gebrek aan data, zijn de kosten van emissies die worden uitgestoten bij de productie, onderhoud en afdanking van voertuigen en de aanleg, onderhoud, beheer en afdanking van infrastructuur (in deze studie aangeduid met de term ketenemissies). Alleen voor Zwitserland zijn deze externe kosten recentelijk in beeld gebracht (Bundesamt für Raumentwicklung, 2020).

[5] De infrastructuurkosten worden soms (gedeeltelijk) door de infrastructuurbeheerder via heffingen in rekening gebracht bij de gebruiker. Dit geldt bijvoorbeeld voor luchthavens (via luchthavengelden) of tolwegen. In deze situatie komen de infrastructuurkosten dus al wel (gedeeltelijk) tot uiting in de prijs voor gebruikers.

[6] Zie bijvoorbeeld CE Delft (2014), CE Delft (2019a), en CE Delft et al. (2019b).

Definitie ketenemissies in deze studie

In deze studie doelen we met de term ketenemissies op alle CO_2-, NO_x- en fijnstofemissies die vrijkomen bij:

- de productie, het onderhoud en de afdanking van voertuigen;
- de aanleg, het onderhoud, het beheer en de afdanking van transportinfrastructuur.

Feitelijk behoren ook de emissies die vrijkomen bij het gebruik van het voertuig (uitlaatemissies, slijtage-emissies) en bij de productie van brandstoffen (en/of opwekking van elektriciteit) tot de ketenemissies. In deze studie hanteren we echter de bovenstaande engere definitie van deze term, aangezien deze laatste emissies niet tot scope van deze studie behoren. Wanneer we verwijzen naar de totale ketenemissies van mobiliteit (dus inclusief de emissies uit de gebruiksfase), dan doen we dat in deze studie met de term 'totale ketenemissies (incl. gebruiksfase)'.

Het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (I&W) wil graag beter inzicht hebben in de externe kosten van ketenemissies. Zij hebben daarom CE Delft gevraagd om een verkennend analyse uit te voeren naar de omvang van deze externe kosten. De resultaten van die analyse dienen vervolgens gebruikt te worden om een vergelijking te maken van de volledige externe en infrastructuurkosten enerzijds en de belastingen en heffingen anderzijds.

1.2 Doelstelling

Het doel van deze studie is om inzicht te geven in de omvang van de externe kosten van ketenemissies. Dit doen we door deze kosten te bepalen voor vier voorbeeldreizen.
De belangrijkste onzekerheden in de bepaling van deze kosten worden in beeld gebracht via gevoeligheidsanalyses. Tevens maken we een vergelijking tussen deze kosten en de belastingen/heffingen die eraan zijn gerelateerd, om zo een inschatting te kunnen geven welk deel van deze kosten reeds (indirect) betaald worden door de gebruiker.

De resultaten van deze analyse worden tenslotte verwerkt in de (geactualiseerde) vergelijkende analyse van externe en infrastructuurkosten enerzijds en belastingen/heffingen anderzijds, zoals die voor een aantal voorbeeldreizen is uitgewerkt in de studie 'De prijs van een vliegreis' (CE Delft, 2019). Op deze wijze wordt inzicht verkregen in de invloed die deze kosten hebben op de vergelijking van kosten en belastingen/heffingen.

1.3 Uitgangspunten voor het onderzoek

De volgende uitgangspunten worden gehanteerd voor dit onderzoek:

- *Emissies*: in deze studie worden de CO_2-, NO_x-, en fijnstofemissies die worden uitgestoten bij de productie, onderhoud en sloop van voertuigen en bij de aanleg en onderhoud van infrastructuur meegenomen.
- *Voorbeeldreize*n: bij alle analyses die in deze studie worden uitgevoerd worden de resultaten bepaald voor vier voorbeeldreizen. Deze voorbeeldreizen worden kort gepresenteerd in de volgende tekstbox. De keuze voor deze voorbeeldreizen is in samenspraak met I&W gemaakt. Daarbij was het uitgangspunt om te kiezen voor reizen die verschillen in lengte en waarbij concurrentie tussen de verschillende modaliteiten aanwezig was.
- *Referentievoertuigen*: de externe kosten van ketenemissies worden in deze studie in beeld gebracht voor personenauto's, touringcars, treinen en vliegtuigen. Daarbij richten we ons op de referentievoertuigen zoals die in CE Delft (2019) zijn gedefinieerd (zie Tabel 3).

Tabel 3 - Overzicht referentievoertuigen

Voertuig	Nadere onderverdeling	Omschrijving referentievoertuig
Vliegtuig	Korte afstand	Embraer 170
	Middellange afstand	Boeing 737-700
Trein	Hogesnelheidstrein	Hogesnelheidstrein van 200 meter
	Conventionele elektrische intercitytrein	Elektrische intercitytrein van 200 meter
Bus	Touringcar	Diesel touringcar van 13,5 ton
Auto	Personenauto	Benzine Volkswagen Golf uit 2016

- *Basisjaar: h*et basisjaar voor deze studie is 2020. Dit betekent onder andere dat alle kosten in deze studie zijn uitgedrukt in het prijspeil voor 2020 en dat voor de belastingen en heffingen is uitgegaan van de tarieven zoals die golden voor 2020. In de berekeningen is soms gebruikgemaakt van data over de (totale) verkeersprestaties in een land (of voor een luchthaven). Omdat deze data voor 2020 vanwege de COVID-19-pandemie niet representatief is, hebben we voor deze variabele gebruikgemaakt van data voor 2019[7].

Overzicht voorbeeldreizen

De vier voorbeeldreizen die in deze studie centraal staan zijn[8]: Amersfoort – Londen, Amersfoort – Parijs, Amersfoort – Barcelona en Amersfoort – Rome.

Voor alle voorbeeldreizen gaan we uit van een retourreis. Daarbij starten (en eindigen) de reizen in Amersfoort, op het treinstation. In het buitenland zijn de stadscentra van de genoemde steden de bestemming.
Voor sommige vervoerwijzen is hierbij voor- en/of natransport noodzakelijk. Daarbij gaan we ervan uit dat:

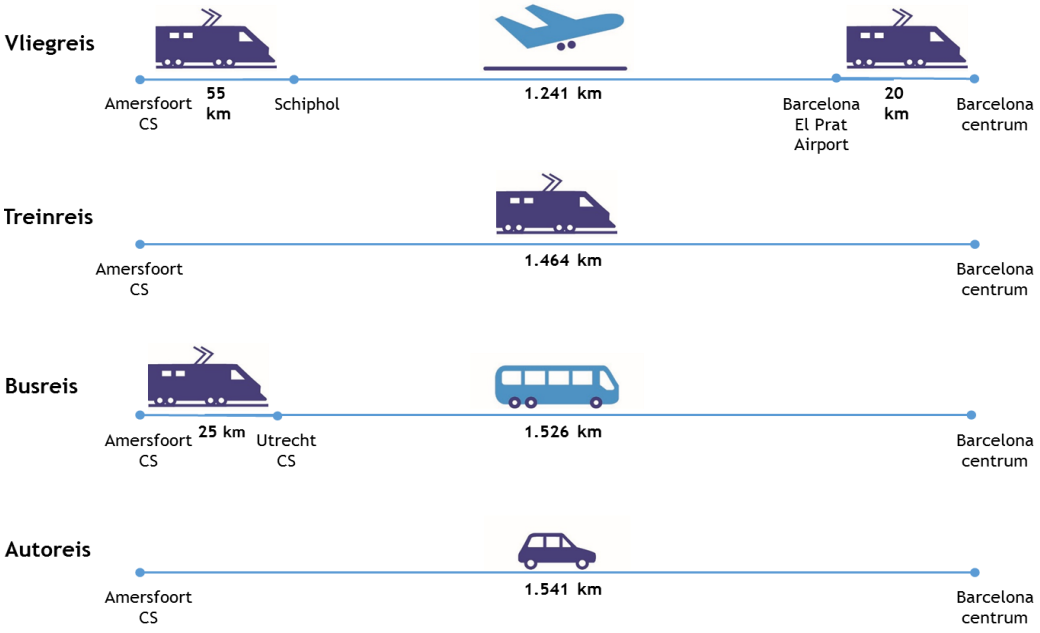
- Voor de vliegreis de trein wordt gebruikt in het voor- en natransport. Voor alle bestemmingen blijkt dit mogelijk te zijn.
- Voor de busreis bestaat het voortransport in Nederland uit een treinreis tussen Amersfoort en Utrecht. Voor de bestemmingslocatie gaan we ervan uit dat de bus stopt in het stadscentrum en er dus geen natransport noodzakelijk is.
- Voor de auto- en de treinreizen is er geen voor- en natransport.

De opbouw van de voorbeeldreizen is voor de reis Amersfoort – Barcelona geïllustreerd in Figuur 3.

[7] Overigens is er geen reden om aan te nemen dat COVID-19 een substantiële invloed heeft op de externe kosten van ketenemissies. De emissies die vrijkomen bij voertuigproductie en onderhoud en bij de aanleg en onderhoud van infrastructuur worden namelijk niet beïnvloed door de (tijdelijke) afname die we nu in verkeersvolumes zien als gevolg van COVID-19. Ook de overige externe en infrastructuurkosten worden voor de specifieke voorbeeldreizen niet substantieel beïnvloed door COVID-19. De resultaten van deze studie zijn daarom ook representatief voor de huidige situatie inclusief COVID-19.

[8] In CE Delft (2019) worden ook nog twee voorbeeldreizen voor een lange afstand onderscheiden (Amersfoort – Los Angeles en Amersfoort – Toronto). In samenspraak met het ministerie van I&W is ervoor gekozen om deze twee voorbeeldreizen niet mee te nemen in deze studie, omdat ze enkel per vliegtuig gemaakt kunnen worden en er daarom geen vergelijking van modaliteiten gemaakt kan worden.

Figuur 3 - Illustratie voorbeeldreis Amersfoort - Barcelona (enkele reis)



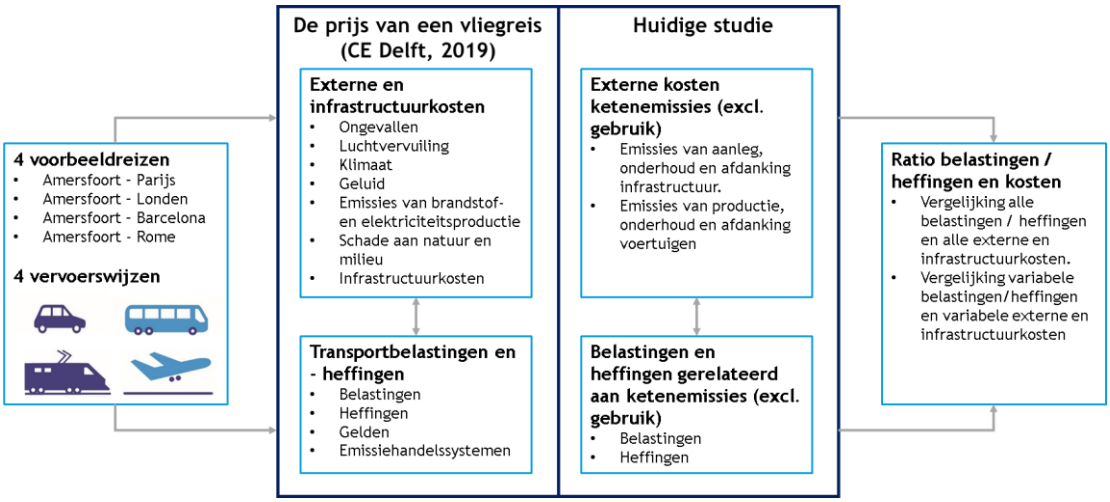
Meer specifieke informatie over de voorbeeldreizen is terug te vinden in Bijlage A.

1.4 Relatie met de studie 'De prijs van een vliegreis'

Zoals is aangegeven in Figuur 4 wordt de kern van deze studie gevormd door het in kaart brengen van de externe kosten van ketenemissies en de belastingen/heffingen die gerelateerd zijn aan deze emissies. De resultaten van die analyse worden vervolgens gecombineerd met de (geactualiseerde[9]) resultaten van de studie 'De prijs van een vliegreis', die bestaan uit een overzicht van de overige externe en infrastructuurkosten en de transportbelastingen en -heffingen die relevant zijn voor de verschillende vervoerswijzen op de vier voorbeeldreizen. Het uiteindelijke doel is dan om een integrale vergelijking te maken van de ratio van belastingen/heffingen en kosten voor de vier voorbeeldreizen (met als resultaat de ratio van belastingen/heffingen en kosten). Hiermee vormt deze analyse een update en uitbreiding van de vergelijkende analyse die voor dezelfde voorbeeldreizen is uitgevoerd in 'De prijs van een vliegreis'.

[9] Het basisjaar in de studie 'De prijs van een vliegreis' was 2016. De resultaten van deze studie zijn daarom geüpdatet voor het jaar 2020. Welke stappen daarvoor zijn ondernomen is weergegeven in Bijlage F.

Figuur 4 - Relatie tussen de huidige studie en 'De prijs van een vliegreis'



Zoals weergegeven in Figuur 4 worden in de vergelijkende analyses zowel externe als infrastructuurkosten meegenomen, alsmede de verschillende vormen van belastingen en heffingen. Om een eerlijke vergelijking te kunnen maken is het belangrijk om al deze verschillende elementen mee te nemen (CE Delft, et al., 2019d). Voor belastingen is het namelijk vaak niet eenduidig vast te stellen of ze gerelateerd dienen te worden aan externe of infrastructuurkosten, waardoor ze enkel met de combinatie van beide kostenposten vergeleken kunnen worden. Eveneens zijn het niet alleen belastingen die geheven worden over het gebruik van voertuigen en infrastructuur, maar ook heffingen, gelden (bijv. luchthavengelden) of emissiehandelssystemen (EU ETS). Een eerlijke vergelijking van kosten en belastingen/heffingen is dus alleen mogelijk als al deze elementen in de vergelijking worden meegenomen.

1.5 Leeswijzer

Dit rapport kent de volgende structuur:

- Hoofdstuk 2 presenteert de definitie en afbakening van ketenemissies en de methodiek zoals die in deze studie is gehanteerd om de omvang van deze emissies te bepalen. Ook de resultaten van de toepassing van die methodiek worden in dit hoofdstuk gepresenteerd.
- Hoofdstuk 3 geeft een overzicht van de externe kosten die het gevolg zijn van de ketenemissies op de voorbeeldreizen. Daartoe wordt stilgestaan bij de vraag wat nu precies de schadelijke effecten zijn van de verschillende ketenemissies en hoe deze effecten kunnen worden gewaardeerd.
- Hoofdstuk 4 biedt een overzicht van de belastingen en heffingen die de externe kosten van de ketenemissies internaliseren. Daarbij wordt ook een inschatting gemaakt van welk deel van de externe kosten van ketenemissies, zoals ingeschat in Hoofdstuk 3, worden geïnternaliseerd door bestaande belastingen en heffingen.
- Hoofdstuk 5 geeft de vergelijking van externe en infrastructuurkosten en belastingen/heffingen voor de referentievoertuigen op de vier voorbeeldreizen. Daarbij worden niet alleen de externe kosten van ketenemissies en de belastingen/heffingen die deze kosten internaliseren meegenomen, maar ook alle andere relevante kosten en heffingen/belastingen (gerelateerd aan de gebruiksfase).
- Hoofstuk 6 presenteert tenslotte de belangrijkste conclusies van het onderzoek en aanbevelingen voor vervolgonderzoek.

2 Ketenemissies

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk presenteren we de belangrijkste resultaten van de verkennende analyse van de ketenemissies van mobiliteit en de daaruit voortkomende inschatting van deze emissies voor de vier voorbeeldreizen. Deze analyse is gedeeltelijk gebaseerd op een uitgebreide literatuurstudie, waarbij een aantal relevante bronnen zijn geselecteerd waaruit de benodigde data is verzameld (zie Bijlage B).

In Paragraaf 2.2 staan we allereerst stil bij wat we nu precies verstaan onder ketenemissies in deze studie. Daarbij gaan we ook in op verschillende categorieën van deze emissies.
De methodiek van de bepaling van ketenemissies komt aan bod in Paragraaf 2.3.
In Paragraaf 2.4 wordt de omvang van de ketenemissies voor de verschillende vervoerswijzen op de verschillende voorbeeldreizen gepresenteerd. Tenslotte onderzoeken we in Paragraaf 2.5 via een aantal gevoeligheidsanalyses de robuustheid van deze resultaten.

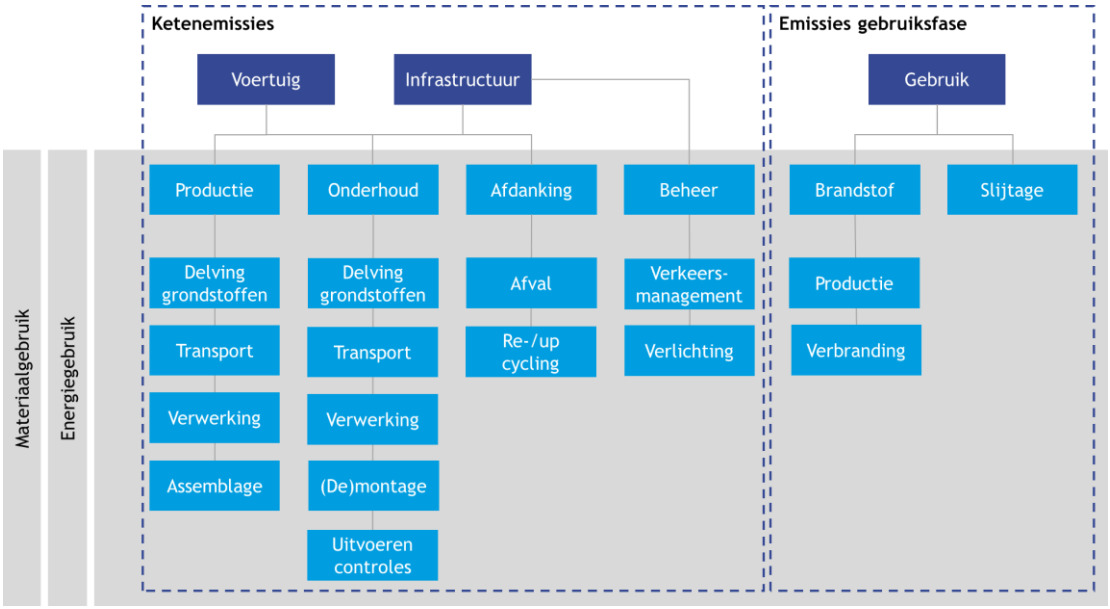
2.2 Definitie ketenemissies

Met een levenscyclusanalyse (LCA) kunnen emissies bepaald worden voor een bepaald proces of product over de gehele levenscyclus. Voor zowel voertuigen als de infrastructuur gaat het daarbij om de milieu-impact die veroorzaakt wordt vanaf het delven van de grondstoffen tot aan de afdanking. Daarbij wordt gekeken naar het productieproces, het gebruik, het onderhoud en de afdanking van het product.

In deze studie verstaan we onder ketenemissies de CO_2-, NO_x- en fijnstofemissies die vrijkomen over de levensduur van een voertuig of de transportinfrastructuur, exclusief de gebruiksfase. Zoals aangegeven in Paragraaf 1.1 behoren ook de emissies van de gebruiksfase feitelijk tot de totale ketenemissies. Echter, omdat de nadruk in deze studie ligt op de emissies gerelateerd aan infrastructuur- en voertuigproductie, onderhoud en afdanking, hanteren we in deze studie de nauwe definiëring van ketenemissies. Wanneer we verwijzen naar ketenemissies inclusief de emissies van de gebruiksfase, dan hanteren we de term ‘totale ketenemissies (inclusief gebruiksfase)’.

Een overzicht van de verschillende stappen die leiden tot ketenemissies van voertuigen en infrastructuur worden weergegeven in Figuur 5. Daarnaast zijn in deze figuur ook de emissies uit de gebruiksfase weergegeven, zodat de gehele keten in beeld is gebracht.
Bij voertuigen kunnen drie belangrijke ketenstappen onderscheiden worden (productie, onderhoud en afdanking), die op hun beurt uiteenvallen in verschillende deelstappen.
Ditzelfde patroon zien we ook voor infrastructuur, waar we vier belangrijke ketenstappen kunnen onderscheiden (productie of constructie, onderhoud, beheer en afdanking).
De hoeveelheid (en soort) ketenemissies worden bepaald door het materiaalgebruik en het energiegebruik per ketenstap. Daar vallen bijvoorbeeld de emissies onder die vrijkomen bij de asfaltproductie, maar ook de emissies als gevolg van het gebruik van machines voor het onderhoud van een voertuig (CE Delft, 2020). Een nadere toelichting op de verschillende ketenstappen kan worden gevonden in Bijlage C.2.

Figuur 5 - Totale ketenemissies (incl. gebruiksfase) mobiliteit



Aandeel van de emissies per ketenstappen in de ketenemissies

Op basis van literatuurstudie hebben we een grove indicatie gemaakt van de verdeling van de ketenemissies over de verschillende ketenstappen. De resultaten zijn voor infrastructuur weergegeven in Tabel 4. Daaruit blijkt dat bij veel van de vervoerswijzen vooral constructie en beheer bijdragen aan de ketenemissies. Het veel hogere aandeel van beheer bij stads-wegen ten opzichte van andere wegen is gelegen in het feit dat de emissies van beheer van weginfrastructuur vooral bestaan uit straatverlichting (en verkeerslichten), waarvoor kan worden aangenomen dat die vooral in de stad aanwezig zijn. Voor alle modaliteiten is verder aangenomen dat de emissies van afdanking 0 zijn. De onderbouwing hierbij is dat tegenover de emissies van sloop, negatieve emissies van recycling van materialen staan[10]. We zijn er daarbij vanuit gegaan dat deze twee effecten even groot zijn en er per saldo geen emissies van afdanking zijn. Een uitgebreide toelichting hierop is te vinden in Bijlage E.2.

Opvallend in Tabel 4 is dat de verdeling van de emissies voor luchtvaart over de verschil-lende processtappen verschilt van de andere modaliteiten. Dit heeft vooral te maken met het emissies die vrijkomen op de luchthaven door logistieke processen die plaatsvinden rondom de vluchten, zoals het vervoer van bagage, verkeersleiding en het ijsvrij maken van de luchthaven (ecoinvent centre, 2007; AEA, et al., 2012).

[10] Door het gebruik van gerecyclede materialen kunnen emissies in de constructie- of onderhoudsfase worden 'uitgespaard'.

Tabel 4 - Aandeel van de emissies in de verschillende ketenstappen in de infrastructuur gerelateerde ketenemissies

Type infrastructuur	Constructie/productie	Onderhoud	Beheer	Afdanking
Stadswegen	50%	10%	40%	0%
Overige wegen	82%	18%	0%	0%
Spoorwegen	48%	34%	18%	0%
Luchthavens	32%	68%		0%

Bron: AEA et al. (2012), Mobitool (2016), Ecoinvent centre (2007); bewerking CE Delft.

Tabel 5 geeft een overzicht van de verdeling van de ketenemissies over de verschillende stappen in de keten van het voertuig. Evenals bij infrastructuur zijn we er daarbij van uitgegaan dat de emissies van afdanking per saldo nul zijn. Bij de meeste vervoerswijzen liggen de ketenemissies van productie dan in de ordegrootte van 60-65%, terwijl de keten-emissies van onderhoud 35 tot 40% van de totale ketenemissies uitmaken. Enkel bij het vliegtuig ligt deze verhouding significant anders, want daar is het aandeel van de productie gerelateerde ketenemissies 95%.

Tabel 5 - Aandeel van de emissies in de verschillende ketenstappen in de voertuig gerelateerde ketenemissies

Vervoerswijze	Productie	Onderhoud	Afdanking
Personenauto	63%	37%	0%
Bus	61%	39%	0%
Hogesnelheidstrein	67%	33%	0%
Conventionele elektrische trein	60%	40%	0%
Vliegtuig	75%	25%	0%

Bron: AEA et al. (2012), Mobitool (2016), (Wernet, et al., 2016) ; bewerking CE Delft.

Afhankelijkheid omvang emissies van gebruik

Tot slot staan we in deze paragraaf stil bij de vraag: in hoeverre hangt de omvang van de verschillende ketenemissies af van de mate waarin het voertuig of de infrastructuur gebruikt wordt? In andere woorden: gaat het hierbij om vaste effecten (omvang emissies is niet afhankelijk van gebruik) of van variabele effecten (omvang emissies is wel afhankelijk van het gebruik)[11].

De onderverdeling van ketenemissies naar vast en variabel is vooral relevant bij het opstellen van de verschillende vergelijkingen van externe kosten en infrastructuurkosten en belastingen/heffingen voor de voorbeeldreizen in Hoofdstuk 5. We verwijzen naar Paragraaf 5.2 voor een nadere toelichting voor het belang van het onderscheid vast/variabel in deze analyses.

[11] Zo kan bijvoorbeeld een gedeelte van de emissies door het onderhoud aan het wegdek als variabel worden beschouwd, omdat de mate van dit onderhoud (en daarmee ook de gepaard gaande emissies) afhankelijk is van de hoeveelheid verkeer die van de weg gebruikmaakt. De emissies die vrijkomen bij het beheer van wegbermen zijn daarentegen vast, omdat de omvang van dit beheer (en dus van de ermee gepaard gaande emissies) niet afhankelijk is van de hoeveelheid verkeer.

Tabel 6 geeft een overzicht van de mate waarin de emissies die vrijkomen in de verschillende ketenstappen als vast of variabel dienen te worden beschouwd. Voor de infrastructuur sluiten we hiervoor aan bij de inschattingen die voor infrastructuurkosten op basis van een uitgebreide literatuurstudie zijn gemaakt in CE Delft et al. (2019b)[12]. Voor de ketenemissies van het voertuig zijn alleen de emissies die gerelateerd zijn aan het onderhoud variabel van aard.

Tabel 6 - Overzicht vast en variabel aandeel voor infrastructuur en voertuigen voor de verschillende ketenstappen

Ketenstappen	Vast aandeel	Variabel deel
Infrastructuur		
Constructie	100% (alle modaliteiten)	0% (alle modaliteiten)
Onderhoud	50% (wegverkeer) 65% (spoor) 67% (luchtvaart)	50% (wegverkeer) 35% (spoor) 33% (luchtvaart)
Beheer	100% (wegverkeer) 100% (spoor) 67% (luchtvaart)	0% (wegverkeer) 0% (spoor) 33% (luchtvaart)
Afdanking	100% (alle modaliteiten)	0% (alle modaliteiten)
Voertuig		
Productie	100% (alle modaliteiten)	0% (alle modaliteiten)
Onderhoud	0% (alle modaliteiten)	100% (alle modaliteiten)
Afdanking	100% (alle modaliteiten)	0% (alle modaliteiten)

2.3 Methodiek bepalen ketenemissies

2.3.1 Ketenemissies van infrastructuur

Voor de bepaling van de ketenemissies gerelateerd aan infrastructuur kunnen verschillende methoden gebruikt worden. Methoden variëren van het gebruik van algemene kentallen voor ketenemissies per reizigerskilometer tot het (zelf) uitvoeren van een volledig nieuwe LCA-analyse, waarbij op basis van zeer gedetailleerde data inschattingen voor de specifieke infrastructuur op de routes van de voorbeeldreizen gemaakt kunnen worden. In Bijlage D.2 worden de verschillende methoden kort besproken, inclusief hun voor- en nadelen voor toepassing in deze studie.

In deze studie kiezen we voor een methodiek waarbij we de infrastructuur op de routes van de voorbeeldreizen onderverdelen naar verschillende classificaties (gedifferentieerd naar factoren die een belangrijke invloed hebben op de omvang van de ketenemissies). Voor elk van deze classificaties van infrastructuur bepalen we de kentallen voor ketenemissies op basis van een literatuuronderzoek naar bestaande LCA-resultaten. Deze methodiek geeft ons de mogelijkheid om rekening te houden met de specifieke kenmerken van de infrastructuur op de routes van de voorbeeldreizen, zonder dat we zelf een volledig nieuwe

[12] De mate waarin infrastructuurkosten gezien kunnen worden als vast of variabel is afhankelijk van de mate waarin de onderliggende activiteiten (bijv. onderhoudsactiviteiten, het aanleggen van een weg) gebruiksafhankelijk zijn of niet. Dezelfde activiteiten liggen ook ten grondslag aan de ketenemissies die vrijkomen. Vandaar dat voor de aannames van de gebruiksafhankelijkheid van de ketenemissies dezelfde aannames gebruikt kunnen worden als voor de infrastructuurkosten.

LCA-analyse hoeven uit te voeren. Een nadere onderbouwing voor de gekozen methodiek kan worden gevonden in Bijlage D.2.

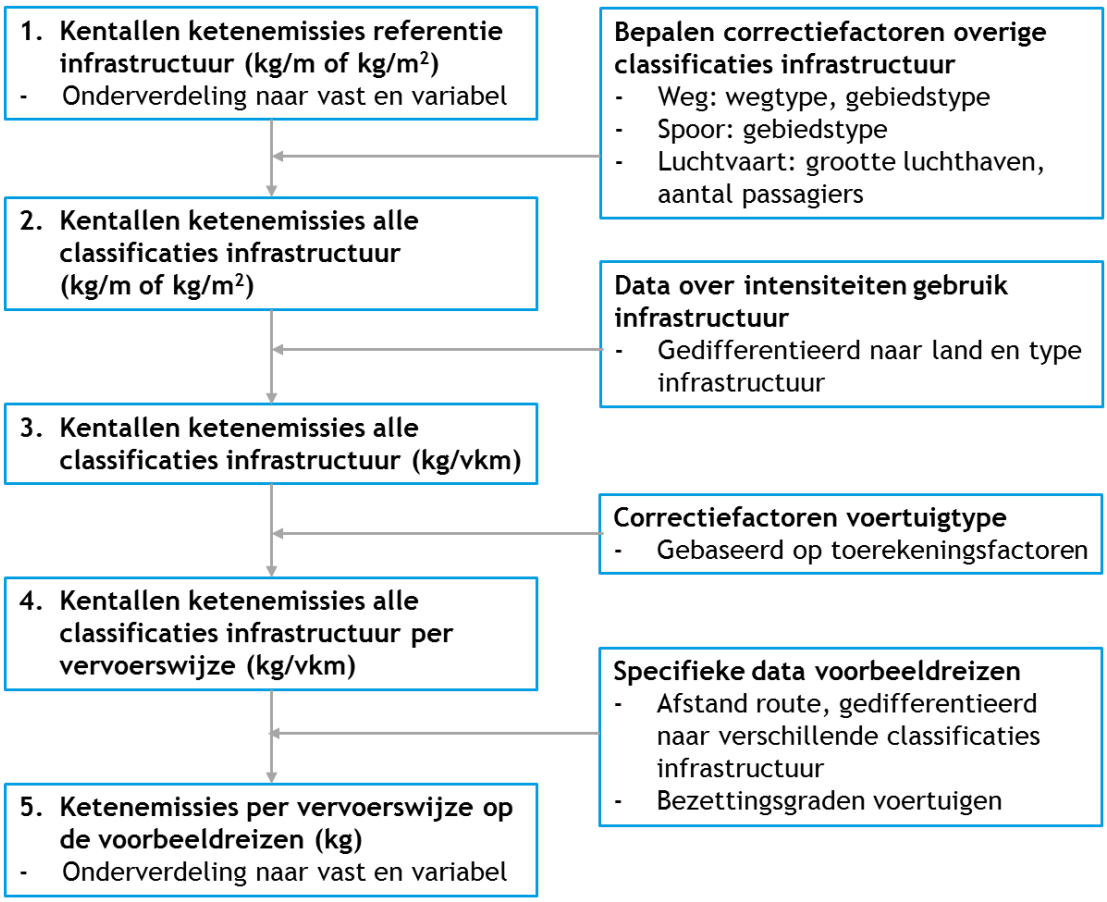
Uitwerking methodiek in vijf deelstappen

In Figuur 6 is een schematisch overzicht gegeven van de methodiek die we in deze studie hanteren voor de bepaling van de ketenemissies gerelateerd aan infrastructuur. De methode bestaat uit vijf stappen:

1. Vaststellen kentallen ketenemissies referentie-infrastructuur.
2. Bepalen kentallen ketenemissies voor verschillende classificaties infrastructuur.
3. Bepalen kentallen ketenemissies voor de verschillende classificaties infrastructuur per voertuigkilometer.
4. Bepalen kentallen ketenemissies voor verschillende vervoerswijzen voor de verschillende classificaties infrastructuur.
5. Bepalen ketenemissies per vervoerswijze op de voorbeeldreis.

Deze stappen lichten we hierna kort toe. Een uitgebreidere toelichting kan worden gevonden in Bijlage D.3.

Figuur 6 - Methodiek bepalen ketenemissies voor infrastructuur op voorbeeldreizen



1. **Vaststellen kentallen ketenemissies referentie-infrastructuur**
   Per soort infrastructuur (weg, spoor en luchtvaart) stellen we een referentietype op, de zogenoemde referentie-infrastructuur. Voor de referentie-infrastructuur hanteren we kentallen die gebaseerd zijn op literatuuronderzoek. Voor deze referentie-infrastructuur hebben we ook bepaald welk deel van de emissies als vast kan worden gedefinieerd en welk deel als variabel.

2. **Bepalen kentallen ketenemissies voor verschillende classificaties infrastructuur**

   Weg- en spoorvervoer
   Op de routes van de verschillende voorbeeldreizen liggen verschillende typen infrastructuur, die variëren in de omvang van de bijbehorende ketenemissies. Om hiermee rekening te kunnen houden werken we voor weg- en spoorinfrastructuur met verschillende classificaties van infrastructuur, waarbij de classificaties zijn bedoeld om de belangrijkste factoren mee te nemen die van invloed zijn op de omvang van de ketenemissies. Op basis van een literatuuronderzoek (zie Bijlage C.3 en Bijlage D.3.2) zijn de belangrijkste factoren die van invloed zijn op de hoogte van de ketenemissies in beeld gebracht, waarbij vervolgens ook gekeken is in hoeverre de data beschikbaar is om deze factoren mee te nemen in dit onderzoek. Op basis daarvan komen we tot de volgende classificaties:
   - Wegvervoer:
     - *Type landschap (vlak, heuvelachtig, bergachtig*). Afhankelijk van het type landschap worden er meer of minder bruggen en tunnels toegepast bij de weginfrastructuur. Dit heeft een sterke invloed op de hoeveelheid ketenemissies die vrijkomen door infrastructuur (AEA, et al., 2012; ecoinvent centre, 2007). Daarom onderscheiden we deze verschillende typen landschappen en kennen per type landschap een percentage tunnels en bruggen toe.
     - *Type weg (stad, provinciaal, snelweg)*. De hoeveelheid materiaalgebruik (en de daarmee gepaard gaande ketenemissies) bij wegen is sterk afhankelijk van de breedte van de weg en dus het aantal rijbanen. Voor stads- en provinciale wegen gaan we uit van twee rijbanen, terwijl we voor de snelwegen uitgaan van gemiddeld vijf rijbanen.
   - Spoorvervoer:
     - *Type landschap (vlak, heuvelachtig, bergachtig)*. Evenals voor wegvervoer heeft het aandeel tunnels en bruggen bij het spoor een grote invloed op de ketenemissies van infrastructuur (UIC, 2016; Merchan, et al., 2017; AEA, et al., 2012; ecoinvent, 2016).
     - *Opbouw spoor (ballast, ballastloos)*: een ballastloos spoor bevat meer beton waardoor er per km meer emissies vrijkomen als gevolg van materiaal en productie (AEA, et al., 2012). Een ballastloos spoor wordt vooral toegepast bij sporen die hoofdzakelijk gebruikt worden door hogesnelheidstreinen (Avramovic, 2010). We maken daarom onderscheid in de spooropbouw bij hogesnelheidslijnen en bij intercity treinen (Railone, 2021).

   Voor de combinaties van de bovenstaande classificaties bepalen we op basis van de literatuur correctiefactoren ten opzichte van de referentie-infrastructuur. Deze correctiefactoren geven de relatieve afwijking van de ketenemissies voor een specifieke klasse ten opzichte van de referentie-infrastructuur volgens:

$$emissiekental_{nieuwe\ classificatie} = emissiekental_{referentie-infrastructuur} * correctiefactor$$

   De gehanteerde correctiefactoren (en de wijze waarop ze zijn bepaald) is weergegeven in Tabel 26 in Bijlage D.3.2.

Luchtvaart
Voor luchtvaart hebben we een iets andere methode toegepast. De reden hiervoor is dat het bij luchtvaart makkelijker is om specifieke data voor de infrastructuur op de voorbeeldreizen te verzamelen, aangezien het maar om vijf luchthavens gaat. We werken daarom voor luchtvaart niet met classificaties, maar rekenen de kentallen voor de referentie-luchthaven om op basis van data voor de vijf specifieke luchthavens.
Dit doen we op basis van een tweetal factoren:

- *De intensiteit van het aantal passagiers (aantal passagiers per m^2 vliegveld)*: deze factor gebruiken we om de ketenemissies per m^2 gerelateerd aan onderhoud en beheer te schalen tussen de referentie-luchthaven en de betreffende luchthavens voor de voorbeeldreizen.
- *De oppervlakte van de luchthaven;* voor de ketenemissies die samenhangen met constructie en afdanking gaan we er vanuit dat die per m^2 gelijk zijn voor alle luchthavens.

3. **Bepalen kentallen ketenemissies voor de verschillende classificaties infrastructuur per voertuigkilometer (weg en spoor) of LTO (luchtvaart)**
   De kentallen zoals bepaald in Stap 1 en 2 geven de ketenemissies over de gehele levensduur van de infrastructuur per meter of vierkante kilometer. In deze stap bepalen we de emissies per voertuigkilometer (of LTO) in 2020. Op basis van data over de intensiteiten op de verschillende classificaties infrastructuur voor 2019 en de aanname dat die intensiteit gemiddeld is voor de gehele levensduur van de infrastructuur hebben we de kentallen uit Stap 2 omgerekend naar kentallen per voertuigkilometer. Voor luchthavens hebben we een soortgelijke methodiek toegepast, maar dan op basis van het aantal LTO's.

4. **Bepalen kentallen ketenemissies voor verschillende vervoerswijzen voor de verschillende classificaties infrastructuur**
   In Stap 3 zijn kentallen bepaald voor een gemiddelde voertuigkilometer of LTO, zonder daarbij onderscheid te maken naar het type voertuig. Op basis van onderzoeken naar infrastructuurkosten weten we echter dat vervoerswijzen sterk verschillen in de schade die ze toebrengen aan de infrastructuur en daarmee ook aan het benodigde onderhoud. Ook de wijze waarop de infrastructuur aangelegd dient te worden is sterk afhankelijk van welke voertuigen hoeveel gebruik gaan maken van die infrastructuur (bijv. bij de dimensionering van bruggen). Dit betekent dan ook dat niet alle voertuigen in dezelfde mate verantwoordelijk zijn voor de ketenemissies gerelateerd aan infrastructuur. Gemiddeld genomen veroorzaakt een bus bijvoorbeeld meer schade aan de weg dan een personenauto, waardoor een groter deel van het onderhoud van die weg aan de bus toegeschreven kan worden en daarmee ook een groter deel van de bijbehorende ketenemissies.

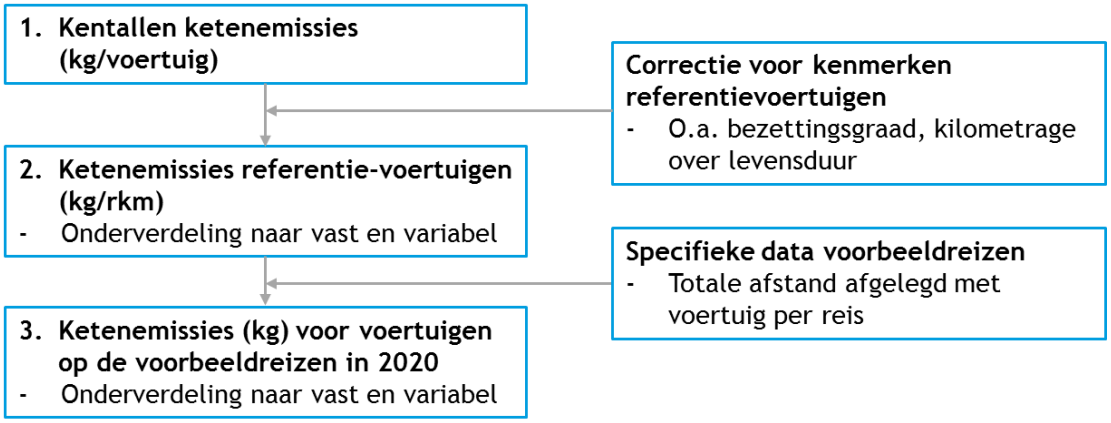
   Om rekening te kunnen houden met deze verschillen tussen vervoerswijzen hebben we correctiefactoren bepaald waarmee de kentallen per gemiddelde voertuigkilometer omgerekend kunnen worden naar kentallen per voertuigkilometer voor specifieke vervoerswijzen. Daarbij hebben we ons gebaseerd op de uitgebreide kennis die hierover beschikbaar is in de literatuur over de bepaling van infrastructuurkosten. In Bijlage D.3.4 lichten we de berekening van de correctiefactoren nader toe.

5. **Bepalen ketenemissies per vervoerswijze op de voorbeeldreizen**
   Met behulp van de kentallen per vervoerswijze en per classificatie van infrastructuur en specifieke data over de aandelen van de verschillende classificaties op de verschillende routes (zie Bijlage A), hebben we de ketenemissies gerelateerd aan infrastructuur in 2020 per vervoerswijze op de voorbeeldreizen bepaald.

2.3.2 Ketenemissies van voertuigen

De methodiek voor de bepaling van de ketenemissies gerelateerd aan de voertuigen wordt gepresenteerd in Figuur 7.

Figuur 7 - Methodiek voor bepalen van de ketenemissies gerelateerd aan voertuigen



Zoals weergegeven in Figuur 7 onderscheiden we drie stappen bij de bepaling van de ketenemissies voor voertuigen:

1. **Bepalen kentallen ketenemissies**. Op basis van een literatuurstudie zijn kentallen voor de ketenemissies van voertuigen vastgesteld (zie Bijlage E) voor een overzicht van die kentallen).
2. **Berekenen ketenemissies per reizigerskilometer voor de specifieke referentie-voertuigen.** De kentallen zoals verzameld in Stap 1 zijn vergelijkbaar gemaakt door ze zoveel mogelijk om te rekenen naar de kenmerken van de referentievoertuigen in deze studie. Hierbij is onder andere een correctie uitgevoerd voor het kilometrage van het voertuig over de gehele levensduur en de bezettingsgraad van het voertuig. Vervolgens is een keuze gemaakt voor het kental dat wordt gehanteerd in deze studie en op basis daarvan zijn de ketenemissies per reizigerskilometer bepaald.
3. **Berekenen ketenemissies voor de voorbeeldreizen.** Met behulp van de resultaten uit Stap 2 en data over de afstanden van de routes op de verschillende voorbeeldreizen kunnen tot slot de ketenemissies gerelateerd aan het voertuig bepaald worden voor de vier voorbeeldreizen.

2.4 Overzicht ketenemissies bij de voorbeeldreizen

Figuur 8 geeft een overzicht van de CO_2-ketenemissies voor de verschillende modaliteiten en voorbeeldreizen. De zwarte balkjes geven daarbij de onzekerheid in de resultaten weer als gevolg van de gehanteerde kentallen. Daarbij is een onzekerheidsmarge van 20% aangenomen (zie ook Bijlage D.3).

Op de korte reizen (Amersfoort – Londen en Amersfoort – Parijs) liggen de CO_2-keten-emissies per reizigerskilometer het hoogst voor het vliegtuig. Dit is vooral het gevolg van het feit dat de 'vaste' ketenemissies gerelateerd aan infrastructuur verdeeld worden over een beperkt aantal reizigerskilometers (vanwege de relatief beperkte reisafstand). Op de langere reizen (naar Barcelona en Rome) zie je dan ook dat de ketenemissies per reizigers-kilometer bij het vliegtuig aanmerkelijk lager liggen[13] en in lijn zijn met de CO_2-keten-emissies van de bus en de trein. Voor alle reizen geldt dat de CO_2-ketenemissies voor vliegtuigen nagenoeg volledig worden bepaald door de infrastructuuremissies.

Op de korte reizen heeft de personenauto, na het vliegtuig, de hoogste CO_2-ketenemissies per reizigerskilometer. Op de langere reizen (naar Barcelona en Rome) is de auto zelfs het voertuig met de hoogste CO_2-ketenemissies[14]. In tegenstelling tot de andere modaliteiten bestaan de CO_2-ketenemissies bij personenauto's voor het grootste gedeelte uit voertuig gerelateerde emissies. In vergelijking met de andere modaliteiten liggen deze emissies relatief hoger als gevolg van het relatief lagere aantal reizigers per voertuig en de gemiddeld kortere levensduur (in termen van kilometrages) van personenauto's[15].
Bij personenauto's zien we, net als bij bussen en treinen, dat de infrastructuur gerelateer-de CO_2-ketenemissies per reizigerskilometer iets hoger liggen bij de reizen naar Barcelona en Rome dan bij de reizen naar Parijs en Rome. De reden hiervoor is dat de routes van de twee eerstgenoemde reizen door meer geaccidenteerd terrein gaan, waardoor het aandeel tunnels en bruggen hoger ligt.

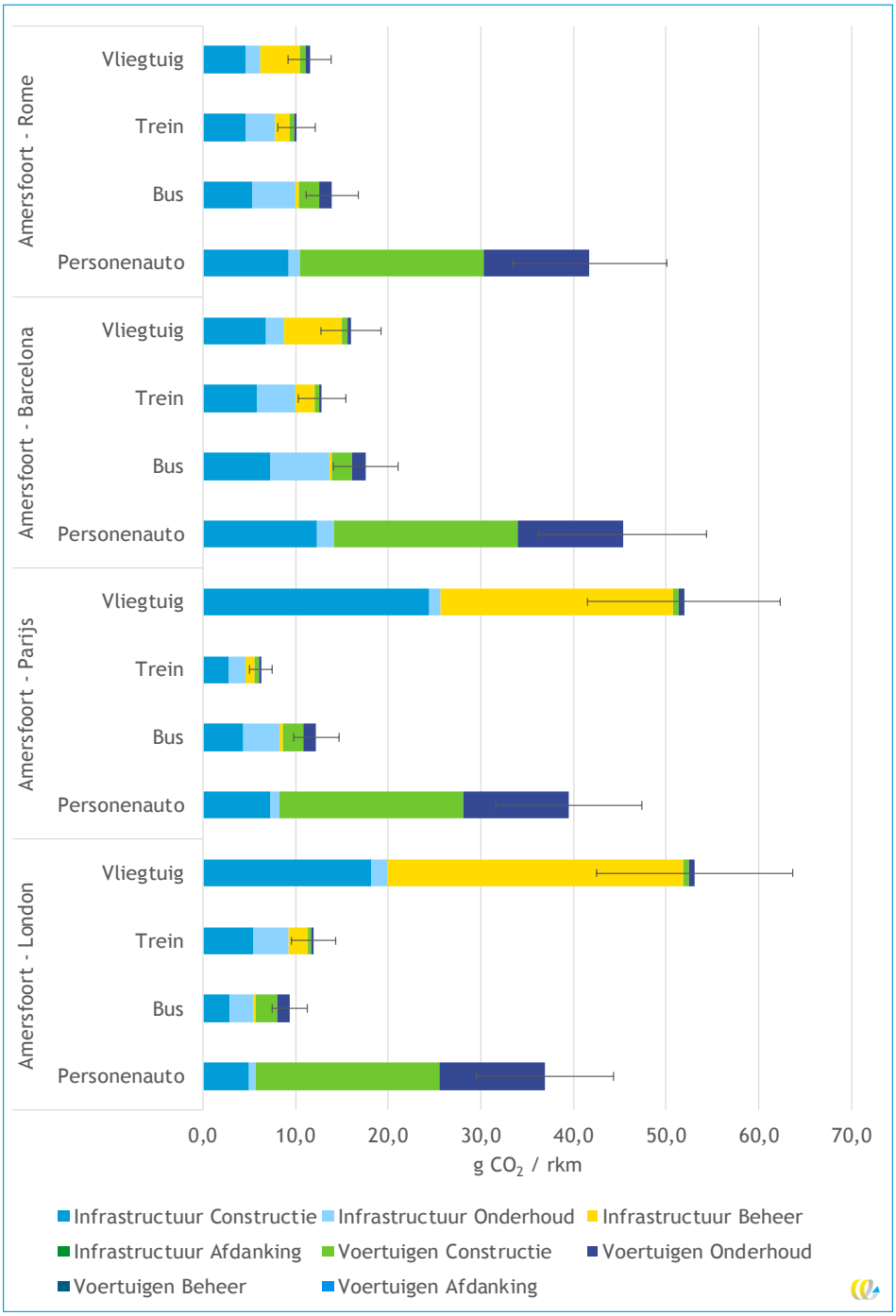
Voor de trein en de bus geldt tenslotte dat de CO_2-ketenemissies per reizigerskilometer op alle reizen redelijk vergelijkbaar zijn. De hogere CO_2-ketenemissies voor de trein op de reis naar Londen in vergelijking met de reis naar Parijs is vooral het gevolg van de ketenemissies gerelateerd aan de Eurotunnel.

[13] Bij een vergelijkbaar vliegtuig zijn de ketenemissies per LTO hetzelfde. Per reizigerskilometer nemen deze emissies dus af als de reisafstand toeneemt.

[14] In onze analyses zijn we ervan uitgegaan dat er twee personen in de auto zitten. Zou je daarentegen uitgaan van drie of vier personen, dan dalen de kosten per reiziger per reis voor de auto naar rato. Bij vier personen per auto zijn de CO_2-emissies van een personenauto op de reizen naar Rome en Barcelona vergelijkbaar met het vliegtuig.

[15] Hierdoor nemen immers de ketenemissies per kilometer toe.

Figuur 8 - CO_2-emissies per rkm per modaliteit en voorbeeldreis, uitgesplitst naar de verschillende ketenstappen

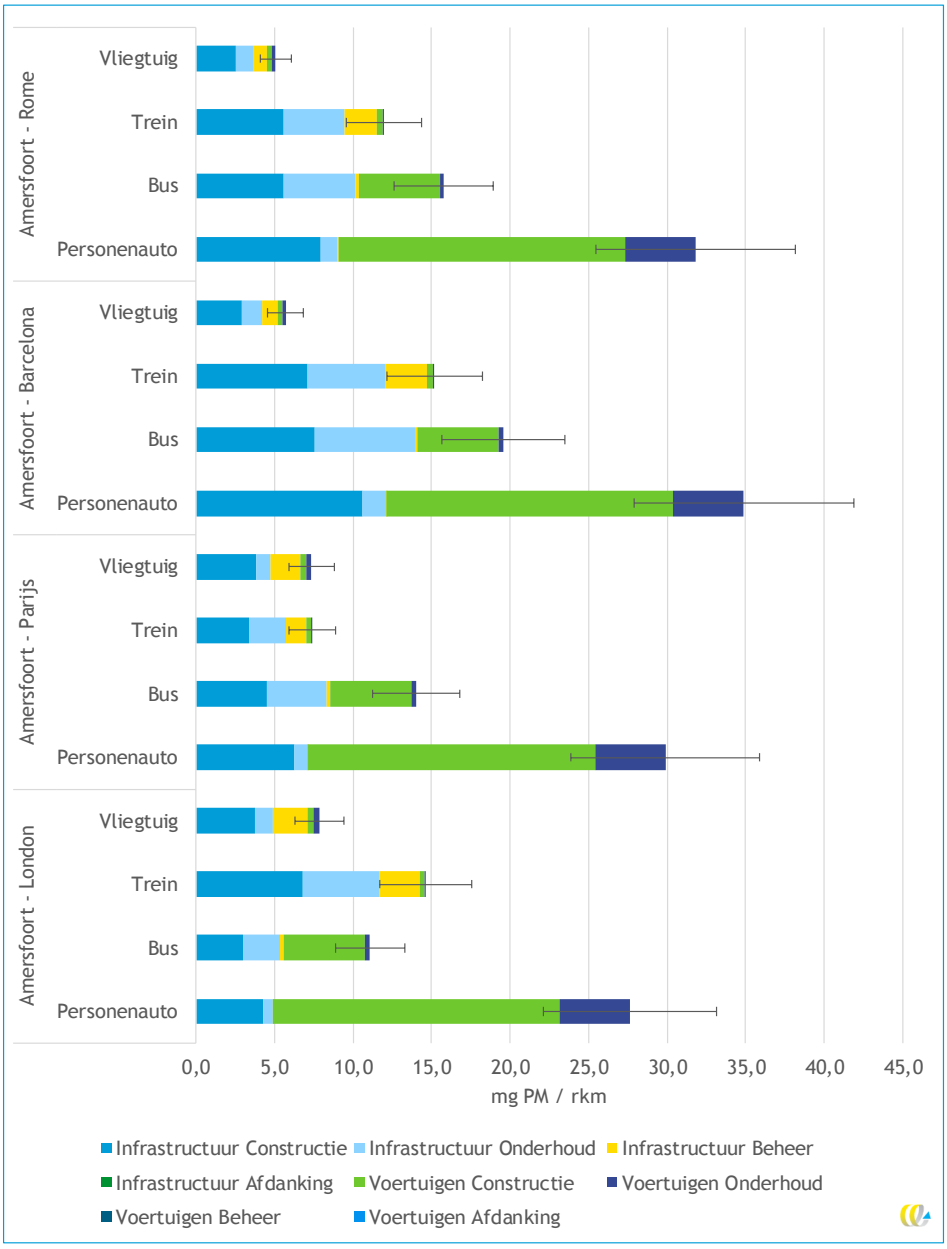


In Figuur 9 geven we een overzicht van de fijnstof ketenemissies per modaliteit en voorbeeldreis. Het grootste verschil met de CO_2-ketenemissies zijn de relatief veel lagere emissies voor de luchtvaart. In vergelijking met de andere modaliteiten zijn de fijnstof-ketenemissies van luchtvaart relatief laag. Voor de infrastructuur gerelateerde emissies wordt dit onder andere verklaard door het relatief grote aandeel van beheer in de emissies, waarbij het toch vooral om emissies van elektriciteitsverbruik gaat (met relatief lage fijnstofemissies). Figuur 9 laat ook zien dat de fijnstof ketenemissies voor de luchtvaart, evenals de CO_2-ketenemissies, per reizigerskilometer lager liggen voor de reizen naar Rome en Barcelona dan voor de reizen naar Parijs en Londen.

De hoogste fijnstofketenemissies zijn er op alle vier de voorbeeldreizen voor de personen-auto. De verdeling tussen voertuig gerelateerde en infrastructuur gerelateerde emissies is daarbij vergelijkbaar met de CO_2-emissies. Ook de verschillen tussen de voorbeeldreizen zijn vergelijkbaar met het patroon dat we zagen bij de CO_2-emissies.

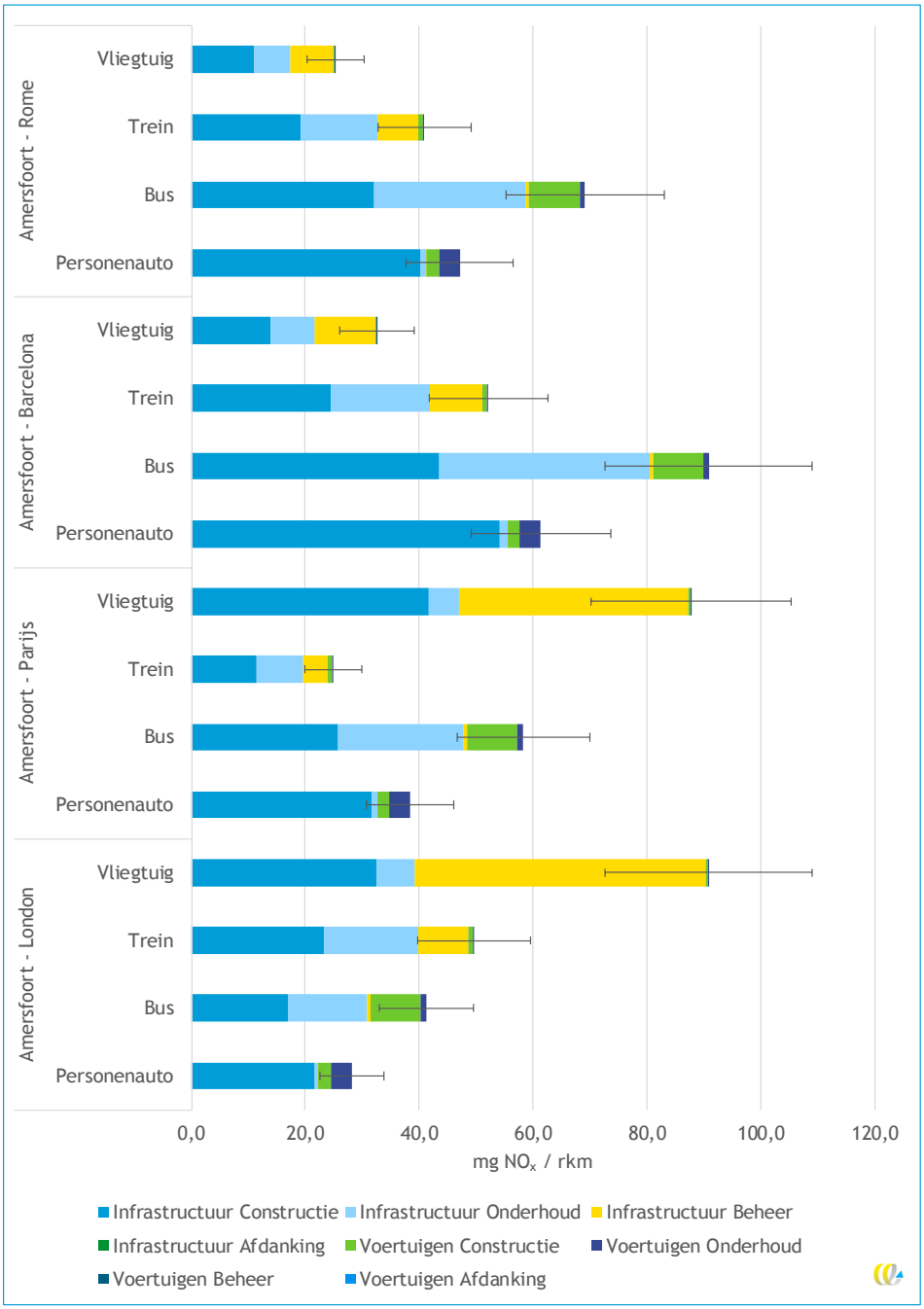
De trein en de bus liggen qua fijnstofketenemissies tussen het vliegtuig en de auto in, waarbij de trein over het algemeen iets lagere emissies heeft dan de bus. Uitzondering is de reis naar Londen, waar de fijnstofketenemissies voor de trein relatief hoog zijn. De reden daarvoor is de aanwezigheid van de Eurotunnel op dat traject.

Figuur 9 - PM-emissies per rkm per modaliteit en voorbeeldreis, uitgesplitst naar de verschillende ketenstappen



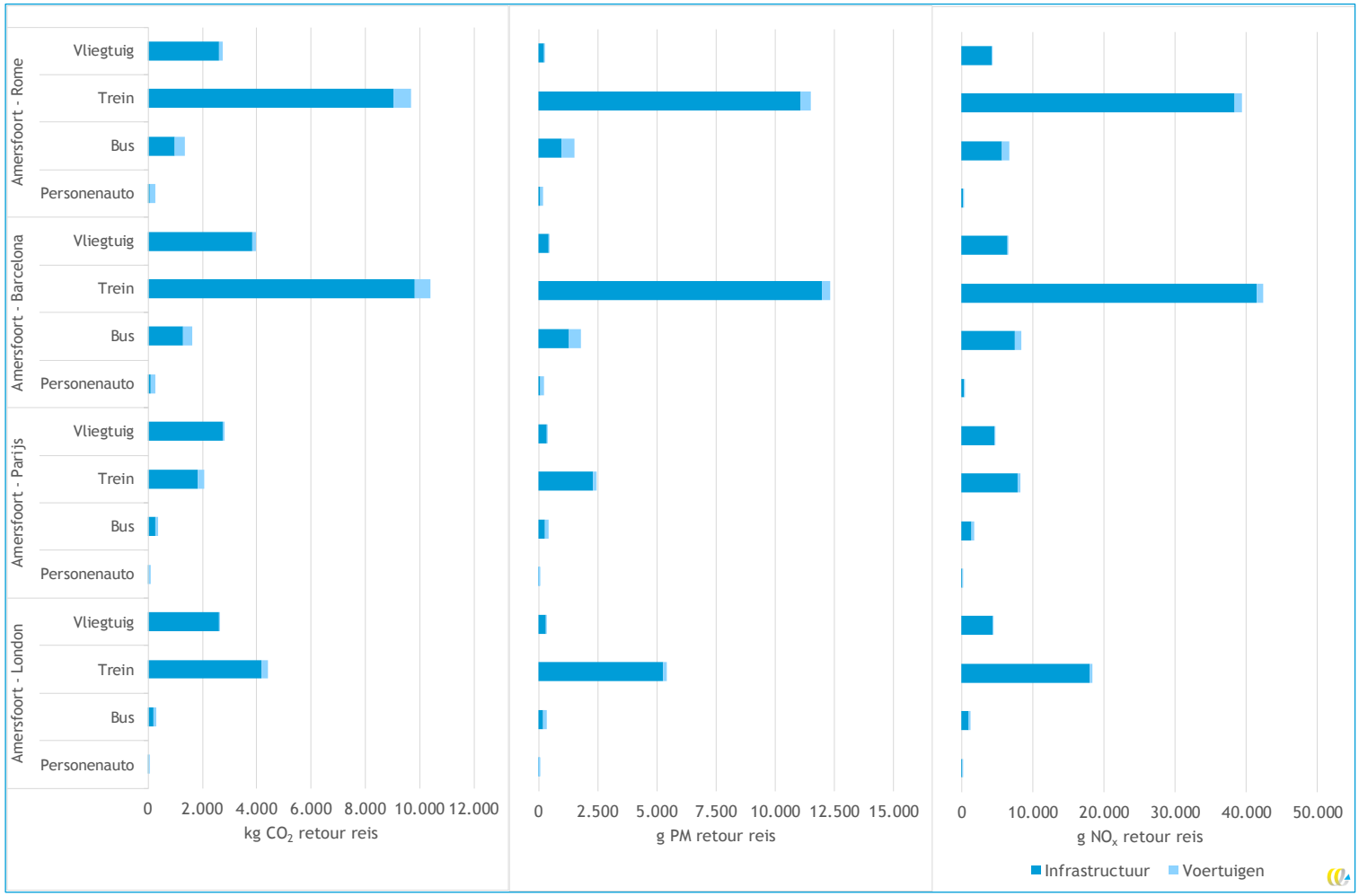
Figuur 10 geeft tenslotte de NO_x-ketenemissies voor de verschillende modaliteiten en vervoerswijzen. In vergelijking met de CO_2- en fijnstofketenemissies valt op dat de voertuig gerelateerde NO_x-ketenemissies aanzienlijk lager zijn. Bij alle modaliteiten overheersen nu de infrastructuur gerelateerde emissies. De hoogste emissies per reizigerskilometer zijn daarbij op de korte reizen voor het vliegtuig, terwijl op de langere reizen voor de bus de hoogste emissies gelden. De personenauto en de trein zitten op de meeste reizen in dezelfde ordegrootte.

Figuur 10 - NO_x-emissies per rkm per modaliteit en voorbeeldreis, uitgesplitst naar de verschillende ketenstappen



In Figuur 11 geven we tenslotte ook de resultaten voor de CO_2-, NO_x- en fijnstofketen-emissies weer per retourreis (i.p.v. per reizigerskilometer). Behalve voor het vliegtuig liggen deze emissies hoger bij de reizen naar Barcelona en Rome dan bij de reizen naar Parijs en Londen. Dit is logischerwijs het gevolg van het feit dat die eerste twee voorbeeld-reizen aanmerkelijk langer zijn. Bij het vliegtuig liggen de emissies op de langere reizen echter lager per reiziger. Op deze vluchten worden grotere vliegtuigen gebruikt (met meer passagiers aan boord), die weliswaar leiden tot hogere kosten per vliegtuig, maar tot lagere kosten per reiziger.

Figuur 11 - Emissies per reiziger voor de voorbeeldreizen



2.5 Gevoeligheidsanalyses

De inschatting van de ketenemissies per voorbeeldreis wordt gekenmerkt door verschillende onzekerheden, zoals ook is aangegeven in Paragraaf 2.3 en Bijlage D.3. Voor een aantal van deze onzekerheden voeren we in deze paragraaf een gevoeligheidsanalyse uit om inzicht te krijgen in de invloed ervan op de resultaten. Daarbij gaat het specifiek om:

- intensiteit waarmee de infrastructuur wordt gebruikt;
- correctiefactoren voor de berekening van ketenemissies voor specifieke vervoerswijzen;
- levensduur voertuigen.

Hierna geven we een overzicht van de resultaten van deze gevoeligheidsanalyses.
We hebben de analyses daarbij alleen voor CO_2-emissies uitgevoerd. Voor fijnstof en NO_x worden vergelijkbare relatieve veranderingen verwacht[16].

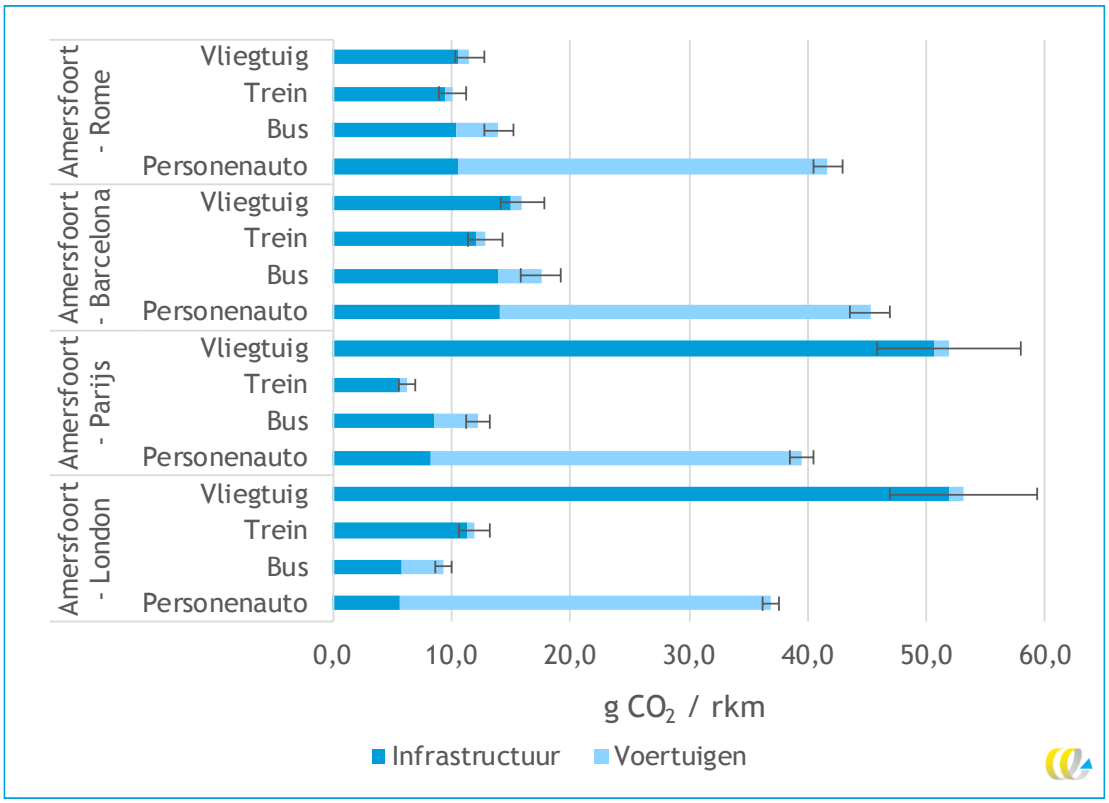
Intensiteit waarmee de infrastructuur wordt gebruikt

Bij de bepaling van ketenemissies per reizigerskilometer (of voertuigkilometer) is de intensiteit waarmee de infrastructuur wordt gehanteerd een belangrijke variabele. Deze intensiteit verschilt echter sterk tussen specifieke infrastructuur (drukke trajecten vs. rustige trajecten) en over de tijd (de afgelopen decennia is de gemiddelde intensiteit waarmee transportinfrastructuur wordt gebruikt sterk gestegen). In de basisvariant hebben we veelal gerekend met landelijk gemiddelde intensiteiten voor 2019. In deze gevoeligheidsanalyse hebben we allereerst gekeken wat de invloed op de ketenemissies is wanneer we rekenen met 12% hogere of lagere intensiteiten.

Figuur 12 laat zien dat deze veranderingen in intensiteiten bij de luchtvaart de grootste relatieve invloed heeft op de ketenemissies (11-12%), gevolgd door het spoor (11%), de bus (7-10%), en de auto (2-4%). De relatief beperkte invloed op de ketenemissies voor personenauto's is het gevolg van de kleinere aandeel van infrastructuur gerelateerde ketenemissies in het totaal.

[16] De gevoeligheidsanalyses hebben vooral betrekking op de wijze waarop de emissies per kilometer infrastructuur of per voertuig worden toegerekend naar emissies gerelateerd aan de voorbeeldreizen. Aangezien dit voor alle emissies op dezelfde wijze wordt gedaan, hebben de gevoeligheidsanalyses ook dezelfde relatieve invloed op de resultaten voor de verschillende emissies.

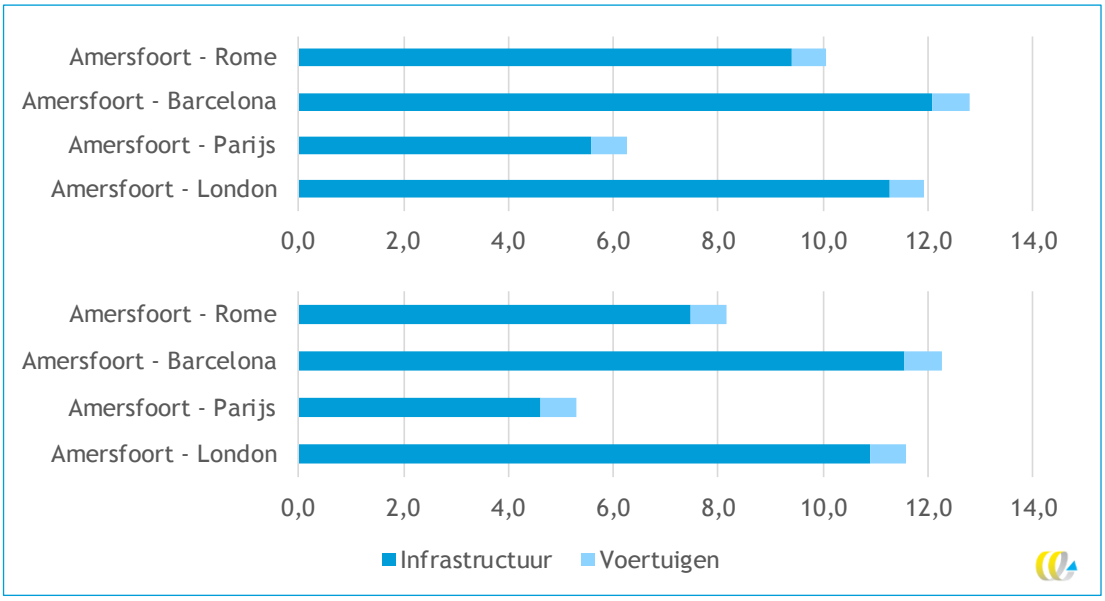
Figuur 12 - Gevoeligheidsanalyse impact verhogen en verlagen vkms, weergegeven als bandbreedte tussen 12% minder vkms (ondergrens bandbreedte) en 12% meer vkms (bovengrens bandbreedte)



Voor het spoorvervoer hebben we daarnaast nog een verdiepende analyse uitgevoerd. Voor het hogesnelheidsnetwerk in Europa geldt namelijk dat er grote verschillen tussen landen bestaan in de intensiteit waarmee het netwerk wordt gebruikt. Zo ligt de intensiteit in Frankijk 2 tot 8 keer hoger dan in landen zoals Nederland, België en Spanje. Voor de netwerken in die landen is er dus nog een groot onbenut potentieel op het hogesnelheids-spoor. We hebben bekeken wat de gevolgen voor de ketenemissies per reizigerskilometer zouden zijn wanneer dit potentieel (gedeeltelijk) zou worden benut door voor het gehele Europese netwerk intensiteiten aan te nemen die in lijn liggen met die van Frankrijk[17].
De resultaten van die analyse zijn weergegeven in Figuur 13. Daaruit blijkt dat vooral bij de voorbeeldreizen naar Parijs en Rome de invloed op de resultaten significant is, respectievelijk 15 en 19% lagere CO_2-emissies per reizigerskilometer. Op de reizen naar Barcelona en Londen zijn de effecten veel beperkter (respectievelijk 4% en 3% lagere emissies). De reden voor het relatief grote effect op de reizen naar Parijs en Rome is dat er op die trajecten een relatief groot aandeel is van HSL-lijnen die minder intensief worden gebruikt.

[17] Alleen voor het Verenigd Koninkrijk hebben we geen aanpassing gedaan aan de intensiteit, aangezien de gemiddelde intensiteit daar nu al hoger ligt dan in Frankrijk.

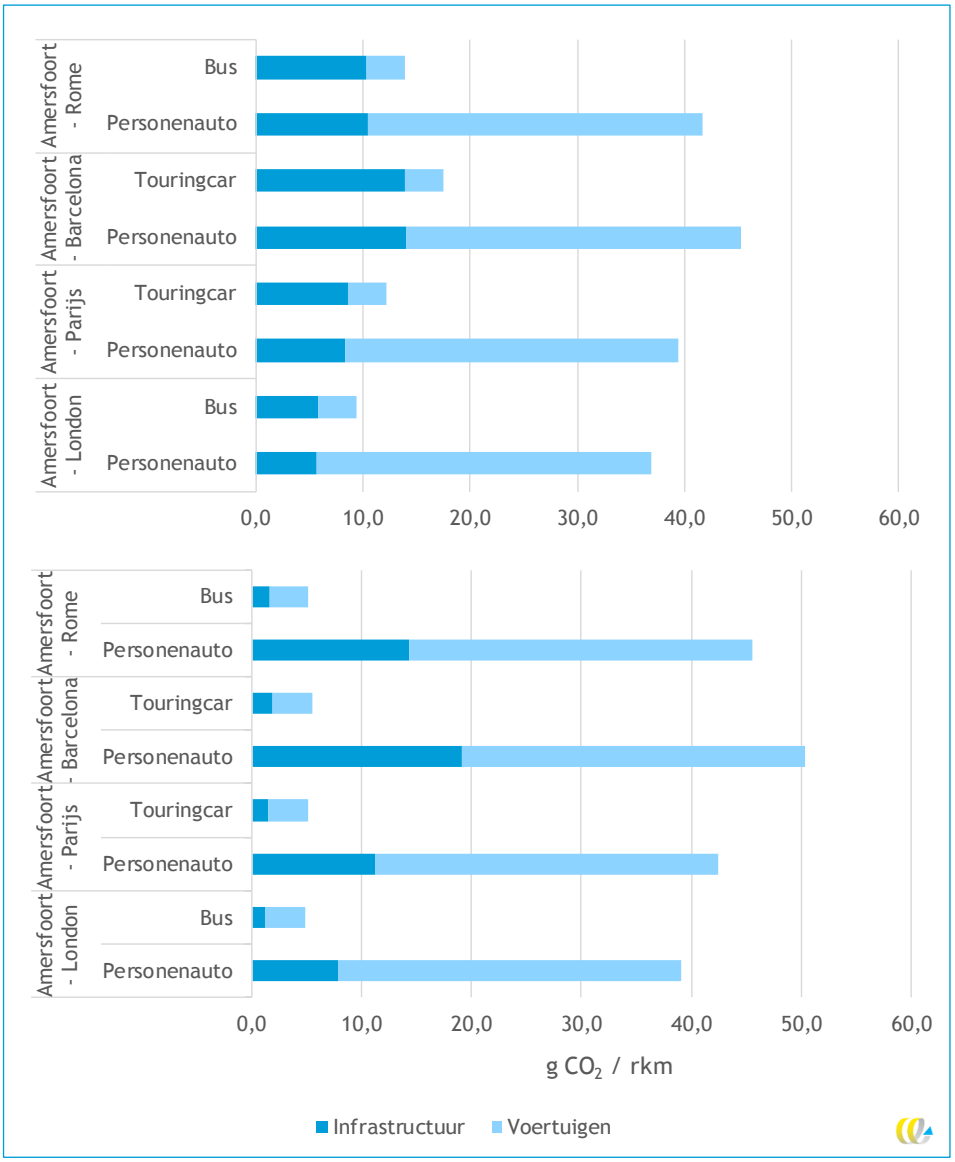
Figuur 13 - Gevoeligheidsanalyse toename intensiteiten HSL-lijnen



Correctiefactoren voor de berekening van ketenemissies voor specifieke vervoerswijzen

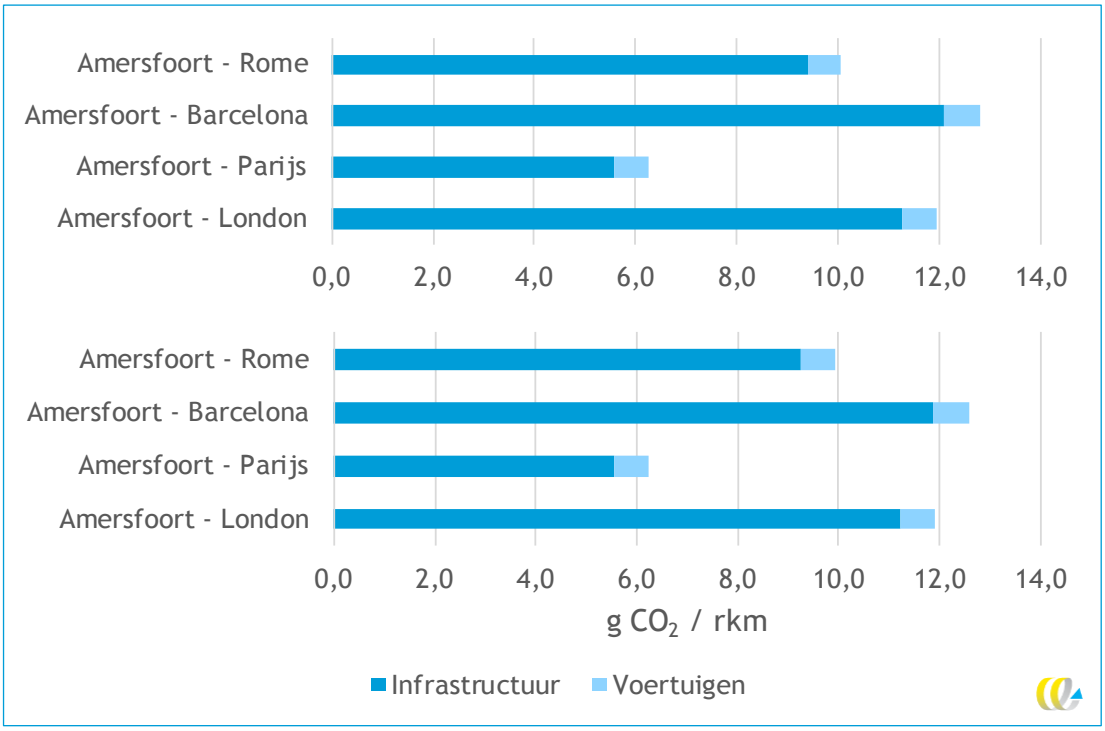
Zoals toegelicht in Paragraaf 2.3.1 (en in meer detail in Bijlage D.3) is bij de berekening van de ketenemissies voor specifieke voertuigen rekening gehouden met de invloed van die voertuigen op het onderhoud aan en de wijze van constructie van de infrastructuur.
De veronderstelling daarbij was dat hoe groter de invloed van het voertuig is op het onderhoud of de constructie-eisen van de infrastructuur, des te groter het aandeel van die vervoerswijzen in de infrastructuur gerelateerde ketenemissies. Om hiermee rekening te kunnen houden in de berekeningen hebben we specifieke correctiefactoren per vervoerswijze bepaald. Dit is gedaan op een gedetailleerde methodiek die is ontwikkeld voor de toerekening van infrastructuurkosten aan vervoerswijzen (zie Bijlage D.3 voor meer details). In de literatuur worden echter ook eenvoudigere methodieken gehanteerd.
Zo wordt bij het wegverkeer vaak aangenomen dat alle vervoerswijzen per voertuigkilometer dezelfde ketenemissies veroorzaken, terwijl bij spoorvervoer vaak wordt aangenomen dat personen- en vrachttreinen per bruto tonkilometer dezelfde ketenemissies veroorzaken. In deze gevoeligheidsanalyse hebben we bekeken wat de invloed van deze alternatieve methoden op de ketenemissies per reizigerskilometer zouden zijn.
Voor het wegvervoer zijn de resultaten van de gevoeligheidsanalyse weergegeven in Figuur 14. Hieruit blijkt dat vooral de ketenemissies voor bussen sterk dalen bij een alternatieve methodiek. De reden hiervoor is dat in de basisvariant de ketenemissies voor wegvoertuigen werden gecorrigeerd op basis van aslasten, die bij bussen veel hoger liggen dan bij het gemiddelde wegvoertuig. Dit weerspiegelt de grote invloed die bussen hebben op de schade aan de weginfrastructuur en daarmee aan het wegonderhoud. Door aan te nemen dat voor alle wegvoertuigen de infrastructuur gerelateerde ketenemissies per voertuig gelijk zijn vallen de ketenemissies per reizigerskilometer voor de bus nu veel lager uit. Voor de personenauto vallen de ketenemissies per reizigerskilometer iets hoger uit, waarvoor de omgekeerde redenering als voor de bussen geldt.

Figuur 14 - Gevoeligheidsanalyse correctiefactoren wegvervoer (onder) ten opzichte van basisscenario (boven)



Figuur 15 geeft de resultaten van de gevoeligheidsanalyse voor het spoorverkeer.
De effecten zijn hier zeer beperkt, wat het gevolg is van het feit dat op het overgrote deel van de voorbeeldreizen gebruik wordt gemaakt van het hogesnelheidsspoor. Dit spoor wordt enkel gebruikt door hogesnelheidstreinen, waardoor een andere toedelingsmethodiek niet leidt tot andere uitkomsten. Dit is enkel het geval voor het gecombineerde spoor, waar zowel personen- als goederentreinen gebruik van maken. Voor de voorbeeldreizen die we in deze studie bekijken hebben deze spoorlijnen echter een zeer beperkt aandeel op de routes.

Figuur 15 - Gevoeligheidsanalyse voor toewijzing op basis van Gtkm

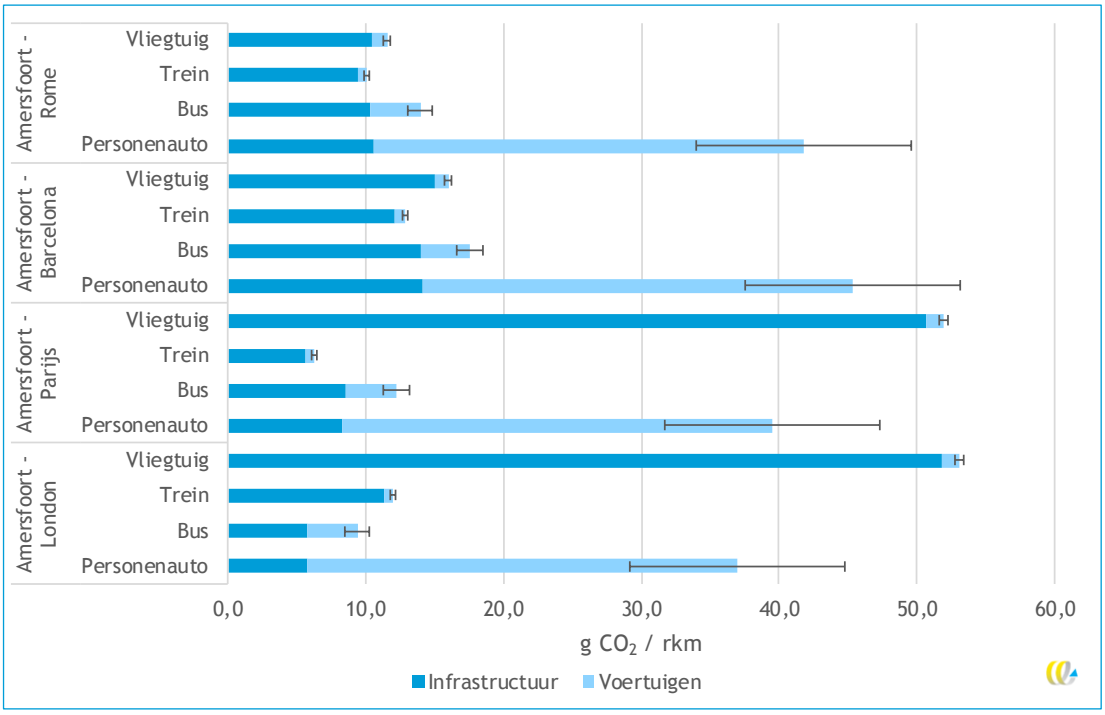


Levensduur voertuigen

Wanneer de levensduur van voertuigen toeneemt (of eigenlijk wanneer het kilometrage over de gehele levensduur toeneemt), dan nemen de voertuig gerelateerde ketenemissies af. Immers, de ketenemissies gerelateerd aan de productie van voertuigen kunnen dan over meer kilometers worden 'afgeschreven'. Bij een kortere levensduur van voertuigen geldt het omgekeerde. In de literatuur bestaat er een grote spreiding in de levensduur kilometrages die worden aangenomen voor de verschillende voertuigen. Vandaar dat we via een gevoeligheidsanalyse in beeld hebben gebracht wat de invloed op de resultaten is als deze kilometrages 25% hoger dan wel lager liggen dan in de basisvariant.

Figuur 16 laat zien dat een andere aanname over de levensduur vooral invloed heeft op de ketenemissies van personenauto's. Deze vallen 20% hoger/lager uit dan in de basisvariant. Bij bussen gaat het om een afwijking van 5 tot 10%, bij treinen om 1 tot 3% en bij vliegtuigen om 1 tot 2%. Deze verschillen tussen vervoerswijzen zijn terug te voeren op het aandeel dat de voertuig gerelateerde emissies hebben in de ketenemissies. Bij personenauto's ligt dit veel hoger dan bij de ander vervoerswijzen.

Figuur 16 - Gevoeligheidsanalyse impact levensduur voertuigen, weergegeven als bandbreedte tussen 25% langere levensduur (ondergrens bandbreedte) en 25% kortere levensduur (bovengrens bandbreedte)



3 Waardering ketenemissies

3.1 Inleiding

De ketenemissies van voertuigen en transportinfrastructuur dragen bij aan klimaat-verandering en luchtvervuiling. Deze schadelijke effecten kunnen economisch gewaardeerd worden met behulp van milieuprijzen. De schadelijkheid van emissies is echter niet altijd gelijk en dus kan niet voor elke situatie dezelfde milieuprijs gehanteerd worden. Zo zijn de kosten van luchtvervuilende emissies bijvoorbeeld hoger in dichtbevolkte gebieden, doordat de emissies daar bij meer mensen leiden tot gezondheidsschade. Ook over de tijd kunnen de kosten van emissies veranderen, bijvoorbeeld door een stijging in de bevolkingsomvang of doordat de noodzaak tot klimaatmaatregelen toeneemt. Voor een goede waardering van de ketenemissies is het dus nodig om een gedifferentieerde set aan milieuprijzen te bezitten. In dit hoofdstuk stellen we zo'n set op en passen we die toe op de ketenemissies voor de voorbeeldreizen.

De opbouw van dit hoofdstuk is als volgt: in Paragraaf 3.2 bespreken we de effecten die optreden als gevolg van de ketenemissies en de externe kosten die dat oplevert.
De methodiek om deze externe effecten te waarderen wordt besproken in Paragraaf 3.3. Ook wordt de gehanteerde set van milieuprijzen in deze Paragraaf gepresenteerd.
Een overzicht van de externe kosten van ketenemissies voor de vier voorbeeldreizen presenteren we in Paragraaf 3.4. Tot slot onderzoeken we de invloed van enkele aannames op de resultaten in Paragraaf 3.5 via een aantal gevoeligheidsanalyses.

3.2 Overzicht externe kosten als gevolg van ketenemissies

Voor de ketenemissies van voertuigen en transportinfrastructuur nemen we in deze studie twee soorten externe kosten mee:
1. Kosten van broeikasgasemissies.
2. Kosten van luchtvervuilende emissies.

Kosten van broeikasgasemissies

Het klimaat verandert door de oplopende concentraties aan broeikasgassen in onze atmosfeer. Die gassen laten de invallende zonnestralen door, maar houden de door de aarde teruggekaatste warmte tegen. Dit fenomeen is bekend als het broeikaseffect en leidt tot een stijging van de mondiale temperatuur en klimaatveranderingen als gevolg van deze temperatuurstijging. De IPCC verwacht een significante toename van temperaturen als er geen klimaatbeleid wordt toegepast (IPCC, 2013). Dergelijke temperatuurtoenames zullen grote en grotendeels onomkeerbare gevolgen hebben op de huidige samenleving. De kosten van broeikasgassen bevatten alle kosten die geassocieerd worden met de effecten van klimaatverandering, zoals extremere weersomstandigheden, een hoger zeespiegelniveau en veranderende leefomgevingen van mens, plant en dier.

De belangrijkste bron van klimaatverandering is het verstoken van fossiele brandstoffen. De ketenemissies van voertuigen en transportinfrastructuur dragen hier ook aan bij.
Het belangrijkste broeikasgas is hierbij koolstofdioxide (CO_2). Hoewel er naast CO_2 ook andere broeikasgassen zijn (bijv. lachgas en methaan), beperken we ons in deze studie tot CO_2. Deze emissies zijn namelijk verantwoordelijk voor het overgrote deel van het

klimaateffect dat optreedt als gevolg van de aanleg, onderhoud en afdanking van infrastructuur en voertuigen.

Kosten van luchtvervuilende emissies

De uitstoot van de luchtvervuilende stoffen zoals stikstofoxiden (NO_x) en fijnstof ($PM_{2,5}$) leidt tot schade op verschillende manieren. Daarbij zijn de volgende schadelijke effecten het belangrijkst:

- **Gezondheidsschade:** De inademing van vervuilende stoffen als fijnstof en NO_x hebben gevolgen voor de menselijke gezondheid en veroorzaken bijvoorbeeld een verhoogd risico op hart- en vaatziekten. Deze categorie vormt de belangrijkste externe kostenpost van luchtvervuiling.
- **Schade aan gebouwen en materialen:** Luchtvervuilende stoffen kunnen op twee manieren schade veroorzaken aan gebouwen: a) NO_x is een verzurende stof die corrosie kan veroorzaken aan gevels; b) deeltjes en stof kunnen gebouwen en materialen vervuilen.
- **Verlies van landbouwgewassen:** Verschillende luchtvervuilende stoffen kunnen schade veroorzaken aan landbouwgewassen. Met name NO_x en SO_2 alsmede secundaire ozon, dat voortkomt uit emissies van NO_x en NMVOS, kunnen deze schadelijke effecten veroorzaken. Een toename in de concentratie van deze stoffen zal dus ook leiden tot een vermindering van het productievolume van landbouwgewassen.
- **Impacts op ecosystemen en biodiversiteit**: luchtvervuilende stoffen veroorzaken schade aan ecosystemen. Daarbij gaat het met name om a) verzuring van de bodem en het grondwater (onder andere door NO_x) en b) eutrofiëring van ecosystemen (door NO_x). Deze negatieve gevolgen voor ecosystemen kan ook schade veroorzaken aan de biodiversiteit.

Overige externe keteneffecten

In deze studie onderzoeken we alleen de externe kosten van emissies voor alle ketenstappen. Er kunnen echter ook externe effecten optreden in de verschillende stappen in de keten van voertuigen en transportinfrastructuur, zoals geluidsoverlast (bijv. van een fabriek waar auto's worden geproduceerd), (externe) veiligheid (op de productielocatie of tijdens het transport van materialen of grondstoffen) en schaarste van grondstoffen. Deze externe effecten blijven in deze studie echter buiten beschouwing, omdat ze lastig te bepalen zijn en naar verwachting ook relatief beperkt van omvang in vergelijking met de externe kosten van ketenemissies.

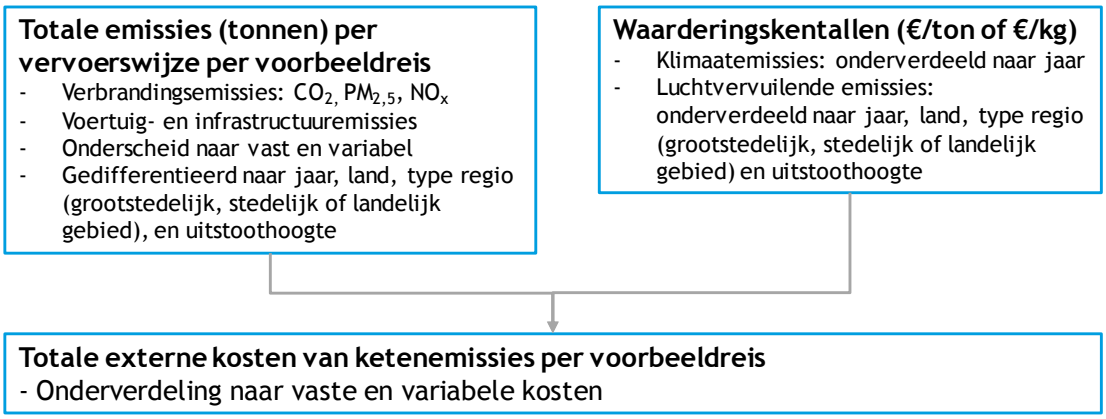
3.3 Methodiek voor waardering ketenemissies

3.3.1 Overzicht methodiek

Figuur 17 geeft een overzicht van de methodiek die is gehanteerd voor het bepalen van de externe kosten van ketenemissies voor de specifieke voorbeeldreizen. Uitgangspunt voor deze analyse vormen de ketenemissies (voertuig + infrastructuur) zoals die in Hoofdstuk 2 per vervoerswijze voor de verschillende voorbeeldreizen zijn bepaald. Door deze ketenemissies te vermenigvuldigen met een gedetailleerde set aan waarderingskentallen worden de totale externe kosten van ketenemissies bepaald. Hierbij maken we onderscheid naar vaste en variabele kosten.

Zoals in Paragraaf 3.1 al werd aangegeven verschilt de waardering van de ketenemissies naar gelang de locatie en het jaar dat ze zijn uitgestoten. Het samenstellen van een set aan waarderingskentallen die recht doet aan deze plaats- en tijdsafhankelijkheid vormt een belangrijke uitdaging bij de waardering van ketenemissies. In Paragraaf 3.3.2 staan we daarom stil bij de locatie en het jaar waarvoor we aannemen dat de ketenemissies worden uitgestoten. Vervolgens gaan we in Paragraaf 3.3.3 in op de manier waarop de tijd- en plaats gedifferentieerde waarderingskentallen kunnen worden bepaald. Een overzicht van deze kentallen presenteren we tenslotte in Paragraaf 3.3.4.

Figuur 17 - Methodiek bepaling van de kosten van ketenemissies



3.3.2 Locatie en jaar van uitstoot ketenemissies

De schadelijkheid van ketenemissies verschilt per locatie, land en moment waarop de emissies worden uitgestoten. Idealiter worden de ketenemissies daarom uitgesplitst naar type regio, land en het jaar waarin de emissies zijn uitgestoten. Voor deze emissies geldt echter dat ze op veel verschillende plaatsen en in veel verschillende jaren vrijkomen. Bij de productie van een auto wordt het staal en de aluminium bijvoorbeeld in China geproduceerd, de elektronica in Nederland, wordt de auto in Polen in elkaar gezet, etc. En de emissies tijdens de productiefase worden jaren eerder uitgestoten dan de emissies die vrijkomen bij het onderhoud of de afdanking van een voertuig. Op basis van de beschikbare data is het niet mogelijk om dergelijke gedetailleerde uitsplitsingen van ketenemissies naar locatie en naar jaar te maken. Daarom hebben we op basis van beschikbare data en enkele aannames een inschatting moeten maken van de locatie en het jaar waarin de ketenemissies worden uitgestoten.

Locatie van uitstoot ketenemissies van voertuigen

Voor de bepaling van de locatie waar de ketenemissies van voertuigen plaatsvinden baseren we ons op de onderdelen die het meeste bijdragen aan de uitstoot van ketenemissies. Voor voertuigen zijn dit enerzijds de emissies die vrijkomen tijdens de productie van materialen en anderzijds de procesemissies tijdens de verwerking van die materialen. Voor personenauto's en treinen ligt de verhouding hierin op 60/40%, voor bussen op 70/30% terwijl bij vliegtuigen vooral de procesemissies overheersend zijn met een aandeel van 60% (AEA, et al., 2012). Deze percentages houden we in deze studie aan voor alle ketenstappen.

Voor de bepaling van locatie van de procesemissies veronderstellen we dat die voor de productiefase het land is waar het voertuig wordt geproduceerd, terwijl dit voor de onderhouds- en afdankingsfase het land is waar het voertuig staat geregistreerd.
De bepaling van de locaties voor de materiaalproductie is complexer, omdat het niet mogelijk is om voor alle referentievoertuigen te bepalen waar alle verschillende typen materialen geproduceerd worden. Daarom beperken we ons hierbij tot de belangrijkste materialen en landen waar deze materialen worden geproduceerd. Op basis van een literatuuronderzoek (zie Bijlage C.4) hebben we vastgesteld dat de productie van staal en ijzer, aluminium en plastics veruit de belangrijkste bronnen van CO_2-emissies zijn bij de productie van auto's, bussen en treinen. Bij vliegtuigen zijn deze materialen ook belangrijk, maar daarnaast ook koolstofvezel en titanium. Voor deze vijf typen materialen hebben we ingeschat in welke landen ze vooral worden geproduceerd (zie Tabel 7).

Tabel 7 - Overzicht van locaties en landen waar emissies belangrijkste materialen plaatsvinden

Land/regio	Staal en ijzer	Aluminium	Plastics	Koolstofvezel	Titanium
Europa	90%	20%	23%	15%	0%
China	5%	60%	25%	15%	40%
Japan	0%	0%	10%	22%	25%
VS	0%	10%	20%	30%	5%
Rusland	0%	0%	0%	0%	20%
Rest van de wereld	5%	10%	22%	18%	10%

Bronnen: GRIF "Fabio Gobbo" (2019) Gambogi (2021), CEMAC (2017) European Commission (2018), (2020).

De waardering van de ketenemissies is ook afhankelijk van of de emissies worden uitgestoten in een dun- of dichtbevolkt gebied. Omdat we dat in dit geval niet weten gaan we uit van een gemiddelde bevolkingsdichtheid voor de uitstootlocaties.

Locatie van uitstoot ketenemissies van transportinfrastructuur

Voor de ketenemissies van infrastructuur geldt dat die voor het overgrote deel vrijkomen op de plek waar de infrastructuur ligt. Dit geldt voor de emissies van het onderhoud en beheer van de infrastructuur, maar ook voor een belangrijk deel van de emissies die vrijkomen bij de constructie van de infrastructuur. Daarnaast worden veel van de gebruikte materialen, bijvoorbeeld bitumen en beton, geproduceerd in het land waar het gebruikt wordt. We gaan er voor de ketenemissies van transportinfrastructuur dan ook van uit dat die worden uitgestoten in het land waar de infrastructuur ligt.

Jaar van uitstoot ketenemissies

Om te bepalen in welk jaar de ketenemissies van de aanleg van infrastructuur hebben plaatsgevonden nemen we een gemiddelde levensduur van infrastructuur van 35 jaar aan[18] (CE Delft, et al., 2019b). Omdat infrastructuur over het algemeen al enige tijd geleden is aangelegd gaan we er in de hoofdanalyse vanuit dat de infrastructuur halverwege de levensduur is[19]. Daarnaast brengen we via een gevoeligheidsanalyse in kaart wat de invloed van de leeftijd (oftewel het jaar van aanleg) van de infrastructuur is op de waarderingskentallen en daarmee op de hoogte van de externe kosten. Voor de emissies die vrijkomen bij onderhoud en afdanking[20] gaan we ervan uit dat die in 2020 plaatsvinden.

Voor het bouwjaar van voertuigen gaan we, evenals in CE Delft (2019), uit van 2016. Voor alle emissies gerelateerd aan voertuigproductie wordt dan ook aangenomen dat die in 2016 zijn uitgestoten. Voor de emissies gerelateerd aan onderhoud, evenals bij infrastructuur, aangenomen dat die in 2020 plaatsvinden.

3.3.3 Bepalen tijd en plaats afhankelijke waarderingskentallen

Voor de emissies die vrijkomen in Europa in een recent jaar kan gebruikgemaakt worden van actuele waarderingskentallen uit het Europese handboek externe kosten van transport (CE Delft, et al. (2019a) of het Environmental Prices Handbook (CE Delft, 2018). Deze handboeken geven geeft echter geen informatie over emissies die plaatsvinden buiten Europa of emissies die plaats hebben gevonden in het verleden (bijv. relevant voor de aanleg van infrastructuur). In deze paragraaf wordt besproken op welke manier we voor deze studie tot waarderingskentallen zijn gekomen.

De waardering van emissies hangt af van het jaartal en het land waar ze zijn uitgestoten. Zo is de economische waardering van klimaatemissies en luchtvervuilende emissies toegenomen over de tijd. In het geval van klimaatemissies komt dit door het cumulatieve effect van broeikasgassen. Om grootschalige klimaatverandering te voorkomen is er op dit moment minder ruimte voor extra CO_2-emissies dan dat er vroeger was. Er is dus meer schaarste aan ruimte voor CO_2-uitstoot ontstaan en daarmee stijgt ook de prijs voor CO_2. Dit proces zet zich voort in de komende jaren, waardoor de waardering voor CO_2 ook in de toekomst zal blijven stijgen. Bij luchtvervuilende emissies is er sprake van een toename van de economische waardering in de tijd door factoren als groeiende bevolkingsomvang (waardoor de emissies bij meer mensen tot gezondheidsklachten leidt) en een vergrijzende bevolking (aangezien oudere mensen eerder gezondheidsklachten krijgen). Ook het land waar de emissies plaatsvinden is bij luchtvervuilende emissies van invloed op de economische waardering. Dit is gerelateerd aan verschillen in bevolkingsomvang en -samenstelling, maar ook aan het welvaartsniveau in een land. Schone lucht wordt gezien als een luxe goed, waarvan de waardering toeneemt als mensen meer geld te besteden hebben (CE Delft, et al., 2019a). Dit betekent dan ook dat de economische waardering van luchtvervuilende emissies in rijke landen hoger is dan in arme landen. Vanwege deze

[18] Uiteraard bestaan er grote verschillen in de levensduur van verschillende elementen van de infrastructuur. De fundering van een weg gaat waarschijnlijk ruim langer mee dan 35 jaar, terwijl de asfaltlaag een kortere levensduur heeft. Op basis van een literatuurstudie wordt in CE Delft et al. (2019b) geconcludeerd dat 35 jaar een goede benadering is van de gemiddelde levensduur van de verschillende infrastructuurelementen bij de verschillende modaliteiten.

[19] We nemen dus aan dat de emissies van de aanleg van infrastructuur gemiddeld 17,5 jaar geleden zijn uitgestoten. Bij de waardering wordt dan ook gerekend met waarderingskentallen die gelden voor 2002.

[20] Aangezien de emissies van afdanking in de toekomst zullen plaatsvinden is deze aanname niet volledig in lijn met de werkelijkheid. Het aandeel van deze emissies in de totale ketenemissies is echter dermate klein, dat deze aanname geen substantiële invloed op de eindresultaten zal hebben.

afhankelijkheden van tijd en plaats hebben we de algemene waarderingskentallen uit CE Delft (2018) verder gedifferentieerd. Hieronder leggen we dat voor CO_2-emissies en luchtvervuilende emissies afzonderlijk uit.

Waardering CO_2-emissies

Omdat de schadelijke effecten van CO_2-emissies mondiaal zijn en de impact ervan dus niet afhangt van waar ze zijn uitgestoten, hanteren we in deze studie voor alle landen dezelfde CO_2-prijs. Wel houden we rekening met het feit dat de waardering van CO_2 over de tijd toeneemt. Daarvoor sluiten we in principe aan bij de aanbeveling van CPB & PBL (2016)om een jaarlijkse groeivoet van 3,5% aan te nemen voor de CO_2-prijs. Voor de periode tussen 2015 en 2030 gaan we echter uit van een gemiddelde CO_2-prijs van €126 (€ 2020) per ton CO_2 (CE Delft, et al., 2019a), om consistentie met de berekeningen uit de studie 'De Prijs van een vliegreis' (CE Delft, 2019) te waarborgen[21].

Waardering luchtvervuilende emissies

Voor de waarderingskentallen van luchtvervuilende emissies geldt dat drie bepalende factoren (d.w.z. inkomensniveaus, bevolkingsdichtheid en basisgezondheid) niet constant zijn over de jaren en tussen landen. Voor het inkomensniveau hebben we daarom een correctie doorgevoerd bij de vertaling van de EU-waarderingen naar niet-EU-landen. In lijn met de aanbeveling van de Werkgroep Discontovoet (Ministerie van Financiën, 2015) voeren we geen correctie door voor de ontwikkeling van inkomens in de tijd (zie onderstaande tekstbox voor verdere uitleg).

Invloed van stijgende inkomensniveaus over de tijd op de waardering van luchtvervuilende emissies
Hogere inkomensniveaus leiden tot een toename in de waardering van een menselijk leven (VOLY). Tegelijkertijd zorgen technologische ontwikkelingen ervoor dat het goedkoper wordt om gezond te blijven waardoor de algemene gezondheidssituatie van de bevolking toeneemt. Omdat deze ontwikkelingen tegengesteld zijn adviseert de Werkgroep Discontovoet (Ministerie van Financiën, 2015) om de waarde van een VOLY niet constant aan te passen naar veranderingen van inkomen over tijd, maar om hier periodiek onderzoek naar te doen. In lijn met het Handboek Milieuprijzen (CE Delft, 2017) nemen we de aanbevelingen van de Werkgroep Discontovoet (Ministerie van Financiën, 2015) over en passen we de waardering van luchtvervuilende emissies niet aan voor de inkomensstijging die zich de afgelopen decennia heeft voorgedaan.

De factor bevolkingsdichtheid beïnvloedt het aantal mensen wat in aanraking komt met luchtvervuilende emissies. In de afgelopen decennia is in de meeste landen de bevolkingsdichtheid toegenomen waardoor de waardering van luchtvervuilende emissies hoger uitvalt. Ook tussen landen zitten er verschillen in bevolkingsdichtheid. Voor beide situaties is dus een correctie van de waarderingskentallen uitgevoerd.

[21] Deze consistentie in CO_2-prijzen is belangrijk, omdat we in de integrale vergelijking van alle externe en infrastructuurkosten enerzijds en de belastingen/heffingen anderzijds, zoals we die in Hoofdstuk 5 uitvoeren, gebruikmaken van de resultaten uit CE Delft (2019) voor de bepaling van de klimaatkosten gerelateerd aan de gebruiksfase.

De derde factor, basisgezondheid, heeft invloed op de waardering van luchtvervuilende emissies, doordat bij een stijgende basisgezondheid de schadelijke gezondheidseffecten van emissies afnemen. Door een gebrek aan data was het echter niet mogelijk om deze factor mee te nemen bij de bepaling van de waarderingskentallen.

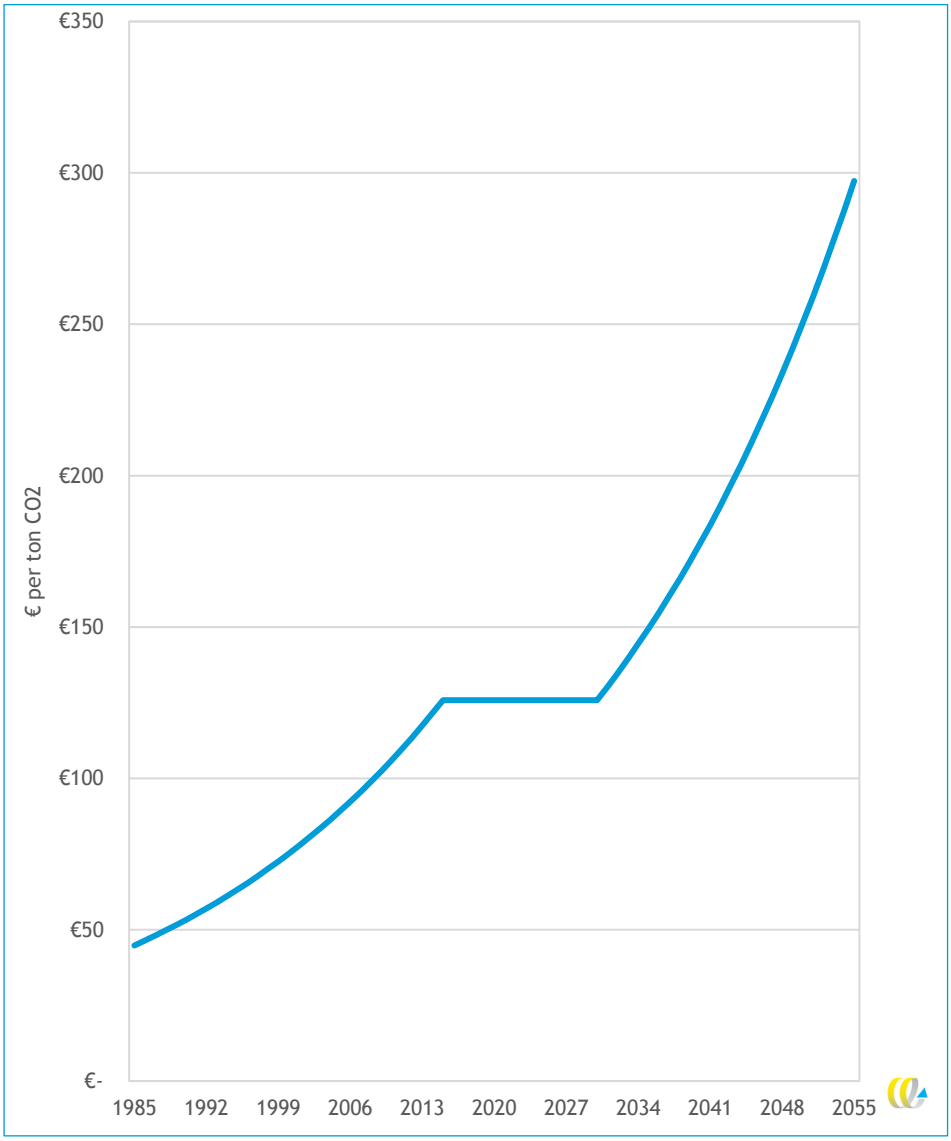
Om de effecten van veranderingen in inkomen en bevolkingsomvang over de tijd en tussen landen mee te kunnen nemen bij de bepaling van de milieuprijzen is gebruikgemaakt van het Benefito-model (CE Delft, 2011). Dit model biedt de mogelijkheid om de invloed van deze veranderingen op de milieuprijzen in te schatten. Als uitgangspunt worden daarbij de gemiddelde milieuprijzen uit CE Delft (2018) gehanteerd[22]. Deze milieuprijzen zijn ook in lijn met de milieuprijzen die zijn gebruikt voor de bepaling van de externe kosten van klimaatemissies en luchtvervuilende emissies tijdens de gebruiksfase, zoals die zijn gepresenteerd in de studie 'De prijs van een vliegreis' (CE Delft, 2019).

3.3.4 Overzicht milieuprijzen

Een overzicht van de gehanteerde CO_2-prijzen in deze studie is weergegeven in Figuur 18. De CO_2-prijs is voor alle landen gelijk verondersteld aangezien klimaatverandering een globaal probleem vormt. Zoals toegelicht in Paragraaf 3.3.3 is voor de periode 2015-2030 uitgegaan van een constante CO_2-prijs.

[22] CE Delft (2018) geeft geen waarderingskentallen met onderscheid naar hoogte van uitstoot. We rekenen in deze studie voor de waardering van ketenemissies dus met gemiddelde waarderingskentallen.

Figuur 18 - CO_2-prijzen tussen 1985 en 2055 (in € 2020)



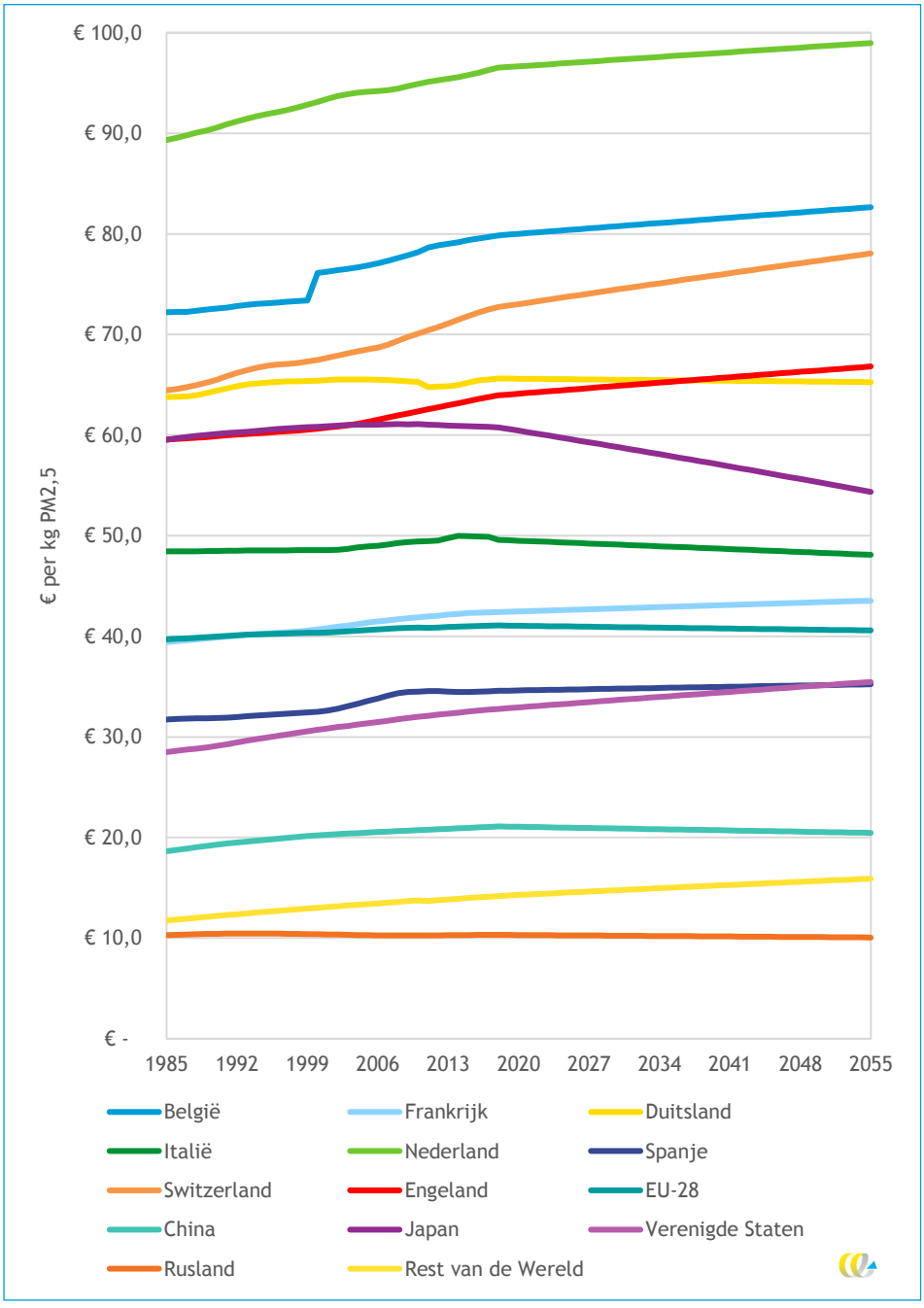
Bij de bepaling van de CO_2-prijzen zijn behalve voor de periode 2015 en 2030, conform CPB & PBL (2016) de prijzen verdisconteerd met 3,5% per jaar.

In Tabel 8 zijn de waarderingskentallen van NO_x en $PM_{2,5}$ weergeven voor het jaar 2020. De waarderingskentallen verschillen tussen landen door verschillen in hoogte van inkomens en de bevolkingsdichtheid. Figuur 19 en Figuur 20 laten de ontwikkeling van de milieu-prijzen zien tussen 1985 en 2055 als gevolg van veranderingen in bevolkingsomvang. De verwachte prognose van de bevolkingsomvang is afkomstig uit de projecties van het OECD.

Tabel 8 - Waarderingskentallen luchtvervuilende emissies voor 2020

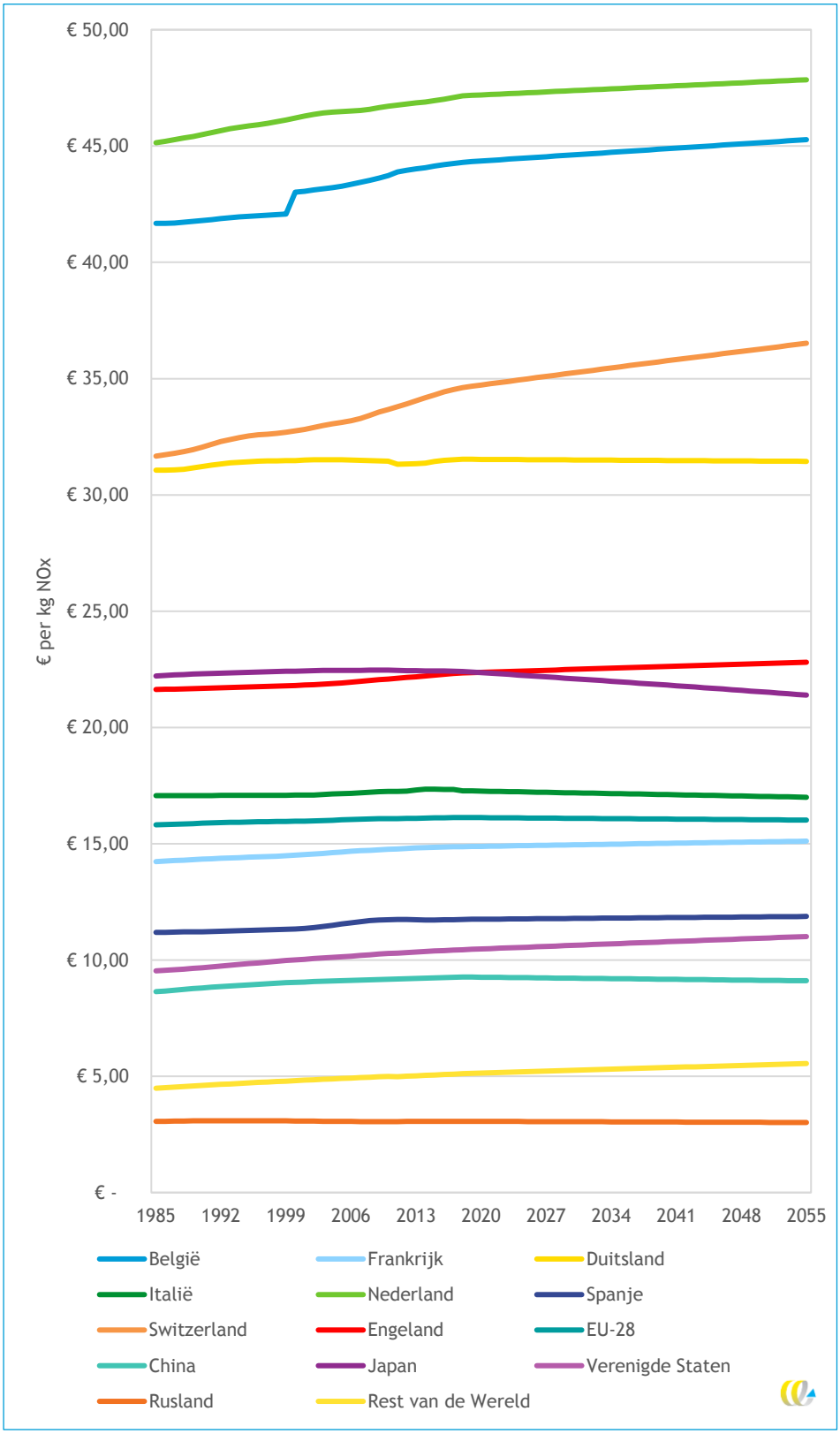
Type emissie	Land	€ kg NO_x	€ kg $PM_{2,5}$
Procesemissies	België	€ 44,4	€ 80,0
	Frankrijk	€ 14,9	€ 42,5
	Duitsland	€ 31,5	€ 65,6
	Italië	€ 17,3	€ 49,5
	Luxembourg	€ 73,8	€ 122,7
	Nederland	€ 47,2	€ 96,7
	Spanje	€ 11,8	€ 34,6
	Switzerland	€ 34,7	€ 73,0
	Engeland	€ 22,4	€ 64,1
Productemissies	EU-28	€ 16,1	€ 41,0
	China	€ 9,3	€ 21,1
	Japan	€ 22,4	€ 60,4
	Verenigde Staten	€ 10,5	€ 32,9
	Rusland	€ 3,1	€ 10,3
	Rest van de Wereld	€ 5,1	€ 14,3

Figuur 19 - Ontwikkeling van waarderingskentallen fijnstof in de periode 1985-2055



Noot: In 2000 is voor België een statistische aanpassing doorgevoerd in de bevolkingsdichtheid

Figuur 20 - Ontwikkeling van waarderingskentallen NO_x in de periode 1985-2055

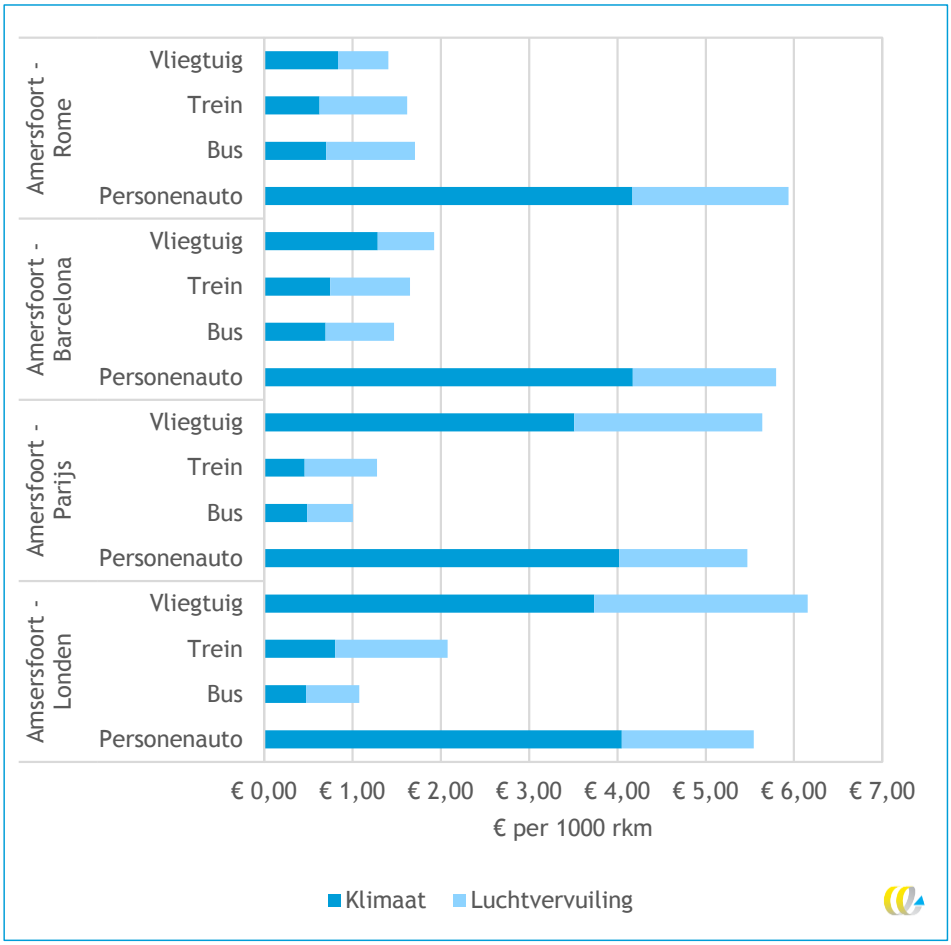


Noot: In 2000 is voor België een statistische aanpassing doorgevoerd in de bevolkingsdichtheid

3.4 Externe kosten van ketenemissies voor de voorbeeldreizen

In Figuur 22 staan de externe kosten van ketenemissies per vervoerswijze voor de verschillende voorbeeldreizen. Evenals in Hoofdstuk 2 gaat het hierbij om de ketenemissies exclusief de emissies die vrijkomen tijdens de gebruiksfase. Op kortere afstanden zijn de kosten van personenauto's en vliegtuigen vergelijkbaar per reizigerskilometer en ruim hoger dan bij de trein en de bus. Op de langere afstanden zijn de kosten voor het vliegtuig echter aanzienlijk lager (doordat het aandeel van de vaste infrastructuur gerelateerde emissies relatief lager wordt) en vergelijkbaar met de bus en trein. Deze verschillen tussen modaliteiten en reizen volgen over het algemeen de patronen zoals we die in Paragraaf 2.4 zagen voor de fysieke ketenemissies.

Figuur 21 – Externe kosten ketenemissies per vervoerswijze per voorbeeldreis (€ per 1.000 rkm)

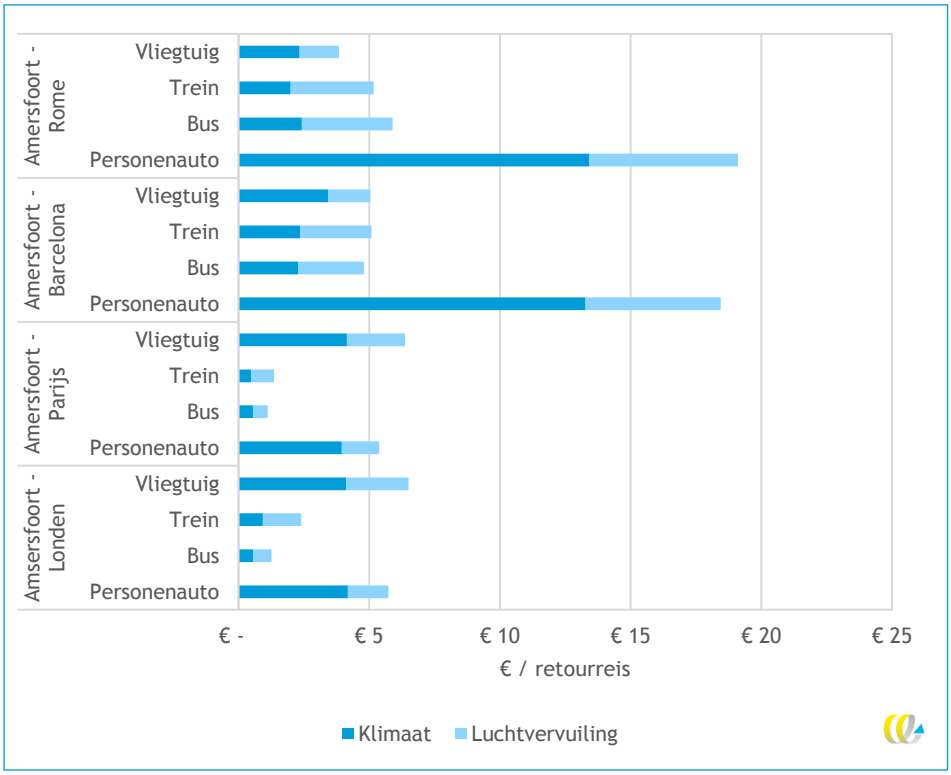


Figuur 22 laat ook zien dat bij de personenauto en het vliegtuig de CO_2-ketenemissies verantwoordelijk zijn voor het grootste deel van de externe kosten (60-70% bij het vliegtuig en 70-75% bij de personenauto). Bij de bus en de trein zijn daarentegen de kosten van luchtvervuilende ketenemissies dominant (50-60% bij de bus en 50-65% bij de trein).
De verklaring voor het feit dat de luchtvervuilende ketenemissies bij de bus en trein verantwoordelijk zijn voor de hoogste kosten is dat er relatief veel van deze emissies vrijkomen bij de aanleg en het onderhoud van de infrastructuur. Omdat deze emissies worden uitgestoten in de (vooral welvarende West-Europese) landen op de routes van de

voorbeeldreizen zelf, worden ze tegen relatief hoge milieuprijzen gewaardeerd. Bij de personenauto is een belangrijk deel van de ketenemissies gerelateerd aan de productie, onderhoud en afdanking van de auto, waarbij de emissies plaatsvinden in minder ontwikkelde landen (Oost-Europa, China). Die luchtvervuilende emissies worden dus gewaardeerd tegen lagere milieuprijzen. Bij luchtvaart zijn ook de infrastructuur gerelateerde emissies dominant, maar zoals aangegeven in Paragraaf 2.4 is het aandeel van de luchtvervuilende emissies in die emissies relatief beperkt.

Figuur 22 laat tenslotte de externe kosten van ketenemissies uitgedrukt in €/retourreis zien. Daarbij wordt duidelijk dat voor alle modaliteiten behalve het vliegtuig de kosten hoger zijn bij de langere reizen. Dit is te verklaren door het grotere aantal kilometers die voor die reizen moet worden afgelegd. Bij het vliegtuig zijn de externe kosten op de langere vluchten daarentegen juist lager dan bij de korte vluchten. De reden hiervoor is dat er op de langere vluchten grotere vliegtuigen worden ingezet. Hoewel de kosten per LTO hoger liggen voor deze vliegtuigen, liggen de kosten per reiziger lager (vanwege het veel grotere aantal passagiers per vliegtuig).

Figuur 22 - Externe kosten ketenemissies per vervoerswijze per voorbeeldreis (€ per retourreis)

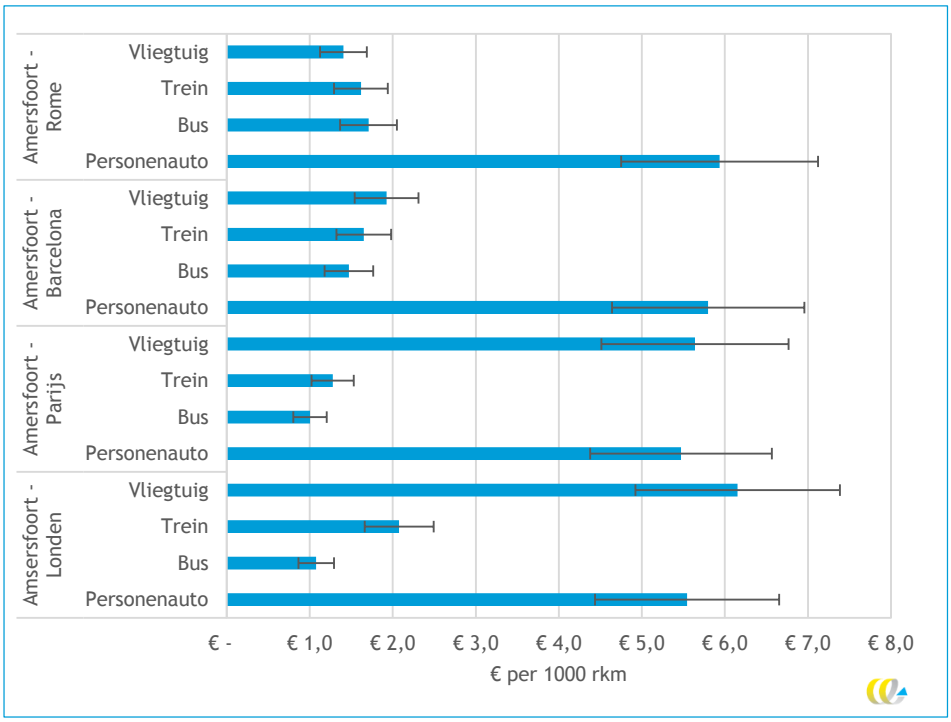


3.5 Gevoeligheidsanalyses

De externe kosten van ketenemissies hangen van de hoeveelheid uitgestoten ketenemissies en de waardering van de ketenemissies. In Paragraaf 3.3 is aangegeven waar de waardering van de ketenemissies van afhankelijk is. De belangrijkste afhankelijkheden zijn het jaar waarin de emissies plaatsvinden en het land waarin de emissies plaatsvinden. We voeren vier gevoeligheidsanalyse uit om het effect van de verschillen afhankelijkheden te laten zien.

In Figuur 23 staat het effect van de bandbreedte voor de omvang van de ketenemissies op de externe kosten. De bandbreedte in de omvang van de ketenemissies zorgt voor een zelfde procentuele afwijking in de externe kosten. In absolute zin is de afwijking groter voor de vervoerswijzen met relatief hogere emissies per reizigerskilometers.

Figuur 23 - Effect van bandbreedte ketenemissies op externe kosten



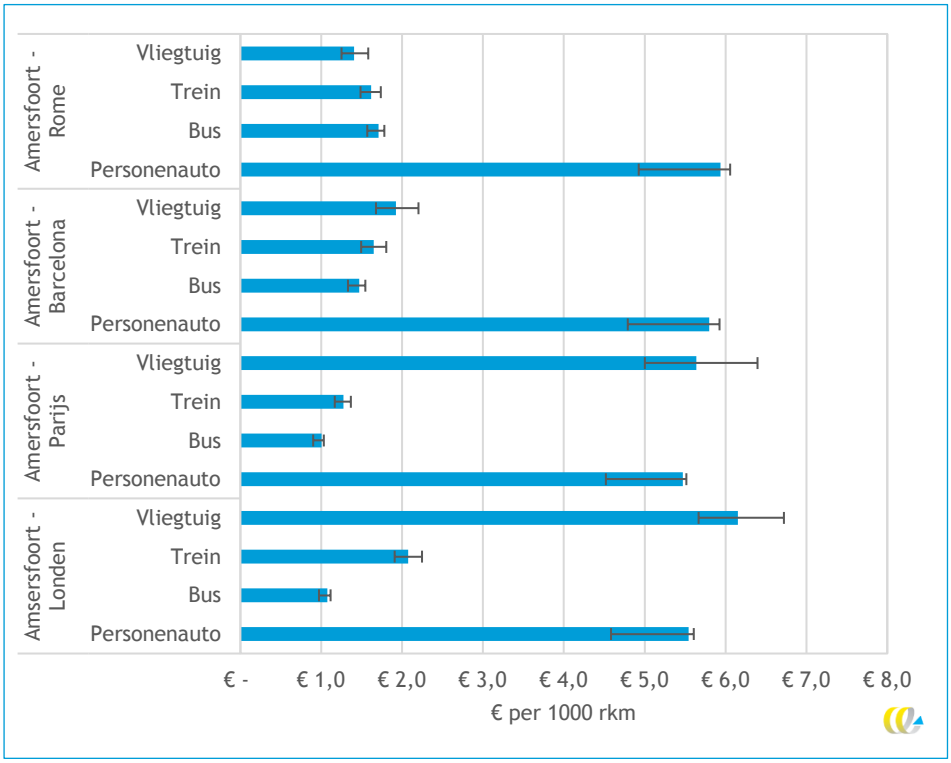
Een tweede gevoeligheidsanalyse voeren wij uit op basis van het effect van de levensduur van voertuigen en de infrastructuur op de waardering. Daarbij gaan wij ervan uit dat de voertuigen en infrastructuur aan het begin of juist aan het einde van de levensduur is. Dit heeft namelijk invloed op het jaar waarin de emissies van de productie en afdanking plaatsvinden. Er is geen rekening gehouden met mogelijke efficiëntieverbeteringen die in de productieprocessen plaats hebben gevonden. Er wordt dus gerekend met dezelfde emissies en deze analyse is bedoeld om te laten zien wat het effect van het constructiejaar van infrastructuur en voertuigen is op de waardering van de externe kosten. Tabel 9 laat zien van welke levensduur is uitgegaan en welke invloed dat heeft op het jaar waarin de emissies van constructie plaatsvinden. Als we bijvoorbeeld aannemen dat zowel voertuig als infrastructuur net nieuw zijn (dus aan het begin van hun levensduur), dan worden beiden in 2020 gebouwd (in plaats van 2016 bij de voertuigen en 2002 bij de infrastructuur).

Tabel 9 - Levensduur voertuigen en infrastructuur en jaartallen van constructie

Vervoerswijze	Levensduur (jaar)	Jaartal emissies constructie		
		Begin levensduur	Standaard analyse	Einde levensduur
Auto	18	2020	2016	2002
Bus	15	2020	2016	2005
Trein	35	2020	2016	1985
Vliegtuig	25	2020	2016	1995
Infrastructuur	35	2020	2002	1985

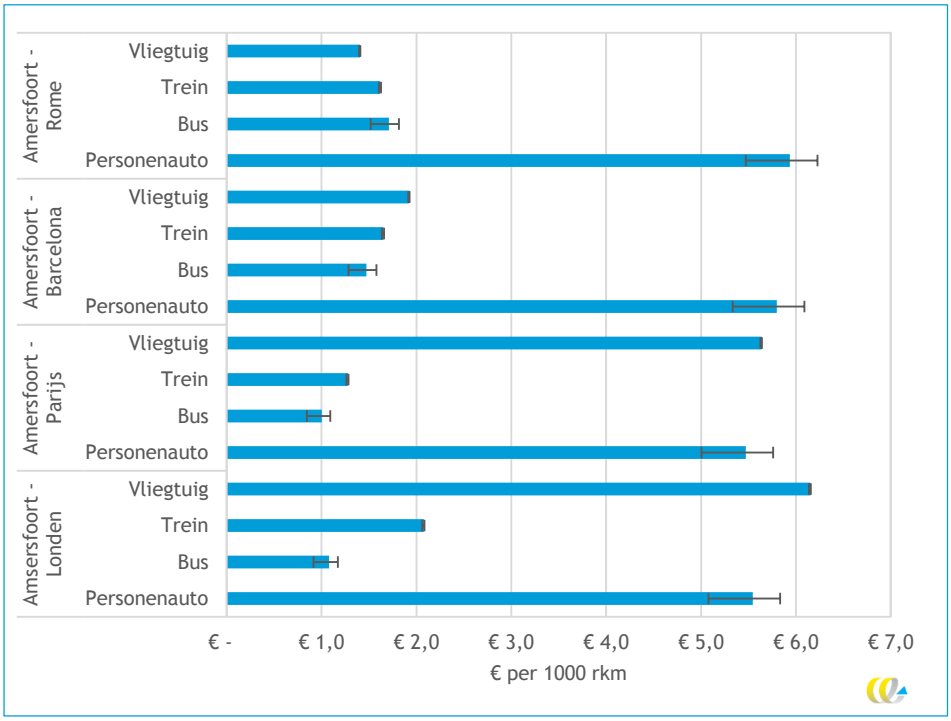
Figuur 24 geeft de effecten weer wanneer de voertuigen en de infrastructuur aan het begin of juist het einde van de levensduur zijn. De resultaten laten zien dat het effect op de kosten van ketenemissies relatief klein is (ca. 9%). Dit komt omdat de in Paragraaf 3.3.4 gepresenteerde milieuprijzen vrij constant over de jaren zijn. De grootste bandbreedte is zichtbaar bij vliegtuigen en treinen. De reden hiervoor is dat infrastructuur een relatief groot aandeel heeft in de ketenemissies van vliegtuigen en treinen. Daarnaast gaan vliegtuigen en treinen langer mee dan wegvoertuigen. Door de langere levensduur zit er een grotere spreiding in het jaar waarin de emissies plaatsvinden. Voor personenauto's heeft de voertuigproductie een hoog aandeel in de ketenemissies. Daardoor leidt vooral de aanname dat een auto aan het einde van de levensduur is tot lagere externe kosten.

Figuur 24 - Effect van begin of einde levensduur op de externe kosten van ketenemissies (€ per 1.000 rkm)



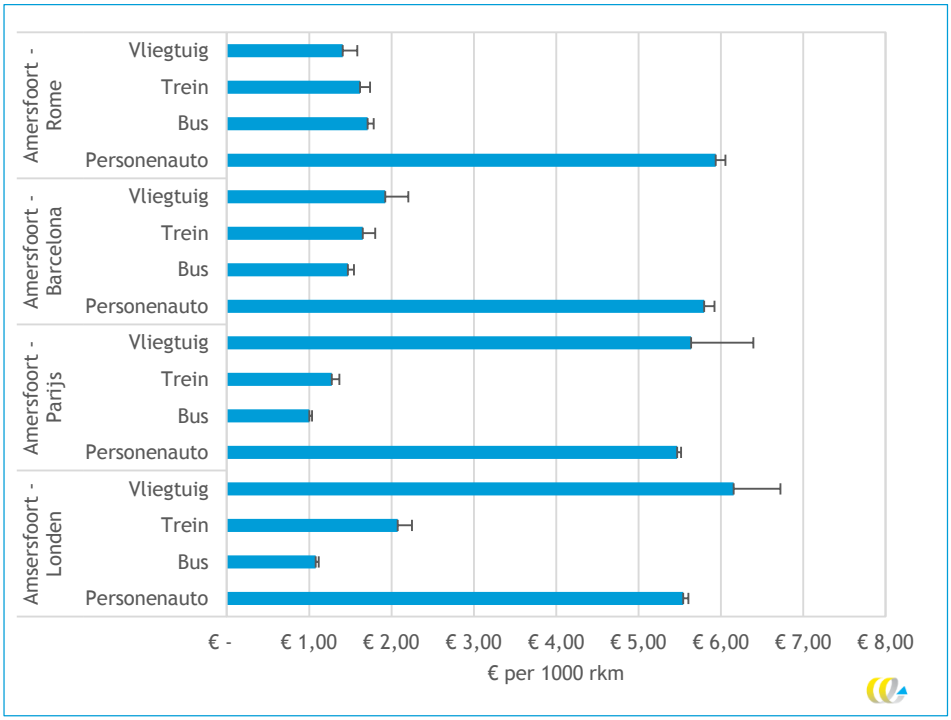
Figuur 25 geeft het effect van de productielocatie van het voertuig weer op de waardering van de externe kosten van ketenemissies. De situatie is hypothetisch en er is niet gekeken of er verschillen zijn in fysieke ketenemissies tussen verschillende productielocaties.
De onderwaarde gaat uit van lage milieuprijzen (China), terwijl de bovenwaarde uitgaat van hoge milieuprijzen (Japan). Doordat de CO_2-prijs voor alle landen gelijk is, zijn verschillen volledig toe te schrijven aan de waardering van luchtvervuilende emissies. Voor vliegtuigen en treinen is effect van een andere productielocatie verwaarloosbaar op de kosten van ketenemissies. Dit komt door het lage aandeel van voertuigproductie op de totale keten-emissies van deze vervoerswijzen. Voor wegtransport is het aandeel voertuigproductie op de totale ketenemissies hoger. Vandaar dat de productielocatie voor deze vervoerswijzen wel van invloed is op de kosten van de ketenemissies, hoewel deze invloed relatief beperkt is (ca. 5%).

Figuur 25 - Bandbreedte effect productielocatie kosten ketenemissies (€ per 1.000 rkm)



Figuur 26 laat tenslotte zien wat de effecten op de resultaten zijn als wij voor de waardering uitgaan van vaste milieuprijzen voor het jaar 2020. Het effect is vergelijkbaar met de situatie waarin we ervan uitgaan dat alle emissies in het jaar 2020 plaatsvinden. Als gevolg hiervan neemt de waardering toe ten opzichte van de standaard situatie waar voertuigproductie in 2016 plaatsvindt en infrastructuurproductie in 2002. Deze aanpassing zorgt ervoor dat de externe kosten beperkt toenemen met circa 6%.

Figuur 26 - Effect vaste milieuprijzen (€2020) op kosten ketenemissies (€ per 1.000 rkm)



4 Belastingen/heffingen gerelateerd aan ketenemissies

4.1 Inleiding

In verschillende landen worden belastingen en heffingen geheven die zijn gerelateerd aan de ketenemissies van voertuigen en transportinfrastructuur. Daarbij kan het gaan om belastingen op het energiegebruik voor de productie van materialen of brandstofbelastingen op de transportbrandstof die nodig is voor het vervoer van materialen. In dit hoofdstuk maken we een vergelijking tussen de omvang van deze belastingen/heffingen en de omvang van de externe kosten van ketenemissies (wederom exclusief de ketenemissies uit de gebruiksfase). Deze vergelijking geeft een eerste indicatie welk deel van de externe kosten van ketenemissies, zoals ingeschat in Hoofdstuk 3, reeds is geïnternaliseerd en dus (indirect) word betaald door de transportgebruiker[23].

In dit hoofdstuk maken we een vergelijking tussen enerzijds de emissies die vrijkomen bij de aanleg, onderhoud en afdanking van infrastructuur en voertuigen, en anderzijds de belastingen en heffingen die betaald moeten worden over het energiegebruik van deze activiteiten. Hierbij blijven mogelijke andere externe (en infrastructuur)kosten buiten beschouwing. Echter, zoals aangegeven in Paragraaf 3.2, is de omvang van dergelijke kosten naar verwachting beperkt. Vandaar dat het weglaten van die kosten uit de vergelijking, hoewel theoretisch niet volledig juist, slechts een beperkt effect heeft op de uiteindelijke uitkomsten.

Om alle belastingen en heffingen in kaart te brengen die gerelateerd zijn aan de keten-emissies, dient de volledige keten en het energieverbruik daarbinnen zeer gedetailleerd in kaart te worden gebracht. Dat is binnen deze verkennende studie niet mogelijk. Wat wel mogelijk is om een inschatting te maken van de belastingen en heffingen die gerelateerd zijn aan de emissies die vrijkomen bij de productie van materialen. Voorbeelden hiervan zijn energiebelastingen en CO_2-heffingen. Zeker bij voertuigproductie wordt hiermee voor een belangrijk deel van de emissies de belastingen/heffingen in kaart gebracht. Daarnaast nemen we de brandstofaccijns mee, omdat deze vooral bij de aanleg en onderhoud van infrastructuur relevant is (diesel verbruikt door mobiele werktuigen zoals shovels, graafmachines, asfalteermachines, etc.). Op deze manier zijn we in staat om ook voor infrastructuur het overgrote deel van de relevante belastingen/heffingen mee te nemen.

[23] Zo geldt bijvoorbeeld dat in de meeste landen voor het gebruik van elektriciteit bij de productie van een auto elektriciteitsbelasting moet worden betaald. De autofabrikant zal deze elektriciteitsbelasting doorberekenen in de verkoopprijs, zodat die uiteindelijk betaald wordt door de consument. Hiermee betaalt de consument dus indirect voor een deel van de ketenemissies die vrijkomen bij de productie van een auto. Eenzelfde redenering geldt voor door private partijen beheerde infrastructuur (bijv. luchthavens). Voor de door de overheid gefinancierde infrastructuur is de situatie iets anders. Hier vormen de betaalde belastingen en heffingen gerelateerd aan ketenemissies onderdeel van de infrastructuurkosten, die door de overheid worden gedragen. Echter, om te voorkomen dat er dubbeltellingen ontstaan bij vergelijkingen van alle externe en infrastructuur-kosten enerzijds en alle belastingen/heffingen anderzijds, zoals we doen in Hoofdstuk 5, is het ook belangrijk om de omvang van de belastingen/heffingen gerelateerd aan de ketenemissies van door de overheid beheerde infrastructuur in te schatten.

In het vervolg van dit hoofdstuk geven we in Paragraaf 4.2 een overzicht van de relevante belastingen en heffingen die in de verschillende landen geheven worden. Vanwege de verschillende productiestromen en productielocaties is het niet mogelijk om te bepalen hoe groot de omvang van belastingen en heffingen gerelateerd aan ketenemissies precies zijn. Paragraaf 4.3 bespreekt daarom welke methode is toegepast om toch een ruwe inschatting van deze belastingen/heffingen te kunnen maken. In Paragraaf 4.4 worden de resultaten voor de verschillende voorbeeldreizen gepresenteerd.

4.2 Overzicht relevante belastingen en heffingen

Zoals aangegeven in Paragraaf 4.1 kijken we in dit hoofdstuk naar twee typen belastingen/heffingen: de belastingen en heffingen die relevant zijn voor de productie van energie-intensieve materialen en de brandstofaccijnzen op dieselverbruik. Naar verwachting dekken deze belastingen/heffingen het overgrote deel van de relevante belastingen en heffingen af.

Tabel 10 laat een overzicht zien van de verschillende relevante belastingen en heffingen. Voor de belastingen en heffingen gerelateerd aan de productie van energie-intensieve materialen geldt dat de precieze vormgeving en de tarieven sterk verschillen per land. Over het algemeen kunnen deze belastingen/heffingen onder drie categorieën worden geschaard: energiebelastingen die worden geheven over het gebruik van energiedragers, belastingen over de uitstoot van CO_2 of systemen waarbij CO_2-emissierechten dienen te worden afgedragen.

Tabel 10 - Overzicht van relevante belastingen en heffingen gerelateerd aan ketenemissies

Voorbeelden van relevante belastingen en heffingen	Type belasting/heffing
Brandstofaccijns	Energiebelasting
CO_2-belastingen	CO_2-belasting/heffing
CO_2-heffingen	CO_2-belasting/heffing
Elektriciteitsbelasting	Energiebelasting
Energiebelasting	Energiebelasting
EU ETS	CO_2-emissieshandelssysteem
Kolenbelasting	Energiebelasting

4.3 Methodiek voor bepalen omvang belastingen en heffingen

4.3.1 Belastingen/heffingen relevant voor productie van materialen

De precieze omvang van belastingen en heffingen die betaald worden voor de productie van materialen is lastig te bepalen. Dit hangt namelijk sterk af van het land waar de productie plaatsvindt en de precisie regelgeving waaronder de verschillende materialen vallen. Om dit voor alle materialen te herleiden is erg lastig en tijdsintensief. Daarnaast is het detail-niveau van de beschikbare data niet voldoende om een dergelijke exercitie uit te voeren. Daarom schatten we de omvang van belastingen en heffingen in door middel van een pragmatische methode. We gaan uit van inschattingen van de *effectieve koolstof belastingen* voor 2015 voor de industrie zoals deze door de OECD (2018) worden gerapporteerd voor verschillende landen. Met de e*ffectieve koolstof belasting* wordt de CO_2-prijs bedoeld zoals die gemiddeld geldt in de praktijk, waarbij rekening wordt

gehouden met de tarieven van de relevante belastingen en heffingen en mogelijke uitzonderingen daarop.

Om de effectieve koolstof belastingen te bepalen neemt de OECD drie typen belastingen en heffingen mee: energiebelastingen (incl. accijns), CO_2-belastingen/heffingen en CO_2-emissiehandelssystemen. Aangezien deze belastingen/heffingen ook sterk gerelateerd zijn aan de omvang van luchtvervuilende emissies geven de *effectieve koolstof belastingen* een goed beeld van de omvang van belastingen en heffingen gerelateerd aan ketenemissies. OECD (2018) onderscheidt bij het bepalen van de effectieve koolstof belastingen zes economische sectoren: industrie, huishoudelijk en commercieel energieverbruik, elektriciteitsproductie, wegtransport, non-wegtransport, en landbouw en visserij. In de meeste landen geldt de hoogste effectieve koolstof belasting voor wegtransport, terwijl de industrie over het algemeen de laagste effectieve koolstof belasting betaalt.

In dit hoofdstuk gaan we uit van de gemiddelde effectieve koolstof belasting die voor de sector Industrie geldt in ieder land. De gehanteerde tarieven zijn terug te vinden in Tabel 11. Voor de productielocatie van de voertuigen sluiten we aan bij de referentie-voertuigen. De Embrear wordt in Brazilië geassembleerd, en de Boeing in Amerika. De wegvoertuigen en de treinen worden in Europa geproduceerd. Voor de materialen in de voertuigen gaan we uit van de locaties in Tabel 7.

Tabel 11 - Gehanteerde belastingtarieven (in € per ton CO_2)

Land/regio	Effectieve koolstofbelasting - Industrie	Brandstofaccijns - Diesel
België	€ 4,86	€ 202,61
Frankrijk	€ 10,39	€ 211,24
Duitsland	€ 9,87	€ 201,35
Italië	€ 10,95	€ 169,10
Luxembourg	€ 7,39	€ 143,71
Nederland	€ 18,78	€ 212,24
Spanje	€ 7,53	€ 140,87
Switzerland	€ 14,97	€ 288,89
Engeland	€ 12,58	€ 310,72
EU-28	€ 12,04	€ 176,78
China	€ 1,64	€ 86,66
Japan	€ 7,93	€ 185,04
Verenigde Staten	€ 1,37	€ 36,06
Rusland	€ 0,00	€ 0,00
Rest van de Wereld	€ 10,44	€ 107,50

Bron: OECD (2018) en European Commission (2020).

4.3.2 Brandstofaccijns op dieselverbruik

Bij de aanleg, onderhoud en afdanking van infrastructuur wordt veelvuldig gebruikgemaakt van mobiele werktuigen, die gebruikmaken van diesel. Ook vindt er vervoer plaats van materialen (met vrachtwagens), waarbij ook diesel verbruikt wordt. De accijns op dit dieselverbruik wordt in deze studie in kaart gebracht. Hetzelfde doen we ook voor het dieselverbruik bij de productie, onderhoud en afdanking van voertuigen. Hierbij gaat het bijvoorbeeld om het dieselverbruik bij het vervoer van grondstoffen, halffabricaten en eindproducten.

Voor de verschillende ketenstappen hebben wij op basis van SimaPro[24] allereerst een inschatting gemaakt van het aandeel van diesel in de totale uitstoot van CO_2-ketenemissies gerelateerd aan de infrastructuur en het voertuig (incl. boven- en onderwaarde). In Tabel 12 zijn de resultaten zichtbaar van deze analyse. De onder- en bovenwaarden zijn gebruikt om in Paragraaf 4.5 een gevoeligheidsanalyse uit te voeren. De CO_2-emissies van dieselverbruik zijn vervolgens met behulp van de CO_2-inhoud van een liter diesel omgerekend naar het totale dieselverbruik (in liters). De accijnsopbrengsten zijn dan tenslotte bepaald door het dieselverbruik te vermenigvuldigen met de relevante accijnstarieven (zie Tabel 11).

Tabel 12 - Aandeel diesel CO_2-emissies in totale CO_2-ketenemissies (exclusief gebruik)

	Aandeel bij infrastructuur gerelateerde ketenemissies			Aandeel bij voertuig gerelateerde ketenemissies		
	Standaard	Ondergrens	Bovengrens	Standaard	Ondergrens	Bovengrens
Personenauto	35%	30%	40%	10%	5%	15%
Bus	35%	30%	40%	10%	5%	15%
Trein	8%	5%	10%	10%	5%	15%
Vliegtuig	20%	15%	25%	20%	10%	30%

4.4 Resultaten voor de voorbeeldreizen

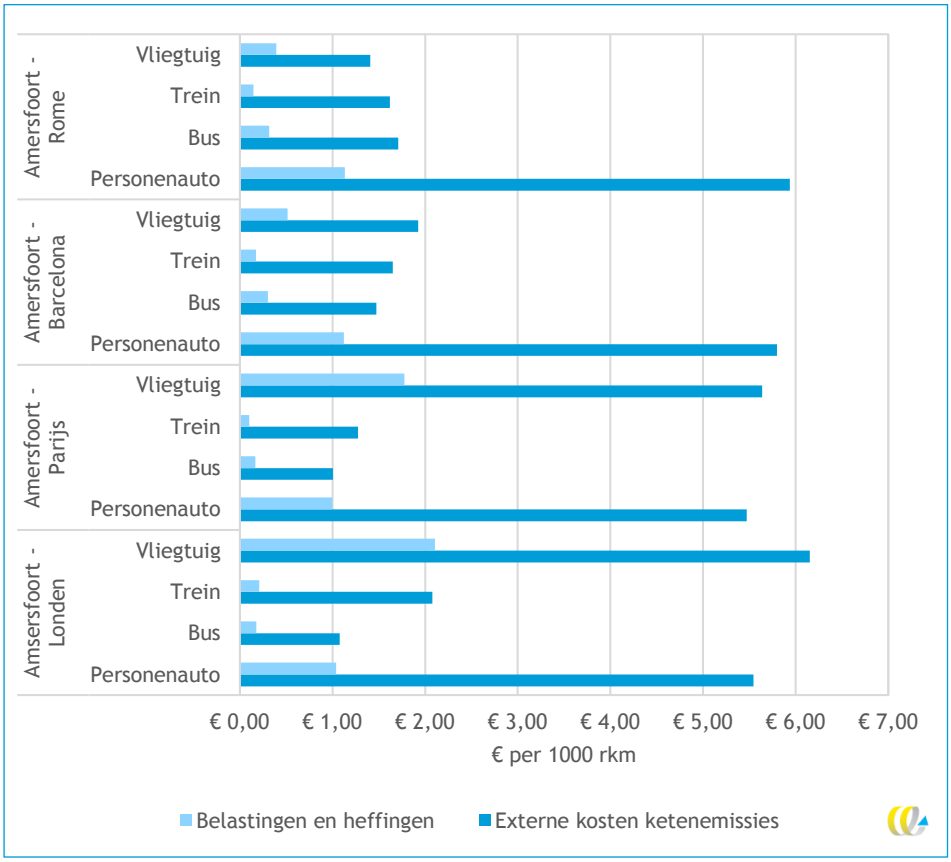
Figuur 27 geeft de hoogte van de belastingen/heffingen weer die kunnen worden gerelateerd aan de ketenemissies (excl. gebruiksfase). Bij vliegtuigen is de omvang van de opbrengsten van de belastingen/heffingen ca. 30% van de ketenemissies. Bij de trein ligt dit op ca. 10%, terwijl deze ratio bij de auto en de bus tussen de ratio's voor vliegtuig en trein inliggen. Het is goed om op te merken dat het hier om een globale analyse gaat, waarbij we bijvoorbeeld enkel de belangrijkste belastingen/heffingen hebben meegenomen. De resultaten dienen dan ook opgevat te worden als een eerste inschatting van de ordegrootte van de mate van internalisatie van de externe kosten van ketenemissies.

Deze internalisatiegraad is sterk gelieerd aan het aandeel van de emissies dat afkomstig is uit dieselverbruik. Dit komt door de significant hogere impliciete CO_2-prijs op diesel ten opzichte van andere energiedragers als elektriciteit of gas. Een groter aandeel van dieselverbruik in de ketenemissies leidt er dus toe dat een groter deel van de externe kosten van ketenemissies worden gedekt door opbrengsten van belastingen/heffingen.

Wanneer we de resultaten voor de vier voorbeeldreizen vergelijken, dan zie we wederom dat er vooral bij het vliegtuig duidelijke verschillen optreden tussen de korte en langere vluchten. Zoals ook in eerdere hoofdstukken toegelicht is dit het gevolg van het feit dat de opbrengsten van belastingen/heffingen gerelateerd aan de ketenemissies van de luchthaven bij langere vluchten over meer kilometers worden verdeeld, waardoor ze per reizigerskilometer lager uitpakken.

[24] SimaPro is een softwareprogramma voor de uitvoer van levenscyclusanalyses. Met behulp van deze software is het mogelijk om selecties van data uit de Ecoinvent-database te halen.

Figuur 27 - Belastingen/heffingen ten opzichte van externe kosten van ketenemissies

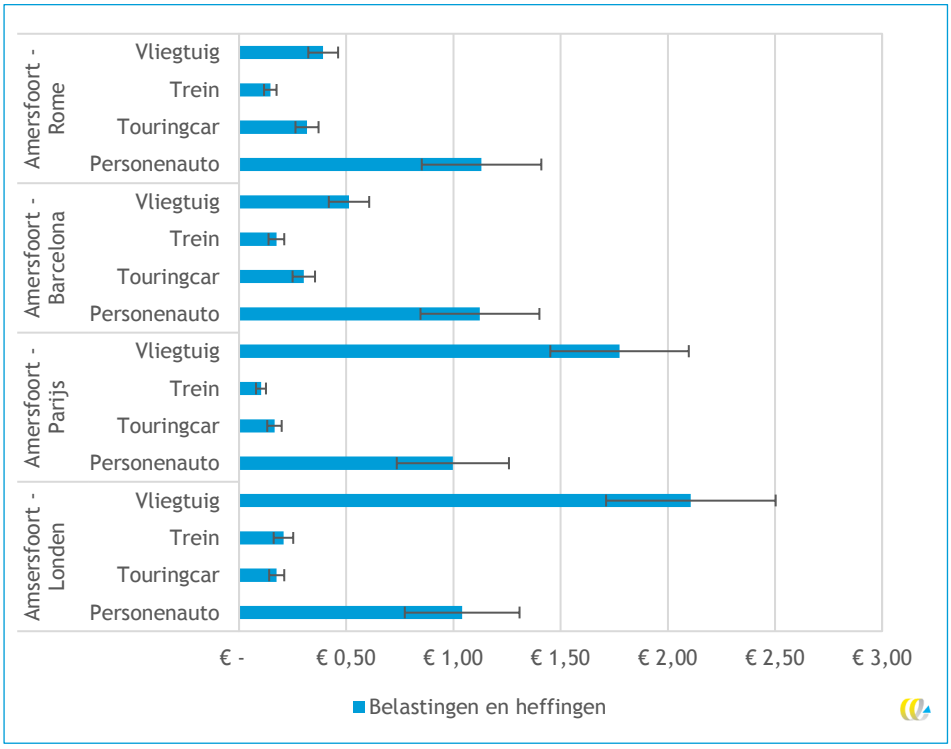


4.5 Gevoeligheidsanalyses

In Tabel 12 staan onder- en bovenwaarden voor de inschatting van de diesel gerelateerde emissies ten opzichte van de totale ketenemissies. We hebben een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd waarbij we hebben gerekend met deze onder- en bovenwaarden. Feitelijk gaan we er daarbij dus vanuit dat dieselverbruik meer/minder invloed heeft op de totale ketenemissies dan in de hoofdvariant.

De resultaten van deze gevoeligheidsanalyse zijn zichtbaar in Figuur 28. Duidelijk wordt dat het aandeel diesel in de totale ketenemissies een sterke invloed heeft op de opbrengsten van de belastingen/heffingen (gemiddeld genomen ca. 20%). Dit laat wederom het belang zien van de dieselaccijns in de beprijzing van ketenemissies.

Figuur 28 - Effect bandbreedte diesel op hoeveelheid belastingen en heffingen op ketenemissies



5 Overall resultaten voorbeeld-reizen

5.1 Inleiding

In de voorgaande hoofdstukken hebben we een inschatting gemaakt van de externe kosten van ketenemissies (exclusief de emissies in de gebruiksfase) en de omvang van de belastingen/heffingen gerelateerd aan deze emissies. Deze resultaten gebruiken we in dit hoofdstuk om een overall vergelijking van externe en infrastructuurkosten enerzijds en belastingen en heffingen anderzijds te maken voor de verschillende vervoerswijzen op de vier voorbeeldreizen. Naast de externe kosten van ketenemissies en de daaraan gerelateerde belastingen/heffingen nemen we hierbij ook de andere relevante externe en infrastructuurkosten en belastingen/heffingen mee, dat wil zeggen de kosten en belastingen/heffingen die zijn gerelateerd aan de gebruiksfase. Deze laatstgenoemde externe en infrastructuurkosten en belastingen/heffingen zijn gebaseerd op de eerdere studie (CE Delft, 2019) en geactualiseerd naar het jaar 2020.

In de volgende tekstbox is een overzicht gegeven van alle relevante kostenposten en belastingen/heffingen. Een uitgebreidere toelichting hierop kan worden gevonden in Bijlage F.

Overzicht externe kosten, infrastructuurkosten, belastingen en heffingen

In de vergelijkingen zoals we die in dit hoofdstuk maken worden de volgende externe en infrastructuurkosten meegenomen:

- Externe ongevalskosten
- Kosten van luchtvervuiling (gerelateerd aan gebruiksfase)
- Klimaatkosten (gerelateerd aan gebruiksfase)
- Kosten van geluid
- Kosten van emissies van brandstof- en elektriciteitsproductie
- Kosten van schade aan natuur en milieu
- Kosten van ketenemissies
- Infrastructuurkosten

De belastingen en heffingen die worden meegenomen zijn weergegeven in Tabel 13.

Tabel 13 - Overzicht belastingen en heffingen

Wegvervoer	Spoorvervoer	Luchtvaart
– Brandstofaccijns – Aanschafbelasting – Houderschapsbelasting – Assurantiebelasting – Tolheffingen (snelweg en stad) – Vignetten – Btw op transportbelastingen	– Elektriciteitsbelasting – Infrastructuurheffingen (= gebruiksvergoeding) – EU ETS – Btw op tickets en op voor- en natransport – Belastingen/heffingen gerelateerd aan ketenemissies	– Vliegbelasting – Luchthavengelden (incl. securitygelden) – Navigatieheffingen (terminal en routeheffing) – EU ETS – Btw op tickets en op voor- en natransport

— Btw op brandstof, aanschaf en onderhoud — Belastingen/heffingen gerelateerd aan ketenemissies		— Belastingen/heffingen gerelateerd aan ketenemissies

Zowel voor de externe en infrastructuurkosten als de belastingen en heffingen geldt dat de scope gelijk is aan die in 'De prijs van een vliegreis', met uitzondering van de kosten en belastingen/heffingen gerelateerd aan de ketenemissies.

De analyse zoals die wordt uitgevoerd in dit hoofdstuk kan gezien worden als een update en uitbreiding van de vergelijkende analyse die voor dezelfde voorbeeldreizen is uitgevoerd in de studie 'De prijs van een vliegreis' (CE Delft, 2019). De uitbreiding heeft betrekking op het meenemen van de externe kosten van ketenemissies en de daaraan gerelateerde belastingen/heffingen (zie de voorgaande hoofdstukken). De update houdt in dat de overige externe en infrastructuurkosten en belastingen/heffingen zijn vastgesteld voor 2020, terwijl dit in de vorige studie voor 2016 was gedaan (de wijze waarop deze actualisatie is uitgevoerd is toegelicht in Bijlage F).

In de volgende paragrafen geven we allereerst een toelichting op welke wijze we de vergelijking van externe en infrastructuurkosten enerzijds en belastingen en heffingen anderzijds maken (zie Paragraaf 5.2). In Paragraaf 5.3 worden dan vervolgens de resultaten per voorbeeldreis in detail besproken.

5.2 Vergelijking van kosten met belastingen/heffingen

De vergelijking van de externe en infrastructuurkosten enerzijds en de belastingen/heffingen anderzijds heeft als doel om te kijken hoe de verschillende vervoerswijzen zich verhouden in de mate waarin de externe en infrastructuurkosten die ze veroorzaken gedekt worden door de belastingen en heffingen[25]. Of in andere woorden, in hoeverre de externe en infrastructuurkosten van de verschillende vervoerswijzen worden geïnternaliseerd.

Evenals in CE Delft (2019), onderscheiden we bij de vergelijking van de externe en infrastructuurkosten met de belastingen en heffingen we twee perspectieven:

— *Een vergelijking van alle externe en infrastructuurkosten met alle transportbelastingen en -heffingen*; dit perspectief biedt inzicht in hoeverre de totale externe en infrastructuurkosten (inclusief de vaste kosten) worden gedekt door de geheven belastingen en heffingen. Daarmee laat het zien in hoeverre er wordt voldaan aan het principe van de vervuiler/gebruiker betaalt. In dit perspectief nemen we enkel de btw mee die wordt geheven over tickets, transportbelastingen en -heffingen, omdat de overige btw gezien dient te worden als een algemene belasting (zie Bijlage F.3). Wel maken we in de overzichten van de totale externe en infrastructuurkosten en belastingen/heffingen inzichtelijk wat de totale btw voor de betreffende reis is.

[25] Idealiter zou de mate waarin zowel de externe als de infrastructuurkosten gedekt worden door specifieke belastingen en heffingen in kaart worden gebracht. Echter, omdat het voor belastingen vaak niet mogelijk is om eenduidig vast te stellen of je die zou moeten toekennen aan het betalen voor infrastructuur of het internaliseren van externe kosten, maken we dit onderscheid niet in deze studie.

— *Een vergelijking van de variabele externe infrastructuurkosten met alle variabele transportbelastingen en -heffingen;* in dit perspectief nemen we de vaste kosten (vaste infrastructuurkosten, kosten van schade aan milieu en natuur, vaste deel van de kosten van ketenemissies) en belastingen (aanschafbelasting personenauto's, MRB-wegvoertuigen, assurantiebelastingen, belastingen/heffingen gerelateerd aan vaste deel van de ketenemissies) niet mee. De vaste kosten (en ook belastingen/heffingen) kunnen gezien worden als historische kosten (oftewel 'sunk costs'), die niet meer veranderen als mensen meer of minder gaan reizen. Vooral voor beleidsontwikkeling waarbij geen aanleg van nieuwe infrastructuur is voorzien (bijvoorbeeld beleid gericht op het intensiever benutten van bestaande infrastructuur), biedt dit perspectief nuttige inzichten. In dit perspectief worden wordt enkel de btw die wordt geheven over variabele belastingen/heffingen (bijv. de brandstofaccijns) meegenomen in de analyse.

5.3 Resultaten voorbeeldreizen

In deze paragraaf presenteren we de resultaten voor de vier verschillende voorbeeldreizen. We willen hier benadrukken dat de analyse is uitgevoerd voor 2020. De hoogte van de externe en infrastructuurkosten, de belastingen en heffingen en de ratio van belastingen/heffingen en kosten kunnen de komende jaren gaan veranderen. Dit kan enerzijds doordat de kosten in omvang toe- of afnemen (bijvoorbeeld door een verschoning van het wagenpark), maar ook doordat de hoogte van de belastingen en heffingen veranderen[26].

Bij de interpretatie van de resultaten zoals die in deze paragraaf worden gepresenteerd dient ook in gedachten gehouden te worden dat de analyses zijn uitgevoerd voor specifieke referentievoertuigen, die niet noodzakelijkerwijs overeenkomen met voertuigen die in soortgelijke analyses zijn gebruikt in andere studies. Een vergelijking van de resultaten van deze studie met die in andere studies dient dan ook met de nodige zorgvuldigheid gemaakt te worden[27].

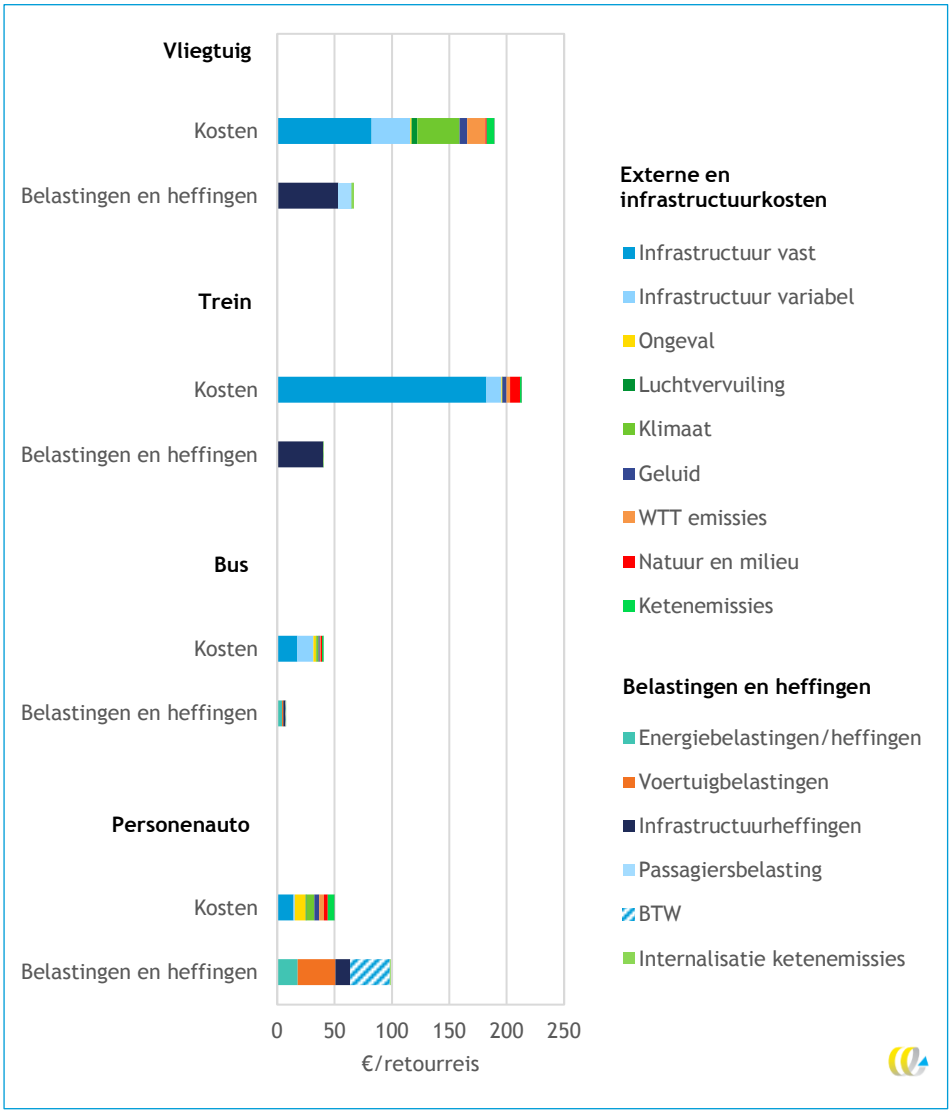
5.3.1 Amersfoort – Parijs

Een overzicht van de te betalen belastingen/heffingen en de gemaakte externe en infrastructuurkosten voor de verschillende vervoerswijzen op de route Amersfoort – Parijs is weergegeven in Figuur 29. De hoogste maatschappelijke kosten treden op bij het vervoer per trein en per vliegtuig. Voor een belangrijk deel bestaan deze kosten uit infrastructuurkosten. Vooral bij de trein zijn de infrastructuurkosten, en dan vooral de vaste component, relatief groot: 86% van de totale externe en infrastructuurkosten bestaan bij de trein uit vaste infrastructuurkosten. Dit is het gevolg van de relatieve hoge kosten om de (hogesnelheids)spoorinfrastructuur aan te leggen, in combinatie met de beperkte benutting van dit spoor (vooral in Nederland en België), waardoor de kosten per treinkilometer hoog uitvallen (CE Delft, et al., 2019d).

[26] Dit laatste geldt bijvoorbeeld voor de luchtvaart, waar per 1 januari 2021 in Nederland een vliegbelasting is ingevoerd. Hoewel het effect van deze vliegbelasting buiten de scope van het onderzoek valt, hebben we in voetnoot 28 voor de voorbeeldreis Amersfoort – Parijs inzichtelijk gemaakt wat de invloed van de vliegbelasting op de ratio van belastingen/heffingen en kosten is.

[27] De resultaten kunnen uiteraard wel worden vergeleken met die in (CE Delft, 2019), waar immers van dezelfde voorbeeldreizen en referentievoertuigen is uitgegaan.

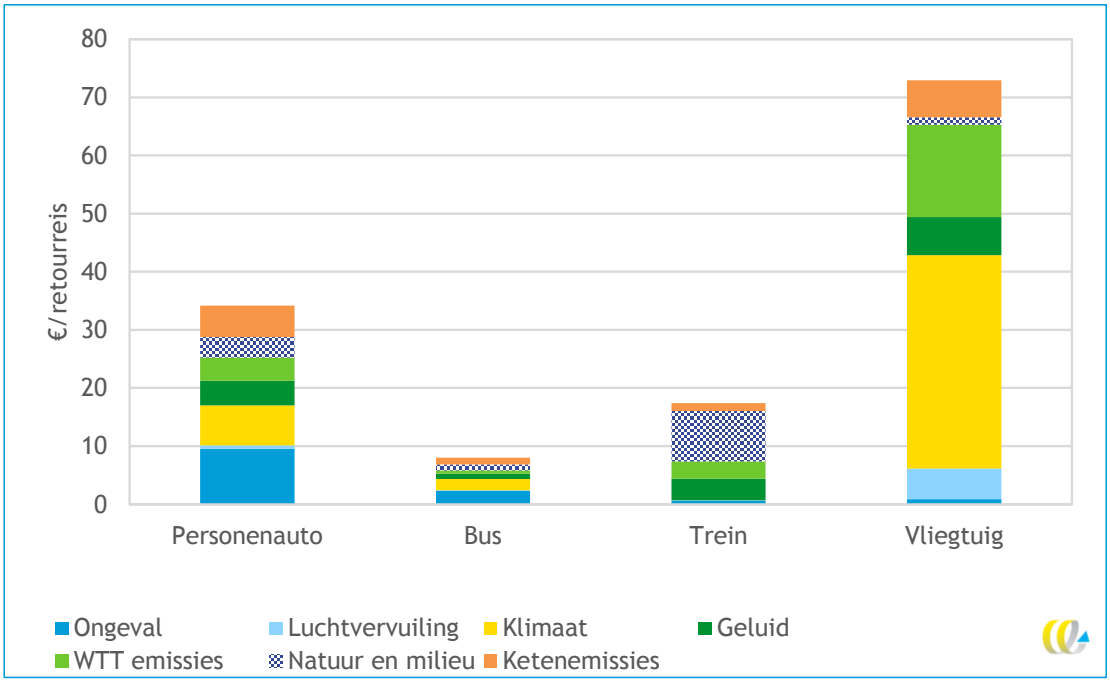
Figuur 29 - Overzicht te betalen belastingen/heffingen en gemaakte externe en infrastructuurkosten voor de verschillende vervoerswijzen op de route Amersfoort - Parijs



Wanneer we inzoomen op de externe kosten (zie ook Figuur 30), dan zien we dat de bus en trein aanzienlijk lagere externe kosten hebben dan het vliegtuig (en ook de auto). Dit geldt voor de externe kosten in het algemeen maar ook voor ketenemissies. Qua hoogte nemen de ketenemissies een klein maar significant aandeel ten opzichte van de totale externe kosten in op de reis. Voor personenauto's en bussen zijn ketenemissies verantwoordelijk voor circa 15% van de totale externe kosten. Voor treinen en vliegtuigen ligt dit percentage lager op circa 8% voor beide vervoerswijzen.

De toevoeging van de ketenemissies verandert de algemene situatie qua externe kosten op deze reis niet. Het hoge brandstofverbruik van vliegtuigen leidt ook tot relatief hoge kosten van klimaat en emissies van brandstofproductie (de zogenaamde Well-to-Tank (WTT)-emissies), terwijl de keuze voor het vliegtuig ook leidt tot significante luchtvervuilings- en geluidskosten. De externe kosten van de auto liggen op de reis naar Parijs meer dan de helft lager dan bij een vliegreis.

Figuur 30 - Externe kosten voor de verschillende vervoerswijzen op de route Amersfoort - Parijs



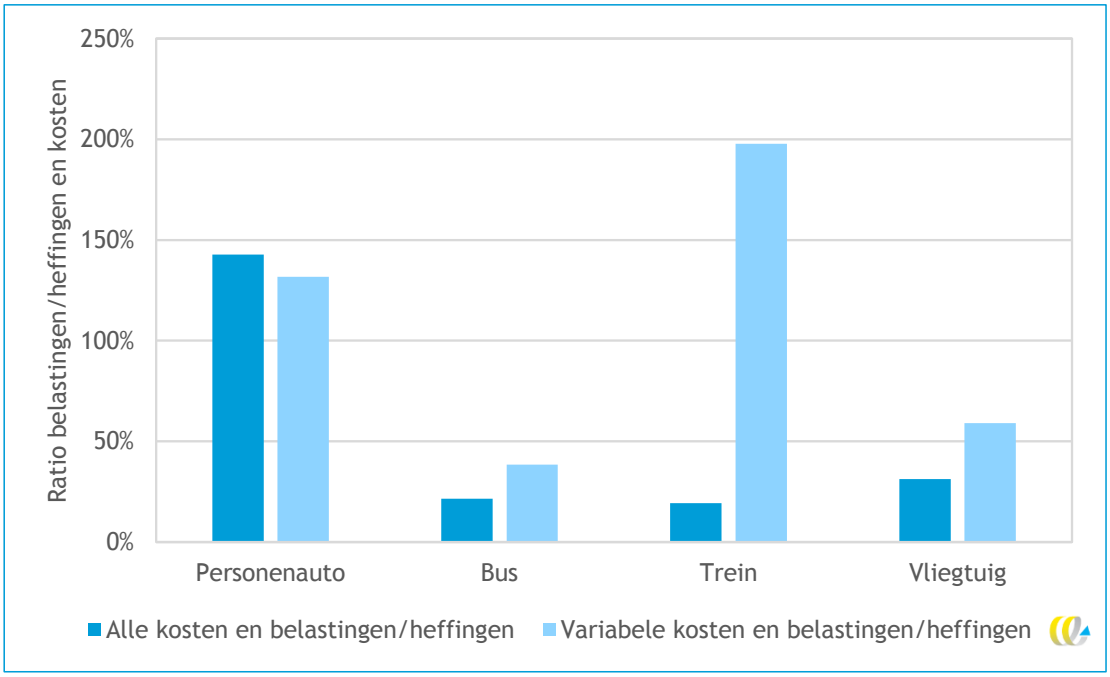
In Figuur 29 is ook een overzicht gegeven van de belastingen en heffingen die betaald moeten worden voor de verschillende vervoerswijzen voor een reis Amersfoort – Parijs. Deze liggen het hoogst bij de auto en het vliegtuig. Bij het vliegtuig gaat het dan vooral om de luchthavengelden en de Franse vliegbelasting. Bij de auto zijn de voertuigbelastingen en btw-heffingen vooral van belang. Opvallend zijn ook de relatief lage belastingen/heffingen voor de bus (per reiziger), wat onder andere het gevolg is van de relatief beperkte voertuig-belastingen die worden geheven voor deze vervoerswijzen. Voor alle vervoerswijzen geldt dat de bijdrage van belastingen en heffingen op ketenemissies klein is. Voor de bus is deze nog het hoogst met een aandeel van 5%, gevolgd door het vliegtuig met 4%. Het aandeel van voor personenauto's en treinen ligt op 1%. Andere belastingen en heffingen hebben dus een duidelijk groter aandeel.

De verhouding tussen enerzijds de belastingen/heffingen en anderzijds de externe en infrastructuurkosten (uitgedrukt in een ratio) is voor de verschillende vervoerswijzen weergegeven in Figuur 31, waarbij we onderscheid maken tussen de twee perspectieven zoals gepresenteerd in Paragraaf 5.2. Wanneer we alle kosten en belastingen/heffingen meenemen, dan zijn voor de auto de belastingen/heffingen hoger dan de kosten.
Dit impliceert dat voor deze specifieke reis voor de auto de externe en infrastructuurkosten geïnternaliseerd worden door de relevante belastingen en heffingen. Bij het vliegtuig wordt 31% van de totale kosten gedekt door belastingen/heffingen[28], terwijl dit bij de trein en de bus 20 en 26% is. Wanneer we alleen de variabele kosten en belastingen/heffingen meenemen, dan veranderen vooral de resultaten voor de trein sterk. De variabele belastingen/heffingen liggen bij de trein op dit traject ca. twee keer zo hoog als de variabele kosten. Bij het vliegtuig worden ca. 59% van de variabele kosten gedekt door de

[28] Wanneer we voor het vliegtuig ook de op 1 januari 2021 ingevoerde Nederlandse vliegbelasting zouden meenemen (€ 7,845 per persoon per vlucht), dan stijgt de ratio voor alle belastingen/heffingen en kosten van 31 naar 35%. De ratio van de variabele belastingen/heffingen en kosten stijgt in deze situatie van 59 naar 67%.

belastingen/heffingen, terwijl dit bij de auto 132% is. Tot slot, bij de bus zijn de belastingen/heffingen gelijk aan 35% van de externe en infrastructuurkosten.

Figuur 31 - Ratio belastingen/heffingen en kosten voor de verschillende vervoerswijzen



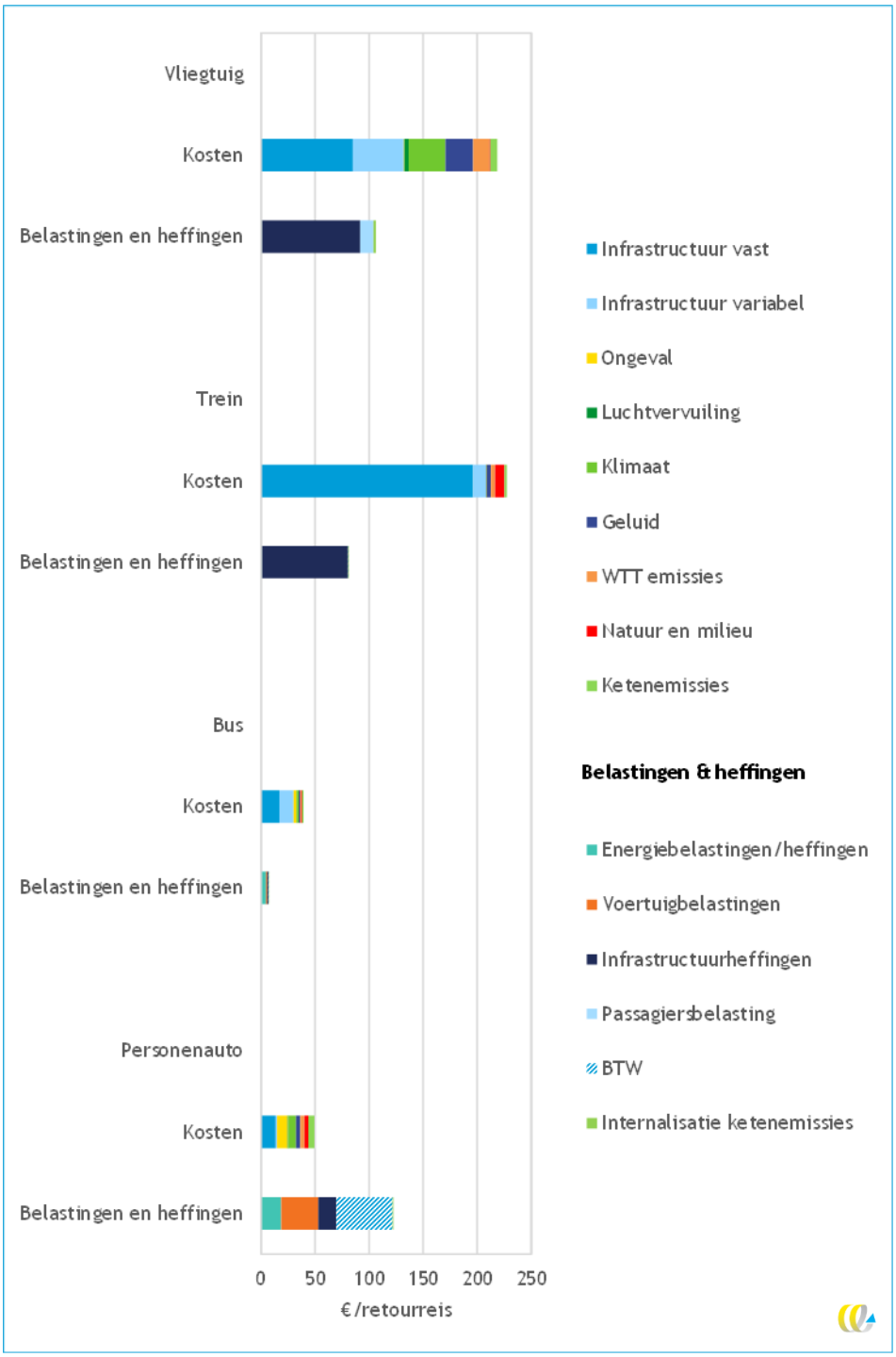
Noot: Bij de bepaling van de ratio's is de btw niet meegenomen, met uitzondering van de btw die wordt geheven over andere transportbelastingen. Zie Paragraaf 5.2 voor een nadere toelichting op deze werkwijze.

5.3.2 Amersfoort - Londen

Een overzicht van de te betalen belastingen/heffingen en de gemaakte externe en infrastructuurkosten voor de verschillende vervoerswijzen op de route Amersfoort - Londen is weergegeven in Figuur 32. In grote lijnen zijn de resultaten vergelijkbaar met die voor de route Amersfoort - Parijs, ook wat betreft de rol van de externe kosten van ketenemissies in de vergelijking. Een belangrijk verschil bij de vliegreis zijn de relatief hoge geluidskosten, die vooral het gevolg zijn van het hoge aantal geluidgehinderde omwonenden van London Heathrow. Daarnaast zijn ook de betaalde belastingen/heffingen voor de vliegreis significant hoger dan op de route Amersfoort - Parijs, wat vooral het gevolg is van de hogere luchthavengelden in Londen.

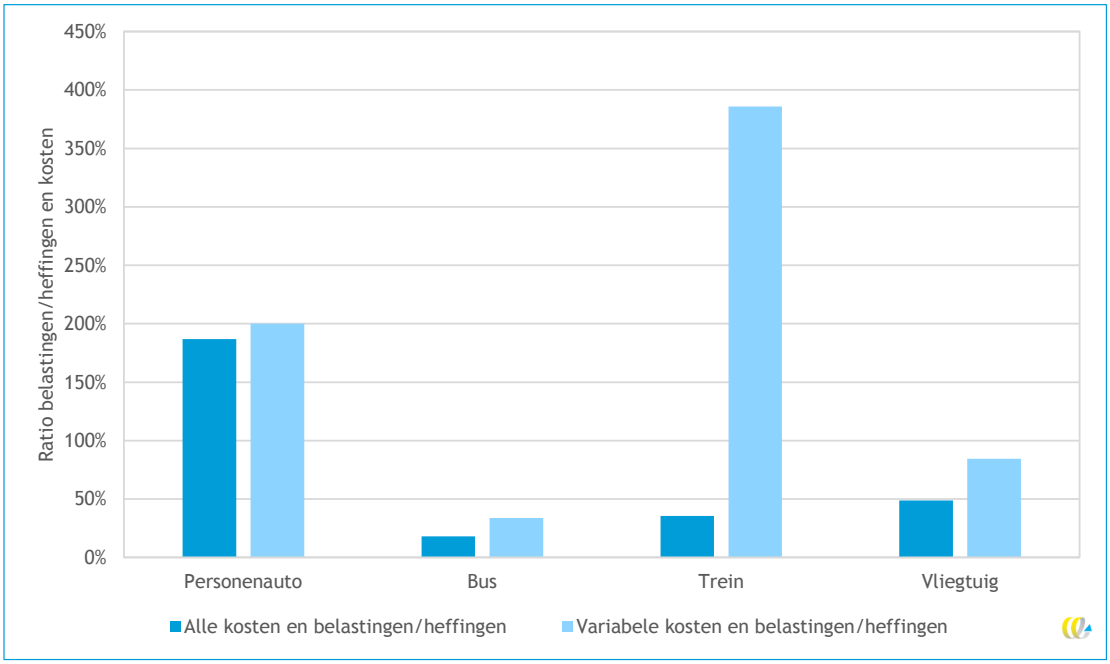
Wanneer we specifiek kijken naar het aandeel van de externe kosten van ketenemissies in de totale externe kosten (excl. infrastructuurkosten), dan zien we dat die bij de auto het grootst is (16%), gevolgd door de bus (14%), de trein (12%), en het vliegtuig (7%).

Figuur 32 -Overzicht te betalen belastingen/heffingen en gemaakte externe en infrastructuurkosten voor de verschillende vervoerswijzen op de route Amersfoort - Londen



Ook de ratio's van belastingen/heffingen en kosten zijn voor de route Amersfoort – Londen grotendeels vergelijkbaar met die voor Amersfoort – Parijs (zie Figuur 33). Bij de vliegreis ligt de ratio voor Amersfoort – Londen hoger, wat het gevolg is van de hogere luchthavengelden voor een Embraer 170 (het referentievliegtuig voor deze twee reizen) in Londen in vergelijking met Parijs.

Figuur 33 - Ratio belastingen/heffingen en kosten voor de verschillende vervoerswijzen



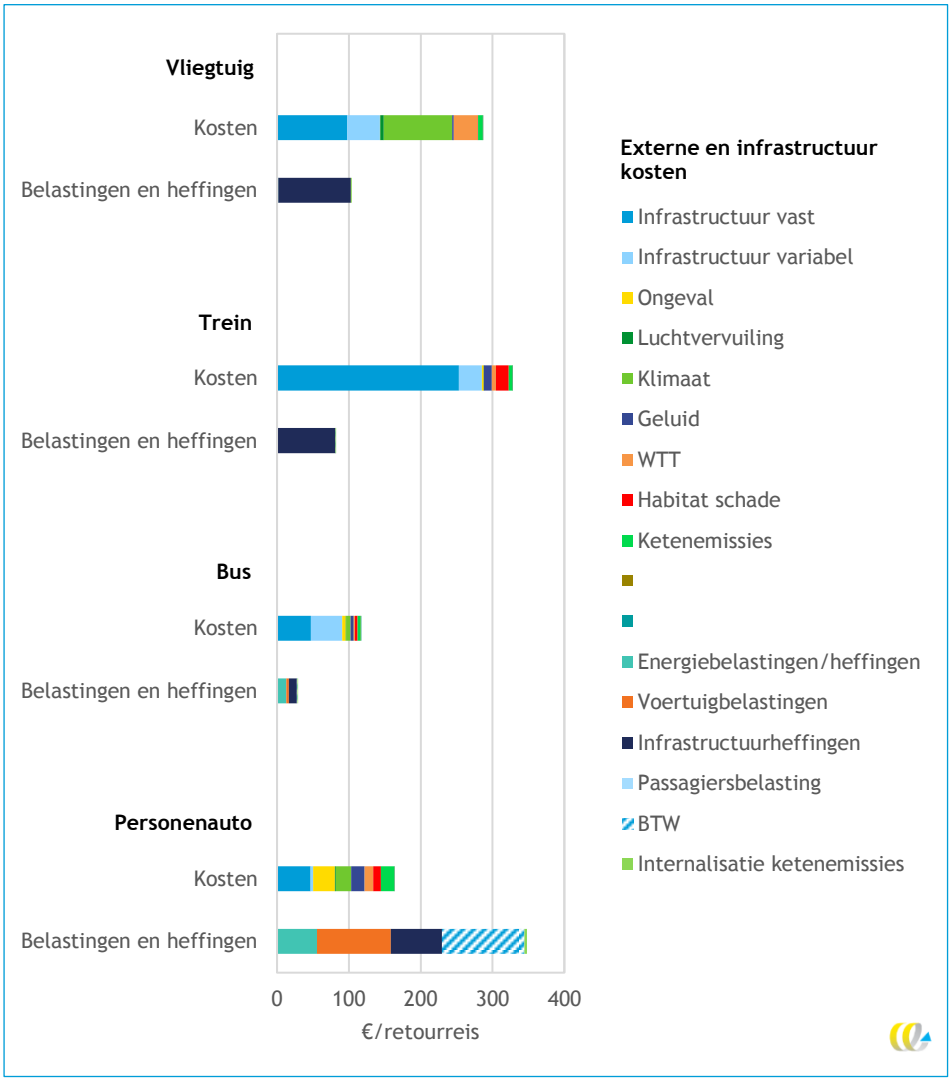
Noot: Bij de bepaling van de ratio's is de btw niet meegenomen, met uitzondering van de btw die wordt geheven over andere transportbelastingen. Zie Paragraaf 5.2 voor een nadere toelichting op deze werkwijze.

5.3.3 Amersfoort – Barcelona

De externe en infrastructuurkosten alsmede de belastingen en heffingen voor de verschillende vervoerswijzen voor een retour Amersfoort – Barcelona staan weergegeven in Figuur 34. Voor een deel zijn deze resultaten vergelijkbaar met de resultaten die we vonden voor de korte afstandsreizen. Zo zijn de totale externe en infrastructuurkosten ook hier weer het hoogst voor de trein, gevolgd bij het vliegtuig. Laten we echter de (vaste) infrastructuurkosten buiten beschouwing, dan zijn de kosten voor het vliegtuig het hoogst, gevolgd door de auto. Een andere overeenkomst met de resultaten voor de korte reisafstanden is dat de infrastructuurkosten bij alle vervoerswijzen de grootste kostenpost vormt.

Ook qua belastingen en heffingen zijn de resultaten redelijk vergelijkbaar met de kortere reizen. De meeste belastingen en heffingen worden betaald voor de autorit, gevolgd door het vliegtuig. Ook de verdeling over de verschillende typen belastingen/heffingen is vergelijkbaar met de situatie voor de kortere reizen. Voor de luchtvaart bestaan de belastingen en heffingen vooral uit luchthavengelden.

Figuur 34 - Overzicht te betalen belastingen/heffingen en gemaakte externe en infrastructuurkosten voor de verschillende vervoerswijzen op de route Amersfoort - Barcelona



Naast overeenkomsten zijn er echter ook verschillen zichtbaar qua externe en infrastructuurkosten tussen de retourreis naar Barcelona en de kortere reizen naar Parijs en Londen:

- Het aandeel van de infrastructuurkosten neemt bij de luchtvaart af. De reden hiervoor is dat de kosten van puntinfrastructuur (zoals een luchthaven) niet toeneemt als de reisafstand toeneemt. Dit in tegenstelling tot lijninfrastructuur (wegen, spoorwegen), waar de kosten van infrastructuur toenemen als de reisafstand stijgt.
- Het aandeel van lokale externe effecten (geluid, luchtkwaliteit) neemt bij de luchtvaart af, volgens dezelfde redenering als bij infrastructuurkosten. Hetzelfde geldt voor de externe kosten van ketenemissies.

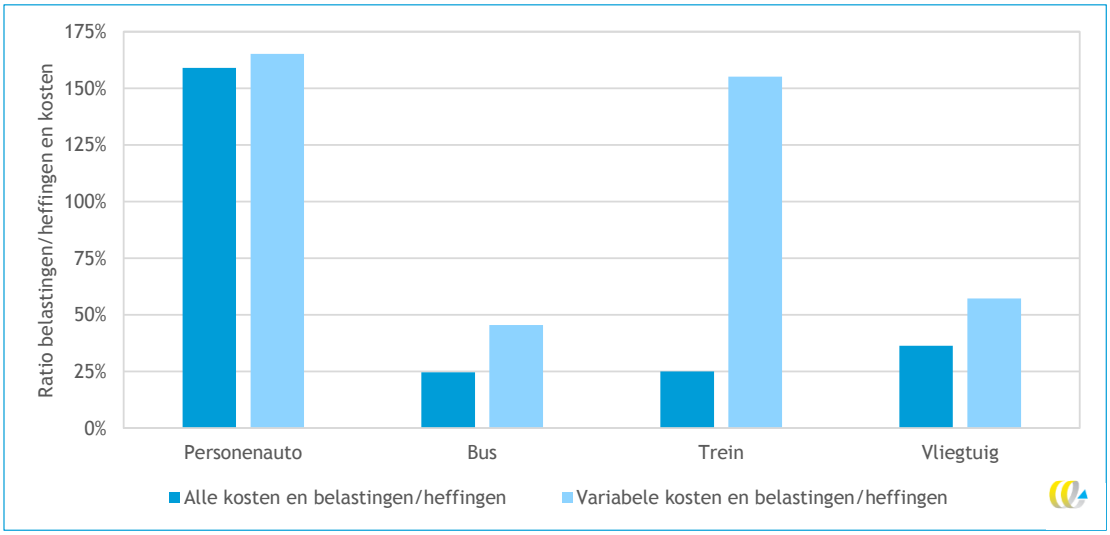
— Het aandeel van de globale externe effecten (klimaat, emissies van brandstofproductie) neemt af, doordat deze niet lineair toenemen met de reisafstand[29]. De absolute omvang van deze kosten neemt overigens wel toe, evenals het aandeel in de totale kosten.

Als gevolg van de bovenstaande veranderingen is het verschil in externe en infrastructuurkosten tussen de auto en het vliegtuig kleiner dan bij de reizen over kortere afstanden.

De rol van de externe kosten van ketenemissies is bij deze voorbeeldreis over het algemeen wat groter dan bij de reizen naar Parijs en Londen. Het aandeel in de totale externe kosten is voor de personenauto gelijk aan 20%, voor de bus aan 23% en voor de trein aan 14%. Enkel bij het vliegtuig valt het aandeel van de externe kosten van ketenemissies in de totale externe kosten wat lager uit, namelijk 5%. De ketenemissies van vliegtuigen zijn vooral vaste kosten, waardoor de langere vluchtafstand zorgt voor een relatief lager aandeel.

De vergelijking van kosten en belastingen/heffingen (zie Figuur 35) laten een vergelijkbaar patroon zien als voor de reizen naar Londen en Parijs. Bij de auto zijn de belastingen/heffingen die betaald worden hoger dan de kosten, terwijl dit bij de trein alleen het geval is wanneer er naar variabele kosten en heffingen wordt gekeken. Bij de vliegreis zijn de kosten in beide perspectieven hoger dan de betaalde heffingen (en deze ratio's zijn ook iets kleiner dan bij de reizen naar Londen en Parijs).

Figuur 35 - Ratio belastingen/heffingen en kosten voor de verschillende vervoerswijzen



5.3.4 Amersfoort - Rome

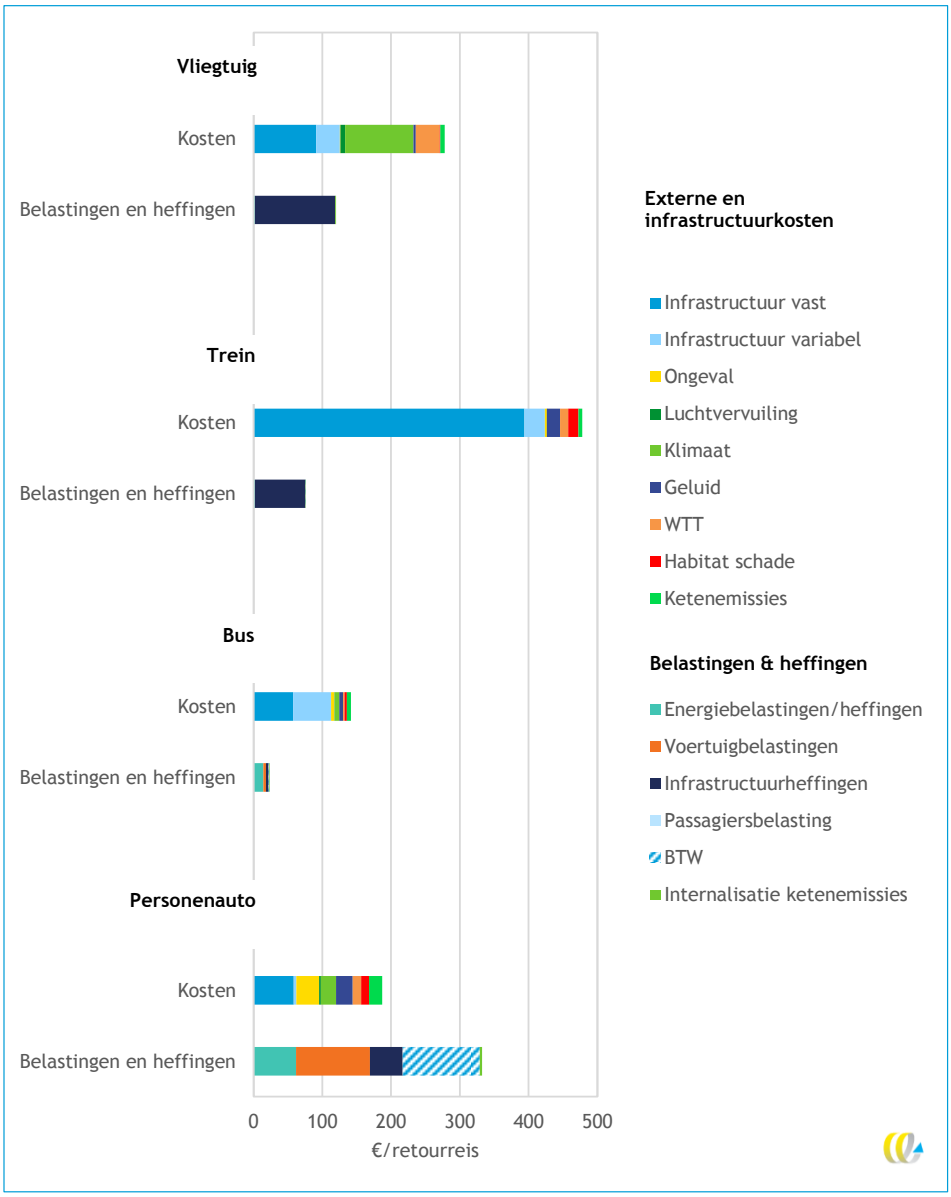
Zowel de externe en infrastructuurkosten als de belastingen en heffingen op de reis Amersfoort – Rome laten een vergelijkbaar patroon zien als bij de reis naar Barcelona (zie Figuur 36). De belangrijkste verschillen tussen beide reizen komen naar voren bij de vliegreis. Doordat de vlucht naar Rome langer is dan naar Barcelona neemt het aandeel van de niet-afstandsafhankelijke kostenposten (infrastructuur, geluid, luchtvervuiling, ketenemissies) in de totale kosten af, terwijl het belang van de afstandsafhankelijke kostenposten (vooral klimaat en WTT-emissies) juist toenemen. Daarnaast liggen de

[29] Het brandstofverbruik (en dus ook de klimaatemissies) bij vliegtuigen ligt tijdens de LTO-fase aanmerkelijk hoger dan tijdens de cruisefase.

infrastructuurkosten voor de luchthaven in Rome lager dan in Barcelona, waardoor ook de absolute omvang van de infrastructuurkosten voor de vliegreis lager uitvallen.

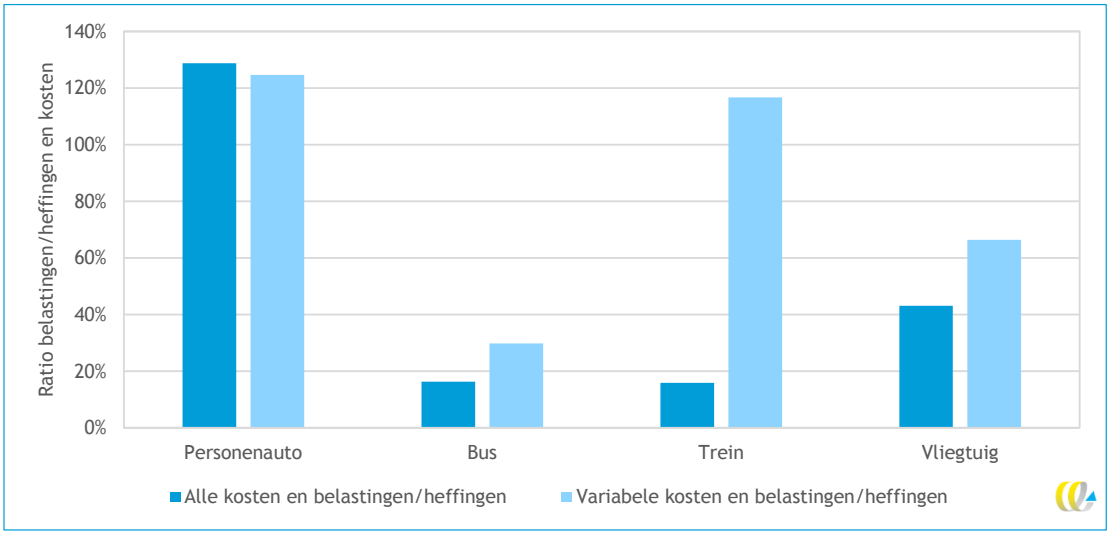
Het aandeel van de externe kosten van ketenemissies in de totale externe kosten liggen bij deze reis op 15% voor de auto, 20% voor de bus, 10% voor de trein en 4% voor het vliegtuig.

Figuur 36 -Overzicht te betalen belastingen/heffingen en gemaakte externe en infrastructuurkosten voor de verschillende vervoerswijzen op de route Amersfoort - Rome



De lagere infrastructuurkosten voor de luchthaven in Rome (in vergelijking tot Barcelona) leiden er ook toe dat de ratio van kosten en belastingen/heffingen voor de reis naar Rome voor de vliegreis iets hoger uitvalt dan voor de reis naar Barcelona. Voor de overige vervoerswijzen vallen de ratio's daarentegen net iets lager uit Figuur 37).

Figuur 37 - Ratio belastingen/heffingen en kosten voor de verschillende vervoerswijzen



5.4 Vergelijking resultaten met 'De prijs van een vliegreis'

Zoals aangegeven in Paragraaf 5.1 vormt de vergelijking zoals we die in dit hoofdstuk hebben uitgevoerd een actualisatie en verbreding van de vergelijking zoals die in de studie 'De prijs van een vliegreis' is gemaakt. In deze paragraaf vergelijken we de resultaten van beide studies. Hiertoe hebben we de ratio's van belastingen/heffingen en kosten naast elkaar gezet in Tabel 14 (totale kosten variant) en Tabel 15 (variabele kosten variant). Daarbij verwijzen de waarden voor 2020 naar deze studie en de waarden voor 2016 naar de vorige studie.

Tabel 14 - Vergelijking van de ratio van belastingen/heffingen en kosten voor de totale kosten variant

	Vliegtuig		Trein		Bus		Auto	
	2016	2020	2016	2020	2016	2020	2016	2020
Amersfoort – Parijs	43%	35%	19%	19%	16%	18%	144%	143%
Amersfoort – Londen	66%	49%	23%	36%	15%	18%	159%	187%
Amersfoort – Barcelona	42%	36%	22%	25%	24%	25%	163%	159%
Amersfoort - Rome	57%	43%	19%	16%	17%	16%	139%	129%

Tabel 15 - Vergelijking van de ratio van belastingen/heffingen en kosten voor de variabele kosten variant

	Vliegtuig		Trein		Bus		Auto	
	2016	2020	2016	2020	2016	2020	2016	2020
Amersfoort – Parijs	79%	68%	196%	196%	35%	34%	144%	132%
Amersfoort – Londen	111%	84%	248%	386%	32%	34%	160%	200%
Amersfoort – Barcelona	65%	57%	135%	155%	46%	46%	179%	165%
Amersfoort - Rome	87%	66%	138%	117%	32%	30%	153%	125%

Over het algemeen zijn de verschillen in de resultaten van beide studies klein. Ondanks het toevoegen van de externe kosten van ketenemissies, vallen bij het vliegtuig de ratio's in de huidige studie lager uit dan bij de vorige studie. De verklaring hiervoor is dat op veel luchthavens de luchthavengelden zijn gedaald. Bij de auto en de bus leidt het meenemen van de externe kosten van ketenemissies soms wel, maar soms ook niet tot lagere ratio's. Stijgende belastingen/heffingen vormen een verklaring voor het de laatste bevinding.
Voor de trein geldt hetzelfde als voor de bus en de auto, met uitzondering van de reis naar Londen. Voor deze reis zien we dat de ratio's aanzienlijk zijn gestegen ten opzichte van de vorige studie, wat te verklaren valt doordat in deze studie een specifieke infrastructuur-heffing voor de hogesnelheidstrein tussen Parijs en Londen is meegenomen (die nog ontbrak in de vorige studie).

6 Conclusies

6.1 Verkenning van de externe kosten van ketenemissies

6.1.1 Overzicht externe kosten van ketenemissies

De analyses zoals uitgevoerd in deze studie tonen aan dat de externe kosten van ketenemissies gemiddeld genomen het hoogst liggen bij de personenauto, waar we uitkomen op € 5 tot € 6 per 1.000 reizigerskilometer. Deze kosten worden overtroffen door vliegtuigen die worden ingezet op korte vluchten (ca. € 7 per 1.000 reizigerskilometer). Dit is vooral omdat de kosten van vaste infrastructuur gerelateerde ketenemissies relatief zwaar mee tellen voor deze vluchten. Op de langere vluchten (naar Rome en Barcelona) zijn de kosten voor het vliegtuig per reizigerskilometer echter aanzienlijk lager. Ze zijn dan van dezelfde ordegrootte als bij de bus en de trein (€ 1 - € 2 per 1.000 reizigerskilometer).

Waar er bij het vliegtuig grote verschillen bestaan in de omvang van de externe kosten van ketenemissies tussen de voorbeeldreizen, daar zijn deze verschillen geringer bij de andere modaliteiten. Ze zijn er echter wel. Zo zijn voor de auto en de bus de externe kosten van ketenemissies het hoogst voor de reis naar Rome, wat vooral het gevolg is van het meer geaccidenteerde terrein (en dus een hoger aandeel tunnels en bruggen) waar de route van die reis doorheen loopt. Bij de trein zijn de ketenemissies daarentegen het hoogst op de reis naar Londen, wat vooral het gevolg is van de hoge ketenemissies die samenhangen met de Eurotunnel. Deze resultaten laten dan ook duidelijk zien dat de specifieke kenmerken van de reis een significante invloed heeft op de omvang van de externe kosten van ketenemissies.

Ook de locatie waar de emissies worden uitgestoten zijn van invloed op de omvang van de externe kosten van ketenemissies. Zo hebben bij de bus en de trein de luchtvervuilende emissies die worden uitgestoten tijdens de aanleg en het onderhoud van de infrastructuur een belangrijk aandeel in de ketenemissies. Doordat deze emissies voor het grootste deel worden uitgestoten in de (relatief welvarende) landen op de routes van de voorbeeldreizen, worden deze emissies gewaardeerd tegen relatief hoge milieuprijzen. Dit resulteert voor deze vervoerswijzen dus in relatief hoge externe kosten van luchtvervuilende ketenemissies. Bij de personenauto, daarentegen, vindt het grootste deel van de luchtvervuilende emissies plaats bij de productie van het voertuig en dus vaak in minder ontwikkelde landen (Oost-Europa, China). Voor de waardering van deze ketenemissies worden dan ook lagere milieuprijzen gebruikt, waardoor het aandeel van de luchtvervuilende emissies in de externe kosten van ketenemissies bij de auto relatief lager is.

Tot slot, voor de meeste vervoerswijzen zijn de infrastructuur gerelateerde ketenemissies dominant in de externe kosten. Dit geldt echter niet voor de personenauto, waarvoor de voertuig gerelateerde ketenemissies het grootste aandeel in de externe kosten hebben. Dit komt door het relatief lage aantal reizigers per auto en de gemiddeld kortere levensduur (in termen van kilometrages) van personenauto's, waardoor de ketenemissies per reizigerskilometer relatief hoog uitvallen.

6.1.2 Aandeel ketenemissies in de totale externe kosten van mobiliteit

De door ons uitgevoerde analyses voor de voorbeeldreizen laten zien dat de externe kosten van ketenemissies een substantiële rol lijken in te nemen in de totale externe kosten van mobiliteit. Bij personenauto's en bussen zijn deze externe kosten verantwoordelijk voor ca. 15-20% van de totale externe kosten (excl. congestiekosten)[30], terwijl dit bij de trein op 8-14% ligt. Bij luchtvaart is het aandeel van de externe kosten van ketenemissies op korte afstanden ook substantieel (7-9%), maar neemt dit aandeel af als de vluchtafstand toeneemt (4-5%).

In hoeverre de bijdrage van de ketenemissies in de totale externe kosten verandert als er wordt gekeken naar andere typen reizen (bijvoorbeeld in de stedelijke omgeving) is op basis van dit onderzoek niet te zeggen. Nader onderzoek op dit punt is daarvoor nodig.

Voor het weg- en spoorvervoer zou het aandeel van ketenemissie in de totale externe kosten in de toekomst wel eens verder kunnen stijgen. Door de instroom van nulemissie wegvoertuigen en een verdere vergroening van de elektriciteitsproductie nemen naar verwachting de externe kosten van emissies in de gebruiksfase af bij deze vervoerswijzen. En daarmee zou het relatieve belang van de ketenemissies kunnen gaan toenemen.

6.1.3 Internalisatie van de externe kosten van ketenemissies

De externe kosten van ketenemissies worden momenteel voor een beperkt deel geïnternaliseerd door belastingen en heffingen[31]. In deze studie hebben we bekeken wat de omvang is van de belastingen/heffingen op de productie van energie-intensieve materialen en van de accijns op diesel (vooral gebruikt door mobiele werktuigen bij de aanleg en het onderhoud van infrastructuur), en hoe die zich verhouden tot de externe kosten van ketenemissies. Bij luchtvaart blijkt ca. 30% van de kosten gedekt te worden door belastingen/heffingen, bij personenauto's en bussen om 15-20% en bij de trein om ca. 10%. Het gaat hierbij wel om een grove inschatting, die wordt gekenmerkt door een hoge mate van onzekerheid. Echter, deze inschatting geeft wel een eerste inschatting van de ordegrootte van deze ratio.

De belangrijkste bijdrage aan de internalisatie van de externe kosten van ketenemissies is weggelegd voor de accijns op diesel. De reden hiervoor is dat het tarief van deze belasting (per ton CO_2) veel hoger ligt dan voor de andere relevante belastingen en heffingen.

6.2 Vergelijking van de mate van internalisatie van externe en infrastructuurkosten

In de studie 'De prijs van een vliegreis' is voor een aantal voorbeeldreizen een vergelijking uitgevoerd van de externe en infrastructuurkosten enerzijds en de belastingen/heffingen anderzijds van verschillende vervoerswijzen. De resultaten van de verkennende analyse naar de externe kosten van ketenemissies zijn gebruikt om deze vergelijking verder te verbreden. Daartoe zijn de externe kosten van ketenemissies en de daaraan gerelateerde belastingen en heffingen opgenomen in de vergelijkende analyse.

[30] Deze aandelen in de totale externe kosten zijn vergelijkbaar met de aandelen die de geluidkosten hebben.

[31] Merk op dat we in de analyse niet alle relevante externe kosten van aanleg, onderhoud, beheer en afdanking van infrastructuur en productie, onderhoud en afdanking hebben meegenomen. Enkel de emissie-gerelateerde externe kosten zijn bekeken. Echter, de andere externe kosten (bijv. geluidsoverlast, trillingen, etc.) zijn naar verwachting beperkt van omvang en hebben dus slechts een beperkte invloed op deze vergelijking.

Wanneer we de uitkomsten van de vergelijkende analyse in deze studie leggen naast de resultaten in 'De prijs van een vliegreis', dan zien we dat het meenemen van de keten-emissies (en de daaraan gerelateerde belastingen/heffingen) leiden tot een lichte daling van de mate waarin de totale externe en infrastructuurkosten worden gedekt door belastingen en heffingen. Echter, ten opzichte van de vorige studie hebben we ook een actualisatie van de relevante belastingen en heffingen uitgevoerd, waardoor in sommige gevallen de ratio van belastingen/heffingen en kosten toch hoger uitvallen dan in de vorige studie. Echter, deze bijgestelde resultaten leiden er niet toe dat de conclusies uit de vorige studie hoeven te worden bijgesteld. In het kort zijn deze conclusies in de volgende tekstbox weergegeven.

Belangrijkste conclusies met betrekking tot de vergelijking van externe/infrastructuurkosten en belastingen/heffingen voor de voorbeeldreizen

- De hoogste totale externe en infrastructuurkosten worden gevonden voor het spoorvervoer, gevolgd door de luchtvaart, de auto en de bus. De hoge kosten voor het spoorvervoer zijn vooral het gevolg van de relatief hoge vaste infrastructuurkosten van deze vervoerswijze. Wanneer we de vaste kosten buiten beschouwing laten, dan heeft het spoorvervoer echter de laagste kosten van alle vervoerswijzen. De luchtvaart heeft in dit perspectief daarentegen de hoogste kosten, gevolgd door de auto en de bus.
- Wanneer we inzoomen op de externe kosten, dan zien we dat deze het hoogst zijn voor de luchtvaart, gevolgd door de auto, de trein en de bus. Vooral op de korte voorbeeldreizen (naar Parijs en Londen) liggen de externe kosten van de luchtvaart ruim boven die van de personenauto, trein en bus. Op de middellange voorbeeldreizen (naar Rome en Barcelona) is het verschil in externe kosten tussen het vliegtuig en de auto kleiner, maar nog altijd in het nadeel van de eerste. Het kleinere verschil in externe kosten is vooral het gevolg van de afnemende externe kosten per reiziger bij het vliegtuig. Immers, de lokale kostenposten (luchtvervuiling, geluid, infrastructuurkosten) nemen in omvang niet toe als de vluchtlengte toeneemt, terwijl dit bij het wegvervoer en de trein wel het geval is.
- Voor de auto dient over het algemeen het meeste aan belastingen en heffingen betaald te worden, gevolgd door het vliegtuig, de trein en de bus.
- De personenauto betaalt op alle voorbeeldreizen meer dan volledig voor de totale externe en infra-structuurkosten die het veroorzaakt. Voor de luchtvaart ligt de mate van internalisatie voor de korte en middellange reizen tussen de 40 en 50%. Bij de trein en de bus ligt de mate waarin de totale externe en infrastructuurkosten gedekt worden belastingen en heffingen duidelijk lager dan bij de auto en ook het vliegtuig.
- Wanneer we enkel kijken naar de variabele kosten en belastingen en heffingen, dan vinden we de hoogste mate van internalisatie voor de auto en de trein. Beide vervoerswijzen betalen op alle voorbeeldreizen meer dan volledig voor de variabele kosten die ze veroorzaken. Bij de luchtvaart ligt de ratio van variabele belastingen/heffingen en variabele kosten tussen de 60 en 85%.

6.3 Onzekerheden en aanbevelingen voor vervolgonderzoek

In deze studie hebben we een verkennende analyse uitgevoerd naar de externe kosten van ketenemissies van mobiliteit. Aangezien dit een relatief nieuw onderwerp van studie is (we zijn op de hoogte van slechts één andere studie die hiernaar onderzoek heeft gedaan), wordt de analyse gekenmerkt door verschillende onzekerheden. Door middel van verschillende gevoeligheidsanalyses hebben we geprobeerd de potentiële invloed van die onzekerheden op de resultaten in beeld te brengen. Deze gevoeligheidsanalyses laten zien dat de resultaten gevoelig zijn voor algemene aannames over de levensduur van voertuigen en de intensiteit van gebruik van infrastructuur. Ook meer technische aannames, bijvoor-beeld over de gehanteerde milieuprijzen, hebben invloed op de uitkomsten, maar niet in de mate als de meer algemene aannames.

Ondanks de onzekerheden in de analyses, zijn we er van overtuigd dat deze studie een goede eerste inschatting geeft van de omvang van de externe kosten van ketenemissies. Om een robuustere inschatting van deze kosten te kunnen maken bevelen wij aan om in vervolgonderzoek:

- Zoveel mogelijk gebruik te maken van specifieke data over intensiteiten van infrastructuurgebruik. In deze studie hebben we ons vooral moeten baseren op nationale gemiddelden. De mate waarin infrastructuur wordt gebruikt verschilt echter sterk per traject en daarmee ook de ketenemissies per voertuig- of reizigerskilometer. Meer gedetailleerde data over intensiteiten van infrastructuurgebruik zou de schattingen van de externe kosten van ketenemissies dus kunnen verbeteren.
- Nader onderzoek te doen naar de emissies die vrijkomen bij de aanleg, onderhoud, beheer en afdanking van infrastructuur. De literatuur op dit vlak geeft een redelijk brede bandbreedte van kentallen voor deze emissies en het zou goed zijn om die bandbreedte verder te kunnen terugbrengen.
- Nader onderzoek te doen naar de ontwikkeling van milieuprijzen door de tijd. Er is nog relatief weinig onderzoek gedaan naar dit onderwerp, zeker voor luchtvervuilende emissies. Zo is het bijvoorbeeld nog onduidelijk wat de invloed van veranderingen in de gemiddelde basisgezondheid in een land is op de milieuprijzen voor bijvoorbeeld NO_x en fijnstof.
- Gedetailleerder onderzoek te doen naar de belastingen en heffingen die in de keten van voertuigen en infrastructuur worden betaald (en in hoeverre die gerelateerd kunnen worden aan de ketenemissies).

De bovenstaande aanbevelingen zijn vooral gericht op het verbeteren van de inschatting van de externe kosten voor specifieke voorbeeldreizen. Een andere aanbeveling is om:

- Het onderzoek naar de externe kosten van ketenemissies te verbreden naar andere vervoerswijzen (vrachtwagens, binnenvaart, zeevaart) en/of andere typen reizen (bijvoorbeeld in de stedelijke omgeving). Ook een analyse gericht op het in kaart brengen van de totale (en gemiddelde) externe kosten van ketenemissies voor Nederland (of een groep landen) zou een logische vervolgstap zijn.
- Te onderzoekenonderzoeken in hoeverre de externe kosten van ketenemissies veranderen door de opkomst van elektrisch aangedreven voertuigen (of voertuigen op waterstof). Vooral de voertuig gerelateerde ketenemissies liggen bij deze vervoers-wijzen naar verwachting hoger dan bij conventioneel aangedreven voertuigen. Daar staat echter tegenover dat de emissies in de gebruiksfase bij elektrisch aangedreven voertuigen lager liggen. Hoe deze tegenstrijdige ontwikkelingen zich vertalen in de externe kosten die deze voertuigen met zich meebrengen is een relevant onderwerp voor vervolgonderzoek.

Bibliografie

AEA, Delft, C. & TNO, 2012. *EU Transport GHG: Routes to 2050 II,* Oxfordshire: AEA.

AENA, sd *JT Barcelona-El Prat Airport 2019 · 2020,* sl: AENA.

Aéroports Voyages, 2021. *LUCHTHAVEN PARIJS CDG.* [Online]
Available at: https://www.aeroports-voyages.fr/nl/luchthaven/parijs-charles-de-gaulle/CDG
[Geopend 30 04 2021].

Avramovic, N., 2010. *Comparison of Ballast and Ballastless Tracks ,* Graz: Institute for Railway Engineering and Transport Economy .

Bruggenstichting, 2020. *Grootste bruggen in Nederland.* [Online]
Available at: https://www.bruggenstichting.nl/informatief/grootste-bruggen-in-nederland
[Geopend 07 04 2021].

Bundesamt für Raumentwicklung, 2020. *Externe Kosten und Nutzen des Verkehrs in der Schweiz. Strassen-, Schienen-, Luft- und Schiffsverkehr 2017,* Bern: ARE.

CBS StatLine, 2020. *Lengte van wegen; wegkenmerken, regio.* [Online]
Available at:
https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/70806ned/table?ts=1617783790940
[Geopend 07 04 2021].

CE Delft, TRT, Planco, ISL, INFRAS, PMR, Ricardo, 2019. *Overview of transport infrastructure expenditures and costs,* Brussel: Europese Commissie.

CE Delft, 2011. *Benefito - Description of the Excel tool and user manual,* Delft: CE Delft.

CE Delft, 2017. *Handboek Milieuprijzen 2017,* Delft: CE Delft.

CE Delft, 2018. *Environmental Prices Handbook - EU 28 version,* Delft: CE Delft.

CE Delft, 2019. *De prijs van een vliegreis - Een onderzoek naar de kosten van en voor de luchtvaart in Nederland,* Delft: CE Delft.

CE Delft, 2020. *STREAM Goederenvervoer 2020 - Emissies van modaliteiten in het goederenvervoer,* Delft: CE Delft.

CE Delft, INFRAS, TRT & Ricardo, 2019a. *Handbook on the External Costs of Transport - Version 2019,* Delft: CE Delft.

CE Delft, et al., 2019c. *Transport taxes and charges in Europe,* Delft: CE Delft.

CE Delft, INFRAS, TRT & Ricardo, 2019d. *State of play of internalisation in the European transport sector,* Delft: sn

CE Delft, et al., 2019b. *Overview of transport infrastructure expenditures and costs,* Delft: CE Delft.

CE Delft & VU, 2014. *Externe en infrastructuurkosten van verkeer - Een overzicht voor Nederland in 2010,* Delft: CE Delft.

CEMAC, 2017. *Carbon fiber manufacturing facility sting and policy considerations: international comparison,* Denver: CEMAC.

CPB/PBL, 2016. *WLO-klimaatscenario's en de waardering van CO2-uitstoot in MKBA's,* Den Haag: CPB/PBL.

ecoinvent centre, 2007. *ecoinvent report no.14 - Transport Services Data v2.0,* Villingen en Uster: ecoinvent centre.

ecoinvent, 2016. *Documentation of changes implemented in the ecoinvent database,* sl: ecoinvent.

ENAC, 2016. *Aeroporto "Leonardo Da Vince" Fiumicino - Roma - Masterplan al 2030 ,* Rome: ENAC.

European Commission, 2018. *A European Strategy for Plastics in a Circular Economy,* Brussels: European Commission.

European Commission, 2020. *Excise Duty Tables,* Brussels: European Commission.

European Commission, 2020. *Study on the EU's list of critical raw materials ,* Brussels: European Commission.

European Investment Bank,, 2020. *EIB Project Carbon Footprint Methodologies - Methodologies for the Assessment of Project GHG Emissions and Emission Variations,* Luxemburg: European Investment Bank.

Fraunhofer ISI and CE Delft, 2008. *Road infrastructure cost and revenue in Europe. Deliverable 2 of the study Inernalisation Measures and Policies for all external cost of Transport (IMPACT),* Karlsruhe/Delft: Fraunhofer ISS/CE Delft.

Gambogi, J., 2021. *U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2021 ,* sl: US Gov.

GRIF “FABIO GOBBO”, 2019. *The European Union aluminium industry. The impact of the EU trade measures on the competitiveness of downstream activitie,* Roma: GRUPPO DI RICERCHE INDUSTRIALI E FINANZIARIE - GRIF “FABIO GOBBO”.

Groupe ADP, 2020. *Traffic at Paris Aéroport up by 2.5% in 2019, at 108 million passengers.* Parijs: Groupe ADP.

Heathrow, sd *Facts and figures.* [Online]
Available at: https://www.heathrow.com/company/about-heathrow/facts-and-figures
[Geopend 30 04 2021].

IPCC, 2013. *Fifth Assessment Report: Working Group 1,* Cambridge: The Intergovermental Panel on Climate Change (IPCC).

Merchan, A. L., Belboom, S. & LéonardChemical, A., 2017. *Life Cycle Assessment of railway infrastructure in Belgium,* Villeneuve d’Ascq, France: Université de Liege.

Messmer, A. & Frischknecht, R., 2016a. *Life Cycle Inventories of Air Transport Services,* Uster: Treeze.

Messmer, A. & Frischknecht, R., 2016b. *LCI of rail transport services,* Uster: Treeze.

Messmer, A. & Frischknecht, R., 2016c. *Life Cycle Inventories of Road and Non-Road Transport Services,* Uster: Treeze.

Messmer, A. & Frischknecht, R., 2016. *LCI of rail transport services,* Uster: Treeze.

Messmer, A. & Frischknecht, R., 2016. *Life Cycle Inventories of Road and Non-Road Transport Services,* Uster: Treeze.

Ministerie van Financiën, 2015. *Rapport Werkgroep Discontovoet 2015,* Den Haag: Ministerie van Financiën.

Mobitool, 2016. *mobitool - Grundlagenbericht,* Bern: Mobitool.

Mobitool, 2017. *mobitool-faktoren-v2.0.2.* sl:Mobitool.

OECD, 2018. *Effective Carbon Rates 2018: Pricing Carbon Emissions Through Taxes and Emissions Trading,* Paris: OECD Publishing.

Railone, 2021. *BALLASTLESS TRACK SYSTEMS: TOP PERFORMANCE ON A FIRM FOUNDATION.* [Online]
Available at: https://www.railone.com/products-solutions/long-distance-and-freight-transport/ballastless-track-systems
[Geopend 15 02 2021].

Ricardo Energy & Environment, 2020. *Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCA,* Brussel: European Commission, DG Climate Action.

Schiphol, 2020. *Hoe groot is Schiphol eigenlijk?.* [Online]
Available at: https://nieuws.schiphol.nl/hoe-groot-is-schiphol-eigenlijk/
[Geopend 30 04 2021].

Schiphol, 2020. *Traffic review 2019,* sl: Schiphol.

Schiphol, 2021. *Weetjes over luchthaven Schiphol.* [Online]
Available at: https://www.schiphol.nl/nl/jij-en-schiphol/pagina/luchthavenfeitjes/
[Geopend 30 04 2021].

Tuchschmid, M. et al., 2014. *Carbon footprint and environmental impact of railway infrastructure,* Heidelberg: sn

UIC, 2016. *Carbon footprint of railway infrastructure - Comparing existing methodologies on typical corridors,* Parijs: UIC.

Wernet, G. et al., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology.,. *The International Journal of Life Cycle Assessment, [online] 21(9),* 2016(v3.6), p. pp.1218–1230.

Wikipedia, 2019. *Lijst van beweegbare bruggen in autosnelwegen in Nederland.* [Online]
Available at:
https://www.wegenwiki.nl/Lijst_van_beweegbare_bruggen_in_autosnelwegen_in_Nederland
[Geopend 07 04 2021].

Wikipedia, 2021. *Lijst van tunnels in Nederland.* [Online]
Available at: https://nl.wikipedia.org/wiki/Lijst_van_tunnels_in_Nederland
[Geopend 07 04 2021].

World Airport Codes, 2021. *Charles De Gaulle International Airport (CDG).* [Online]
Available at: https://www.world-airport-codes.com/france/charles-de-gaulle-5672.html
[Geopend 30 04 2021].

World Airport Codes, 2021. *Leonardo Da Vinci-Fiumicino Airport (FCO).* [Online]
Available at: https://www.world-airport-codes.com/italy/leonardo-da-vinci-international-11489.html
[Geopend 30 04 2021].

Zürich Airport, 2020. *Facts and figures 2019,* Zürich: Flughafen Zürich AG.

A Data voorbeeldreizen

A.1 Inleiding

In deze Bijlage geven we een overzicht van de data die voor de verschillende voorbeeldreizen zijn verzameld en toegepast in de verschillende berekeningen. Daarbij staan we allereerst stil bij de routes en afstanden voor de verschillende voorbeeldreizen, waarbij we volledig aansluiten bij de data zoals die zijn gehanteerd in CE Delft (2019). Vervolgens gaan we in op de data die is gebruikt om de classificaties van de infrastructuur zoals benodigd voor de bepaling van de ketenemissies (zie Paragraaf 2.3.1) te operationaliseren.

A.2 Route en afstanden

Voor de bepaling van de route (en afstanden) van de voorbeeldreizen gaan we uit van de snelste reisroute. Daarbij hebben we gebruikgemaakt van Google Maps (auto, bus, trein) en de ICAO emissions calculator (vliegtuig). De resulterende afstanden staan voor de verschillende voorbeeldreizen weergegeven in Tabel 16. Het gaat hierbij om afstanden voor een enkele reis. Aangezien we in deze studie de kosten en belastingen/heffingen voor een retourreis in beeld brengen, worden deze afstanden in de berekeningen vermenigvuldigd met een factor twee. Bij de trein hebben we ook onderscheid gemaakt naar conventionele elektrische intercitytreinen en hogesnelheidstreinen.

Tabel 16 - Afstanden per vervoerswijze (in km voor een enkele reis) voor de verschillende voorbeeldreizen

Voorbeeldreizen	Vliegreis			Treinreis	Busreis		Autoreis
	Vliegtuig	Trein (voor)	Trein (na)	Trein	Bus	Trein (voor)	Auto
Amersfoort - Parijs	398	55	26	369	475	25	492
Amersfoort – Londen	367	55	22	621	500	25	517
Amersfoort – Barcelona	1.241	55	20	1.464	1.526	25	1.541
Amersfoort – Rome	1.296	55	32	1.627	1.614	25	1.609

A.3 Kenmerken infrastructuur

Voor de routes zoals weergegeven in Tabel 16 hebben we met behulp van Google Maps een onderverdeling gemaakt van de kilometers naar verschillende typen infrastructuur.
Voor wegverkeer staat deze relatieve onderverdeling in Tabel 17 en voor spoorverkeer in Tabel 18.

Tabel 17 - Relatieve aandelen van verschillende typen weginfrastructuur op de verschillende voorbeeldreizen

Type landschap	Type weg	Amersfoort - Parijs	Amersfoort - Londen	Amersfoort - Barcelona	Amersfoort - Rome
Vlakke regio	Snelweg	82,4%	72,4%	45,1%	36,8%
	Provinciale weg	0,9%	1,5%	0,3%	0,3%
	Stadsweg	0,9%	1,9%	0,1%	0,1%
Heuvelachtige regio	Snelweg	15,6%	13,9%	53,3%	51,6%
	Provinciale weg	0,2%	0,3%	0,3%	0,4%
	Stadsweg	0,2%	0,4%	0,1%	0,1%
Bergachtige regio	Snelweg	0,0%	0,0%	0,8%	10,5%
	Provinciale weg	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%
	Stadsweg	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Eurotunnel		0,0%	9,7%	0,0%	0,0%

Tabel 18 - Relatieve aandelen van verschillende typen spoorinfrastructuur op de verschillende voorbeeld-reizen

Type landschap	Type weg	Amersfoort - Parijs	Amersfoort - Londen	Amersfoort - Barcelona	Amersfoort - Rome
Vlakke regio	Hogesnelheidstrein	63,0%	61,2%	34,2%	28,7%
	Elektrische IC	21,4%	16,7%	18,4%	8,5%
Heuvelachtige regio	Hogesnelheidstrein	11,6%	11,0%	30,3%	39,5%
	Elektrische IC	4,0%	3,0%	16,3%	11,7%
Bergachtige regio	Hogesnelheidstrein	0,0%	0,0%	0,5%	8,9%
	Elektrische IC	0,0%	0,0%	0,3%	2,6%
Eurotunnel		0,0%	8,1%	0,0%	0,0%

Voor luchthavens zijn de data die zijn gebruikt in de verschillende berekeningen in deze studie weergegeven in Tabel 19.

Tabel 19 - Aantal passagiers en oppervlakte per luchthaven

Luchthaven	Aantal passagiers via luchthaven/jaar	Oppervlakte van de luchthaven (ha)	Passagiers/m^2
Referentieluchthaven (Zürich Airport, 2020)	31.500.000	6.750	3
Schiphol (Schiphol, 2020; Schiphol, 2020; Schiphol, 2021)	71.707.000	2.787	3
London Heathrow (Heathrow, sd)	80.100.000	1.227	7
Paris CDG (World Airport Codes, 2021; Groupe ADP, 2020; Aéroports Voyages, 2021)	76.150.007	3.257	2
Barcelona BCN (AENA, sd)	52.686.314	3.140	2
Rome FCO (World Airport Codes, 2021; ENAC, 2016)	37.509.556	1.600	2

B Overzicht en selectie bronnen

B.1 Inleiding

In deze bijlage geven we een beschrijving van de verschillende bronnen die we hebben geanalyseerd voor deze studie. Daarna maken we een vergelijking tussen de verschillende bronnen op basis van een aantal criteria, zoals wetenschappelijke relevantie, relevantie voor dit project en compleetheid. Op basis van deze vergelijking zijn een aantal bronnen geselecteerd die als basis zijn gebruikt voor de berekeningen in deze studie.

B.2 Overzicht bronnen

Voor dit onderzoek hebben we hoofdzakelijk de volgende negen studies gebruikt voor het vaststellen van de ketenemissies.

Ecoinvent chapter Transport (ecoinvent centre, 2007; ecoinvent, 2016) **& Life Cycle Inventories of transport services** (Messmer & Frischknecht, 2016; Messmer & Frischknecht, 2016; Messmer & Frischknecht, 2016a)
Ecoinvent is een Zwitserse non-profit organisatie met een 'Life Cycle Inventory' (LCI) database. De database bevat informatie over emissies van duizenden producten, inclusief het productie- en onderhoudsproces. Het programma SimaPro biedt de mogelijkheid om de informatie uit deze database in te lezen en te verwerken voor een levenscyclusanalyse(LCA) en daarmee de emissies te bepalen over de hele levensduur voor een bepaald proces of product. Voor mobiliteit bevat de Ecoinventdatabase informatie over alle modaliteiten die in deze studie zijn opgenomen en over de materialen in de bijbehorende infrastructuur. Voor alle modaliteiten is de informatie beschikbaar voor verschillende geografische situaties, zoals: Zwitserland, Europa zonder Zwitserland en de wereld. Voor treinen zijn specifieke landen beschouwd waarover informatie beschikbaar is.

Vanuit het Zwitserse bedrijf Treeze is voor alle modaliteiten levenscyclus-inventarisatie (LCI) uitgevoerd (Messmer & Frischknecht, 2016a; Messmer & Frischknecht, 2016b; Messmer & Frischknecht, 2016c) . Op basis van uitgangspunten (zoals levensduur voertuig en infrastructuur, samenstelling wagenpark) zijn factoren bepaald waarmee emissies worden toegekend aan voertuigen en infrastructuur. De aannames achter de LCI's worden veelvuldig gebruikt door Ecoinvent voor de LCA's.

Mobitool (2016)
Het Zwitserse platform Mobitool heeft de tool 'Mobitool-Faktoren' ontwikkeld om een overzicht te geven van de emissies van voertuigen per modaliteit. Dit is een spreadsheet waarin de CO_2-, PM- en NO_x-uitstoot van 150 verschillende voertuigen bepaald kan worden. In de spreadsheet wordt onderscheid gemaakt in uitstoot door gebruik (directe uitstoot), brandstofopwekking, onderhoud van het voertuig, productie en sloop en infrastructuur.
De tool is gebaseerd op de LCA-methodiek en maakt overwegend gebruik van de data uit de Ecoinvent-database. Om een specifiek geval te definiëren, past Mobitool een factor toe om de emissies en modellen te schalen. Voor de definitie van een voertuig geldt:

$$voertuig_{mobitool} = voertuig_{ecoinvent} * \frac{voertuiggewicht_{mobitool}}{voertuiggewicht_{ecoinvent}}$$

En voor de indirecte uitstoot geldt:

$$energielevering_{mobitool} = energielevering_{ecoinvent} * \frac{gemiddeld\ verbruik_{mobitool}}{gemiddeld\ verbruik_{ecoinvent}}$$

Eenzelfde methode is toegepast om de directe uitstoot, het onderhoud, en de bijdrage van de infrastructuur te bepalen. In Mobitool_faktoren (2017) staan alle modaliteiten gespecificeerd (Mobitool, 2017). De kentallen voor voertuigen en de omrekenfactoren voor PM en NO_x hebben we mede bepaald op basis van Mobitool_faktoren (Mobitool, 2017). Daarnaast hebben we Mobitool_faktoren gebruikt als een controlemiddel voor onze uitkomsten.

EU Transport GHG: Routes to 2050 II (AEA, et al., 2012)
In AEA, et al. (2012) is onderzoek gedaan naar het potentieel reduceren van emissies in 2050 door productie, onderhoud en afdanking voor zowel voertuigen als infrastructuur. Het onderzoek maakt een vergelijking tussen verschillende bronnen uit de literatuur en komt voor ieder voertuig en type infrastructuur met bevindingen over factoren die emissies kunnen terugdringen richting 2050 toe. In de studie wordt geconcludeerd dat (in 2012) de bijdrage van infrastructuur aan de totale GHG-emissies per modaliteit varieert tussen de 15 en 30%. Factoren van invloed op GHG door infrastructuur:

- Intensiteit van gebruik.
- Het gebruik gedurende de levensduur van de voertuigen die gebruikmaken van de infrastructuur.
- De GHG van de energie die gebruikt wordt voor de voertuigen en infrastructuur.
  De AEA, et al. (2012) studie hebben wij gebruikt voor het bepalen van de meest voorkomende materialen in zowel infrastructuur als voertuigen en de daarbij behorende CO_2-emissies. Daarnaast hebben we de studie gebruikt om kentallen voor de referentie-infrastructuur te bepalen en de omrekenfactoren voor de classificaties te berekenen.

Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCA (Ricardo Energy & Environment, 2020)
In 2020 heeft Ricardo Energy & Environment een studie uitgevoerd met als onderwerp LCA's van verschillende voertuigen op de weg. In de studie zijn LCA's gemaakt waarin de voertuigproductie, -onderhoud en -afdanking zijn meegenomen. Per voertuigsoort is een vergelijking gemaakt tussen LCA's van verschillende brandstofsoorten. De LCA's zijn doorgerekend voor drie scenario's: het huidige scenario (op basis van het jaar 2020) en scenario's voor 2030 en 2050. Voor deze studie hebben we input gebruikt van de LCA's van de personenauto's en bus in 2020.

Carbon footprint of railway infrastructure (UIC, 2016)
In dit onderzoek heeft het UIC onderzocht wat de CO_2-voetafdruk is van spoorinfrastructuur. Dit is gedaan door verschillende studies die zijn uitgevoerd op dit gebied, te vergelijken en met de kentallen uit deze studies een drietal cases door te rekenen. De cases bestaan uit een corridor met een groot aandeel tunnels en bruggen (70%), een klein aandeel tunnels en bruggen (10%) en een corridor voor goederenvervoer. De resultaten van de casestudies geven de impact van het aandeel tunnels en bruggen weer per km spoor: hoe groter het aandeel tunnels en bruggen, hoe meer CO_2-emissies er per km spoor optreden. Op basis van de studie van het UIC hebben wij kentallen voor spoorinfrastructuur bepaald in relatie tot het aandeel tunnels en bruggen.

Life Cycle Assessment of railway infrastructure in Belgium (Merchan, et al., 2017)
Onderzoekers van de Universiteit Luik hebben LCA's uitgevoerd voor de spoorinfrastructuur in België. Er is een analyse gemaakt van de opbouw van het spoornetwerk (o.a. welke materialen worden er toegepast?, wat is het aandeel tunnels en bruggen?) waarmee LCA's zijn uitgevoerd voor treinen aangedreven door diesel en door elektriciteit. We hebben voor deze studie informatie gebruikt over de opbouw van het spoor en het maken van classificaties.

B.3 Vergelijking bronnen

De selectie van de bronnen in Bijlage B.2 hebben we gemaakt op basis van een toetsing.

Een overzicht van alle bestudeerde bronnen is weergegeven in Tabel 20. Voor de toetsing hebben wij daarbij de volgende criteria gehanteerd:

- *Publicatiejaar*: minimaal 2010. Uitzondering hierop is Ecoinvente centre (2007), omdat er in 2016 een bijlage met aanpassingen is toegevoegd aan het rapport (ecoinvent, 2016).
- *Compleetheid*: minimaal een score van 3 op basis van een kwalitatieve beoordeling van 1 tot 5 (zie de volgende tekstbox voor een nadere toelichting op de scoringsmethodiek voor dit criterium). Uitzondering hierop is (Messmer & Frischknecht, 2016). Er wordt in andere bronnen verwezen naar deze bron waardoor we deze studie toch hebben opgenomen.
- *Wetenschappelijke onderbouwing*: minimaal voldoende. Gescoord op basis van achtergrondinformatie en gebruikte bronnen.

Naast deze criteria hebben wij onderscheid gemaakt tussen bronnen die informatie geven over voertuigen en/of infrastructuur.

Beoordeling op het criterium 'Compleetheid'
Voor de compleetheid hebben wij een toetsing uitgevoerd in welke mate alle ketenstappen voor voertuigen (productie, onderhoud, einde levensduur) en infrastructuur (productie, onderhoud, einde levensduur, allocatie) worden meegenomen. Daarnaast hebben we ook gekeken in hoeverre de verschillende modaliteiten (personen-auto, touring car, railtransport, luchtvaart) worden beschouwd in de studies. We zijn nagegaan welk van deze facetten zijn meegenomen in elke bron en hebben deze op de volgende manier beoordeeld:

- < 3 facetten meegenomen is een 1
- 3-4 facetten meegenomen is een 2
- 5-6 facetten meegenomen is een 3
- 7-8 facetten meegenomen is een 4
- 9-11 facetten meegenomen is een 5

Op basis van de scores op de verschillende indicatoren zijn de 9 studies geselecteerd die in Bijlage B.2 zijn toegelicht (zie Tabel 20).

Tabel 20 - Vergelijking literatuur

Bron	Publicatie-jaar	Voertuigen	Infrastruc-tuur	Compleet-heid	Wetenschappelijke onderbouwing	Gebruikt
Ecoinvent (2007; 2016)	2007 ; 2016	Ja	Ja	5	Goed	Ja
Mobitool (2016)	2016	Ja	Ja	5	Goed	Ja
AEA, CE Delft & TNO (2012)	2012	Ja	Ja	5	Goed	Ja
Europese Commissie	2020	Nee	Nee	1	Goed	Nee
Ricardo Energy & Environment (2020)	2020	Ja	Nee	3	Goed	Ja
Merchan, et al. (2017)	2017	Nee	Ja	3	Voldoende	Nee
UIC (2016)	2016	Nee	Ja	3	Goed	Ja
The World Bank	2017	Nee	Ja	1	Goed	Nee
Olubanjo Olugbenga, Nikolaos Kalyviotis and Shoshanna Saxe	2019	Nee	Ja	1	Goed	Nee
Laura Trupia, Tony Parry, Luis C. Neves & Davide Lo Presti	2017	Nee	Ja	1	Goed	Nee
Fridell, Erik ; Bäckström, Sebastian ; Stripple, Håkan	2019	Nee	Ja	2	Goed	Nee
Messmer & Frischknecht (2016a)	2016	Ja	Ja	3	Goed	Ja
Messmer & Frischknecht (2016)	2016	Ja	Ja	2	Goed	Ja
Messmer & Frischknecht (2016)	2016	Ja	Ja	4	Goed	Ja
EIB (2020)	2020	Ja	Ja	1	Goed	Nee

C Nadere toelichting ketenemissies mobiliteit

C.1 Inleiding

In deze bijlage geven we een nadere toelichting op de ketenemissies van mobiliteit. In Bijlage C.2 geven we eerst een gedetailleerd overzicht van de verschillende elementen die bijdragen aan de ketenemissies van mobiliteit. In Bijlage C.3 staan we vervolgens stil bij de belangrijkste factoren die de omvang van de ketenemissies bepalen. Eén van die factoren is het type materiaal dat gebruikt wordt. In Bijlage C.4 gaan we hier dieper op in voor de verschillende voertuigen die worden onderscheiden in deze studie.

C.2 Overzicht van de verschillende ketenstappen

In Paragraaf 2.2 is een overzicht gegeven van de verschillende elementen die bijdragen aan de ketenemissies van mobiliteit. Deze verschillende stappen lichten we in deze paragraaf wat nader toe.

C.2.1 Ketenemissies gerelateerd aan voertuigen

Bij de ketenemissies die zijn gerelateerd aan voertuigen kunnen drie stappen onderscheiden worden, die op hun beurt uiteen vallen in verschillende deelstappen:

- *Productie*: de emissies die vrijkomen bij het produceren van het voertuig. Deze emissies zijn het gevolg van de volgende activiteiten:
  - *Delving grondstoffen*: hierbij gaat het om de winning van de grondstoffen (bijv. ijzererts, rubber). Daarbij komen bijvoorbeeld emissies vrij als gevolg van dieselgebruik door graafmachines, aggregaten, etc.
  - *Transport:* hierbij gaat het om het transporteren van grondstoffen, materialen, halffabricaten en eindproducten tussen verschillende productielocaties, distributie-centra en verkooppunten. Ook bij dit transport komen emissies vrij.
  - *Verwerking:* het verwerken van de grondstoffen tot een bruikbaar materiaal (bijv. staal). Deze worden vervolgens verwerkt tot componenten, onderdelen of producten.
  - *Assemblage:* bij de assemblage worden verschillende componenten en onderdelen samengevoegd tot één voertuig. Hierbij is het belangrijk om op te merken dat de verwerking van grondstoffen tot componenten, onderdelen of producten doorgaans niet op dezelfde plek plaatsvindt als de assemblage. Tussen de verwerking en de assemblage zal daarom in meer of mindere mate transport plaatsvinden.
- *Onderhoud*: de emissies die vrijkomen bij het onderhoud van het voertuig. Deze emissies zijn het gevolg van de volgende activiteiten:
  - *Delving grondstoffen*: bij het onderhoud wordt gebruikgemaakt van materialen waarvoor grondstoffen moeten worden gewonnen. Evenals in het productieproces leidt dit tot emissies bij de winning van grondstoffen.
  - *Transport:* evenals in het productieproces is transport van grondstoffen, materialen, halffabricaten en eindproducten onderdeel van de keten van onderhouds-activiteiten.
  - *Verwerking*: zie verwerking bij productie.

- (*De)montage*: hier gaat het om het daadwerkelijke onderhoud aan het voertuig, waarbij energie wordt gebruikt voor (de)montage van onderdelen. Dit leidt tot de uitstoot van emissies.
- *Uitvoeren controles*: de energie die wordt gebruikt tijdens periodieke en incidentele controles draagt bij aan de ketenemissies gerelateerd aan voertuigen.

— *Afdanking:* de emissies die vrijkomen bij de afdanking van het voertuig. Deze emissies zijn het gevolg van de volgende activiteiten*:*
  - Recycling: aan het einde van de levensduur kan een gedeelte van de materialen opnieuw gebruikt worden. Het is afhankelijk van het materiaal in hoeverre dit mogelijk is. Zo is staal makkelijker te recyclen dan bijvoorbeeld beton of composieten. De grootte van het aandeel materialen dat te recyclen is, bepaalt of het einde van de levensduur een positief, negatief of neutraal effect heeft op de ketenemissies.
  - Afval: niet recyclebare materialen zullen terecht komen in afvalstromen. Materialen die aan het eind van de levensduur terecht komen in een niet-recyclebare afvalstroom, hebben een negatieve impact op de ketenemissies.

C.2.2 Ketenemissies gerelateerd aan infrastructuur

Bij de ketenemissies die zijn gerelateerd aan infrastructuur kunnen vier stappen onderscheiden worden, die op hun beurt uiteen vallen in verschillende deelstappen. Drie van deze vier stappen zijn gelijk aan de ketenstappen voor voertuigen (productie/constructie, onderhoud en afdanking) en ook de deelstappen voor deze ketenstappen zijn grotendeels vergelijkbaar. Deze stappen lichten we hieronder daarom niet nader toe.

De vierde ketenstap is wel specifiek voor ketenemissies gerelateerd aan infrastructuur, namelijk:

— *Beheer:* de emissies die vrijkomen als gevolg van het beheer van de infrastructuur. Hierbij gaat het vooral om de volgende activiteiten:
  - *Verkeersmanagement (incl. verkeersregelinstallaties)*: de energie die nodig is voor het laten werken van verkeersregelinstallaties (bijv. stoplichten, treinwissels, etc.) en verkeersmanagement draagt bij aan de ketenemissies van infrastructuurbeheer.
  - *Verlichting*: vooral bij het wegverkeer (maar ook op stations of vliegvelden) is de elektriciteit die nodig is voor de verlichting een belangrijke bron van ketenemissies van infrastructuurbeheer.

C.2.3 Ketenemissies in de gebruiksfase

Zoals aangegeven in Paragraaf 2.2 zijn de ketenemissies in deze studie gedefinieerd als de emissies die vrijkomen over de levensduur van een voertuig of de transportinfrastructuur, exclusief de gebruiksfase. Hiermee hanteren we in deze studie een enge definiëring van ketenemissies.

Bij een ruimere definiëring van ketenemissies, zouden de emissies uit de gebruiksfase ook meegenomen worden. Het gaat dan specifiek om de emissies die zijn gerelateerd aan:

— *Brandstof:* hierbij gaat het om de emissies die vrijkomen bij de productie en de verbranding van brandstoffen.
  - *Productie*: bij de productie van brandstoffen komen emissies vrij, bijvoorbeeld bij de winning van olie, de raffinage of de distributie van brandstoffen.
  - *Verbranding:* hierbij gaat het om de emissies die vrijkomen als gevolg van de verbranding van brandstoffen, de zogenaamde uitlaatemissies.

— *Slijtage*: hierbij gaat het om de fijnstofemissies die vrijkomen als gevolg van slijtage van remmen en banden. Bij treinen gaat het ook om de emissies als gevolg van de wrijving tussen stroomafnemers en de bovenleiding.

Bij de bepaling van de externe kosten worden de emissies in de gebruiksfase apart van de ketenemissies meegenomen:
- de schadelijke effecten van verbrandingsemissies zijn onderdeel van de kosten van luchtvervuiling en klimaat;
- de emissies als gevolg van brandstofproductie leiden tot externe kosten van brandstof- en elektriciteitsproductie;
- de schadelijke effecten van slijtage-emissies zijn onderdeel van de kosten van luchtvervuiling.

C.3 De belangrijkste factoren die van invloed zijn op omvang ketenemissies

De omvang van de ketenemissies zijn afhankelijk van een groot aantal factoren. Daarbij bestaan er verschillen tussen ketenemissies gerelateerd aan voertuigen en infrastructuur, maar zijn er ook veel overeenkomsten. Op basis van een bestudering van de studies zoals genoemd in Bijlage B, geven we in deze paragraaf een korte beschrijving van de belangrijkste factoren.

Allereerst een aantal algemene factoren:
- *Toegepaste materialen:* de samenstelling van een product wordt bepaald door de toegepaste materialen. Ieder materiaal brengt andere emissies met zich mee.
- *Levensduur*: de levensduur van een product bepaalt over welke periode de emissies die vrijkomen worden afgeschreven. Voor voertuigen wordt de levensduur meestal in kilometers of in jaren beschreven. De levensduur van infrastructuur wordt uitgedrukt in jaren.
- *Intensiteit gebruik:* De intensiteit waarmee een product wordt gebruikt, bepaalt de ketenemissies per reiziger of per kilometer. Hoe intensiever het product gebruikt wordt, hoe lager de voetafdruk per eenheid.

Naast deze algemene factoren kunnen er per ketenstap ook specifieke factoren onderscheiden worden:
- Productie:
  - *Productielocatie:* De locatie van productie (met name het land) bepaalt welke energiemix er gebruikt wordt bij de productie en welk logistiek er nodig is om van de fabriek naar de eindgebruiker te komen. Bij samengestelde producten zoals voertuigen kan de productie van onderdelen en de assemblage in verschillende landen plaatsvinden (Ricardo Energy & Environment, 2020).
  - *Logistieke processen:* De emissies die vrijkomen bij de logistieke processen worden bepaald door de modaliteiten waarmee deze plaatsvinden en door de brandstof die hiervoor gebruikt wordt. Ook de afstand is een bepalende factor.
  - *Energiemix bij productie:* De energiemix die gebruikt wordt bij de productie van producten bepaalt de emissies die vrijkomen (bijv. groene vs. grijze stroom) (Ricardo Energy & Environment, 2020).
- *Onderhoud:* De manier waarop een product onderhouden wordt, beïnvloedt de emissies die vrijkomen gedurende de levensduur. Factoren die de emissies beïnvloeden zijn: de frequentie waarop het onderhoud plaatsvindt, de materialen die worden toegepast en de logistieke processen die nodig zijn om het onderhoud uit te voeren.
- *Afdanking/End of Life:* De emissies aan het einde van de levensduur van een product worden bepaald door wat er met de materialen uit het product gebeurt. Recyclebare materialen hebben een lagere ketenemissies dan materialen die niet recyclebaar zijn.

Specifiek voor infrastructuur hebben ook de volgende factoren invloed op de omvang van de ketenemissies:

- *Het type infrastructuur*: de ketenemissies variëren tussen verschillende typen infrastructuur (bijv. stadsweg vs. snelweg) (AEA, et al., 2012) (Merchan, et al., 2017). Dit is enerzijds het gevolg van een verschil in gebruikte materialen, maar ook van de dimensionering van de infrastructuur (en de invloed die dat heeft op hoeveelheid materialen) en van de omvang (bijv. aantal rijbanen, oppervlakte vliegveld).
- *Het aandeel tunnels en bruggen:* de aanleg (en onderhoud) van bruggen en tunnels is relatief energie- en materiaalintensief (in vergelijking tot andere transportinfrastructuur) (AEA, et al., 2012) (ecoinvent centre, 2007). Vandaar dat wegen/spoorwegen met een hoog percentage tunnels en/of bruggen gekenmerkt worden door relatief hoge ketenemissies.

Specifiek voor voertuigen is de volgende factor van invloed op de omvang van de ketenemissies:

- *Grootte/gewicht van het voertuig*: voor een groter/zwaarder voertuig moeten meer materialen gebruikt worden en dit leidt (los van het type materialen) tot hogere ketenemissies.

Voor al de bovenstaande factoren geldt dat we in deze studie hebben geprobeerd om ze zo goed mogelijk te laten aansluiten bij de referentievoertuigen en voorbeeldreizen zoals die in deze studie worden onderzocht. Dit hebben we voor het type infrastructuur bijvoorbeeld gedaan door verschillende classificaties van infrastructuur te bepalen (met bijbehorende ketenemissies), waarvoor we per voorbeeldreis hebben gekeken welk aandeel ze hebben op de route (zie ook Bijlage D.3.2). En bij de grootte van het voertuig hebben we gezocht naar kentallen in de literatuur die het best passen bij de grootte van het referentievoertuig (of hebben we een correctie uitgevoerd om dit beter op elkaar te laten aansluiten).
Voor sommige factoren (bijvoorbeeld de vorm van onderhoud) hebben we daarentegen juist aangenomen dat die op de routes van de voorbeeldreizen van gemiddeld niveau zijn.

Tot slot, voor een aantal factoren hebben we een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd om de invloed op de resultaten in te schatten:

- *Levensduur/intensiteit gebruik infrastructuur*: voor de verschillende typen infrastructuur hebben we bekeken wat de invloed van de mate van gebruik (over hun levensduur) is op de ketenemissies.
- *Levensduur/intensiteit gebruik voertuigen*: voor de referentievoertuigen is vastgesteld hoeveel kilometer ze maken over hun gehele levensduur. Via een gevoeligheidsanalyse hebben we inzichtelijk gemaakt wat de invloed van deze aanname is op de omvang van de emissies.

C.4 Materiaalgebruik in voertuigen

In Tabel 21 zijn voor de verschillende typen voertuigen de aandelen van de materialen weergegeven, gesorteerd naar de bijdrage in het gewicht of de uitstoot van broeikasgasemissies. De bijdrage van deze materialen is ongeveer 94-99% van het totaal, zowel in gewicht als in GHG-emissies. Bij de trein en het vliegtuig dekt de top 3 zelfs ongeveer 90% van het gewicht en de GHG-emissies af. Voor de personenauto geldt dit ook voor de top 3 op basis van gewicht, terwijl de top 3 op basis van het GHG ongeveer 77% afdekt.

Bij de personenauto, touringcar en trein vormen staal en ijzer, plastics en aluminium de belangrijkste materialen. De materiaalverdeling bij vliegtuigen ligt iets anders. In het gewicht vormen aluminium, staal en ijzer en koolstofvezel composieten de top 3, terwijl dit op basis van het GHG aluminium, koolstofvezel composiet en titanium zijn.

Tabel 21 - Aandelen materialen ten opzichte van gewicht en van het totale GHG

Aandeel op basis van gewicht		Aandeel op basis van GHG-emissies	
Personenauto			
Staal en ijzer	61,6%	Staal en ijzer	35,1%
Plastics	16,0%	Plastics	25,8%
Aluminium	9,9%	Aluminium	16,0%
Glas	3,2%	Textiel	8,9%
Rubber	2,4%	Magnesium	4,4%
Anders	2,2%	Anders	3,7%
Touringcar			
Staal en ijzer	59,4%	Staal en ijzer	
Aluminium	18,8%	Plastics	
Plastics	7,42%	Aluminium	
Anders	6,4%	Textiel	
Rubber	3,8%	Magnesium	
Glas	3,3%	Anders	
Trein			
Staal en ijzer	57,3%	Aluminium	46,9%
Aluminium	26,7%	Staal en ijzer	33,4%
Plastics	7,3%	Plastics	10,8%
Anders	4,4%	Anders	4,7%
Koper	2,7%	Koper	2,7%
Vliegtuig			
Aluminium	58,3%	Aluminium	33,7%
Staal en ijzer	19,2%	Koolstof vezel composieten	30,0%
Koolstof vezel composieten	9,2%	Titanium	25,6%
Titanium	7,7%	Nikkel	5,1%
Nikkel	2,8%	Staal en ijzer	3,7%

Bron: Gemiddelden op basis van (ecoinvent, 2016; AEA, et al., 2012; Ricardo Energy & Environment, 2020).

D Methodiek bepaling ketenemissies van infrastructuur

D.1 Inleiding

In deze bijlage geven we uitgebreide toelichting op de berekening van de ketenemissies van infrastructuur. Een samenvatting van de toegepaste methodiek en de gehanteerde kentallen is opgenomen in Paragraaf 2.3.1 van het hoofdrapport.

Allereerst geven we in deze bijlage een overzicht van mogelijke methoden om de ketenemissies van infrastructuur te bepalen (zie Bijlage D.2). In Bijlage D.3 gaan we vervolgens uitgebreid in op de wijze waarop de ketenemissies van infrastructuur in deze studie zijn bepaald.

D.2 Overzicht mogelijke methoden

Voor de bepaling van de omvang van ketenemissies kunnen vier methoden onderscheiden worden die variëren in de mate waarin ze specifieke resultaten opleveren voor de routes van de verschillende voorbeeldreizen:

1. *Gebruikmaken van emissiekentallen in gram/reizigerskilometer*: in de literatuur zijn kentallen beschikbaar die voor de verschillende modaliteiten de emissies die samenhangen met de infrastructuur weergegeven in gram per reizigerskilometer (Mobitool, 2017; UIC, 2016).
2. *Het aanpassen van emissiekentallen uit bestaande LCA-databases (of studies) aan de corridor-specifieke situatie*. Emissiekentallen zoals onder Stap 1 bedoeld, zijn vaak afkomstig uit LCA-databases, zoals in Ecoinvent (2016). Deze kentallen kunnen op hoofdlijnen worden aangepast voor de corridor-specifieke situatie. Deze methode is vooral geschikt als er gedetailleerde data beschikbaar is over de corridor-specifieke situatie, zoals het type wegen.
3. *Gebruikmaken van emissiekentallen voor specifieke typen infrastructuur*: Hierbij gaat het om emissiekentallen uitgedrukt in bijv. gram per kilometer weg of gram per m^2 vliegveldterrein, eventueel nog verder onderverdeeld naar verschillende typen infrastructuur (bijv. een tweebaansweg, een vierbaansweg, een viaduct, een tunnel, startbanen op een vliegveld, etc.). Door deze data te combineren met data over het type infrastructuur (en het gebruik ervan) op een corridor kunnen vervolgens de emissies bepaald worden.
4. *Uitvoeren van een volledige LCA-analyse*: De meest gedetailleerde aanpak is het uitvoeren van een volledige levenscyclusanalyse (LCA) voor een specifieke corridor, waarbij met behulp van LCA-software en zeer gedetailleerde data over de infrastructuur (aandeel beton, aandeel asfalt, aandeel staal, etc.) op die corridor een berekening gemaakt wordt van de emissies die vrijkomen over de gehele levenscyclus van die infrastructuur.

Methode 1 is de meest ruwe methodiek om de ketenemissies gerelateerd aan infrastructuur voor een specifieke voorbeeldreis te bepalen. Deze methode houdt op geen enkele wijze rekening met de specifieke kenmerken van de infrastructuur op de verschillende voorbeeldreizen. Dit levert daardoor emissieschattingen op die zeer onzeker zijn. Daarom hebben we er voor gekozen om deze methode niet toe te passen in dit onderzoek. Eveneens hebben we

Methode 4 niet toegepast, alhoewel deze methode de meest gedetailleerde resultaten oplevert. Maar Methode 4 is erg arbeids- en data-intensief, omdat er over alle processen en materialen over de hele levensduur gedetailleerde informatie verzameld en verwerkt moet worden voor de specifieke voorbeeldreizen. Een dergelijke analyse valt buiten de scope van deze studie.

Wanneer we Methode 2 en 3 met elkaar vergelijken, dan geeft Methode 3 de meest specifieke informatie per route, maar vraagt om een uitgebreidere verzameling van data. Op basis van een bestudering van de beschikbare openbare databronnen zijn we tot de conclusie gekomen dat voor een gedetailleerde toepassing van Methode 3 de benodigde data niet (in voldoende detail) beschikbaar is of dat het verzamelen ervan binnen de scope van deze studie niet mogelijk is. Denk daarbij bijvoorbeeld aan data over de bebouwing van luchthavens (bijvoorbeeld gebouwhoogtes) of aan het aantal eenbaans-, tweebaans-, en meerbaanswegen per land op de routes. Echter, een vereenvoudigde toepassing van Methode 3, waarbij er een beperkt aantal typen infrastructuur worden onderscheiden (gedifferentieerd naar factoren die een belangrijke invloed hebben op de omvang van de ketenemissies) , is wel haalbaar. Aangezien deze methodiek naar onze mening meer gedetailleerde en daarmee betrouwbaardere resultaten oplevert dan Methode 2, is in deze studie gekozen voor toepassing van Methode 3.

D.3 Nadere toelichting toegepaste methodiek

De gekozen methodiek voor de bepaling van de ketenemissies gerelateerd aan de ketenemissies bestaat uit vijf stappen:

1. Vaststellen kentallen ketenemissies referentie-infrastructuur.
2. Bepalen kentallen ketenemissies voor verschillende classificaties infrastructuur.
3. Bepalen kentallen ketenemissies voor de verschillende classificaties infrastructuur per voertuigkilometer.
4. Bepalen kentallen ketenemissies voor verschillende vervoerswijzen voor de verschillende classificaties infrastructuur.
5. Bepalen ketenemissies per vervoerswijze op de voorbeeldreis.

Deze vijf stappen werken we in deze paragraaf nader uit.

D.3.1 Vaststellen kentallen referentie-infrastructuur

Op basis van een bestudering van de literatuur, zoals geselecteerd in Bijlage B, hebben we voor de ketenemissies gerelateerd aan infrastructuur een keuze van kentallen gemaakt. Daarbij zijn drie bronnen het meest relevant:

- *Data uit SimaPro;* SimaPro is een geavanceerd LCA-softwareprogramma. Het bevat milieudatabases, zoals de Ecoinvent-database (Wernet, et al., 2016), met gegevens van een breed scala aan materialen en processen, waarmee specifieke producten (zoals infrastructuur) kan worden samengesteld. Ook bevat SimaPro analysemethoden die de ketenemissies berekenen. Wij hebben voor dit project een uitdraai gemaakt met SimaPro van de ketenemissies van materialen, productieprocessen en deelproducten voor de verschillende vormen van transportinfrastructuur. De milieukundige data in SimaPro over de deelproducten en bijbehorende materialen en productieprocessen is gebaseerd op verschillende bronnen, waaronder Wernet et al. (2016), Messmer & Frischknecht (2016a), Messmer & Frischknecht (2016b), Messmer & Frischknecht (2016c).
- *AEA et al.* (2012), waarin op basis van een uitgebreide literatuuranalyse presenteert deze studie schattingen van ketenemissies gerelateerd aan infrastructuur voor alle modaliteiten.

- *UIC* (2016) maakt een vergelijking van vijf uitgebreide studies naar de ketenemissies van spoorinfrastructuur.

Doordat deze drie studies een breed scala aan andere studies hebben meegenomen, kunnen we ons in deze studie op een brede feitenbasis baseren.

Tabel 22 geeft een vergelijking van kentallen voor de ketenemissies gerelateerd aan infrastructuur uit de verschillende studies. Waar nodig hebben we de resultaten uit de verschillende studies omgerekend zodat ze allemaal in dezelfde eenheid staan.

Tabel 22 - Kentallen uit de literatuur per meter (weg en spoor) en m^2 (luchtvaart)

	Data uit Ecoinvent-database v.3.6, berekend met SimaPro	**AEA et al. (2012)**	**UIC (2016)**	**Kental gehanteerd in deze studie voor referentie-infrastructuur**
Weg (kg CO_2-eq./m)	– 500 (exclusief beheer, provinciale weg bergachtige regio)	– 565 (Inclusief beheer, provinciale weg, vlakke regio) – 339 (exclusief beheer, provinciale weg vlakke regio)		– 500 (exclusief beheer, provinciale weg, bergachtige regio)
Spoor (kg CO_2-eq./m)	– 5.230 (IC, bergachtig) – 7.230 (Hogesnel-heidslijn, berg-achtige regio)	– 7.500 (IC, vlak)	– 6.000 (IC, berg-achtig)	– 5.230 (IC, bergachtig) – 7.230 (Hogesnel-heidslijn, berg-achtige regio)
Luchtvaart (kg CO_2 eq./m^2)	– 2.000	– 2.013		– 2.000

In de laatste kolom van Tabel 22 zijn de kentallen geselecteerd die we voor deze studie hebben geselecteerd voor de referentie-infrastructuur. De kenmerken van de referentie-infrastructuur zijn ook weergegeven in de laatste kolom. Over het algemeen lagen de resultaten van de verschillende studies redelijk op één lijn[32]. Daarom zijn we voor de referentie-infrastructuur voor alle modaliteiten uitgegaan van de waarden uit SimaPro, om op die manier een goede consistentie tussen de modaliteiten te kunnen waarborgen.

[32] Een belangrijke uitzondering daarbij zijn de resultaten van AEA et al. (2012) voor spoorinfrastructuur. Deze resultaten liggen aanmerkelijk hoger dan in de twee andere studies. De belangrijkste reden hiervoor is dat de AEA-studie de ketenemissies gerelateerd aan de bovenleidingen veel hoger inschat dan de overige studies. Dit blijkt ook uit (UIC, 2016), waar de resultaten van AEA et al. op dit punt veel hoger liggen dan de vier andere studies die waar worden meegenomen. We beoordelen de waarde van AEA et al. daarom als een outlier en nemen die niet mee in onze berekeningen.

Om toch de onzekerheid in de kentallen mee te nemen, hanteren we bij de inschatting van de ketenemissies een bandbreedte. Op basis van een nadere bestudering van de onderliggende studies bij de drie studies genoemd in Tabel 22, gaan we daarbij uit van een range voor de kentallen van plus en min 20%.

De kentallen voor de referentie-infrastructuur is vervolgens ook onderverdeeld naar de verschillende ketenstappen (constructie, onderhoud, beheer en afdanking). Daarbij is gebruikgemaakt van de onderverdeling zoals die Paragraaf 2.2 zijn gepresenteerd.

D.3.2 Bepalen kentallen ketenemissies voor verschillende classificaties infrastructuur

De kentallen voor de referentie-infrastructuur hebben we omgerekend naar kentallen voor verschillende classificaties van infrastructuur. Daarbij kunnen drie stappen worden onderscheiden:
1. Selectie en definitie van classificaties van infrastructuur.
2. Bepalen van omrekenfactoren voor de verschillende classificaties.
3. Bepalen van de kentallen voor de verschillende classificaties.

Deze drie stappen lichten we hierna verder toe.

Selectie en definitie van classificaties van infrastructuur

Op basis van het overzicht van factoren die van invloed zijn op de omvang van de ketenemissies gerelateerd aan infrastructuur (zie Bijlage C.3) en de beschikbare data voor de verschillende routes hebben we een selectie gemaakt van classificaties waarvoor we afzonderlijke kentallen voor ketenemissies berekenen.

Wegvervoer

Voor het wegvervoer hanteren we een tweetal classificaties:
- *Type landschap: vlak, heuvelachtig, bergachtig*. De reden om type landschap mee te nemen als classificatie is dat dit een goede indicator is voor het aandeel bruggen en tunnels, waarvan in Bijlage C.3 is vastgesteld dat die een grote invloed hebben op de ketenemissies. Tabel 23 geeft een overzicht van het aandeel tunnels en bruggen dat kan worden aangenomen voor de verschillende typen landschappen.

Tabel 23 - Classificatie wegvervoer type landschap: aandeel bruggen/tunnels per type landschap

	Vlak	Heuvelachtig	Berg
Aandeel tunnels (%)			
Ecoinvent centre (2007)	-	-	15,0%
Berekening Nederland[a]	0,3%	-	-
Deze studie	0,3%	7,7%[b]	15,0%
Aandeel bruggen (%)			
Ecoinvent centre (2007)	-	-	16,0%
Berekening Nederland[a]	0,6%	-	-
Deze studie	0,6%	8,3%[b]	16,0%

[a] Deze berekeningen zijn gebaseerd op data van o.a. CBS Statline (2020) en Bruggenstichting (2020).

[b] Het aandeel tunnels en bruggen in een heuvelachtig landschap hebben we geschat door het gemiddelde te nemen van de waarden voor vlak en berglandschap.

— *Type weg: stadsweg, provinciale weg, snelweg*. Zoals aangegeven in Bijlage C.3 heeft het type weg invloed op de ketenemissies vanwege verschillen in gebruikte materialen, dimensionering van de infrastructuur, de omvang (bijv. aantal rijbanen, oppervlakte vliegveld) en de intensiteit waarmee de infrastructuur wordt gebruikt (bij bepaling ketenemissies per voertuig- of reizigerskilometer). In deze studie definiëren we de type wegen aan de hand van het aantal rijbanen (zie Tabel 24). Daarnaast houden we ook rekening met verschillen in de intensiteit waarmee deze wegen worden gebruikt.

Tabel 24 - Classificatie wegevervoer type weg (twee richtingen)

	Snelweg	Provinciaal	Stad
Gemiddeld aantal rijstroken	5	2	2

Spoorvervoer

Ook voor het spoorvervoer hanteren we een tweetal classificaties:

— *Type landschap: vlak, heuvelachtig, bergachtig*. Evenals bij het wegvervoer onderscheiden we drie typen landschappen als indicator voor het aandeel bruggen en tunnels. Het aandeel tunnels en bruggen per type landschap weergegeven in Tabel 25.

Tabel 25 - Classificatie spoorvervoer type landschap

	Vlak	Heuvelachtig	Berg
Aandeel tunnels (%)			
Ecoinvent centre (2007)	-	-	7,0%
Merchan et al. (2017)	2,6%	-	-
Deze studie	2,6%	4,8%[a]	7,0%
Aandeel bruggen (%)			
Ecoinvent centre (2007)	-	-	3,0%
Merchan et al. (2017)	2,2%	-	-
Deze studie	2,2%	2,6%[a]	3,0%

[a] Het aandeel tunnels en bruggen in een heuvelachtig landschap hebben we berekend door het gemiddelde te nemen van de waarden voor vlak en berglandschap.

— *Opbouw spoor: ballastspoor en balastloos spoor;* de opbouw van het spoor heeft een belangrijke invloed op de ketenemissies. Een belangrijke factor daarbij is of het spoor met of zonder ballast is uitgevoerd[33]. Bij een ballastloos spoor liggen de ketenemissies per km netwerk ca. 38% hoger dan bij een ballastspoor. Het merendeel van het Europese spoornetwerk bestaat uit ballastsporen (Avramovic, 2010). Een ballastloos spoor wordt vrijwel alleen op hoge snelheidslijnen toegepast. Op basis van Ecoinvent centre (2007) schatten we in dat bij 20% van de hogesnelheidslijnen in Europa gebruik wordt gemaakt van ballastloze sporen. Bij het reguliere spoor wordt in principe geen gebruikgemaakt van ballastloze sporen waardoor dit aandeel 0% is.

[33] Bij een ballastspoor liggen de spoorstaven op dwarsliggers, die op hun beurt liggen op een zandbed met daarop ballast (grove steenslag). Bij een ballastloos spoor liggen de spoorstaven in een betonconstructie.

Luchtvaart

Aangezien er bij de luchtvaart sprake is van puntinfrastructuur, is het eenvoudiger om specifieke data te verzamelen over die infrastructuur dan bij weg- of spoorinfrastructuur. Vandaar dat we bij luchtvaart niet werken met classificaties, maar de kentallen uit de literatuur omrekenen op basis van specifieke data voor de verschillende luchthavens. Dit doen we op basis van een tweetal factoren:

- *De intensiteit van het aantal passagiers (aantal passagiers per m^2 vliegveld)*: deze factor gebruiken we om de ketenemissies per m^2 gerelateerd aan onderhoud en beheer te schalen tussen de luchthaven zoals die is aangenomen in de SimaPro-data (bron voor het kental voor de referentie-luchthaven) en de betreffende luchthavens voor de voorbeeldreizen. Om het aandeel van onderhoud en beheer in de ketenemissies te bepalen is gebruikgemaakt van de waarden zoals die zijn weergegeven in Paragraaf 2.2.
- *De oppervlakte van de luchthaven;* voor de ketenemissies die samenhangen met constructie en afdanking gaan we er vanuit dat die per m^2 gelijk zijn voor alle luchthavens.

In Bijlage A is een overzicht gegeven van de data die is gebruikt om de bovenstaande factoren toe te passen in deze studie.

Bepalen van omrekenfactoren voor de verschillende classificaties

In Tabel 26 zijn de omrekenfactoren voor de verschillende classificaties weergegeven.

Tabel 26 - Omrekenfactoren voor de verschillende classificaties

Classificatie	Omrekenfactor	Onderbouwing
Weg - Type landschap		
Vlak	0,68	Op basis van AEA et al. (2012) zijn kentallen gegeven voor een meter weg door een vlak landschap. De omrekenfactor is berekend door dit kental als percentage uit te drukken ten opzichte van de referentie-infrastructuur.
Heuvelachtig	0,84	Berekend als gemiddelde van de kentallen van het vlakke landschap en het berglandschap.
Berg	1,00	Referentie-infrastructuur
Weg - Type weg		
Snelweg	2,50	In deze studie gaan we uit van gemiddeld 5 rijbanen per snelweg. Dit is 2,5 keer zoveel als bij de referentie-infrastructuur.
Provinciaal	1,00	Referentie-infrastructuur.
Stad	1,00	Het aantal rijbanen in steden is is gelijk aan het aantal rijbanen van een provinciale weg.
Spoor - Type landschap		
Vlak	0,76	In UIC (2016) is per meter spoor in kaart gebracht wat de verschillen in ketenemissies (excl. de gebruiksfase) zijn tussen een spoor met een hoog aandeel tunnels en bruggen (beiden 35%) ten opzichte van een laag aandeel tunnels en bruggen (beiden 5%). We hebben aangenomen dat emissies door tunnels en bruggen lineair afnemen met het percentage tunnels en bruggen per meter spoor (en getoetst aan de resultaten in onderliggende studies van (UIC, 2016)). Op basis van deze aanname hebben we de omrekenfactor voor een vlak landschap bepaald.
Heuvelachtig	0,88	Dezelfde methode als voor het vlakke landschap.
Berg	1,00	Referentie-infrastructuur.

Classificatie	Omrekenfactor	Onderbouwing
Eurotunnel	5,18	Dezelfde methode als voor het vlakke landschap.
Spoor - Opbouw spoor		
Regulier spoor	1,00	Referentie-infrastructuur.
Hogesnelheidsspoor	1,08	Met SimaPro zijn twee kentallen voor de ketenemissies berekend, namelijk voor een regulier spoor en voor een hoge snelheidsspoor. De verhouding tussen deze twee kentallen hebben we aangehouden als omrekenfactor.

Bepalen van de kentallen voor de verschillende classificaties

Op basis van de omrekenfactoren zoals hierboven gepresenteerd zijn de kentallen voor de referentie-infrastructuur (zie Tabel 22) omgerekend naar kentallen voor de verschillende classificaties van infrastructuur. De resulterende waarden zijn weergegeven in Tabel 27 tot en met Tabel 29.

Tabel 27 - Kentallen voor ketenemissies voor de verschillende classificaties van weginfrastructuur

Classificatie weg	Ketenemissies (kg CO_2-eq./m/jaar)
Vlak snelweg	1.969
Vlak provinciaal	788
Vlak stad	788
Heuvelachtig snelweg	3.068
Heuvelachtig provinciaal	1.227
Heuvelachtig stad	1.227
Berg snelweg	4.168
Berg provinciaal	1.667
Berg stad	1.667
Eurotunnel	9.028

Tabel 28 - Kentallen voor ketenemissies voor de verschillende classificaties van spoorinfrastructuur

Classificatie spoor	Ketenemissies (kg CO_2-eq./m/jaar)
Vlak regulier spoor	3.967
Heuvelachtig regulier spoor	4.599
Berg regulier spoor	5.230
Eurotunnel	9.028
Vlak hogesnelheidsspoor	5.484
Heuvelachtig hogesnelheidsspoor	6.357
Berg hogesnelheidsspoor	7.230

Tabel 29 - Kentallen voor ketenemissies voor de verschillende luchthavens

Luchthaven	Ketenemissies (kg CO_2-eq./m^2/jaar)
Schiphol	1.456
London Heathrow	2.544
Paris CDG	1.184
Barcelona BCN	1.184
Rome FCO	1.184

D.3.3 Bepalen kentallen ketenemissies voor de verschillende classificaties infrastructuur per voertuigkilometer

De kentallen per kilometer (of vierkante kilometer) infrastructuur, zoals bepaald in Bijlage D.3.2, zijn omgerekend naar kentallen per voertuigkilometer (of LTO bij luchtvaart) met behulp van data over de intensiteiten waarmee de verschillende typen infrastructuur worden gebruikt. Daarbij is gebruikgemaakt van data zoals gebruikt in CE Delft et al. (2019a). Op deze manier wordt voor de berekening van de ketenemissies dezelfde mobiliteitsdata gebruikt als voor de berekening van de infrastructuurkosten en externe kosten (zie Hoofdstuk 5). De data over de intensiteit van het gebruik van verschillende typen infrastructuur is beschikbaar per land en per type infrastructuur.

D.3.4 Bepalen kentallen ketenemissies voor verschillende vervoerswijzen per classificatie infrastructuur

De kentallen zoals bepaald in Bijlage D.3.3 gelden voor een gemiddelde voertuigkilometer (of LTO bij luchtvaart). Echter, voor zowel weg-, spoor- als luchthaveninfrastructuur geldt dat er verschillende vervoerswijzen gebruikmaken van die infrastructuur. Niet al deze vervoerswijzen hebben echter hetzelfde aandeel in de ketenemissies. Hiervoor dient dus gecorrigeerd te worden.

In de literatuur kunnen verschillende methoden worden onderscheiden om de ketenemissies te alloceren naar vervoerswijzen:

- In Ecoinvent centre (2007) worden emissies toegerekend op basis van de (voertuig)kilometers (weg en spoor) en het aantal passagiers (luchtvaart). In andere woorden: als personenauto's 80% van de voertuigkilometers op een weg maken, dan krijgen zij ook 80% van de ketenemissies toegerekend.
- Tuchschmid et al. (2014) hanteren bruto tonkilometers[34] als toerekeningsfactor voor de toedeling van ketenemissies aan personen- en goederentreinen.
- In CE Delft et al. (2019b) wordt een gedetailleerde methodiek toegepast voor de allocatie van infrastructuurkosten, die naar ons inziens (in aangepaste vorm) ook toepasbaar is op ketenemissies[35]. Deze methodiek onderscheidt verschillende soorten kostenposten (aanlegkosten, onderhoudskosten, beheerkosten), waarvoor specifieke toerekeningsfactoren worden vastgesteld (afhankelijk van de aard van die kosten). Deze methodiek maakt het mogelijk om specifiek per ketenstap de factor te kiezen die het best aansluit bij de aard van die ketenstap.

In de hoofdanalyse maken we in deze studie gebruik van (een versimpelde variant van) de methodiek uit CE Delft et al. (2019b), aangezien deze methodiek de mogelijkheid biedt om per ketenstap te variëren in de toerekeningsfactor en op die manier rekening te houden met verschillen in de mate waarin voertuigen bijdragen aan de ketenemissies in de verschillende stappen. Een overzicht van de gehanteerde factoren is weergegeven in Tabel 30. Om inzicht te geven in de invloed van de gehanteerde toerekeningsfactoren op de uiteindelijke ketenemissies per vervoerswijzen zullen we ook een gevoeligheidsanalyse uitvoeren, waarbij we voor het wegverkeer rekenen met enkel voertuigkilometers (in lijn

[34] Bruto tonkilometers zijn de tonkilometer inclusief het gewicht van de trein.

[35] Hogere infrastructuurkosten worden namelijk (gedeeltelijk) veroorzaakt doordat er vaker of uitgebreider onderhoud moet worden uitgevoerd of omdat er meer of zwaarder gedimensioneerde infrastructuur moet worden aangelegd AEA et al. (2012). In deze situaties zullen er ook meer ketenemissies vrijkomen. Per saldo lijken de allocatiefactoren voor infrastructuurkosten en ketenemissies dan ook significante overlap te hebben, waarmee deze allocatiemethodiek voor beide effecten toepasbaar is.

met Ecoinvent centre (2007)) en voor het spoorverkeer met bruto ton kilometers (in lijn met Tuchschmid (2014)) als toerekeningsfactor.

Tabel 30 - Overzicht toerekeningsfactoren

Ketenstap	Toerekeningsfactoren
Wegverkeer	
Constructie	90% o.b.v. PAE-kilometers, 10% op aslastkilometers
Onderhoud en operatie vast	Voertuigkilometers
Onderhoud variabel	Aslastkilometers
Afdanking	Aslastkilometers
Spoor	
Constructie	Voertuigkilometers
Onderhoud en operatie vast	Voertuigkilometers
Onderhoud variabel	Tonkilometers
Afdanking	Tonkilometers
Luchtvaart	
Alle ketenstappen	Revenue ton kilometers

Op basis van de toerekeningsfactoren uit Tabel 30 en specifieke voertuig- en transportdata zijn correctiefactoren berekend waarmee de kentallen voor een gemiddelde voertuig-kilometer kunnen worden omgerekend naar kentallen per vervoerswijze. Zo is de correctie-factor voor ketenemissies als gevolg van constructie van een snelweg voor een personenauto bijvoorbeeld gelijk aan 0,8. Dit betekent dat de ketenemissies per voertuigkilometer voor een personenauto 80% bedraagt van de emissies per gemiddelde voertuigkilometer.

D.3.5 Bepalen ketenemissies per vervoerswijze op de voorbeeldreis

Met behulp van de kentallen per vervoerswijze en per classificatie van infrastructuur en specifieke data over de aandelen van de verschillende classificaties op de verschillende routes (zie Bijlage A), hebben we tenslotte de ketenemissies gerelateerd aan infrastructuur per vervoerswijze op de voorbeeldreizen bepaald. Voor de bepaling van de ketenemissies van PM en NO_x hebben we gebruikgemaakt van de verhouding in de ketenemissies van CO_2 per reizigerskilometer en PM/NO_x per reizigerskilometer uit Mobitool (2017).

E Bepalen ketenemissies van voertuigen

E.1 Inleiding

In deze bijlage presenteren we de kentallen voor de ketenemissies gerelateerd aan voertuigen. Deze kentallen zijn gebaseerd op een literatuurstudie, waarbij we de bronnen zoals gepresenteerd in Bijlage B hebben bestudeerd. In Bijlage E.2 presenteren we allereerst de kentallen voor de CO_2-ketenemissies, waarna we in Bijlage E.3 de kentallen voor de luchtvervuilende emissies presenteren.

E.2 Kentallen CO_2-ketenemissies voor voertuigen

Tabel 31 geeft een overzicht van de kentallen voor CO_2-ketenemissies zoals die door de verschillende studies worden gepresenteerd. De kentallen in de tabel zijn wel bewerkt door CE Delft, zodat ze onderling goed vergelijkbaar zijn. Zo hebben we bijvoorbeeld de bezettingsgraad en het kilometrage over de levensduur in lijn gebracht met de aannames die voor deze studie zijn gemaakt voor de referentievoertuigen.

Tabel 31 - Kentallen CO_2-ketenemissies voertuigen (g/rkm)

Studies	Productie	Onderhoud + afdanking	Totaal
Personenauto			
Mobitool (2016)	2,3	21,3	23,6
AEA et al. (2012)	14,5	7,3	21,8
Ricardo (2020)	42,8	-4,4[a]	39,4
Deze studie	**19,8**	**11,4**	**31,2**
Bus			
Mobitool (2016)	0,8	1,5	2,3
Ricardo (2020)	3,6	0,9	4,5
Deze studie	**2,2**	**1,4**	**3,6**
Hogesnelheidstrein			
Mobitool (2016)	0,4	0,3	0,7
AEA et al. (2012)	0,3	0,1	0,4
Deze studie	**0,4**	**0,2**	**0,6**
Elektrische intercity trein			
Mobitool (2016)	0,7	0,6	1,3
AEA et al. (2012)	0,5	0,1	0,7
Deze studie	**0,6**	**0,4**	**1,0**
Vliegtuig - korte afstand			
Mobitool (2016)	0,3	0,1	0,4
Deze studie	**0,3**	**0,1**	**0,4**
Vliegtuig - Middellange afstand			
Mobitool (2016)	0,3	0,1	0,4
Deze studie	**0,3**	**0,1**	**0,4**

[a] De emissies van onderhoud + afdanking zijn in deze studie negatief, wat het gevolg is van een hoog aandeel materialen dat gerecycled wordt (zie ook de uitleg in Bijlage C.2.1).

Voor de personenauto lopen de kentallen van de verschillende studies uiteen (ook al wordt in elke studie gekeken naar een Volkswagen Golf). Omdat de precieze reden daarvoor niet is te achterhalen op basis van een vergelijking van de studies hebben we er voor deze studie voor gekozen om het gemiddelde van de verschillende studies te hanteren als kental voor de referentieauto.

In de studies die hebben gekeken naar de ketenemissies van touringcars wordt geen specifiek merk en type benoemd. De studies bekijken echter wel vergelijkbare touringcars in termen van aantal zitplaatsen en het gewicht van het voertuig. Deze kenmerken komen overeen met wat is aangenomen voor de referentie-bus in deze studie. Evenals voor de personenauto hanteren we het gemiddelde van de ketenemissies uit de verschillende studies als kental voor de referentie-bus in deze studie.

Bij de treinen worden door de studies verschillende typen treinen bekeken. Echter, we zien dat dit geen substantiële invloed heeft op de materialen die voor de treinen worden gebruikt. De ketenemissies van productie liggen dicht bij elkaar, ongeacht het type trein. De emissies van onderhoud variëren meer, maar ook hier is het door een gebrek aan inzicht in de aannames die in de verschillende studies zijn gemaakt niet mogelijk om dit verschil beter te verklaren. Voor de treinen hanteren we daarom het gemiddelde van de studies als kental voor de referentietreinen.

Bij vliegtuigen was er van de bestudeerde studies maar één die bruikbare kentallen gaf voor de CO_2-ketenemissies. Deze kentallen worden gehanteerd voor de referentievliegtuigen in deze studie.

Tot slot gaan we er in deze studie gaan vanuit dat de afdanking geen positieve of negatieve emissies met zich mee zal brengen. Hier zijn een aantal redenen voor:

- Een groot gedeelte van de materialen in voertuigen zijn recyclebaar, met name metalen (staal en aluminium). Dit dekt het grootste gedeelte van de materialen die worden toegepast in voertuigen af (zie Bijlage C.4).
- Materialen zoals koolstof vezel composieten, textiel en rubber zijn moeilijk recyclebaar en leiden daardoor tot positieve emissies aan het einde van de levensduur.
- Er bestaat Europese regelgeving waaraan voldaan moet worden bij de productie van een personenauto's: een groot gedeelte (85%>) van de toegepaste materialen moet recyclebaar zijn aan het einde van de levensduur (AEA, et al., 2012).
- Bij de productie van voertuigen worden gedeeltelijk gerecyclede materialen gebruikt (ecoinvent centre, 2007).

In ecoinvent centre (2007) is ervoor gekozen om de emissies die vrijkomen bij afdanking van niet-recyclebare materialen, weg te strepen tegen de emissies die bespaard blijven bij het gebruik van gerecyclede materialen bij productie. In Ricardo Energy & Environment (2020) wordt wel uitgegaan van negatieve emissies door een hoge recyclebaarheid (voor de personenauto en bus). Wij hanteren in deze studie de methode van Ecoinvent centre (2007), wat als een conservatieve methode beschouwd zou kunnen worden ten opzichte van Ricardo Energy & Environment (2020). In werkelijkheid zouden negatieve emissies door afdanking op kunnen treden waardoor de voertuigemissies lager uit zouden kunnen vallen. Het effect op de totale ketenemissies is echter gering omdat, behalve voor de personenauto, emissies door infrastructuur het grootste aandeel hebben in de ketenemissies.

E.3 Kentallen NO_x- en PM-ketenemissies voor voertuigen

De kentallen voor NO_x- en PM-ketenemissies gerelateerd aan voertuigen zijn afgeleid van de CO_2-kentallen. Op basis van Mobitool (2016) is de verhouding in de CO_2-ketenemissies en de NO_x- en PM-ketenemissies (allen in g/rkm) bepaald. Die verhouding is gebruikt om de NO_x- en PM-ketenemissies voor de verschillende referentievoertuigen te bepalen (zie Tabel 32)

Tabel 32 - Kentallen NO_x- en PM-ketenemissies voertuigen (mg/rkm)

	NO_x (mg/rkm)			PM (mg/rkm)		
Referentievoertuigen	**Productie + afdanking**	**Onderhoud**	**Totaal**	**Productie + afdanking**	**Onderhoud**	**Totaal**
Personenauto	2,1	3,7	5,8	18,2	4,5	22,7
Touringcar	8,9	1,0	9,9	5,2	0,2	5,4
Hogesnelheidstrein	0,8	0,3	1,0	0,4	0,0	0,4
Elektrische Intercity trein	0,9	0,4	1,3	0,4	0,2	0,6
Vliegtuig	0,5	0,2	0,7	0,1	0,1	0,1

F Externe en infrastructuurkosten en belastingen/heffingen in de gebruiksfase

F.1 Inleiding

In deze bijlage geven we een korte toelichting op de verschillende externe en infrastructuurkosten en belastingen/heffingen die gerelateerd zijn aan de gebruiksfase van mobiliteit. Hierbij gaat het bij de kosten bijvoorbeeld om de externe ongevalskosten en geluidskosten, terwijl het belastingen en heffingen bijvoorbeeld gaat om brandstofaccijnzen en infrastructuurheffingen. Al deze kosten en belastingen/heffingen worden in Hoofdstuk 5 meegenomen in de vergelijkende analyses voor de voorbeeldreizen. Overigens is de scope van deze kosten en belastingen/heffingen volledig consistent met de scope zoals toegepast in de studie 'De prijs van een vliegreis' (CE Delft, 2019). Het enige verschil tussen beide studies is dat deze studies uitgaat van waarden voor 2020, terwijl in CE Delft (2019) 2016 het basisjaar was. Hoe deze actualisatie is gemaakt wordt in deze bijlage toegelicht.

In het vervolg van deze bijlage geven we allereerst een overzicht van de verschillende externe en infrastructuurkosten (zie Bijlage F.2). In Bijlage F.3 geven we vervolgens een overzicht van alle relevante belastingen en heffingen voor het gebruik van mobiliteit. Tot slot bespreken we in Bijlage F.4 de rol van subsidies.

F.2 Externe kosten en infrastructuurkosten

In de vergelijkende analyse, zoals die wordt uitgevoerd in Hoofdstuk 5, worden naast de externe kosten van ketenemissies ook de externe en infrastructuurkosten meegenomen zoals weergegeven in Tabel 33 (allen gerelateerd aan de gebruiksfase). Evenals in CE Delft (2019) worden de congestiekosten niet meegenomen[36]. Deze kostenpost blijft buiten beschouwing, omdat we voor de voorbeeldreizen aannemen dat de reiziger reist tijdens zijn/haar vakantie[37] en daarom kiest voor een vertrektijdstip waarbij de kans dat hij/zij in de file terechtkomt minimaal is[38].

[36] Enkele andere externe kostenposten die niet worden meegenomen zijn de kosten van trillingen, de externe kosten van energievoorzieningszekerheid en de externe kosten als gevolg van nucleaire energieopwekking. Voor deze kostenposten bestaan geen algemeen geaccepteerde waarderingskentallen (CE Delft, et al., 2019a).

[37] We kiezen bij de voorbeeldreizen voor dit reismotief, omdat autoritten en vliegreizen vooral hierop concurreren.

[38] Mocht er toch voor een vertrektijdstip gekozen worden waarbij er sprake is van congestie, dan kunnen de congestiekosten substantieel zijn. De omvang van deze kosten verschilt echter sterk per locatie en tijdstip (en feitelijk dus met de drukte op de weg). Het is dan ook lastig om één enkele schatting te geven van de congestiekosten op de voorbeeldreizen.

Tabel 33 - Overzicht van externe kosten en infrastructuurkosten[39] (gerelateerd aan de gebruiksfase)

Kostenpost	Vaste of variabele kosten
Externe kosten	
Externe ongevalskosten	Variabel
Kosten van luchtvervuiling	Variabel
Klimaatkosten	Variabel
Kosten van geluid	Variabel
Kosten van emissies van brandstof- en elektriciteitsproductie	Variabel
Kosten van schade aan natuur en milieu	Vast
Infrastructuurkosten	
Vaste infrastructuurkosten	Vast
Variabel infrastructuurkosten	Variabel

Evenals in CE Delft (2019)is voor de bepaling van de hoogte van de externe en infrastructuurkosten gebruikgemaakt van kentallen uit het Europese Handbook on the external costs of transport (CE Delft, et al., 2019a) en de studie 'Overview of transport infrastructure expenditures and costs; (CE Delft, et al., 2019b). Beide studies presenteren voor alle 28 EU-lidstaten state-of-the-art kentallen voor 2016. Deze kostenkentallen zijn voor inflatie gecorrigeerd naar het basisjaar 2020. Tevens is de gehanteerde CO_2-prijs geactualiseerd.

In Tabel 33 is voor elke kostenpost aangegeven of het gaat om vaste of variabele kosten (in andere woorden, of de omvang van de kosten varieert met de omvang van het verkeer). Bij de externe kosten gaat het vooral om variabele kosten, met uitzondering van de kosten van schade aan natuur en milieu[40] en gedeeltelijk de kosten van ketenemissies.
Bij infrastructuurkosten zijn een deel van de kosten als vast te definiëren (bijvoorbeeld de aanlegkosten) en een ander deel als variabel (bijvoorbeeld een groot deel van de onderhoudskosten).

Tot slot, het feit dat de analyses in deze studie zijn gebaseerd op kentallen brengen een bepaalde mate van onzekerheid met zich mee. De berekende externe en infrastructuurkosten geven dan ook geen precieze weergave van de daadwerkelijke kosten die optreden bij de verschillende vervoerswijzen, maar bieden wel een goede eerste orde schatting van die kosten. Op basis van deze eerste orde schattingen is het mogelijk om op betrouwbare wijze de vergelijkende analyse tussen de verschillende vervoerswijzen uit te voeren.

[39] Voor een nadere omschrijving van de verschillende kostenposten verwijzen we naar CE Delft (2019) of CE Delft et al. (2019a).

[40] Bij deze kosten gaat het om het effect van transportinfrastructuur op ecosystemen en biodiversiteit, onder andere door de doorsnijdingseffecten van transportinfrastructuur. De omvang van deze kosten zijn onafhankelijk van de omvang van het verkeer en daarmee dus vast.

F.3 Belastingen en heffingen

Overzicht belastingen en heffingen

In aanvulling op de belastingen en heffingen die zijn gerelateerd aan de ketenemissies (zie Hoofdstuk 4) onderscheiden we in deze studie dezelfde belastingen en heffingen als die zijn meegenomen in CE Delft (2019). Een overzicht van deze belastingen is gegeven in Tabel 34. Ook hierbij hebben we weer een onderscheid gemaakt tussen vast en variabel: vaste belastingen/heffingen variëren in omvang niet met het aantal kilometers dat wordt gereisd, terwijl dit bij variabele belastingen wel het geval is. Bij een aantal heffingen (tolgelden, vignets) is het niet eenduidig vast te stellen of die als vast of variabel moet worden beschouwd. Echter, ook bij deze heffingen is er altijd een variabele component (bij vignetten kan er vaak gekozen worden voor een geldigheidsduur van een week, een maand of een jaar). Vandaar dat er in CE Delft et al. (2019c) voor gekozen is om deze heffingen als variabel te beschouwen. Wij hanteren deze aanname ook in deze studie, ook al om consistentie met de studie 'De prijs van een vliegreis' te waarborgen.

Tabel 34 - Overzicht van transportbelastingen en -heffingen

Belasting of heffing	Categorie belasting/heffing	Vaste of variabele belastingen/heffingen
Wegvervoer		
Brandstofaccijns	Energiebelasting/heffing	Variabel
Aanschafbelasting	Voertuigbelasting	Vast
Houderschapsbelasting	Voertuigbelasting	Vast
Assurantiebelasting	Voertuigbelasting	Vast
(Snelweg)Tolheffingen	Infrastructuurheffing	Variabel
Vignetten	Infrastructuurheffing	Variabel
Stedelijke tolheffingen	Infrastructuurheffing	Variabel
Btw op transportbelastingen	Btw	Vast/Variabel
Btw op brandstof, aanschaf en onderhoud	Btw	Vast/Variabel
Spoorvervoer		
Elektriciteitsbelasting	Energiebelasting/heffing	Variabel
Infrastructuurheffingen (=gebruiksvergoeding)	Infrastructuurheffing	Variabel
EU ETS	Energiebelasting/heffing	Variabel
Btw op tickets en op voor- en natransport	Btw	Variabel
Vliegtuig		
Vliegbelasting	Passagiersbelasting	Variabel/vast
Luchthavengelden (incl. securitygelden)	Infrastructuurheffing	Variabel
Navigatieheffingen (terminal en route-heffing)	Infrastructuurheffing	Variabel
EU ETS	Energiebelasting/heffing	Variabel
Btw op tickets en op voor- en natransport	Btw	Variabel

In lijn met de vorige studie (CE Delft, 2019) blijven algemene belastingen (bijvoorbeeld belastingen op arbeid en kapitaal) buiten beschouwing. Een aparte rol is wederom weggelegd voor btw. Btw (met uitzondering van de btw over andere transportbelastingen) blijft in analyses zoals we die in deze studie uitvoeren meestal buiten beschouwing, omdat het

gezien kan worden als een algemene belasting. Echter, de btw-tarieven tussen de verschillende vervoerswijzen verschillen sterk en hebben daardoor invloed op de kosten voor de reiziger. Bovendien maakt btw nadrukkelijk onderdeel uit van het politieke en maatschappelijke debat over de verschillen tussen modaliteiten. Om deze rol van btw in de afweging tussen vervoerswijzen toch inzichtelijk te maken nemen we, evenals in CE Delft (2019):

- bij de bepaling van de totale belastingen en heffingen voor de voorbeeldreizen alle btw in beschouwing;
- bij de vergelijking van de externe en infrastructuurkosten met de belastingen/heffingen nemen we daarentegen enkel de btw mee die wordt betaald over transportbelastingen en -heffingen (omdat die dient te worden opgevat als een transportbelasting).

Actualisatie hoogte belastingen/heffingen

Voor de bepaling van de hoogte van de belastingen en heffingen in 2020 hebben we een actualisatie uitgevoerd van de analyse uit de vorige studie (CE Delft, 2019). Daarvoor hebben we een inventarisatie uitgevoerd van de huidige stand van zaken met betrekking tot de relevante belastingen en heffingen in de landen waar de voorbeeldreizen doorheen gaan. Een aantal belastingen/heffingen zijn onderhevig geweest aan veranderingen tussen 2016 en 2020. De belangrijkste ontwikkelingen per modaliteit zijn:

- Wegverkeer:
  - Het btw-tarief voor binnenlandse reizen met de bus en trein is in Nederland gestegen van 6% in 2016 naar 9% in 2020.
  - De brandstofaccijns op benzine en diesel is in de meeste landen gestegen.
  - Het tarief van de assurantiebelastingen is in sommige landen gestegen.
- Spoorvervoer:
  - De EU ETS-prijs is tussen 2016 en 2020 sterk gestegen (van € 5,20 naar € 24,76 per ton CO_2). In de meeste landen is de gemiddelde CO_2-intensiteit van de elektriciteitsproductie in dezelfde periode echter ook afgenomen. Afhankelijk van de mate waarin dit laatste het geval is geweest, zijn de EU ETS-kosten voor het spoorvervoer gestegen of gedaald.
  - In vergelijking met de vorige studie is een heffing meegenomen die in de vorige studie nog ontbrak, namelijk de specifieke infrastructuurheffing voor de HighSpeedOne in het Verenigd Koninkrijk (die wordt gebruikt voor het treinverkeer tussen Frankrijk en Londen).
- Luchtvaart:
  - Voor de korte afstandsvluchten zijn de luchthavengelden gedaald. Het gaat om de gelden voor het referentietoestel Embraer 170 op de luchthavens Amsterdam Schiphol, London Heathrow en Paris Charles de Gaulle (respectievelijk een daling van 16%, 29% en 23%). De luchthavengelden voor de vliegtuigen op de middellange afstand zijn, door hun grootte en gewicht (Boeing 737-700) gestegen ten opzichte van 2016 op de luchthaven Amsterdam Schiphol (12% toename). De luchthavengelden voor deze categorie zijn op de luchthavens van aankomst overigens gedaald. Dit zijn de luchthavens Barcelona El Prat en Rome Fiumicino (resp. 8 en 23% daling).
  - Vliegbelastingen per persoon voor de luchthavens London Heathrow en Paris Charles de Gaulle zijn gedaald ten opzichte van de bedragen in 2016.
  - De toegenomen EU ETS-prijs leidt tot aanzienlijk hogere EU ETS-kosten voor de luchtvaart (374%).

F.4 Subsidies

Hoewel het speelveld tussen de verschillende vervoerswijzen ook beïnvloedt kan worden door verschillen in subsidies, nemen we evenals in de vorige studie subsidies niet expliciet mee. We doen dit niet, omdat een deel van de subsidies impliciet al wordt meegenomen in de bepaling van de kosten of de belastingen/heffingen (bijvoorbeeld de vrijstelling van btw op vliegtickets en accijnsvrijstelling van kerosine), of omdat ze niet relevant zijn voor de voorbeeldreizen (dit geldt bijvoorbeeld voor de BDU[41] bijdragen die worden uitgekeerd aan onrendabele OV-verbindingen), of omdat ze lastig zijn toe te rekenen aan een specifiek voertuig voor een specifieke reis (bijvoorbeeld R&D-subsidies). Voor een nadere toelichting op dit onderwerp verwijzen we naar CE Delft (2019).

[41] Brede Doel Uitkeringen zijn Rijkssubsidies voor de bekostiging van uitgaven op het gebied van verkeer en vervoer in de regio. Het gaat dan vaak om laag bezette, niet commerciële OV-verbindingen.