

**Adressé à :**

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

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

**Eindrapport: Transport van  
goederen**

CSC N° 2019B0134

**8 DECEMBER 2020**



**Personne de contact :**

Sylvie Gayda  
Directeur d'études  
Tél. +32 (0)2 738 78 79  
[s.gayda@stratec.be](mailto:s.gayda@stratec.be)



<b>Deliverable</b>	
<b>Author</b>	Koen Mommens
<b>Status</b>	Final
<b>Version</b>	Einde versie
<b>Document date</b>	08/12/2020
<b>Reviewers</b>	Lieselot Vanhaverbeke, Quentin De Clerck

# Inhoudstafel

<b>IMPACT OP HET GOEDERENVERVOER</b>	<b>7</b>
<b>1. INLEIDING</b>	<b>7</b>
<b>2. METHODOLOGIE</b>	<b>9</b>
2.1. TRANSPORTNETWERK	9
2.2. TRANSPORTVRAAG	10
2.3. AGENTS	12
2.4. VLOOTSAMENSTELLING	15
2.4.1. aantal	15
2.4.2. aandrijvingstechnologie	17
2.4.3. interne kosten	29
2.4.4. externe kosten	32
<b>3. SCENARIO'S</b>	<b>36</b>
<b>4. RESULTATEN</b>	<b>37</b>
4.1. BUSINESS AS USUAL	37
4.2. INVOERING VAN EEN ZERO-EMISSIEZONE	39
4.3. INVOERING VAN EEN DIESEL- EN BENZINEBAN	43
4.4. VERGELIJKING VAN DE SCENARIO'S	46
4.5. DISCUSSIE	49
<b>5. CONCLUSIE</b>	<b>50</b>
<b>6. REFERENTIES</b>	<b>52</b>

## Lijst van de tabellen

Tabel 1: Marktaandeel in 2035 per voertuigtype en aandrijvingstechnologie .....	18
Tabel 2: Euro normering voor bestelwagens (bron: Ecoscore) .....	21
Tabel 3: Euro-normering vachtwagens (bron: Dieselnet.com) .....	22
Tabel 4: Interne kosten voor de verschillende voertuigen.....	30
Tabel 5: Externe kost voor geluidsoverlast per voertuigtype (van Essen et al., 2019). .....	33
Tabel 6: Externe kost voor congestie (van Essen et al., 2019).....	34
Tabel 7: : Marginale externe kost voor ongevallen in België (van Essen et al., 2019). .....	34
Tabel 8: Emissies (g/vkm) voor wegvoertuigen op stedelijke access roads, met snelheidsbeperking 30 km/u, 0% hellingsgraad, free flow (HBEFA, 2019). .....	35
Tabel 9: Transportprestaties per type voertuig op dagbasis voor business as usual scenario .....	38
Tabel 10: Externe kosten van business as usual scenario (uitgedrukt in €) .....	39
Tabel 11: Transportprestaties per type voertuig op dagbasis voor invoering zero-emissie ban.....	41
Tabel 12: Externe kosten invoering zero-emissie ban (uitgedrukt in €). .....	42
Tabel 13: Transportprestaties per type voertuig op dagbasis voor invoering diesel- en benzineban... ..	44
Tabel 14: Externe kosten voor invoering diesel- en benzineban (uitgedrukt in €). .....	45

## Lijst van de figuren

Figuur 1: Transport netwerk TRABAM (Mommens, 2019) .....	9
Figuur 2: Zonering TRABAM voor Brussels Hoofdstedelijk Gewest .....	10
Figuur 3: Evolutie van de tewerkstelling per sector in België (bron: Nationale Bank van België) .....	11
Figuur 4: Evolutie van het goederenvervoer uitgedrukt in tonnage (bron: Federaal Planbureau, 2019) .....	12
Figuur 5: Zonering Strategisch Personenvervoersmodel Vlaanderen. ....	13
Figuur 6: Vergelijking saturatiegraad wegvervoer op linkniveau tussen Strategisch Vrachtmodel Vlaanderen (links) en TRABAM (rechts) .....	13
Figuur 7: Geografische spreiding van depot van Belgische transport ondernemingen (Mommens et al., 2016).....	14
Figuur 8: TRABAM methodologie.....	15
Figuur 9: Evolutie van aantal inschrijvingen nieuwe vrachtvoertuigen (FEBIAC, 2020) .....	16
Figuur 10: Euro-normering vrachtwagens. ....	22

Figuur 11: BEV vrachtwagens (links: 12 ton vrachtwagen van AVIA Ingenieria -test inCityLogin Madrid, rechts: Volvo – test Dencity project Gothenburg).....	26
Figuur 12: Verdeling van aantal voertuigkilometers per voertuigtype en scenario. ....	46
Figuur 13: Verdeling van aantal voertuigkilometers per aandrijvingstechnologie en scenario. ....	47
Figuur 14: Modal split per tonkilometers afgelegd in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest. ....	47
Figuur 15: Externe kost per dag in euro. ....	48
Figuur 16: Externe kost per dag in euro (congestie buiten beschouwing gelaten). ....	48

## Lijst van de afkortingen

BEV	Batterij Elektrisch Voertuig
CBM	<i>compressed biomethane</i>
CNG	<i>compressed natural gas</i>
HHV	<i>high heating value</i>
KMO	<i>kleine of middelgrote onderneming</i>
LBM	<i>liquified biomethane</i>
LNG	<i>liquified natural gas</i>
TRABAM	<i>Transport Agent-BAsed Model</i>
TTW	<i>tank-to-wheel</i>
WTT	<i>well-to-tank</i>
ZEZ	zero-emissiezone

# IMPACT OP HET GOEDERENVERVOER

## 1. INLEIDING

In 2030 emissievrije stedelijke logistiek hebben, dat is de doelstelling die in het Witboek Transport van de Europese Commissie geschreven staat (Europese Commissie, 2011). Een ban van verbrandingsmotoren voor het Brussels Hoofdstedelijk Gewest kadert in deze visie. Een ban van verbrandingsmotoren in een bepaalde zone wordt in de literatuur vaak benoemd als een zero-emissiezone (ZEZ). Bij dergelijke invoering mogen enkel zero-emissievoertuigen de zone binnen. Hieronder vallen elektrisch aangedreven voertuigen, voertuigen aangedreven op waterstof en plug-in hybride voertuigen (zero-emissie in stedelijk gebied, benzine/diesel op niet-stedelijk traject). Het dient aangegeven te worden dat er onder zero-emissie dan louter naar het *tank-to-wheel* (TTW) gedeelte van de keten gekeken wordt. Dat zijn de emissies vanaf het tanken/opladen van het voertuig tot en met de uitlaat tijdens gebruik. Er is echter ook nog het productie gedeelte van de energiebron en het transport van de energiebron tot aan de 'pomp'. Dit wordt het *well-to-tank* (WTT) gedeelte genoemd. Elektrische en waterstof-voertuigen kunnen ook in het *well-to-tank* gedeelte CO<sub>2</sub> neutraal zijn mits er in de energiesector tegen 2035 een volledige omschakeling gebeurt naar zero-emissieproductie. LBM (liquified biomethane) en CBM (compressed biomethane) kunnen in extreme gevallen zero-emissie zijn, maar algemeen mogen ze niet als zero-emissietechnologieën beschouwd worden. Meer informatie over de verschillende aandrijvingstechnologieën is terug te vinden in het deelrapport Technologie binnen deze studie, en in Sectie 2.4.2 van dit rapport.

Spoor- en binnenvaartvervoer worden algemeen als duurzame transport alternatieven beschouwd (Otten et al., 2017). Spoorvervoer kan als zero-emissie beschouwd worden, zeker tegen 2035. Momenteel gebeurt spoorvervoer in België al hoofdzakelijk via elektrisch aangedreven locomotieven, op rangeeractiviteit na dewelke nog met diesel aangedreven locomotieven plaatsvindt. Binnenvaart maakt voornamelijk gebruik van oudere, diesel aangedreven schepen. Hoewel er inspanningen plaatsvinden om de vloot te vernieuwen en de emissies van de schepen te reduceren, zal het zeer moeilijk zijn voor de binnenvaartsector om tegen 2035 emissieloos te zijn. Het duurzaamheidsvoordeel van de binnenvaart is de schaalgrootte en de beschikbare capaciteit. Daardoor kan ook congestie vermeden en verminderd worden. Om die redenen wordt binnenvaart doorgaans wel toegelaten in een zero-emissiezone, ondanks dat ze in wezen dus niet zero-emissie zal zijn. Een modale verschuiving richting binnenvaart en/of spoorvervoer is mogelijk, en zal voornamelijk afhangen van de kostimpact van de maatregel op het wegvervoer.

In deze studie wordt het jaar 2035 gesimuleerd. Ricardo-AEA (2017) stelt in een studie voor Oxford dat de voordelen van een ban van verbrandingsmotoren in de eerste jaren niet opwegen tegen de kosten.

Tegen 2035 tekent zich volgens de studie evenwel een sterk netto voordeel op. Dat wordt behaald door de expansie van het aantal zero-emissievoertuigen, onder meer door de significante daling van de kosten van zero-emissievoertuigen ten opzichte van de stijgende kosten van conventionele voertuigen.

Technisch is een ban van voertuigen al (zo goed als) implementeerbaar als die op basis van beschikbare technologie (ANPR camera's voor LEZ en OBU's) gehandhaafd wordt. Realistisch is de implementatie pas na significante aanpassing van de voertuigvloot en uitbouw van de noodzakelijke tank- en laadinfrastructuur.

Afgaande op bovenstaande worden **drie scenario's** gehanteerd in deze studie:

1. **Business as usual in 2035:** dit scenario gaat uit van doorlopend beleid. Onder andere kilometerheffing en lage-emissiezone (LEZ) blijven behouden onder de huidige vorm. Dit vormt het scenario waarmee de andere scenario's vergeleken kunnen worden.
2. **Invoering van een zero-emissiezone in 2035.** In dit scenario wordt een ban ingevoerd voor goederenvoertuigen die op de weg rijden en geen zero-emissietechnologie gebruiken. Onder zero-emissietechnologieën worden elektrische voertuigen, plug-in hybride voertuigen en voertuigen aangedreven op waterstof verstaan. Ook binnenvaart en spoor worden toegelaten op het grondgebied van het Brussels Hoofdstedelijk Gewest. De Brusselse Ring (R0) wordt hieronder niet verstaan.
3. **Invoering van een diesel- en benzineban in 2035.** In dit scenario worden enkel wegvoertuigen aangedreven op diesel en benzine op het hierboven vermelde gebied verboden.



## 2. METHODOLOGIE

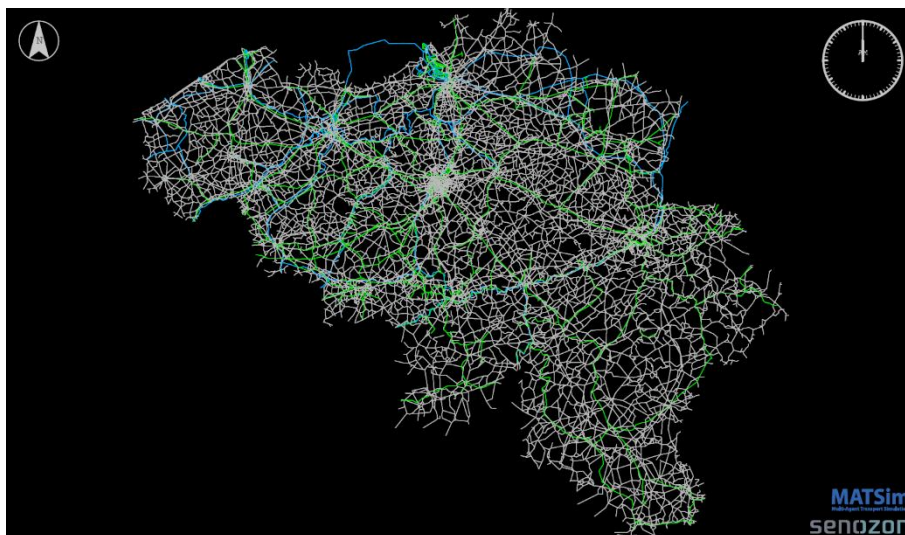
Er worden binnen het kader van deze studie meerdere simulaties uitgevoerd met een *agent-based transport* model, TRABAM genaamd. TRABAM staat voor Transport Agent-BASed Model. Het is een *agent-based transport* model voor multimodaal goederenvervoer binnen het Belgische grondgebied. TRABAM is ontwikkeld aan de Vrije Universiteit Brussel, onderzoeksgroep MOBI, en dit binnen het doctoraat van Koen Mommens (2019). TRABAM maakt gebruik van de open-source software MATSim (Horni et al., 2017), en bouwt verder op het werk van Schröder et al. (2014).

Het model is zeer geschikt voor het nauwkeurig berekenen van de maatschappelijke, economische en ecologische impact van goederentransport (Mommens et al., 2019) dankzij de in overweging genomen interne en externe kosten die verbonden zijn aan de transporttechnologieën. Het model werd reeds meermaals toegepast, onder andere voor supermarktketens (Mommens et al., 2018) en voor de Vlaamse Overheid (van Lier et al., 2019).

TRABAM heeft drie inputs: het transportnetwerk, de transportvraag, en de *agents* met hun depots en voertuigenvloot.

### 2.1. Transportnetwerk

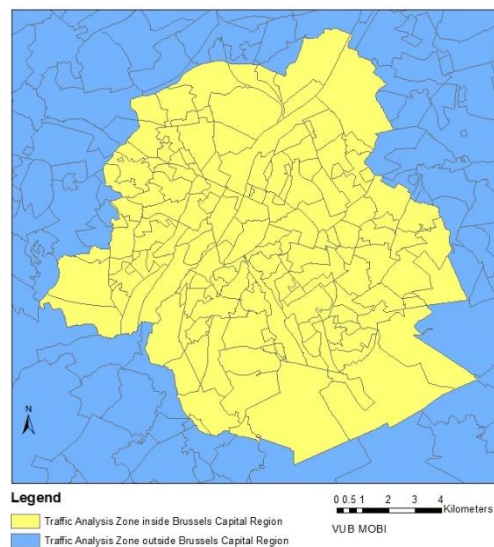
Het transportnetwerk bestaat uit de weginfrastructuur (afkomstig van Openstreetmaps), de bevaarbare waterwegen en de spoorinfrastructuur op het Belgisch grondgebied. Het verbod wordt verondersteld van toepassing te zijn op alle weginfrastructuur zich bevindend op het grondgebied van het Brussels Hoofdstedelijk Gewest, met uitzondering van de buitenring (R0).



Figuur 1: Transport netwerk TRABAM (Mommens, 2019)

## 2.2. Transportvraag

De transportvraag is de tweede input. Goederenstromen worden onderverdeeld volgens 10 goederentypes (NST/R<sup>1</sup>) en zes verschillende laadeenheden (vaste bulk, vloeibare bulk, pallets, containers, mobiele eenheden en andere), en worden gemodelleerd tussen 4.934 zones in België (Mommens et al., 2017). Deze zones zijn fijnmazig in stedelijke gebieden ('wijk'-niveau) en ruimer in niet-stedelijke gebieden ('secties'-niveau). De onderverdeling tussen stedelijke en niet-stedelijke gebieden is gebaseerd op Luyten et al. (2007). Voor het Brussels Hoofdstedelijk Gewest telt TRABAM 147 zones (zie Figuur 2). Bijgevolg is TRABAM uitermate geschikt voor simulaties van scenario's rond stedelijke logistiek.



*Figuur 2: Zoning TRABAM voor Brussels Hoofdstedelijk Gewest*

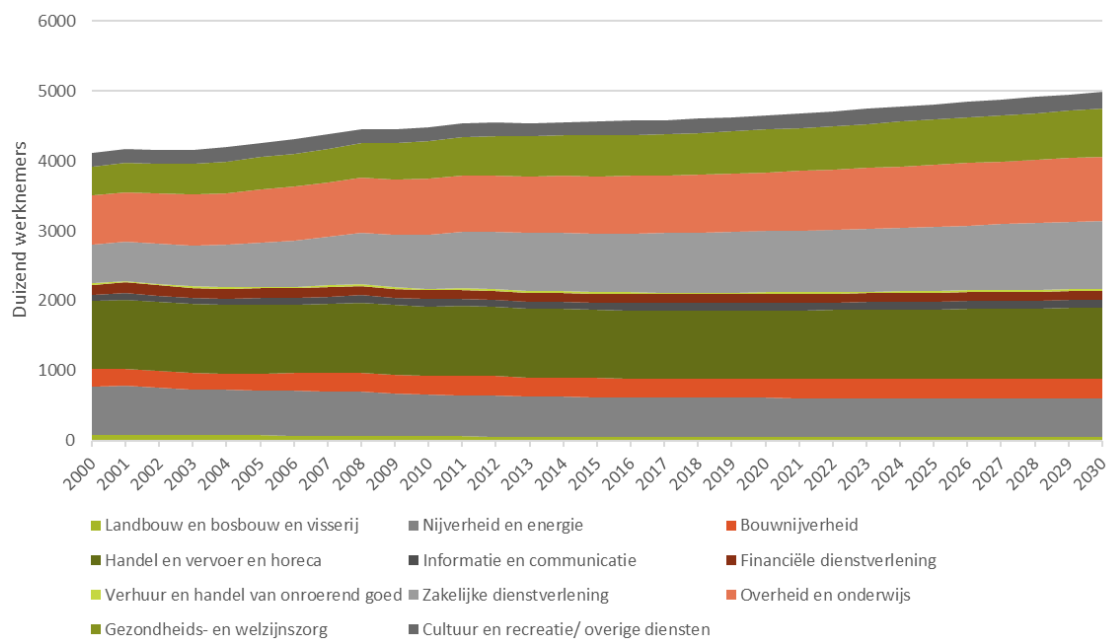
De transportvraag wordt gegenereerd op basis van socio-economische gegevens (Mommens et al., 2017), volgens een vergelijkbare methodologie die MUSTI hanteert voor het personenvervoer. Er wordt op basis van tewerkstelling per economische sector, grondoppervlakte per economische sector en bevolkingsdichtheid voorspeld hoeveel volume (tonnage) er in een zone gegenereerd en aangetrokken wordt. Hierbij wordt telkens het onderscheid gemaakt naar type goed (NST/R) en laadeenheid. Afvalstromen worden meegenomen in de analyse, zij het niet specifiek. Voor het toekomstjaar 2035 wordt zoveel als mogelijk gebruikt gemaakt van dezelfde inputgegevens als in MUSTI, zijnde:

- Bevolkingsprojecties zijn afkomstig van BISA (2020): BISA voorspelt de totale bevolking (hetgeen TRABAM gebruikt) op gemeenteniveau tot 2025 en op gewestniveau tot 2070 (per 5 jaar). Er werd uitgegaan van het opgegeven aantal voor het jaar 2035 wat neer komt op 1.254.825 inwoners. De oorspronkelijke bron

<sup>1</sup> Nomenclature uniforme des marchandises pour les Statistiques de Transport, Révisée, afgekort NSTR is een veel gebruikte classificatie van goederen in Europa. De categorieën zijn: Landbouwproducten en levende dieren, Andere voedingsproducten en veevoeder, Vaste minerale brandstoffen, Aardoliën en aardolieproducten, Ertsen, metaalafval, geroest ijzerkies, IJzer, staal en non-ferrometalen (incl. halfproducten), Ruwe mineralen en -producten; bouwmaterialen, Meststoffen, Chemische producten, Voertuigen, machines en overige goederen (w.o. stukgoederen)

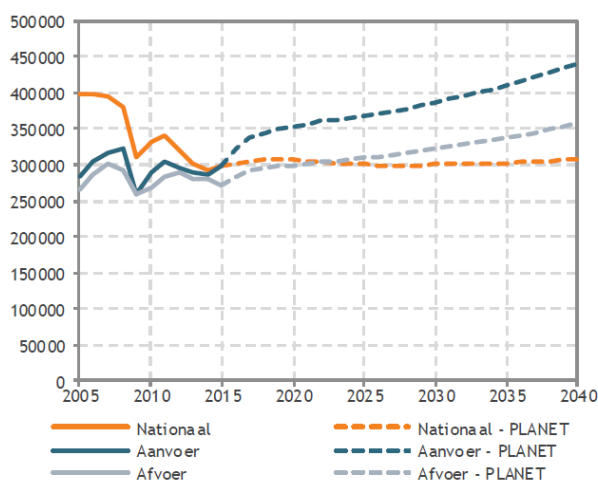
voor dit cijfer is het Federaal Planbureau. De groei werd proportioneel over de zones verdeeld volgens de huidige bevolkingsdichtheid.

- Voor tewerkstelling, een andere input voor TRABAM, zijn er gewestelijke prognoses beschikbaar tot 2025 bij BISA en het Federaal Planbureau. De Nationale Bank van België geeft wel tewerkstellingscijfers tot 2030 (Figuur 3). Deze cijfers werden lineair doorgetrokken naar simulatiejaar 2035.
- De laatste input is oppervlakte per economische sector. Daar bestaan geen prognoses voor. Hiervoor werd uitgegaan van de huidige situatie.



*Figuur 3: Evolutie van de tewerkstelling per sector in België (bron: Nationale Bank van België)*

Het generatiemodel van TRABAM voorspelt een groei van het te transporteren volume in België met 5,22% tussen 2012 en 2035. Ter vergelijking, het generatiemodel van het Strategisch Vrachtmodel Vlaanderen voorziet een groei in volume van 4,61% tussen 2017 en 2030, en het Federaal Planbureau voorziet een groei van het volume domestiek transport in België met 5,10% tussen 2015 en 2040.



Figuur 4: Evolutie van het goederenvervoer uitgedrukt in tonnage (bron: Federaal Planbureau, 2019)

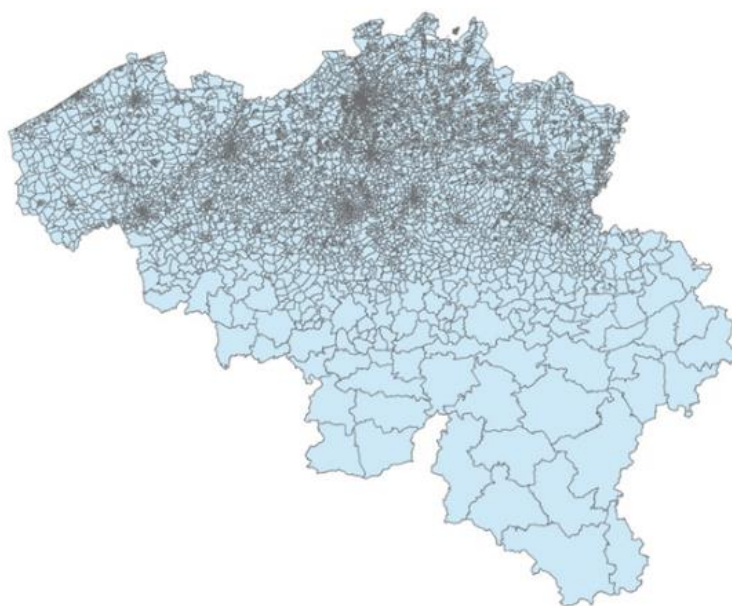
Voor het Brussels Hoofdstedelijk Gewest gaat TRABAM uit van een groei van 5,63% in gegeneerd volume en een groei van 5,89% van aangetrokken volume. In totaal gaat het over een volume van 87.383.018 ton aan gegeneerd volume goederen op jaarbasis en 93.854.207 ton aan aangetrokken volume goederen. Dit cijfer werd in een persoonlijke communicatie gevalideerd door Brussel Mobiliteit in juli 2020.

## 2.3. Agents

In TRABAM worden verschillende types *agents* gebruikt (Mommens, 2019). Er zijn twee types te onderscheiden: *single agents* die hoofdzakelijk hun route optimaliseren en de Belgische transportondernemingen die route, vertrektijd, aantal stops, stopsequentie en voertuigkeuze (incl. modus en aandrijvingstechnologie) optimaliseren.

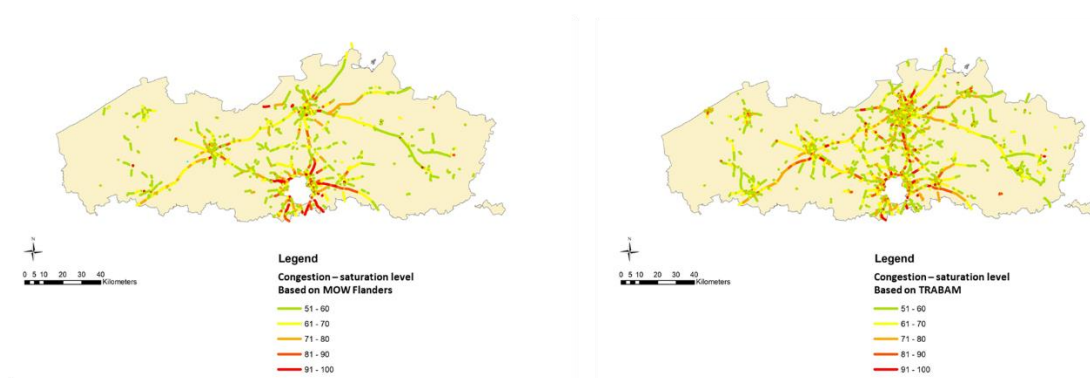
Onder de *single agents* vallen: import-, export- en transit-goederenvoertuigen waarbij de assumptie is dat ze door in het buitenland ingeschreven voertuigen uitgevoerd worden, goederenvoertuigen die ingezet worden voor eigen transport (en dus geen transport voor derden) en personenwagens tijdens piekuren (7u-9u; 12u-13u; 16u-19u). De bovenvermelde goederenvervoersstromen worden meegenomen in alle analyses.

Om goederenvervoer correct te simuleren is een duidelijk en breed congestiebeeld nodig. Congestie beïnvloedt immers de economische rentabiliteit van de logistieke sector en de logistieke keuzes die ze maken (route, vertrektijd, voertuigkeuze). Gezien logistieke activiteit zich niet limiteert tot het grondgebied van het Brussels Hoofdstedelijk Gewest en de nabij gemeenten, maar georganiseerd wordt een ruimere schaal, is een congestiebeeld nodig dat ook die ruimere schaal meeneemt. MUSTI biedt die mogelijkheid niet. In België voorziet Vlaams Verkeerscentrum (MOW Beleid) de beste input. Zij produceren ruwe data voor hun toekomstjaar 2030 met het Strategisch Personenvervoersmodel Vlaanderen. Voor het Brussels Hoofdstedelijk Gewest is de gehanteerde zonering fijnmazig, zoals weergegeven in figuur 5.



*Figuur 5: Zoning Strategisch Personenvervoersmodel Vlaanderen.*

De output van MUSTI kon niet gebruikt worden omdat deze enkel een gedetailleerd beeld geeft van het Brussels Hoofdstedelijk Gewest en de regio errond. Daarna worden de zones te ruim om een realistische congestie te simuleren. Het spreekt voor zich dat voor goederenvervoer een congestiebeeld voor een ruimer gebied noodzakelijk is. Goederenvervoer organiseert zich immers op een ruimere schaal, via melkroutes, transporten tussen havens, steden en industriegebieden, tussen perifere distributiecentra en stedelijke bestemmingen. Figuur 6 geeft het congestiebeeld van TRABAM (rechts) en van het Vlaams Verkeerscentrum (links) als validering.

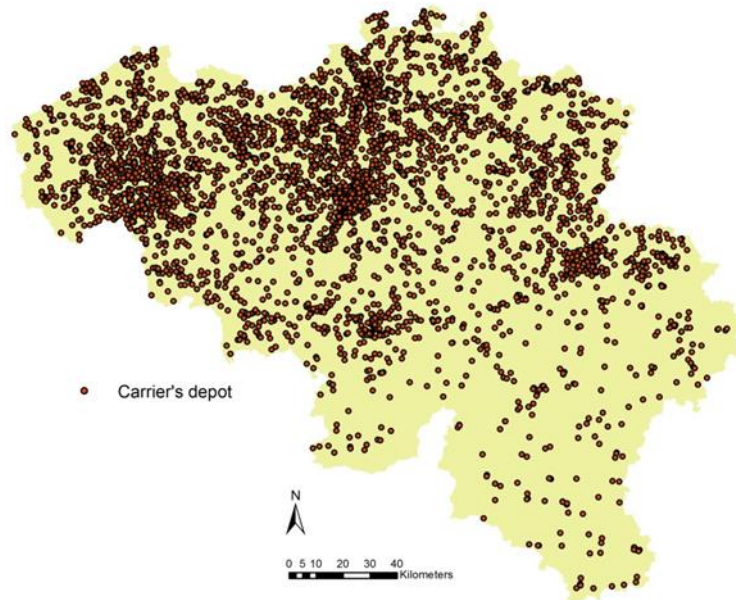


*Figuur 6: Vergelijking saturatiegraad wegvervoer op linkniveau tussen Strategisch Vrachtmodel Vlaanderen (links) en TRABAM (rechts)*

Het tweede type *agents* zijn de Belgische transportondernemingen. Voor deze transporteurs zijn de reële depotlocaties en reële transportvloot naar type voertuig, laadvermogen en EURO-norm in het vervoersmodel opgenomen. Deze *agents* maken een dagplanning, zoals transporteurs dat in de praktijk doen. Dat plan bevat een routeschema voor elk voertuig, start- en eindtijd en het depot van vertrek of aankomst. Een dagplan impliceert dat TRABAM simuleert op dagbasis. De agents/transporteurs krijgen hun te transporteren goederen toegewezen en de agents staan zelf in voor het maken van hun dagplan. Ze kiezen daarbij welk voertuig uit hun vloot gebruikt wordt, wanneer dit voertuig het depot verlaat

en welke verzendingen (aantal en volgorde) het voertuig uitvoert. Daarna volgt de routekeuze op voertuigniveau (Mommens, 2019).

Voor 2035 wordt er vanuit gegaan dat de depotlocaties - de reële locaties van transportondernemingen in het basisjaar - onveranderd zullen zijn. Deze assumptie is te verantwoorden door het grote aantal depots en de gebiedsdekkende spreiding van de depots, zoals weergegeven in Figuur 7.



*Figuur 7: Geografische spreiding van depot van Belgische transport ondernemingen (Mommens et al., 2016)*

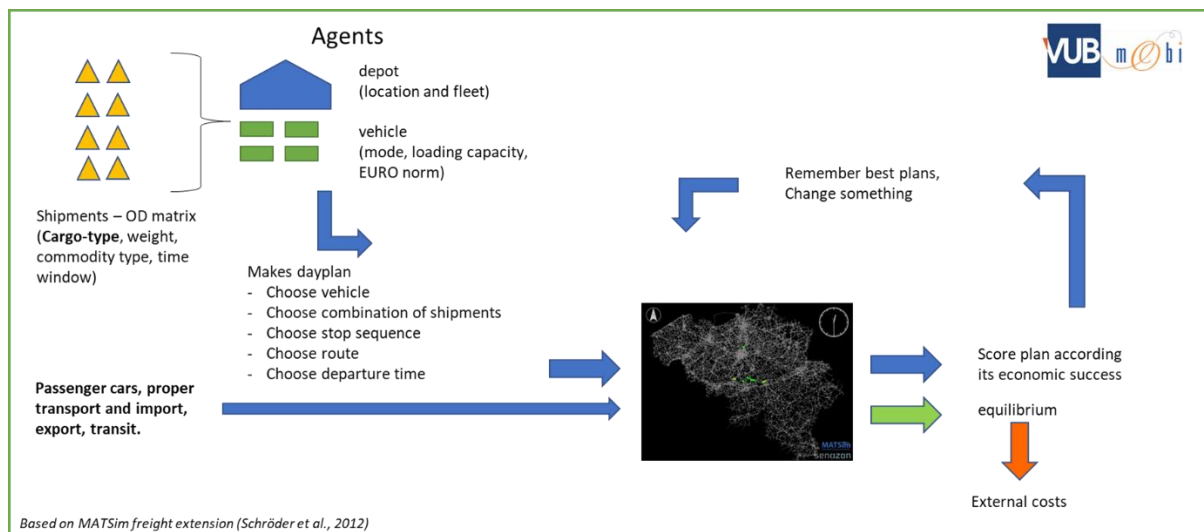
De *agent*/transporteurs staat dus zelf in voor de voertuigkeuze. Deze keuze bevat de modale keuze tussen wegvervoer, spoor en binnenvaart, alsook de voertuigkeuze binnen een modus: type bestelwagen/vrachtwagen/binnenschip en type aandrijving.

De voertuigen worden individueel op het netwerk gesimuleerd, waarbij een tijdsafhankelijk en voertuigafhankelijk kostenminimalisatie-algoritme de optimale route berekent. Omdat het laadvermogen en EURO-norm aan de individuele voertuigen gekoppeld wordt, neemt TRABAM de integrale differentiatie<sup>2</sup> van de huidige kilometerheffing mee in de modellering. Er wordt verondersteld dat de kilometerheffing in zijn huidige vorm nog steeds van toepassing zal zijn in 2035.

De dagplannen van alle *agents* worden simultaan uitgevoerd, waarna de *agents* hun plan evalueren op basis van het economisch succes van hun plan. Economisch succes houdt rekening met kosten en een penalitatie voor het niet of te laat leveren van goederen. Venstertijden kunnen gebruikt worden, net als dat het niet naleven van rij- en rusttijden onder de 'te laat leveren'-penaliteit vallen. Via een iteratieproces proberen de *agents* hun dagplan te verbeteren door hun routekeuze, beladingsgraad, modale- en voertuigkeuze, vertrektijd en stop-sequentie bij routes aan te passen. Ze onthouden hun beste plan doorheen de verschillende iteraties en het transportsysteem in zijn geheel vindt doorheen

<sup>2</sup> Op voertuigniveau: laadvermogen en EURO-norm, op netwerk-niveau: volledige wegnetwerk in Brussels Hoofdstedelijk Gewest en selectief netwerk in Vlaanderen en Wallonië.

het proces een evenwicht. Dit evenwicht wordt gebruikt als output voor de berekening van de CO<sub>2</sub>-emissies. De TRABAM-methodologie wordt samengevat in onderstaande Figuur 8.



Figuur 8: TRABAM methodologie

## 2.4. Vlootsamenstelling

De grootte en de samenstelling van de vloot is de vierde en laatste input voor TRABAM. Hieronder worden de assumpties met betrekking tot het aantal voertuigen en de technologieën voor de voertuigen besproken, met bijhorende interne en externe kosten.

### 2.4.1. AANTAL

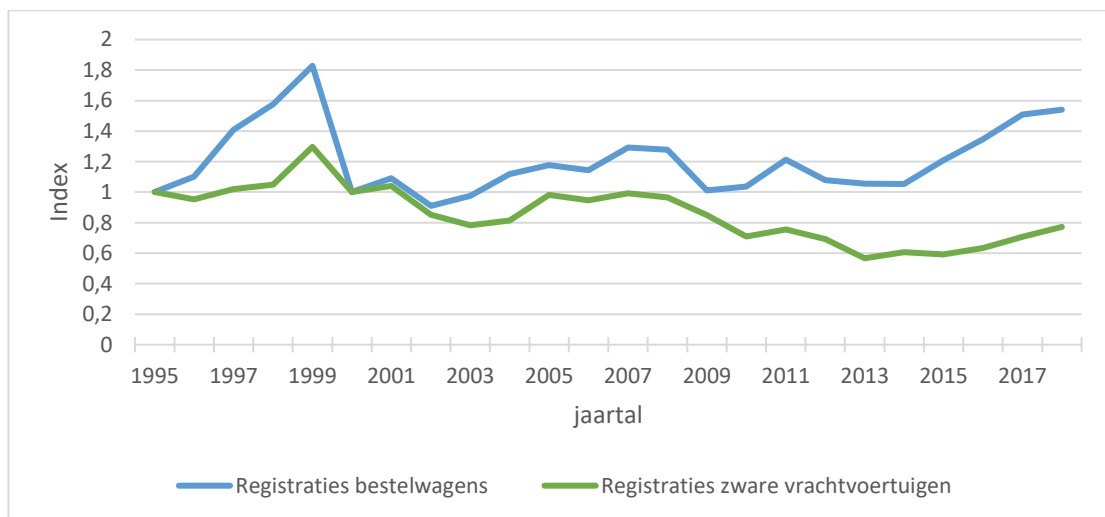
De transportvraag in 2035 wordt verwacht groter te zijn dan de huidige, en bijgevolg zal er ook een grotere vloot nodig zijn om aan deze vraag te voldoen. In TRABAM is het belangrijk om voldoende transportvoertuigen ter beschikking te stellen, aangezien het model de transportvraag tegemoet probeert te komen met de voertuigen die ter beschikking staan. Daarbij dient bijvoorbeeld rekening gehouden te worden met de te verwachten groei van e-commerce leveringen. Indien er niet voldoende zijn, dan zal niet alle transportvraag uitgevoerd worden in TRABAM.

Belangrijk is ook te begrijpen dat het ter beschikking stellen van transportvoertuigen niet bepaalt welk voertuig uiteindelijk gebruikt wordt, wanneer en waarvoor. Een uitbreiding van de vloot is dus enkel nodig om ervoor te zorgen dat aan de transportvraag tegemoet kan gekomen worden en dat de agents (Belgische transportbedrijven) een realistische keuze kan maken tussen voertuigtypes en hun aandrijvingstechnologieën.

Er zijn niet veel bronnen die voorspellingen maken van het aantal vrachtvoertuigen. In Vlaanderen werd in het kader van het mobiliteitsplan Vlaanderen geschat dat er tussen 2016 en 2030 31.782 bestelwagens bijkomen in Vlaanderen. VITO maakt in Vlaanderen prognoses over de voertuigvloot en de voertuigtechnologie. Zij doen dit tot het 2030, de doorkijk naar 2050 zien zij nog als te provisorisch en niet onderbouwd. Op federaal niveau geeft de FOD Mobiliteit cijfers over het aantal nieuwe

inschrijvingen per voertuigtype<sup>3</sup>. Uit die gegevens is een sterke stijging zichtbaar die - als deze zich aan hetzelfde tempo doorzet - leidt tot 260.751 extra bestelwagens in 2030 in België. Dit is duidelijk verschillend van de 31 duizend bestelwagens op Vlaams niveau, maar daarbij dient opgemerkt te worden dat het bij de cijfers van FOD Mobiliteit om alle bestelwagens gaat, dus ook van bijvoorbeeld doe-het-zelvers, privaat en zakelijk operationeel vervoer (bijvoorbeeld hersteldiensten). De verwachting is dat het aantal bestelwagens op de Belgische wegen zal stijgen tegen 2035. Motoren voor deze stijging zijn de groei van e-commerce, de huidige kilometerheffing die bestelwagens niet in beschouwing neemt en de implementatie van transportbeleid gericht op de internalisering van de klimaatimpact in het bijzonder. Bestelwagens zullen sneller dan zware wegvoertuigen kunnen overschakelen op zero-emissie-aandrijvingen, waardoor hun gebruik interessant zal zijn.

Voor vrachtwagens zijn de voorspellingen genuanceerder. Vlaanderen gaat uit van een stijging van het aantal vrachtwagens met 12.415 eenheden tussen 2016 en 2030. De huidige trend van inschrijvingen van vrachtwagens bij de FOD Mobiliteit is echter dalend, en - als deze zich zou doorzetten - eindigen we dezelfde periode (2016-2030) met 9.820 vrachtwagens minder. Het aantal registraties van vrachtwagens bijgehouden door FEBIAC en toegankelijk op hun website<sup>4</sup> daalde ook gedurende lange tijd, maar kent recent terug een heropleving (zie Figuur 9).



Figuur 9: Evolutie van aantal inschrijvingen nieuwe vrachtoertuigen (FEBIAC, 2020)

Het te transporteren volume wordt verwacht te stijgen tegen 2035 en transportbedrijven zullen aan deze vraag tegemoet trachten te komen. Dat kan enerzijds door efficiënter te werken, bijvoorbeeld door bundeling van goederen en het vermijden van lege ritten. Daar houdt TRABAM rekening mee. Anderzijds kan dat door te investeren in nieuwe voertuigen. Om efficiënte en realistische voertuigkeuzes door *agents* toe te laten in TRABAM, wordt ervoor geopteerd om uit te gaan van de ruimste prognoses voor het aantal voertuigen. Dat houdt in dat er 50.580 extra bestelwagens en 14.600 extra vrachtwagens proportioneel aan de *agents* worden toegevoegd voor het jaar 2035. Vergeleken met het ambitieuze

<sup>3</sup> <https://mobilit.belgium.be/nl/wegverkeer/statistieken>

<sup>4</sup> <http://www.febiac.be/public/statistics.aspx?lang=NL>



scenario van het Vlaamse Mobiliteitsplan worden 31.782 extra bestelwagens verwacht en 12.415 extra vrachtwagens tegen 2030.

## **2.4.2. AANDRIJVINGSTECHNOLOGIE**

Naast het aantal voertuigen is, in het kader van een ban, de aandrijvingstechnologie van de voertuigen minstens even belangrijk. Hierbij dient er dus een als input een percentage van de goederenvoertuigvloot per aandrijvingstechnologie opgegeven te worden voor het jaar 2035. (Noot aan de lezer: dit deel komt ook terug in het rapport “Technologische evoluties”, sectie 2.2. Opdat beide rapporten ook los van elkaar kunnen gelezen worden, werd ervoor geopteerd om de tekst hier te herhalen. De lezer die het rapport “Technologische evoluties” reeds las, kan dus meteen door naar sectie 2.4.3 )

Net zoals bij het aantal, bepaalt ook deze input uiteindelijk niet welk voertuig gebruikt zal worden. Het gebruik hangt af van het optimalisatieproces van de agents/transportbedrijven.

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

Bovenop de aannames die gemaakt dienen te worden naar de voertuigontwikkeling toe, dienen er daarboven nog aannames gemaakt te worden over hoe deze het aankoopgedrag zullen beïnvloeden. Enkel zo kan een toekomstige samenstelling van de nieuwverkopen opgemaakt worden. Het hoeft echter geen verder betoog dat hierover een grote onzekerheid heerst. Momenteel hebben de verschillende Belgische gewesten afzonderlijke, verschillende prognoses hieromtrent. Een overlappend initiatief is gaande, maar de (tussentijdse) resultaten hiervan konden door de betrokken partijen niet worden gedeeld. In samenspraak met de opdrachtgever, Brussel Leefmilieu, die tevens ook één van bovenstaande betrokken partijen is, werd overeengekomen dat de overlappende prognose nog niet gebruikt kan worden. Via Brussel Leefmilieu werd een geconsolideerd voertuigenpark voor het perspectief 2025/2030 bekomen dat opgemaakt werd in 2018. Deze vloot werd opgemaakt in het kader van de emissie-inventaris en houdt reeds rekening met de invoering van de lage emissie zone in Brussel en de kilometerheffing. Daarnaast zijn er de prognoses opgemaakt voor het Vlaams Gewest in het Clean Power for Transport document met als scope 2030. Beide vormen de input voor deze studie. Alles wordt in onderstaande Tabel 1 weergegeven.

Tabel 1: Marktaandeel in 2035 per voertuigtype en aandrijvingstechnologie

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

Het verbod focust vooral op *tank-to-wheel* emissies. Dat zijn de emissies vanaf het tanken/opladen van het voertuig tot en met de uitlaat tijdens gebruik. Er is echter ook nog het productie gedeelte van de energiebron en het transport van de energiebron tot aan de 'pomp'. Dit wordt het *well-to-tank* gedeelte genoemd. Beide worden in rekening gebracht in de externe kosten, alsook bijvoorbeeld de vorming van fijn stof door de banden tijdens het rijden. Het is belangrijk om in rekening te brengen dat de

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

<sup>6</sup> Samenstelling gebaseerd op CPT, prognose Brussel Leefmilieu en Hydrogen Council (aandeel waterstof vervangt 1 op 1 diesel).

daadwerkelijke emissies van energieproductie in 2035 niet gekend zijn. Dat zal afhangen van hoe energie dan geproduceerd zal worden. Inspanningen om de energieproductie te verduurzamen worden voorzien, echter de uitkomst in 2035 is niet gekend. Hetzelfde geldt voor de uitstoot van voertuigtechnologieën. Motoren en filters worden efficiënter, en daardoor worden emissies verminderd. De snelheid waarmee dit gebeurt is echter niet gekend. In onderstaande secties worden eerst de verschillende aandrijvingstechnologieën besproken. In totaal worden zeven aandrijvingen meegenomen: diesel aangedreven voertuigen, benzine aangedreven voertuigen, waterstof, batterij elektrisch en plug-in hybride voertuigen, CNG/LNG, CBM/LBM en biobrandstoffen. Hun vlootaandeel zit in de TRABAM simulaties, omdat ze mee de modale keuze en het voertuiggebruik zullen bepalen. Niet al deze voertuigaandrijvingen worden echter verondersteld toegelaten te worden bij de invoering van de ban in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest. Diesel en benzine worden telkens geweigerd.

Na het overzicht van de aandrijvingsvormen worden ze met elkaar vergeleken inzake interne kosten – hetgeen een input is voor TRABAM. Daarnaast worden de externe kosten besproken die als input dienen voor de impactanalyse.

#### **2.4.2.A. DIESEL**

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

Diesel wordt toegepast in een verbrandingsmotor waarin de chemische energie in de diesel wordt omgezet in mechanische energie. Dieselvoertuigen stoten relatief veel fijn stof (PM) en stikstofoxiden (NO<sub>x</sub>) uit, maar minder CO<sub>2</sub> dan benzinevoertuigen omdat ze doorgaans efficiënter werken. In realiteit convergeren benzine- en dieselwagens echter op vlak van gemiddelde CO<sub>2</sub>-uitstoot, gezien dieselwagens typisch groter en zwaarder zijn.

Na de beschrijving van de verschillende aandrijvingstechnologieën volgt een overzicht van de kosten en emissies voor de verschillende technologieën. Dieselmotoren in goederenwegvoertuigen worden vanaf 2035 uit het Brussels Hoofdstedelijk Gewest geband.

#### **2.4.2.B. BENZINE**

Benzinevoertuigen worden veel minder ingezet voor goederenvervoer. Enkel in de categorie van het lichtere wegvervoer (bestelwagens) zijn benzinevoertuigen terug te vinden (met een nationale

grootteorde rond 5-10% anno 2020, hetgeen we gelijkaardig veronderstellen voor het Brussels gewest). De reden hiervoor is vooral dat benzinemotoren een hoger vermogen hebben, maar een lager koppel dan dieselmotoren. Gezien goederenvoertuigen groter en zwaarder zijn, hebben zij meer baat bij een motor met hogere koppel gezien dit betekent dat ze vanuit een laag toerental een grotere trekkracht hebben. Daarnaast zijn benzinemotoren minder efficiënt, doordat ze minder zuurstof gebruiken in hun verbrandingsproces. Dieselmotoren gebruiken meer zuurstof dan nodig om de brandstof te verbranden, waardoor ze optimaal gebruik maken van de energie die in de diesel opgeslagen zit. Deze manier van werken heeft echter gevolgen voor de vorming van onder meer fijnstof- en NO<sub>x</sub>-deeltjes. Tot slot is er natuurlijk ook nog het fiscaal voordeel dat op professionele diesel van toepassing is, en niet op benzinemotoren.

Ook bij benzinemotoren wordt chemische energie omzet in mechanische energie. Benzinemotoren stoten in het *tank-to-wheel* gedeelte minder luchtvervuilende polluenten uit dan dieselmotoren, maar wel meer CO<sub>2</sub> (ongeveer 17%) voor vergelijkbare modellen, wat wil zeggen dat ze algemeen gezien meer verbruiken. Goederenwegvoertuigen door benzine aangedreven worden geband uit het Brussels Hoofdstedelijk Gewest vanaf 2035.

#### **2.4.2.C. EMISSIASTANDAARDEN**

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

Tabel 2: Euro normering voor bestelwagens (bron: Ecoscore)

Category†	Stage	Date	CO	HC	HC+NOx	NOx	PM	PN
			g/km					
<b>Positive Ignition (Gasoline)</b>								
N <sub>1</sub> , Class I ≤1305 kg	Euro 1	1994.10	2.72	-	0.97	-	-	-
	Euro 2	1997.01	2.2	-	0.50	-	-	-
	Euro 3	2000.01	2.3	0.20	-	0.15	-	-
	Euro 4	2005.01	1.0	0.10	-	0.08	-	-
	Euro 5	2009.09 <sup>b</sup>	1.0	0.10 <sup>g</sup>	-	0.06	0.005 <sup>e,f</sup>	-
	Euro 6	2014.09	1.0	0.10 <sup>g</sup>	-	0.06	0.005 <sup>e,f</sup>	6.0×10 <sup>11</sup> e <sub>j</sub>
N <sub>1</sub> , Class II 1305-1760 kg	Euro 1	1994.10	5.17	-	1.40	-	-	-
	Euro 2	1998.01	4.0	-	0.65	-	-	-
	Euro 3	2001.01	4.17	0.25	-	0.18	-	-
	Euro 4	2006.01	1.81	0.13	-	0.10	-	-
	Euro 5	2010.09 <sup>c</sup>	1.81	0.13 <sup>h</sup>	-	0.075	0.005 <sup>e,f</sup>	-
	Euro 6	2015.09	1.81	0.13 <sup>h</sup>	-	0.075	0.005 <sup>e,f</sup>	6.0×10 <sup>11</sup> e <sub>j</sub>
N <sub>1</sub> , Class III >1760 kg	Euro 1	1994.10	6.90	-	1.70	-	-	-
	Euro 2	1998.01	5.0	-	0.80	-	-	-
	Euro 3	2001.01	5.22	0.29	-	0.21	-	-
	Euro 4	2006.01	2.27	0.16	-	0.11	-	-
	Euro 5	2010.09 <sup>c</sup>	2.27	0.16 <sup>i</sup>	-	0.082	0.005 <sup>e,f</sup>	-
	Euro 6	2015.09	2.27	0.16 <sup>i</sup>	-	0.082	0.005 <sup>e,f</sup>	6.0×10 <sup>11</sup> e <sub>j</sub>
N <sub>2</sub>	Euro 5	2010.09 <sup>c</sup>	2.27	0.16 <sup>i</sup>	-	0.082	0.005 <sup>e,f</sup>	-
	Euro 6	2015.09	2.27	0.16 <sup>i</sup>	-	0.082	0.005 <sup>e,f</sup>	6.0×10 <sup>11</sup> e <sub>j</sub>

<b>Compression Ignition (Diesel)</b>								
N <sub>1</sub> , Class I ≤1305 kg	Euro 1	1994.10	2.72	-	0.97	-	0.14	-
	Euro 2 IDI	1997.01	1.0	-	0.70	-	0.08	-
	Euro 2 DI	1997.01 <sup>a</sup>	1.0	-	0.90	-	0.10	-
	Euro 3	2000.01	0.64	-	0.56	0.50	0.05	-
	Euro 4	2005.01	0.50	-	0.30	0.25	0.025	-
	Euro 5a	2009.09 <sup>b</sup>	0.50	-	0.23	0.18	0.005 <sup>f</sup>	-
	Euro 5b	2011.09 <sup>d</sup>	0.50	-	0.23	0.18	0.005 <sup>f</sup>	6.0×10 <sup>11</sup>
	Euro 6	2014.09	0.50	-	0.17	0.08	0.005 <sup>f</sup>	6.0×10 <sup>11</sup>
N <sub>1</sub> , Class II 1305-1760 kg	Euro 1	1994.10	5.17	-	1.40	-	0.19	-
	Euro 2 IDI	1998.01	1.25	-	1.0	-	0.12	-
	Euro 2 DI	1998.01 <sup>a</sup>	1.25	-	1.30	-	0.14	-
	Euro 3	2001.01	0.80	-	0.72	0.65	0.07	-
	Euro 4	2006.01	0.63	-	0.39	0.33	0.04	-
	Euro 5a	2010.09 <sup>c</sup>	0.63	-	0.295	0.235	0.005 <sup>f</sup>	-
	Euro 5b	2011.09 <sup>d</sup>	0.63	-	0.295	0.235	0.005 <sup>f</sup>	6.0×10 <sup>11</sup>
	Euro 6	2015.09	0.63	-	0.195	0.105	0.005 <sup>f</sup>	6.0×10 <sup>11</sup>
N <sub>1</sub> , Class III >1760 kg	Euro 1	1994.10	6.90	-	1.70	-	0.25	-
	Euro 2 IDI	1998.01	1.5	-	1.20	-	0.17	-
	Euro 2 DI	1998.01 <sup>a</sup>	1.5	-	1.60	-	0.20	-
	Euro 3	2001.01	0.95	-	0.86	0.78	0.10	-
	Euro 4	2006.01	0.74	-	0.46	0.39	0.06	-
	Euro 5a	2010.09 <sup>c</sup>	0.74	-	0.350	0.280	0.005 <sup>f</sup>	-
	Euro 5b	2011.09 <sup>d</sup>	0.74	-	0.350	0.280	0.005 <sup>f</sup>	6.0×10 <sup>11</sup>
	Euro 6	2015.09	0.74	-	0.215	0.125	0.005 <sup>f</sup>	6.0×10 <sup>11</sup>
N <sub>2</sub>	Euro 5a	2010.09 <sup>c</sup>	0.74	-	0.350	0.280	0.005 <sup>f</sup>	-
	Euro 5b	2011.09 <sup>d</sup>	0.74	-	0.350	0.280	0.005 <sup>f</sup>	6.0×10 <sup>11</sup>
	Euro 6	2015.09	0.74	-	0.215	0.125	0.005 <sup>f</sup>	6.0×10 <sup>11</sup>

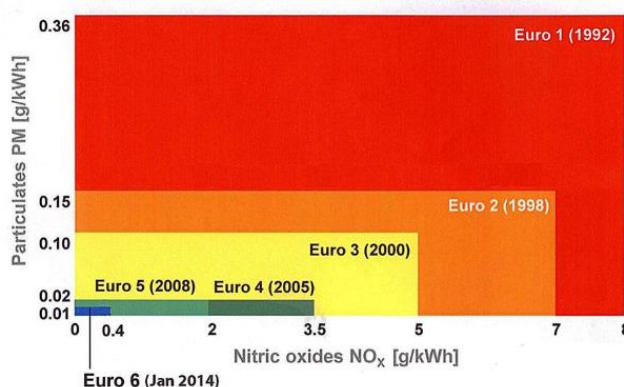
† For Euro 1/2 the Category N<sub>1</sub> reference mass classes were Class I ≤ 1250 kg, Class II 1250-1700 kg, Class III > 1700 kg  
a. until 1999.09.30 (after that date DI engines must meet the IDI limits)  
b. 2011.01 for all models  
c. 2012.01 for all models  
d. 2013.01 for all models  
e. applicable only to vehicles using DI engines  
f. 0.0045 g/km using the PMP measurement procedure  
g. and NMHC = 0.068 g/km  
h. and NMHC = 0.090 g/km  
i. and NMHC = 0.108 g/km  
j. 6.0×10<sup>12</sup> 1/km within first three years from Euro 6 effective dates

Tabel 3: Euro-normering vrachtwagens (bron: Dieselnet.com)

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

<sup>a</sup> PM = 0.13 g/kWh for engines < 0.75 dm<sup>3</sup> swept volume per cylinder and a rated power speed > 3000 min<sup>-1</sup>

Momenteel liggen er drie opties op tafel voor de invoering van een Euro 7. Optie 1 gaat uit van een beperkte herziening van Euro 6 en focust vooral op de huidige uitdagingen, zijnde de verschillende types en emissietests. Een vereenvoudiging waarbij de nadruk blijft liggen op praktijkmetingen is het doel van deze optie. Optie 2 wil een brede herziening van Euro 6 waarbij naast vereenvoudiging ook strengere grenswaarden worden opgelegd voor alle voertuigen. Er wordt daarbij ook nagedacht over een uitbreiding naar andere verontreinigende stoffen. Optie 3 wil een volledige herziening van Euro 6 met strengere grenswaarden en een monitoring van emissies doorheen de gehele levensduur van een voertuig. Dit zou moeten gebeuren aan de hand van *On Board Monitoring* en zou tevens ook als controle systeem gehanteerd kunnen worden. Gezien de grote onduidelijkheid hieromtrent wordt er uitgegaan van behoud van de huidige Euro-normering, waarbij de vloot vernieuwd wordt met Euro 6 voertuigen. Deze vernieuwing versnelt sinds de invoering van de kilometerheffing in België. De Euro-normen zorgen voor een sterke reductie in uitstoot op voertuigniveau, zoals weergegeven in Figuur 11.



Figuur 10: Euro-normering vrachtwagens.

Daarnaast legt de Europese Commissie ook limieten op inzake CO<sub>2</sub> emissies van nieuwe voertuigen. Voor personenwagens en bestelwagens is dit reeds al geruime tijd het geval. Voor vrachtwagens bestaan er sinds kort (2019) een verordening goedgekeurd voor het reduceren van de CO<sub>2</sub> emissies van nieuw geproduceerde voertuigen. Het gaat om een juridisch bindend akkoord tussen het Europees Parlement en de lidstaten om de CO<sub>2</sub> uitstoot van nieuwe vrachtwagens (type N2 en N3) te verlagen met 15% tegen 2025 en met 30% tegen 2030 ten opzichte van 2019. Daarnaast moeten fabrikanten

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

De invoering van dergelijke CO<sub>2</sub> emissiestandaarden voor zware vrachtvoertuigen mikt naast emissiereductie tevens op verlaagde brandstofkosten voor transportoperatoren via de verspreiding van kosteneffectieve technologieën. Daarnaast wordt dit ook belangrijk geacht voor de concurrentiepositie van de Europese vrachtwagenfabrikanten aangezien in de Verenigde Staten, Canada, Japan en China reeds regulerende maatregelen geïmplementeerd werden om de CO<sub>2</sub> uitstoot van zware bedrijfsvoertuigen te verminderen (van Lier et al., 2019).

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

#### **2.4.2.D. CNG/LNG**

Mono-brandstof of bi-brandstof CNG (Compressed Natural Gas) en LNG (Liquified Natural Gas) aangedreven voertuigen verbruiken aardgas (methaan, CH<sub>4</sub>). Ze worden onder meer naar voor geschoven als alternatief voor diesel- en benzinevoertuigen. Dankzij het samenpersen (tot 200-300 bar) of vloeibaar maken van aardgas wordt de volumetrische energiedichtheid verhoogd zodat ook een toepassing in het vrachtvervoer mogelijk wordt. LNG is geschikter voor vrachtvoertuigen met hoge kilometeraantallen per jaar en regelmatig gebruik. CNG is gepaster voor kleinere voertuigen met lagere kilometeraantallen. Momenteel wordt er vanuit de federale overheid een incentive gegeven aangezien er geen taksen betaald dienen te worden wanneer LNG en CNG getankt worden. Ook bestond er tot voor kort een tijdelijke incentive vanuit de nationale gasfederatie in vorm van een aankooppremie voor CNG-voertuigen, al heeft dit voor wat betreft CNG-personenwagens tot nog toe niet geleid tot een *rush* naar de technologie, gezien het marktaandeel anno 2020 ervan relatief marginaal blijft (<0.2% voor het Brussels Hoofdstedelijk Gewest).

Ondanks het lagere koolstofgehalte van aardgas in vergelijking met diesel, resulteert overschakeling op aardgasvoertuigen slechts in een geringe reductie van de CO<sub>2</sub>-emissies (*well-to-wheel*) (International Energy Agency, 2017). Naast hun beperkt reductiepotentieel in termen van CO<sub>2</sub> uitstoot, is er ook het probleem van methaanlekages. Methaan komt vrij door lekkage (*methane slip*) bij de productie, verwerking, transmissie en distributie. De impact van dit nadelige verschijnsel neemt toe naarmate pijpleidingen grotere afstanden overbruggen, gezien de grotere kans op lekages bij koppelingen.

---

<sup>7</sup> <https://www.acea.be/statistics/tag/category/average-vehicle-age>

Bovendien gaat het samendrukken van aardgas tot een tankdruk van 200 tot 300 bar bij CNG en het vloeibaar maken van aardgas gepaard met energieverlies. Bij grootschalige installaties bijvoorbeeld wordt ca. 10% van de energetische waarde van het geproduceerde LNG gebruikt voor het vloeibaar maken van LNG (Marynissen et al., 2018). Methaan is ook een broeikasgas, tevens veel sterker dan CO<sub>2</sub>. Bijgevolg wordt het reductiepotentieel van CNG en LNG ingeschat op 4,9% tot 7% (Kollamdhoti et al., 2016). LNG en CNG voertuigen stoten wel minder grote hoeveelheden luchtvervuilende polluenten uit, al zijn deze waarden vergelijkbaar met goed onderhouden Euro VI dieselvrachtwagens. Beide (CNG/LNG) kunnen dus niet als zero-emissie beschouwd worden.

Aardgas is wel niet-carcinogeen bij verbranding, in tegenstelling tot diesel.

Op basis van de geannualiseerde kapitaal- en operationele kosten (ook de *total cost of ownership*) van het gebruik van methaanvoertuigen in het zwaar transport blijkt in de meeste gevallen dat deze hoger zijn dan deze voor conventionele benzine- en diesellootvoertuigen, wat betekent dat het vanuit economisch oogpunt gezien voor transportoperatoren niet aantrekkelijk kan zijn om over te schakelen op CNG, LNG of biomethaan. Deze resultaten zijn uiteraard zeer gevoelig voor het verschil in brandstofkosten tussen diesel/ benzine en methaanbrandstoffen.

Voor binnenvaart betekent een overschakeling naar LNG een reductie in de emissies van NO<sub>x</sub> en PM, tot wel 75%, hetgeen vooral te wijten is aan samenstelling van de dieselbrandstof die wordt toegepast in deze sector (TNO, 2015). Beschikbare gegevens tonen daarenboven aan dat grote LNG motoren in schepen lage methaanemissie hebben, zodat de uitstoot van broeikasgassen in de *tank-to-wheelfase* vermindert met 15-20% ten opzichte van dieselmotoren. Knelpunten voor de binnenvaart zijn de kostenbatenerhouding, technische aspecten en het beperkte jaarlijkse totaal LNG-verbruik van de vloot schepen hetgeen voor een te lage *return on investment* zorgt voor binnenschippers om in nieuwe aandrijvingstechnologieën te investeren.

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

#### **2.4.2.E. CBM/LBM**

CBM (Compressed BioMethane) en LBM (Liquified BioMethane) zijn gebaseerd op biomethaan. Biomethaan is te vergelijken met aardgas. Het biogas is een hernieuwbaar gas dat ontstaat wanneer organisch materiaal door bacteriën wordt ontbonden in een zuurstofvrije omgeving (bijvb. uit huishoudafval en ander organisch afval). Het biogas dat daarbij ontstaat kan opgewerkt worden tot biomethaan. Biomethaan heeft het potentieel om onder zeer beperkende voorwaarden klimaatneutraal te zijn (TNO et al, 2014). Zo zal de manier waarop biomethaan wordt gewonnen doorslaggevend zijn, net zoals dit het geval is voor andere biobrandstoffen (volgt verderop). Het werd ook opgenomen in het



nieuwe Europese akkoord rond de hernieuwbare energierichtlijn (2018)<sup>8</sup> als mee te tellen bij de verplichte doelstellingen voor 'geavanceerde brandstoffen' in transport. Het huidige *well-to-wheel* reductiepotentieel is echter beperkt: 46% tot 52% CO<sub>2</sub> ten opzichte van dieselloeruigen (Kollamdhoti et al., 2016) , al is er een behoorlijk reductiepotentieel dat verderop besproken wordt. In deze getallen worden de methaanlekkages niet meegerekend. Beide (CBM/LBM) kunnen dus niet als zero-emissie beschouwd worden.

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

#### **2.4.2.F. BIOBRANDSTOFFEN**

Biobrandstoffen hebben relatief hoge energiedichtheden en zijn compatibel met bestaande wagenparken en infrastructuur voor brandstofverdeling. Biobrandstoffen worden beschouwd als voertuigen met een gemengd brandstofsysteem (*dual fuel*). In bestaande gemengde brandstofsysteemen voor zware vrachtwagens wordt momenteel nog een mix van diesel en LPG of aardgas (CNG/LNG) gebruikt. Momenteel is er een maximale bijmenging van 30% gas. Er bestaan systemen die een hoger gaspercentage toelaten, maar dit verlaagt momenteel nog het motorrendement. Ook bij deze brandstofsysteemen stellen zich problemen van onvolledige verbranding en methaanlekage. Het huidige Europese beleid stimuleert nog steeds het bijmengen van (eerste generatie) biodiesel waarvan op basis van *well-to-tank* analyse niet kan volgehouden worden dat dit duurzaam is.

Biobrandstoffen hebben vooral lange-afstandtransporten als toepassing.

De keuze van grondstoffen is een sleutelfactor in het koolstofarm maken van biobrandstoffen in vergelijking met fossiele brandstoffen. Bij biodiesel moet hierbij rekening worden gehouden met broeikasgasemissies die gepaard gaan met de teelt, de verandering van het landgebruik en de impact op afvalstromen (gerelateerd aan het nastreven van circulariteit) in het kader van een volledige levenscyclus-analyse van op gewassen gebaseerde biodiesels. In hun analyse stellen Kollamdhoti et al. (2016) dat naast duurzame biobrandstoffen afgeleid uit organisch afval, deze brandstof ook kan worden geproduceerd uit energiegewassen en mogelijk uit hout. Hoewel de CO<sub>2</sub>-uitstoot die vrijkomt bij de verbranding van biobrandstoffen geproduceerd uit energiegewassen niet als een bijdrage aan de

---

<sup>8</sup> RICHTLIJN (EU) 2018/2001 VAN HET EUROPEES PARLEMENT EN DE RAAD

klimaatverandering wordt beschouwd, omdat deze emissies deel uitmaken van de koolstofcyclus op korte termijn, is de impact van CO<sub>2</sub>-emissies door verbranding van uit hout afgeleide brandstoffen minder duidelijk, aangezien bosbouwbronnen geen deel uitmaken van de koolstofcyclus op korte termijn. Bovendien kunnen energiegewassen leiden tot andere ongewenste milieueffecten, zoals indirecte verandering van landgebruik. De voorziene verhoging van de productie van biogas en biomethaan in Europa is ook strategisch belangrijk omdat het de EU kan helpen haar energiezekerheid te verbeteren door de afhankelijkheid van de invoer van fossiele brandstoffen van buiten de EU (hoofdzakelijk Rusland, de VS en het Midden-Oosten) te verminderen.

Bepaalde opties voor biobrandstoffen kunnen een lagere impact hebben op lokale luchtvervuiling in vergelijking met diesel.

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

#### 2.4.2.G. BATTERIJ ELEKTRISCHE VOERTUIGEN EN HYBRIDE VOERTUIGEN

Batterij elektrische voertuigen (BEV – plug-in hybride en full) worden wel toegelaten in het Brussel Hoofdstedelijk Gewest. In het segment van de bestelwagens zijn er al marktwaardige BEVs. Voor de zware vrachtoertuigen moet worden opgemerkt dat deze momenteel in ontwikkelingsfase zijn. Momenteel verschijnen de eerste modellen op de markt (zie Figuur 12), worden nog hoofdzakelijk voor nichetoepassingen door specifieke gebruiksprofielen gebruikt, zoals bijvoorbeeld terminalvoertuigen, betonmixers en vuilniswagens. Algemeen gebruik van elektrisch aangedreven zware vrachtoertuigen voor goederenvervoer over de weg is nog uitdagend vanwege de ontoereikende huidige batterijtechnologie, waardoor het behouden van voldoende beschikbaar netto-laadvermogen bij zware BEV's een barrière vormt. Er wordt aangenomen dat door de evolutie in batterijtechnologie, ook meer algemene toepassingen met zware vrachtoertuigen mogelijk worden.



*Figuur 11: BEV vrachtwagens (links: 12 ton vrachtwagen van AVIA Ingenieria -test inCityLogin Madrid, rechts: Volvo – test Dencity project Gothenburg).*

Zo worden marktwaardige modellen voor zwaar vrachtvervoer tegen 2025 verwacht. Het daadwerkelijk oppikken en inzetten van deze voertuigen wordt nog eens 5 jaar later (in 2030) verwacht (TNO, 2018). Dit is het gevolg van een initiële periode van onzekerheid en een te verwachten 'kat uit de boom kijken' gedrag. Hierdoor zal het vlootaandeel van zero-emissie zware vrachtoertuigen nog relatief klein zijn in

2035 en zal hun gebruik nog steeds eerder niche dan wel algemeen zijn. Het spreekt voor zich dat de schatting van het marktaandeel voor zware vrachtvoertuigen minder robuust is. Deze is, in tegenstelling tot bestelwagens, nog zeer afhankelijk van de technologische ontwikkelingen en van beleidsmaatregelen. Strenge normen en beleid zouden de ontwikkeling en marktevolutie kunnen versnellen. Om de TCO van BEV's aantrekkelijker te maken ten opzichte van conventionele vrachtwagens kunnen ondersteunende maatregelen vanuit de overheid geïntroduceerd worden. In 2018 kondigde de Duitse regering bijvoorbeeld aan dat met ingang van 1 januari 2019 de tol (LKW-Maut) verlaagd zal worden voor elektrische semi-vrachtwagens om de langzame elektrificatie van het vrachtwagenvervoer te stimuleren via de resulterende besparing voor transportbedrijven.

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

De *well-to-wheel* uitstoot van BEVs is heel afhankelijk van hoe de elektriciteit geproduceerd wordt. BEV's kunnen als zero-emissievoertuigen meegenomen worden vanuit een WTW-perspectief, als hernieuwbare elektriciteit wordt aangewend. De introductie van BEV's lijkt essentieel om op termijn de uitstoot van CO<sub>2</sub> door het goederenvervoer in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest te reduceren.

Inzake energieverbruik wordt er gerekend op 30 kWu/100km voor elektrische bestelwagens, 75 kWu/km voor elektrische lichte vrachtwagens en 200 kWu/100km voor elektrische zware vrachtwagens. De energie-efficiëntieverhouding van de batterij ten opzichte van diesel verbetert wanneer de gemiddelde snelheid afneemt dus voorlopig zijn BEV's meer geschikt voor stedelijke omgeving en korte afstandstransport.

#### **2.4.2.H. WATERSTOF**

Waterstofvrachtoertuigen of *fuel cell electric vehicles* (FCEV) gebruiken een brandstofcel waarin waterstof opgeslagen zit in een hoge-druktank. Waterstof wordt omgezet in elektriciteit om het voertuig aan te drijven. Naast waterstof wordt er ook geëxperimenteerd met ammoniak als brandstof, al is hier nog geen sprake van een commercialisatie. We kunnen waterstofvrachtoertuigen beschouwen, gezien ze tijdens het gebruik (of *tank-to-wheel*, TTW) gedeelte geen CO<sub>2</sub> of pollutanten uitstoten. Wat het WTT-gedeelte betreft, hangt de impact sterk af van hoe waterstof geproduceerd wordt. De verschillen tussen de *pathways* zijn significant. Zo wordt waterstof vandaag voornamelijk aangemaakt via *steam methane reforming*, (SMR) op basis van een fossiel aardgas. Hiermee gaat een CO<sub>2</sub>-uitstoot gepaard maar door de industriële schaal van toepassing wordt het kostenplaatje per kilogram 'grijze' waterstof wel aantrekkelijk. Een duurzamere waterstofproductie is gebaseerd op elektrolyse van water tot waterstof- en zuurstofatomen, waarvoor hernieuwbare energie wordt gebruikt. Deze 'groene' waterstof heeft dus

het potentieel voor een heel lage klimaatimpact, al is elektrolyse een energie-intensief proces en is het eindproduct aanzienlijk duurder dan ‘grijze’ waterstof. Een tussenstap is het afvangen van de vrijgekomen CO<sub>2</sub> tijdens het conventionele SMR proces en het opslagen ervan, bijvoorbeeld ondergronds. Voor deze ‘blauwe’ waterstof doet men dus beroep op *carbon capture and storage* (CCS).

Waterstofvoertuigen hebben theoretisch een aantal voordelen ten opzichte van BEV's. Ten eerste heeft waterstof als energiedrager een hogere energiedichtheid dan de huidige generatie batterijen (ongeveer zes keer hoger per volume-eenheid en tot 20 keer hoger per gewichtseenheid (Collins & McLarty, 2020)). Op systeemniveau komt dit echter maar gedeeltelijk tot uiting omdat een brandstofcelaandrijving veel ruimte in beslag neemt. Ten tweede is tanksnelheid vergelijkbaar met die van voertuigen op traditionele brandstof, wat de operationele impact bij vervanging van bestaande benzine- en dieselveertuigen minimaliseert. Die tanksnelheid is echter relatief gezien de huidige voorziening infrastructuur vereist dat je eerst een pak kilometers moet afleggen vooraleer je kan tanken. Daartegenover staat dat de efficiëntie bij de opwekking van waterstof voor voertuigen lager ligt dan wanneer elektriciteit gebruikt wordt voor het laden van BEV's. Dit resulteert in een hoger energieverbruik per kilometer voor de voertuigen tijdens het rijden op waterstof ten opzichte van BEV's. Voor vrachtwagens komt dat neer op ongeveer 270 kWh/100 km bij FCEV's versus 200 kWh/100 km bij BEV's.

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

#### **2.4.2.1. BINNENVAART/SPOOR**

Zoals reeds aangegeven worden spoor en binnenvaart als duurzame transport alternatieven beschouwd (Otten et al., 2017). Spoorvervoer kan als zero-emissie beschouwd worden, zeker tegen 2035 als elektriciteit mogelijk klimaatneutraal opgewekt wordt. Binnenvaart maakt voornamelijk gebruik van

oudere, dieselaangedreven schepen. Ondanks inspanningen die plaatsvinden om de vloot te vernieuwen en de emissies van de schepen te reduceren, zal het zeer moeilijk zijn voor de binnenvaartsector om tegen 2035 emissieloos te zijn. Het duurzaamheidsvoordeel van de binnenvaart is de schaalgrootte en de beschikbare capaciteit. Daardoor kan ook congestie op de weg en bijhorende emissies vermeden en verminderd worden. Om die redenen wordt binnenvaart wel toegelaten in de zero-emissiezone, ondanks dat ze in wezen dus niet zero-emissie zal zijn. Een modale verschuiving richting binnenvaart en/of spoorvervoer is mogelijk, en zal voornamelijk afhangen van de kostimpact van de maatregel op het wegvervoer.

### 2.4.3. INTERNE KOSTEN

De implementatie van een ban heeft verschillende kostenimplicaties voor verschillende stakeholders. In het geval van de transportondernemingen – de *agents* in TRABAM – gaat het om kosten gekoppeld aan de aankoop en het gebruik van het voertuig:

- Aankoop van nieuwe voertuigen
- Variabele kosten per afstand (aandrijving, bandenslijtage, onderhoud, kilometerheffing, etc.)
- Variabele kosten per tijd (loon chauffeur, belastingen, verzekering, etc.)

Deze kosten kunnen beïnvloed worden door beleid, door bijvoorbeeld de aankoop voor een bepaalde technologie te stimuleren met een subsidie, of door de kilometerheffing of belastingen te verlagen voor bepaalde types van voertuigen.

Vaste kosten en tijds- en afstands-gerelateerde variabele kosten worden in TRABAM meegenomen. De gehanteerde kosten voor het jaar 2035 per type voertuig en per aandrijvingstechnologie zijn terug te vinden in Tabel 4.

Tabel 4: Interne kosten voor de verschillende voertuigen.

Voertuigtype	Aandrijvings-technologie	Toegang BHG	Maximaal laad- vermogen	Kost per km (€/km)	Kost per tijd (€/u)	Vaste kost (€)	Kilometer-heffing
Bestelwagen (< 3,5 ton)	Diesel <sup>9</sup>	Nee	3,5 ton	0,44	35,7	17.000	Geen
	Benzine <sup>4</sup>	Nee		0,47	35,7	17.500	Geen
	BEV (+hybride) <sup>10,11</sup>	Ja		0,30	35,7	25.000	Geen
	Waterstof <sup>12</sup>	Ja		0,38	35,7	26.000	Geen
	LNG <sup>13</sup>	Nee		0,45	35,7	17.700	Geen
	CNG <sup>8</sup>	Nee		0,45	35,7	17.700	Geen
	CBM <sup>8</sup>	Nee		0,43	35,7	17.700	Geen
Lichte vrachtwagen (3,5-12 ton)	Diesel <sup>14</sup>	Nee	12 ton	0,55	37,1	45.000	Wel
	Benzine <sup>6,9</sup>	Nee		0,58	37,1	46.325	Wel
	BEV (+hybride) <sup>6,11</sup>	Ja		0,37	37,1	57.000	Wel
	Waterstof <sup>15</sup>	Ja		0,42	37,1	71.000	Wel
	CNG <sup>8</sup>	Nee		0,56	37,1	55.600	Wel
	CBM <sup>8</sup>	Nee		0,53	37,1	58.000	Wel
Zware vrachtwagen >12 ton)	Diesel <sup>9</sup>	Nee	44 ton	0,69	40,1	97.200	Wel
	BEV (+hybride) <sup>16</sup>	Ja		0,47	40,1	160.000	Wel
	Waterstof <sup>17</sup>	Ja		0,53	40,1	200.600	Wel
	LNG <sup>8</sup>	Nee		0,67	40,1	112.750	Wel
	CNG <sup>8</sup>	Nee		0,67	40,1	112.750	Wel
	LBM <sup>8</sup>	Nee		0,73	40,1	118.500	Wel

<sup>9</sup> Transportkost van verschillende MOBI projecten

Daarnaast is er ook flankerend beleid mogelijk dat het gebruik van bepaalde technologieën bevordert en hun kosten vermindert. Een voorbeeld is het voorzien van waterstoftankstations en/of laadpalen voor elektrische goederenvoertuigen. Deze verlagen onder meer het aantal omrijd-kilometers. Ze vormen echter wel zware infrastructuurinvesteringen, en bijgevolg is er een risico voor een lock-in waarbij de keuze voor één technologie de ontwikkeling en uitbouw van andere technologieën verhindert, een aspect dat niet meegenomen kon worden in de simulaties. In de simulaties wordt uitgegaan van voldoende laad/tank infrastructuur zodat dat er geen extra omrijd-kilometers nodig zijn. In de praktijk zullen de kosten van de nodige laad- en tankinfrastructuur bij de bedrijven zelf in eerste instantie waarschijnlijk bij de bedrijfseigenaars vallen, maar dit is natuurlijk afhankelijk van de ondersteunde maatregelen die worden getroffen.

Hieronder volgt een overzicht van de verwachte kosten per aandrijvingstechnologie:

- Elektriciteitsprijzen: de toekomstige prijzen voor België werden bepaald rekening houdende met intermitterende hernieuwbare energie (zon en wind). Prijsbereik tussen 83 €/MWh en 110 €/MWh met centrale waarde 95 €/MWh. Dit bedrag moet verhoogd worden met 20% leveranciersmarge en 46,18 €/ MWh aan taksen en heffingen.
- Aardgasprijzen: prijsbereik *low heating value gas* tussen 28,7 €/MWh en 36,3 €/MWh met centrale waarde 32,5 €/MWh en *high heating value (HHV) gas* tussen 25,9 €/MWh en 32,8 €/MWh met centrale waarde 29,3 €/MWh
- Dieselprijzen: € 1,57 incl. BTW, € 1,30 excl. BTW, 32,5 liter/100 km voor zware vrachtwagen, 16 l/100km voor lichte vrachtwagen en bestelwagen 7,8 liter / 100km.
- Waterstofprijzen 2030: voor *on site* 2,72 €/kg H<sub>2</sub>; voor levering met tankwagen 6,71 €/kg H<sub>2</sub>.
  - Bestelwagens: verkoopprijs waterstof: 8,5 €/kg, 0,76 kg/100 km, (Thomas et al., 2016).
  - Vrachtwagens: verkoopprijs waterstof: 7,7 €/kg, 8 kg/100km (Thomas et al., 2016).

---

<sup>10</sup> Lebeau et al., 2019

<sup>11</sup> Eigen berekening o.b.v. verhouding prijsverschil bij andere voertuigtypes en verhouding Power Trains for Transport

<sup>12</sup> Thomas et al., 2016

<sup>13</sup> Kollamthodi et al., 2016

<sup>14</sup> NEA databank

<sup>15</sup> Eigen berekening o.b.v. verhouding prijsverschil bij andere voertuigtypes

<sup>16</sup> IEA, 2017

<sup>17</sup> Moulak et al., 2017

#### 2.4.4. EXTERNE KOSTEN

Naast de kosten die gedragen worden door de transportonderneming zijn er ook de zogenaamde externe kosten. Externe kosten kunnen gedefinieerd worden als:

*“An external cost arises, when the social or economic activities of one group of persons have an impact on another group and when that impact is not fully accounted, or compensated for, by the first group.”* (Bickel et al., 2005: 10)

De voornaamste externe kosten parameters voor transport zijn:

- Luchtvervuiling: de goederenvoertuigen stoten verschillende pollutanten uit, die een impact hebben op de menselijke gezondheid en de omgeving.
- Klimaatverandering: de goederenvoertuigen stoten verschillende broeikasgassen uit, die de klimaatopwarming versterken.
- Geluidsoverlast: goederenvoertuigen zorgen voor geluid, zowel latent geluid als piekgeluiden. Beide hebben een negatief effect op de gezondheid.
- Infrastructuur: goederenvoertuigen brengen schade toe aan de transportinfrastructuur.
- Ongevallen: goederenvoertuigen zijn eveneens betrokken bij ongevallen, en de letsels zijn vaker groter bij ongevallen met vrachtvoertuigen. De kosten voor ongevallen zijn voor een groot deel geïnternaliseerd door de verzekeringskosten, waardoor deze externe kost gereduceerd is tot de kosten die niet gedekt zijn.
- Congestie: de verliestijd die je als transportvoertuig oplegt aan andere voertuigen. Door de hoge monetaire waarde die aan tijd gegeven wordt, is dit een belangrijke parameter in inzake grootteorde. Daarnaast speelt congestie ook een rol bij luchtvervuiling en klimaatverandering, gezien de uitstoot hoger ligt bij lagere snelheid. Ook geluidsoverlast wordt door congestie beïnvloed, hetzij complexer.

Externe kosten zijn afhankelijk van tal van parameters. Deze studie neemt de belangrijkste mee. Via de TRABAM simulaties worden (1) voertuigtype, (2) Euro-norm, (3) aandrijvingstechnologie, (4) beladingsgraad, (5) snelheid/congestie, (6) dag/nacht en (7) infrastructuurtype.

Twee bronnen worden voor de externe kosten berekening gebruikt. Enerzijds wordt de studie van van Essen et al. (2019) gebruikt voor de externe kosten voor ongevallen, congestie, geluid en infrastructuur. De studie is openbaar verkrijgbaar<sup>18</sup>, en werd uitgevoerd in opdracht van de Europese Commissie. Het is de referentiestudie in Europa voor de internalisering van externe kosten. De waarden worden aangeraden voor gebruik in wetenschappelijke publicaties om consistentie in externe kosten berekeningen te vergroten.

---

<sup>18</sup> [https://ec.europa.eu/transport/themes/sustainable/studies/sustainable\\_en](https://ec.europa.eu/transport/themes/sustainable/studies/sustainable_en)



Tabel 5: Externe kost voor geluidsoverlast per voertuigtype (van Essen et al., 2019).

Data in euro-cent per /pk men tonkm					
			Metropolitaan	Stedelijk	Ruraal
Bestelwagen	Dag	Druk	2,4	0,1	0,02
		Rustig	5,9	0,4	0,04
	Nacht	Druk	4,4	0,2	0,04
		Rustig	10,7	0,7	0,08
Zwaar vrachtvoertuig 3,5 - 7,5 t	Dag	Druk	1,5	0,08	0,01
		Rustig	3,6	0,23	0,03
	Nacht	Druk	2,7	0,15	0,02
		Rustig	6,5	0,42	0,05
Zwaar vrachtvoertuig 7,5 - 16 t	Dag	Druk	0,7	0,04	0,01
		Rustig	1,8	0,11	0,01
	Nacht	Druk	1,3	0,07	0,01
		Rustig	3,2	0,21	0,02
Zwaar vrachtvoertuig 16 - 32 t	Dag	Druk	0,6	0,03	0,005
		Rustig	1,3	0,09	0,01
	Nacht	Druk	1,0	0,06	0,01
		Rustig	2,4	0,16	0,02
Zwaar vrachtvoertuig > 32 t	Dag	Druk	0,6	0,03	0,005
		Rustig	1,4	0,09	0,01
	Nacht	Druk	1,1	0,06	0,01
		Rustig	2,6	0,17	0,02
Goederentrein	Dag	Druk	0,13	0,05	0,01
		Rustig	0,17	0,08	0,01
	Nacht	Druk	0,24	0,09	0,01
		Rustig	0,39	0,15	0,02
Binnenvaart	-	-	0	0	0

Tabel 6: Externe kost voor congestie (van Essen et al., 2019).

Voertuigtype	Gebied	Wegtype	Verkeerssituatie	Externe kost (€/tonkm)
Licht vrachtoertuig	Stedelijk	Hoofdweg	Overbelast	5,3
			Belast	4,1
			Nabij capaciteit	2,9
		Andere stedelijke wegen	Overbelast	11,0
			Belast	9,7
			Nabij capaciteit	7,8
	Inter-stedelijk	Snelweg	Overbelast	4,9
			Belast	3,8
			Nabij capaciteit	2,7
		Andere weg	Overbelast	7,8
			Belast	6,6
			Nabij capaciteit	5,2
Zwaar vrachtoertuig	Stedelijk	Hoofdweg	Overbelast	61,6
			Belast	47,5
			Nabij capaciteit	33,5
		Andere stedelijke wegen	Overbelast	127,3
			Belast	111,7
			Nabij capaciteit	90,6
	Inter-stedelijk	Snelweg	Overbelast	56,8
			Belast	43,8
			Nabij capaciteit	30,8
		Andere weg	Overbelast	89,7
			Belast	76,6
			Nabij capaciteit	60,3

Tabel 7: : Marginale externe kost voor ongevallen in België (van Essen et al., 2019).

Bestelwagen (eurocent/vkm)			-Zwaar vrachtoertuig (eurocent/vkm)		
Snelweg	Stedelijk	Ruraal	Snelweg	Stedelijk	Ruraal
1,40	1,76	1,93	5,19	1,82	3,23

Ook voor de monetaire waarden van luchtvervuiling en klimaatverandering wordt er gebruik gemaakt van de van Essen et al. (2019) studie. Dit eveneens om bovenstaande redenen. De berekening van de uitstoot gebeurt echter los van de van Essen et al. (2019) studie. De emissies (in kg) worden berekend aan de hand van het *Handbook of Emission Factors* (HBEFA, 2019). HBEFA is een databank die realistische emissiewaarden voor wegvervoer geeft voor type voertuigen, uitrusting (filters, katalysatoren, etc.), euro-norm, type weg, snelheid, beladingsgraad, seizoen, warmte van de motor en hellingsgraden. Voor HBEFA dient een licentie betaald te worden. De databank bevat ook prognoses voor verschillende landen (excl. België). Door overheden en instellingen wordt vooral COPERT gebruikt. COPERT heeft een aantal functionaliteiten (zoals vlootsamenstelling en prognoses) die ook voor België

van toepassing zijn. Echter voor de emissiewaarden zelf maakt COPERT ook gebruik van HBEFA. De emissiewaarden die in COPERT terug te vinden zijn, zijn gemiddeldes van HBEFA. HBEFA geeft bijgevolg meer gedetailleerde emissiewaarden voor verschillende verkeersstromen en typologieën. Net deze verkeersstromen worden gedetailleerd op link- en voertuigniveau gesimuleerd met TRABAM.

Onderstaande tabel geeft de emissies per voertuigtype en aandrijvingstechnologie weer voor één bepaalde setting<sup>19</sup>. Deze tabel is illustratief en ter bevestiging van de beschrijving van de aandrijvingstechnologieën (zie eerder). Voor de impactanalyse worden niet alleen deze, maar ook andere settingcombinaties gebruikt. Noteer ook dat waterstof niet opgenomen is in onderstaande tabel. Net als BEV hebben waterstofvoertuigen geen directe emissies, behalve fijn stof door wrijving. Daarom worden voor waterstofvoertuigen de onderstaande waardes van elektriciteit gebruikt.

*Tabel 8: Emissies (g/vkm) voor wegvoertuigen op stedelijke access roads, met snelheidsbeperking 30 km/u, 0% hellingsgraad, free flow (HBEFA, 2019).*

Voertuig categorie	Aandrijvingstechnologie	NO <sub>x</sub> (g/vkm)	PM (g/vkm)	CH <sub>4</sub> (g/vkm)	SO <sub>2</sub> (g/vkm)	CO <sub>2</sub> (g/vkm)
Bestelwagen	Benzine (4S)	0,357262	0,026927	0,010744	0,000777	154,5262
	Diesel	0,904486	0,063448	0,004483	0,000966	179,6274
	Elektrisch	0	0,026	0	0	0
	Bifuel CNG/benzine	0,12352	0,026591	0,005945	4,49E-05	133,9365
	Plug-in hybride	0,059807	0,029716	0,005372	0,0007	128,6626
Zwaar vrachtvoertuig	Diesel	5,57528	0,36325	0,003802	0,00373	693,4864
	CNG	0,691691	0,283	0,165556	0	370,5888
	Elektrisch	0	0,28	0	0	0
	LNG	1,381335	0,287371	0,334764	0	724,5496

<sup>19</sup> Urban, access road, 30 km/h speed limit, 0% gradient, free flow

### 3. SCENARIO'S

Ter herhaling, volgende drie scenario's worden in TRABAM gesimuleerd:

1. **Business as usual in 2035:** dit scenario gaat uit van doorlopend beleid. Onder andere kilometerheffing en lage-emissiezone (LEZ) blijven behouden onder de huidige vorm. Dit vormt het scenario waarmee de andere scenario's vergeleken kunnen worden.
2. **Invoering van een zero-emissiezone in 2035.** In dit scenario wordt een ban ingevoerd voor goederenvoertuigen die op de weg rijden en geen zero-emissietechnologie gebruiken. Onder zero-emissietechnologieën worden elektrische voertuigen, plug-in hybride voertuigen en voertuigen aangedreven op waterstof verstaan. Ook binnenvaart en spoor worden toegelaten op het grondgebied van het Brussels Hoofdstedelijk Gewest. De Brusselse Ring (R0) wordt hieronder niet verstaan.
3. **Invoering van een diesel- en benzineban in 2035.** In dit scenario worden enkel wegvoertuigen aangedreven op diesel en benzine op het hierboven vermelde gebied verboden.

De resultaten van de simulaties bevatten enerzijds de transportindicatoren 'voertuigkilometers' en 'tonkilometers' gereden per type voertuig (bestelwagen, lichte vrachtwagen, zware vrachtwagen, goederentrein en binnenschip) en per type aandrijving voor de wegvoertuigen. Geografisch wordt naar het Brussels Hoofdstedelijk Gewest gekeken.

De simulaties nemen alle voertuigbewegingen van vrachtvoertuigen mee. Dat houdt bestelwagens en zwaar(der) wegvoertuigen, alsook binnenvaart en spoor. Het betreft domestieke stromen van goederen door logistieke dienstverleners (3PL) alsook eigen transport. Import, export en transit worden ook meegenomen, maar hun impact is verwaarloosbaar, gezien de R0 niet opgenomen is in de ban. Deze stromen worden door in het buitenland ingeschreven voertuigen uitgevoerd. Dit is een assumptie in het model. De invoering van de ban scenario's heeft dus nauwelijks een impact op de inzet van buitenlandse voertuigen in het model.

Daarnaast worden de externe kosten, en dus zodoende de eventuele maatschappelijke en ecologische voordelen van een invoering van een ban berekend voor het Brussels Hoofdstedelijk Gewest. Dit gebeurt per externe kosten-parameter: luchtvervuiling, klimaatverandering, ongevallen, geluidsoverlast, infrastructuur en congestie.

## 4. RESULTATEN

De resultaten worden eerst per scenario beschreven, waarna een vergelijking volgt en daaraan gekoppelde conclusies.

### 4.1. Business as usual

In het *business as usual* scenario wordt er uitgegaan van ongewijzigd beleid, en bijgevolg wordt er geen ban ingevoerd. Het *business as usual* scenario is onderhevig aan de voorspelde groei in transportvolume, dit ten gevolge van een verwachte economische groei en bevolkingsgroei voor het Brussels Hoofdstedelijk Gewest. De voorspelde groei in volume – plus 5,63% in gegenereerd volume en plus 5,89% in aangetrokken volume – vertaalt zich in een groter aantal vrachtvoertuigen die van de transportinfrastructuur gebruik maken. Indicatief zal er vergeleken worden met 2012. Dat is het basisjaar van TRABAM en tegelijk het jaar waarvoor Brussel Mobiliteit cijfers publiceert (Brussel Mobiliteit, 2019).

In totaal verplaatsen er zich in 2035 per dag volgens het *business as usual* scenario 34.695 bestelwagens en 17.301 vrachtwagens in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest. Dit is een significante stijging in vergelijking met het basisjaar 2012 waarvoor respectievelijk TRABAM en Brussel Mobiliteit over 26.291 en 26.500 bestelwagens en 16.723 en 16.500 vrachtwagens spreken. In proporties uitgedrukt, vindt 65% van de goederenverplaatsingen over de weg plaats via bestelwagens en 35% via vrachtwagens. De verhouding tussen bestelwagens en vrachtwagens verschuift richting meer bestelwagens (+4%) ten aanzien van 2012 (Brussel Mobiliteit, 2019).

De resultaten liggen in lijn met de voorspellingen van het Federaal Planbureau (2019). GOODMOVE voorspelt daarentegen een daling van het aantal vrachtwagens en een sterke stijging van het aantal bestelwagens. De stijging van het aantal bestelwagens is er ook in TRABAM, namelijk met +32% (ten opzichte van 26% in GOODMOVE). De daling van het aantal vrachtwagens dus niet, en dat kan enigszins verklaard worden door de methodologie van TRABAM. In het model worden transportactiviteiten geoptimaliseerd, onder andere door middel van voertuigkeuze. De marktimperfecties worden moeilijk gecapteerd door het model. Daardoor valt de keuze in het model op grotere, efficiëntere voertuigen, waar in de realiteit misschien in der haast een kleiner voertuig ingezet wordt. Met stijgende prijzen en meer regulering zullen transportbedrijven harder moeten inzetten op efficiëntie en optimalisatie.

De *modal split* tussen weg, spoor en binnenvaart blijft in dit scenario ook gelijk aan de huidige. De genomen maatregelen – zoals de kilometerheffing en de lage-emissiezone – hebben dus ook op lange termijn geen verschuivend effect naar binnenvaart en spoor. De huidige manier van werken wordt met andere woorden verdergezet. Vrachtwagens staan hoofdzakelijk in voor grote stromen voor opslag, levering van groothandel en stromen vanuit en richting de industrie. De groei in aantal bestelwagens is vermoedelijk deels toe te wijzen aan de groei van e-commerce. Hoewel het aandeel e-commerce in de bestelwagen-bewegingen momenteel (2020) nog relatief beperkt is, wordt er tegen 2030 tot een

verdrivoudiging van de e-commerce transport-bewegingen verwacht. Het gebruik wordt niet afgeremd door de lage-emissiezone.

In totaal worden er 327.371 voertuigkilometers en 4.552.272 tonkilometers per dag door wegvoertuigen afgelegd. Van deze voertuigkilometers worden 47% van de voertuigkilometers door bestelwagens afgelegd. Ook dat is 4% meer dan aangegeven door Brussel Mobiliteit voor het jaar 2012.

*Tabel 9: Transportprestaties per type voertuig op dagbasis voor business as usual scenario*

Voertuigtype	Aandrijvings-technologie	Aandeel voertuigkilometer	Totaal voertuigkilometer	Aandeel tonkilometer	Totaal tonkilometer
Bestelwagen (< 3,5 ton)	Diesel	68,9%	105.976	69,9%	222.880
	Benzine	3,7%	5.672	3,7%	11.804
	BEV +hybride	14,9%	22.866	14,8%	48.074
	Waterstof	2,3%	3.478	2,3%	7.711
	LNG	0,4%	615	0,3%	1.529
	CNG	9,9%	15.257	9,9%	31.371
	CBM	0%	0	0%	0
	<b>Totaal</b>	<b>100%</b>	<b>153.864</b>	<b>100%</b>	<b>323.369</b>
Lichte vrachtwagen (3,5-12 ton)	Diesel	86,8%	50.184	86,9%	586.169
	Benzine	0,7%	405	0,7%	3.930
	BEV (+hybride)	3,5%	2.039	3,5%	21.426
	Waterstof	6,4%	3.717	6,4%	38.670
	LNG	0%	0	0%	0
	CNG	2,6%	1.491	2,5%	16.665
	CBM	0%	0	0%	0
	<b>Totaal</b>	<b>100%</b>	<b>57.864</b>	<b>100%</b>	<b>666.860</b>
Zware vrachtwagen >12 ton)	Diesel	77,1%	89.246	77,1%	2.804.540
	Benzine	0%	0	0%	0
	BEV (+hybride)	0,6%	694	0,7%	16.621
	Waterstof	5,8%	6.716	5,8%	193.454
	LNG	8,2%	9.543	8,1%	268.335
	CNG	1,0%	1.112	0,9%	30.855
	CBM	7,2%	8.360	7,5%	248.238
	<b>Totaal</b>	<b>100%</b>	<b>115.671</b>	<b>100%</b>	<b>3.562.043</b>
Wegvervoer			327.371		4.552.272
Spoor					6.235
Binnenvaart					110.003

Binnenvaart en spoor staan respectievelijk in voor het transport van 5.187.000 ton en 249.000 ton op jaarbasis volgens de BAU simulatie uitgevoerd met TRABAM. Hun modaal aandeel op basis van volume is daardoor 2,7% en 0,1%. Deze is nagenoeg identiek aan de modale verdeling in 2012-TRABAM.

Het scenario resulteert in een externe kost van 280.680 euro per dag. Daarvan is congestie de belangrijkste externe kosten-factor in monetaire termen. Dit komt door de hoge monetaire waarde die aan de waarde van 'tijd' (*value of time*) gegeven wordt. De externe kosten per parameter en voertuigtype worden in onderstaande tabel weergegeven.

Tabel 10: Externe kosten van business as usual scenario (uitgedrukt in €)

Voertuigtype	Aandrijvings-technologie	Lucht- vervuiling	Klimaat- verandering	Ongevallen	Infrastructuur	Geluid	Congestie
Bestelwagen (< 3,5 ton)	Diesel	2.321	2.543	1.865	212	7.147	55.926
	Benzine	9	107	100	11	378	2.962
	BEV +hybride	13	0	402	46	771	12.063
	Waterstof	2	0	61	7	124	1.935
	LNG	9	14	11	1	49	384
	CNG	223	341	269	31	1.006	7.872
	CBM	0	0	0	0	0	0
Lichte vrachtwagen (3,5-12 ton)	Diesel	2.227	8.793	913	708	5.679	12.705
	Benzine	6	59	7	6	38	85
	BEV (+hybride)	2	0	37	29	104	464
	Waterstof	4	0	68	52	187	838
	LNG	0	0	0	0	0	0
	CNG	42	232	27	21	161	361
	CBM	0	0	0	0	0	0
Zware vrachtwagen >12 ton)	Diesel	3.926	21.595	1.624	8.505	21.420	60.788
	Benzine	0	0	0	0	0	0
	BEV (+hybride)	1	0	13	66	127	360
	Waterstof	7	0	122	640	739	4.193
	LNG	242	1.922	174	909	1.025	5.816
	CNG	28	221	20	106	236	669
	CBM	223	975	152	797	1.896	5.381
Spoor		0	5	6	25	8	8
Binnenvaart		2.002	220	110	308	0	0
Totaal		11.286	37.027	5.982	12.480	41.095	172.810

## 4.2. Invoering van een zero-emissiezone

De invoering van een zero-emissiezone impliceert dat enkel zero-emissievrachtvoertuigen in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest (met uitzondering van de R0) toegelaten zijn. Daaronder worden waterstofvoertuigen, BEV's en plug-in hybride voertuigen verstaan. Daarnaast worden binnenvaart en spoor, als duurzame modi, ook toegelaten. De groei in transportvraag is gelijk aan de *business as usual*, zijnde plus 5,63% in gegenereerd volume en plus 5,89% in aangetrokken volume.

In totaal verplaatsen er zich in 2035 per dag volgens dit scenario 48.386 bestelwagens en 5.846 vrachtwagens in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest. De duidelijke daling in aantal vrachtwagens (min 10.877 ten opzichte van 2012 volgens TRABAM) is ten gevolge van het beperkte aantal zero-emissievrachtwagens (6,6% van de vloot voor de zware vrachtwagens). De resultaten liggen bijgevolg meer in lijn met GOODMOVE, waar een daling van het aantal vrachtwagens en een sterke stijging van

het aantal bestelwagens voorspeld wordt. Er zijn er onvoldoende beschikbaar om in 2035 in te staan voor de grote goederenstromen naar industrie, groothandel en opslag. Bestelwagens (plus 13.691 extra per dag ten opzichte van de business as usual) vangen een groot deel van dit transport op. Dit is groot aantal extra voertuigen en dat is niet wenselijk, zowel vanuit verkeersplanmatig oogpunt, als vanuit logistieke organisatie bij depot, winkels, etc. die met extra leveringen te maken krijgen. Binnenvaart en spoor nemen ook een aanzienlijk deel van de vrachtwagenstroom over. Binnenvaart groeit tot 15.051.948 ton en spoor tot 632.995 ton per jaar. Hun modale aandeel wordt hiermee respectievelijk 8% voor binnenvaart en 0,3% voor spoor, zo goed als een verdrievoudiging ten opzichte van business as usual. Indien de technologische ontwikkeling van vrachtwagens sneller zou gaan dan verwacht en er tegen 2035 een vlootaandeel van 20%-25% zero-emissie zware vrachtwagens zou zijn, dan is een implementatie van dit scenario mogelijk zonder de huidige manier van logistieke organisatie aan te passen.

De resultaten van het model nemen veel verschillende belangrijke goederenkenmerken mee, zoals het type goed (NST/R) en de gebruikte laadeenheid (pallets, containers, bulk, etc.). Dat maakt dat bijvoorbeeld de onmogelijkheid van transport van containers door bestelwagens meegenomen wordt. Desalniettemin dient er rekening mee gehouden te worden dat niet alle kenmerken geïncorporeerd kunnen worden (omwille van gebrek aan data en rekentijd), en dat bepaalde de verschuiving richting bestelwagens niet altijd realiseerbaar of even realistisch is. Het model laat bijvoorbeeld afvalophaling en transport van beton via bestelwagens toe.

In totaal worden er 1.306.225 voertuigkilometers door wegvoertuigen afgelegd. Het groot aantal bestelwagens, die in verhouding tot vrachtwagens meer voertuigkilometers moeten afleggen om hetzelfde volume te verzetten, zijn de oorzaak voor het hogere totaal voertuigkilometers. In totaal worden er 4.167.474 tonkilometers op dagbasis over de weg afgelegd. Daarvan is 66% op het conto van bestelwagens.



Tabel 11: Transportprestaties per type voertuig op dagbasis voor invoering zero-emissie ban

Voertuigtype	Aandrijvings-technologie	Aandeel voertuigkilometer	Totaal voertuigkilometer	Aandeel tonkilometer	Totaal tonkilometer
Bestelwagen (< 3,5 ton)	Diesel	0%	0	0%	0
	Benzine	0%	0	0%	0
	BEV +hybride	85,3%	1.061.415	85,3%	2.335.119
	Waterstof	14,7%	182.608	14,7%	401.730
	LNG	0%	0	0%	0
	CNG	0%	0	0%	0
	CBM	0%	0	0%	0
	Totaal	100%	1.244.023	100%	2.736.849
Lichte vrachtwagen (3,5-12 ton)	Diesel	0%	0	0%	0
	Benzine	0%	0	0%	0
	BEV (+hybride)	41,5%	8.606	41,5%	98.858
	Waterstof	58,5%	12.128	58,5%	139.579
	LNG	0%	0	0%	0
	CNG	0%	0	0%	0
	CBM	0%	0	0%	0
	Totaal	100%	20.734	100%	238.437
Zware vrachtwagen >12 ton)	Diesel	0%	0	0%	0
	Benzine	0%	0	0%	0
	BEV (+hybride)	8,9%	3.680	8,8%	105.106
	Waterstof	91,1%	37.788	91,2%	1.087.082
	LNG	0%	0	0%	0
	CNG	0%	0	0%	0
	CBM	0%	0	0%	0
	Totaal	100%	41.468	100%	1.192.188
Wegvervoer			1.306.225		4.167.474
Spoor					15.100
Binnenvaart					317.660

In externe kosten resulteert dit in een totaal van 805.164 euro per dag. Opmerkelijk meer dan het *business as usual* scenario, meer dan een verdubbeling. Dit komt louter door de externe kosten voor congestie, die monetair belangrijker geacht worden dan de andere parameters. Het grote gebruik van extra bestelwagens zorgt voor een hoge congestie kost, die niet gecompenseerd wordt door de kostenreductie ten gevolge van het vermijden van broeikasgassen.

Tabel 12: Externe kosten invoering zero-emissie ban (uitgedrukt in €).

Voertuigtype	Aandrijvings-technologie	Lucht-vervuiling	Klimaat-verandering	Ongevallen	Infrastructuur	Geluid	Congestie
Bestelwagen (< 3,5 ton)	Diesel	0	0	0	0	0	0
	Benzine	0	0	0	0	0	0
	BEV +hybride	581	0	18.681	2.123	37.438	585.940
	Waterstof	100	0	3.214	365	6.441	100.804
	LNG	0	0	0	0	0	0
	CNG	0	0	0	0	0	0
	CBM	0	0	0	0	0	0
Lichte vrachtwagen (3,5-12 ton)	Diesel	0	0	0	0	0	0
	Benzine	0	0	0	0	0	0
	BEV (+hybride)	9	0	157	121	479	2.143
	Waterstof	13	0	221	171	676	3.025
	LNG	0	0	0	0	0	0
	CNG	0	0	0	0	0	0
	CBM	0	0	0	0	0	0
Zware vrachtwagen >12 ton)	Diesel	0	0	0	0	0	0
	Benzine	0	0	0	0	0	0
	BEV (+hybride)	4	0	67	351	803	2.278
	Waterstof	38	0	688	3.601	4.151	23.563
	LNG	0	0	0	0	0	0
	CNG	0	0	0	0	0	0
	CBM	0	0	0	0	0	0
Spoor		1	13	15	60	21	0
Binnenvaart		5.781	635	318	889	0	0
Totaal		6.527	648	23.360	7.682	50.008	717.753

Om aan de transportvraag en de ban voorwaarden te voldoen, worden haast alle beschikbare zero-emissie voertuigen van België ingezet. Dat impliceert een hoog aantal aanrijkmeters voor logistieke dienstverleners (*agents*) die ver van het gewest gelegen zijn. Deze aanrijkmeters zorgen voor extra overlast en externe kosten, die weliswaar niet op het grondgebied van het gewest plaatsvinden. Deze aanrijkmeters gebeuren wel met duurzame voertuigen. Minder duurzame voertuigen worden ingezet in de rest van het land. Indien andere gewesten of steden een soortgelijke ban implementeren komt het vervoerssysteem nog meer onder druk te staan. Aan de andere kant veroorzaakt de implementatie van de ban in Brussel een aanzienlijke verschuiving naar binnenvaart en spoor. De ecologische en maatschappelijke voordelen van deze verschuiving liggen voor een groot deel in de omringende gewesten, gezien de beperkte afstand van het totale traject dat in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest wordt afgelegd.

### 4.3. Invoering van een diesel- en benzineban

In dit scenario wordt een ban op diesel- en benzinevoertuigen ingevoerd op het grondgebied van het Brussels Hoofdstedelijk Gewest (met uitzondering van de R0). Daarnaast worden binnenvaart en spoor, als duurzame modi, ook toegelaten. De groei in transportvraag is gelijk aan de *business as usual*, zijnde plus 5,63% in gegeneerd volume en plus 5,89% in aangetrokken volume.

In totaal verplaatsen er zich in 2035 per dag volgens dit scenario 34.886 bestelwagens en 17.276 vrachtwagens in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest. Dat zijn respectievelijk 191 bestelwagens meer en 25 vrachtwagens minder dan in het business as usual scenario. De invoering zorgt dus niet voor een ingrijpende verandering in de logistieke organisatie. Vrachtwagens staan hoofdzakelijk in voor grote stromen voor opslag, levering van groothandel en stromen vanuit en richting de industrie. Het is opmerkelijk dat het aantal voertuigkilometers en tonkilometers afgelegd door BEV en waterstof aangedreven lichte vrachtwagens in dit scenario hoger is dan met de zero-emissiezone. Dit komt vermoedelijk omdat in grote volumes in het scenario van de zero-emissiezone noodgedwongen in kleine verzendingen worden opgedeeld, en dat de economische keuze bij die opdeling uitgaat naar bestelwagens. De kilometerheffing die niet van toepassing is op bestelwagens werkt deze keuze in de hand. In het scenario van de diesel- en benzineban gebeurt de opdeling van grote volumes nauwelijks. Daardoor toont dit scenario eerder een omzetting van aandrijvingsvorm, en ziet men dus hogere waarden voor lichte vrachtwagens. De verhouding tussen bestelwagens en vrachtwagens verschuift wat meer richting bestelwagens, zij het beperkt.

De *modal split* tussen weg, spoor en binnenvaart blijft in dit scenario ook gelijk aan deze uit het *business as usual* scenario. In totaal worden er 327.878 voertuigkilometers en 4.557.054 tonkilometers per dag door wegvoertuigen afgelegd. Daarvan worden 47% van de voertuigkilometers door bestelwagens afgelegd.

Tabel 13: Transportprestaties per type voertuig op dagbasis voor invoering diesel- en benzineban

Voertuigtype	Aandrijvings-technologie	Aandeel voertuigkilometer	Totaal voertuigkilometer	Aandeel tonkilometer	Totaal tonkilometer
Bestelwagen (< 3,5 ton)	Diesel	0%	0	0%	0
	Benzine	0%	0	0%	0
	BEV +hybride	56,6%	80.105	56,5%	176.058
	Waterstof	8,7%	12.380	8,8%	27.254
	LNG	1,4%	2.000	1,3%	4.131
	CNG	33,2%	47.059	33,4%	103.956
	CBM	0%	0	0%	0
	Totaal	100%	141.544	100%	311.399
Lichte vrachtwagen (3,5-12 ton)	Diesel	0%	0	0%	0
	Benzine	0%	0	0%	0
	BEV (+hybride)	44,8%	27.826	44,8%	319.968
	Waterstof	30,0%	18.637	30,1%	215.041
	LNG	0%	0	0%	0
	CNG	25,2%	15.648	25,1%	179.267
	CBM	0%	0	0%	0
	Totaal	100%	62.111	100%	714.276
Zware vrachtwagen >12 ton)	Diesel	0%	0	0%	0
	Benzine	0%	0	0%	0
	BEV (+hybride)	2,3%	2.874	2,3%	81.117
	Waterstof	27,7%	34.408	27,7%	990.749
	LNG	38,2%	47.420	38,1%	1.341.009
	CNG	5,4%	6.668	5,4%	193.905
	CBM	26,4%	32.853	26,4%	924.599
	Totaal	100%	124.223	100%	3.531.379
Wegvervoer			327.878		4.557.054
Spoor					6.259
Binnenvaart					110.542

In externe kosten resulteert dit in 242.602 euro per dag. De invoering van deze ban resulteert dus in een besparing van ongeveer 40.000 euro aan externe kosten per dag ten opzichte van het *business as usual* scenario.

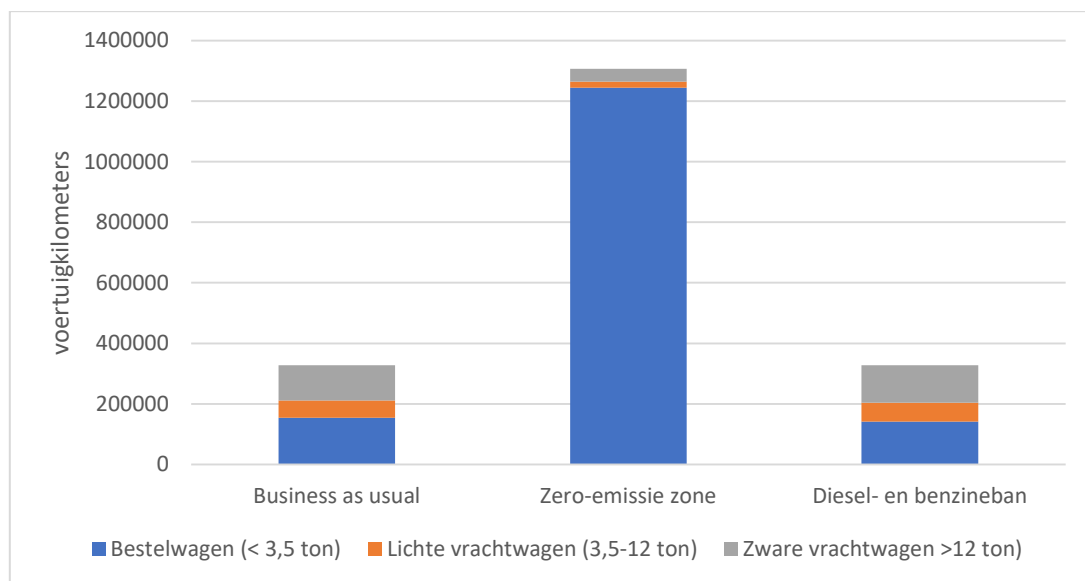
Tabel 14: Externe kosten voor invoering diesel- en benzineban (uitgedrukt in €).

Voertuigtype	Aandrijvings-technologie	Lucht- vervuiling	Klimaat- verandering	Ongevallen	Infrastructuur	Geluid	Congestie
Bestelwagen (< 3,5 ton)	Diesel	0	0	0	0	0	0
	Benzine	0	0	0	0	0	0
	BEV +hybride	44	0	1410	160	2.823	44.177
	Waterstof	7	0	218	25	437	6.839
	LNG	29	45	35	4	132	1.037
	CNG	687	1.050	828	94	3.333	26.085
	CBM	0	0	0	0	0	0
Lichte vrachtwagen (3,5-12 ton)	Diesel	0	0	0	0	0	0
	Benzine	0	0	0	0	0	0
	BEV (+hybride)	30	0	506	392	1.550	6.935
	Waterstof	20	0	339	263	1.042	4.661
	LNG	0	0	0	0	0	0
	CNG	454	2.501	285	221	1.737	3.886
	CBM	0	0	0	0	0	0
Zware vrachtwagen >12 ton)	Diesel	0	0	0	0	0	0
	Benzine	0	0	0	0	0	0
	BEV (+hybride)	3	0	52	274	620	1.758
	Waterstof	35	0	626	3.279	3.783	21.474
	LNG	1.207	9.603	863	4.519	5.121	29.066
	CNG	175	1.389	121	635	1.481	4203
	CBM	832	3.631	598	3.131	7.062	20.041
Spoor		0	5	6	25	9	0
Binnenvaart		2.012	221	111	310	0	0
Totaal		5.535	18.445	5.999	13.332	29.129	170.162

## 4.4. Vergelijking van de scenario's

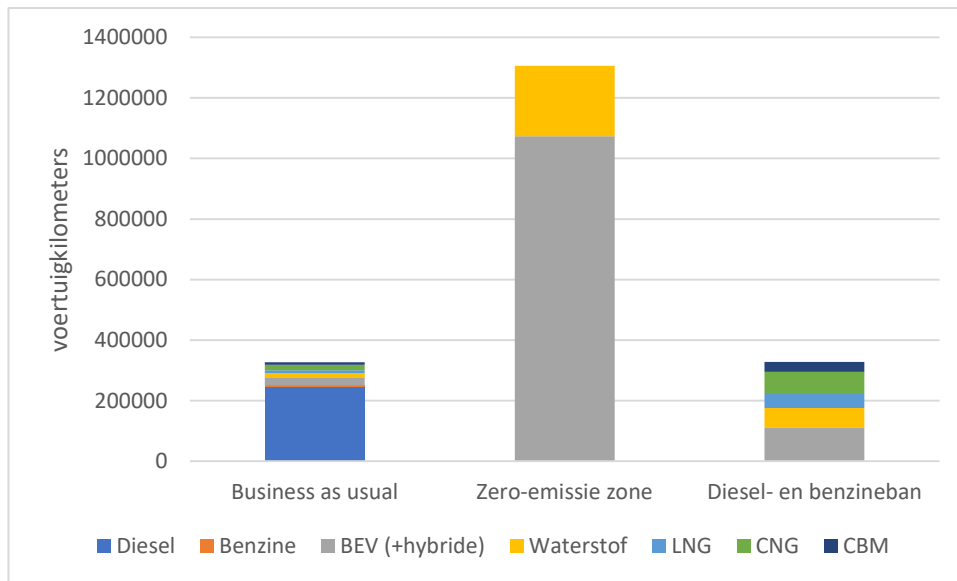
De drie scenario's zijn gesimuleerd voor hetzelfde jaar (2035) en een gelijke transportvraag. Ze zijn dus goed vergelijkbaar.

De meest tastbare vergelijking is op het niveau van voertuigkilometers, gezien deze zichtbaar en relevant zijn voor alle stakeholders. Zoals reeds aangegeven is het aantal afgelegde voertuigkilometers in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest opmerkelijk hoger in scenario 2 (zero-emissiezone). Dit komt omdat nagenoeg alle wegtransport door zware vrachtwagens in dit scenario verschoven wordt naar bestelwagens. Dit is ook duidelijk zichtbaar in Figuur 13. Er zijn meerdere bestelwagens nodig om één vrachtwagen te vervangen.



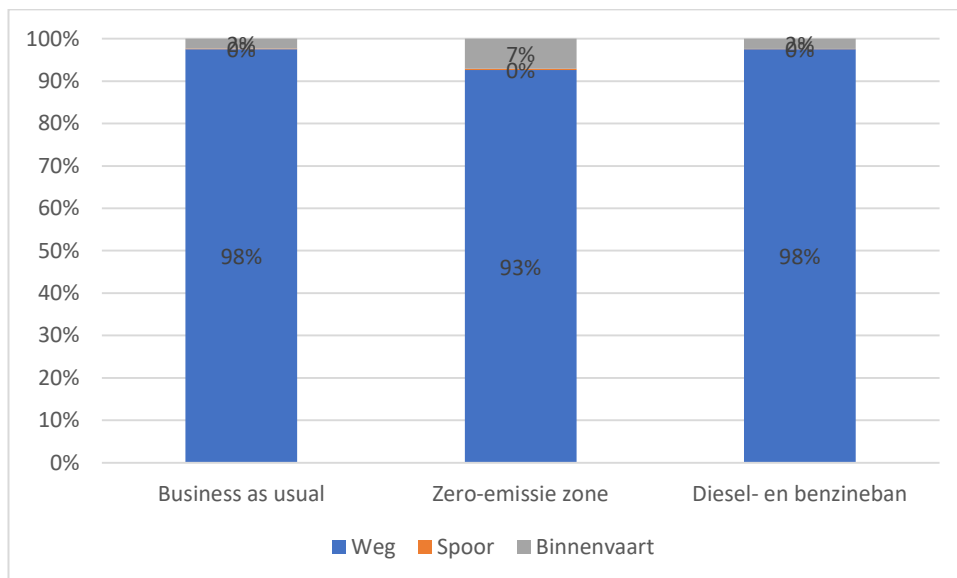
Figuur 12: Verdeling van aantal voertuigkilometers per voertuigtype en scenario.

Wanneer het onderscheid gemaakt wordt per aandrijvingstechnologie, dan is het zichtbaar dat de *business as usual* nog sterk gebruik maakt van diesel. In een zero-emissiezone worden hoofdzakelijk BEVs ingezet. Ook het aandeel waterstofvoertuigen is zowel relatief als in absolute cijfers niet te onderschatten. De invoering van een diesel- en benzineban geeft een relatief gelijkmatig gebruik van alle alternatieve aandrijvingstechnologieën weer. Het voordeel is dat goederenvervoer minder afhankelijk is van bevoorrading en ontwikkeling van één specifieke aandrijvingstechnologie. Dit heeft als gevolg dat bedrijven, in een diesel- en benzineban scenario, de mogelijkheid zullen hebben om te kiezen voor de technologische alternatieven die het best passen bij hun financiële middelen. Dit is vooral van belang voor Kleine of Middelgrote Ondernemingen (KMO's), aangezien respectievelijk 45% en 12% van de KMO's hun voertuigen financieren met eigen fondsen of met behulp van een lening. Hierdoor speelt de aankoopprijs van een voertuig een grotere rol voor deze bedrijven. Het nadeel van een diesel- en benzineban is dat men voldoende zal moeten investeren in onder andere laad- en tankinfrastructuur.

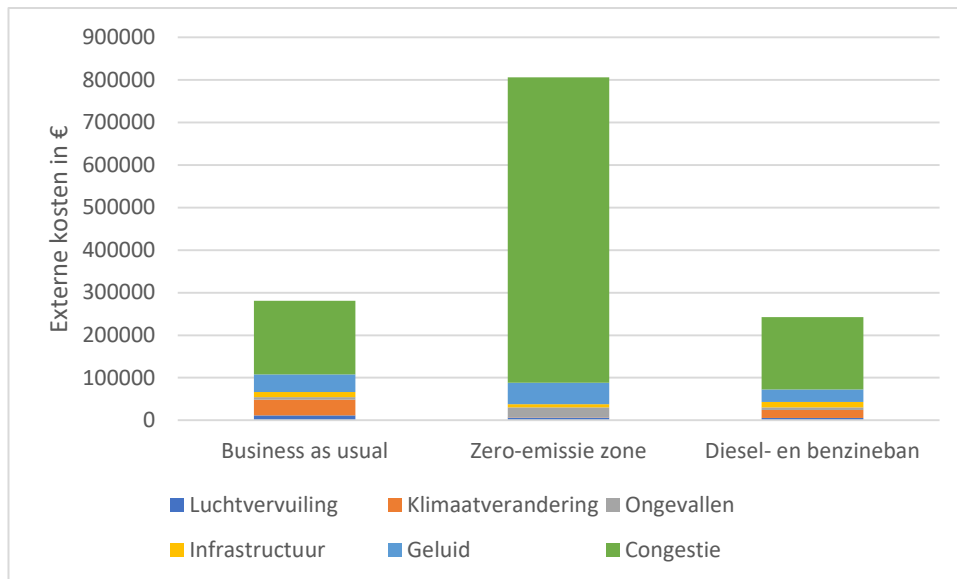


Figuur 13: Verdeling van aantal voertuigkilometers per aandrijvingstechnologie en scenario.

De *modal split* – uitgedrukt in tonkilometers afgelegd op het Brussels Hoofdstedelijk Gewest – is gelijk voor de *business as usual* en de invoering van een diesel- en benzineban. Voor de invoering van een zero-emissiezone is er een duidelijke verschuiving zichtbaar naar de binnenvaart.

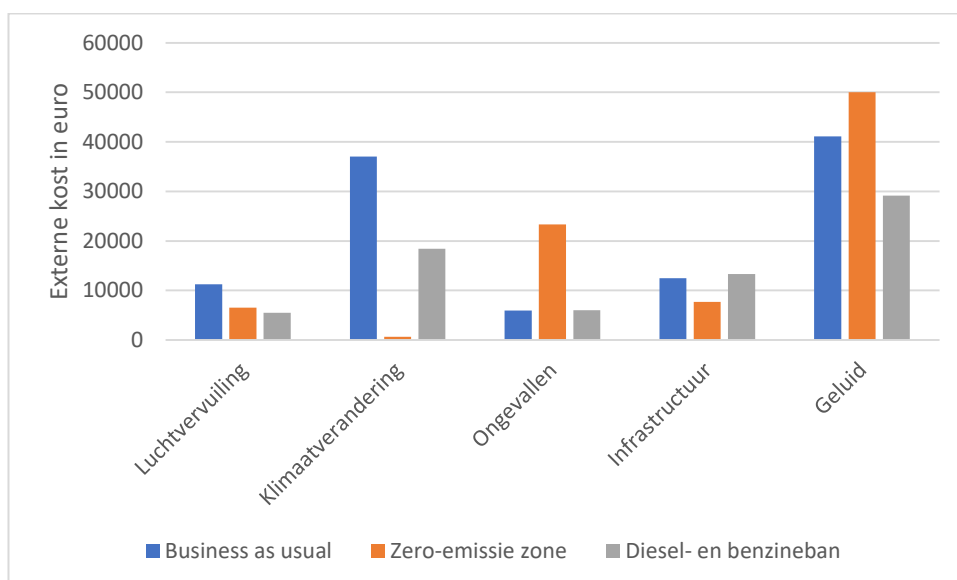


Figuur 14: Modal split per tonkilometers afgelegd in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest.



Figuur 15: Externe kost per dag in euro.

De externe kosten tonen aan dat een invoering van een diesel- en benzineban het meest wenselijk is. In onderstaande figuur 16 worden de externe kosten op dagbasis voor transport op het grondgebied van het Brussels Hoofdstedelijk Gewest uitgedrukt in euro weergegeven voor de drie scenario's. Congestie is veruit de belangrijkste parameter. Het hoge aantal voertuigkilometers bij de invoering van een zero-emissiezone zorgt voor hoge congestiekosten. De externe kost voor congestie wordt berekend als het effect van het toevoegen van één vrachtvoertuig aan het verkeer (marginale externe kost). Deze kost is afhankelijk van de verkeerssituatie. Bij een belaste of overlaste verkeerssituatie zal de marginale externe congestie kost hoger zijn dan bij vrij of verzadigd verkeer (zie tabel 6). Wanneer men de congestie even buiten beschouwing laat, dan is het beeld genuanceerder.



Figuur 16: Externe kost per dag in euro (congestie buiten beschouwing gelaten).

Het hoge aantal voertuigkilometers bij de invoering van een zero-emissiezone zorgt voor hogere externe kosten voor ongevallen en geluid. De externe kost voor infrastructuur valt lager uit omdat bestelwagens



minder schade aanrichten dan vrachtwagens. De impact op klimaat wordt in dit scenario gereduceerd tot de impact van binnenvaart en spoor.

Congestie buiten beschouwing gelaten, scoort het scenario *business as usual* het slechtste op de externe kosten. Daarna volgt de invoering van een zero-emissiezone, met een reductie van 18,8% aan externe kosten (zonder congestie). De invoering van een diesel- en benzineban zorgt voor een reductie van 32,8% ten opzichte van de *business as usual*.

## 4.5. Discussie

TRABAM laat niet toe om locatiekeuze of locatieveranderingen van bedrijven te simuleren en te analyseren. Daarover kan dus geen uitspraak gedaan worden. Het is wel zo dat de uitvoering van een implementatiescenario (zero-emissiezone of diesel- en benzineban) zorgt dat logistieke dienstverleners uit het Brussels Hoofdstedelijk Gewest hun niet-toegelaten voertuigen niet kunnen inzetten. Voor sommige bedrijven betekent dit het einde van hun transportactiviteit. Een invoering van een ban kan bijgevolg drie gevolgen hebben voor dergelijke bedrijven: (1) ze vernieuwen en verduurzamen hun vloot, (2) ze herlokalisieren buiten het Brussels Hoofdstedelijk Gewest of (3) ze zetten hun activiteiten stop. Een duidelijke en vroege aankondiging van de ban zal een vernieuwing en verduurzaming van de vloot in de hand werken. Aanvullend kan de lage-emissiezone reeds een zachte incentive zijn om dit proces te begeleiden.

De lage-emissiezone heeft geen ingrijpend effect op het goederenvervoer tegen 2035. De lage-emissiezone heeft op korte termijn vermoedelijk een versterkend effect om de bestelwagenvloot te vernieuwen – net zoals de kilometerheffing dat effect heeft op vrachtwagens. De lage-emissiezone kan wel worden ingezet om de overgang naar een ban te begeleiden. Bepaalde technologieën zouden in de jaren voorafgaand aan de invoering van de ban een tarief kunnen betalen. Dat kan de vlootvernieuwing versnellen, waardoor een disruptieve impact op de transportorganisatie geminimaliseerd kan worden. Het invoeren van een lage-emissiezone of een ban zorgt voor een verhoging van de transportkosten. Vanuit de ervaring van de kilometerheffing blijkt dat de kosten doorgedruwd en geabsorbeerd worden verder in de keten. Dat wordt ook bevestigd door de overzichtsstudie van Beuthe et al. (2014). Een verandering in de prijs heeft volgens hen geen effect op de totale hoeveelheid getransporteerde tonnages. Er kan wel een verschuiving zijn tussen de hoeveelheid die getransporteerd wordt per transportmodus alsook verschuivingen in de voertuigkilometers en tonkilometers per modus. Dat bevestigt ook Prognos in een directe communicatie aan VUB MOBI. Prognos is een studie bureau dat onder meer transportvraag voorspelt voor landen en regio's. Transport staat in voor 1% tot 10% van de prijs van een product, waarbij hoe duurder het product, hoe lager het aandeel van transport zal zijn. Dit kan worden geïllustreerd door de waargenomen gedrag van de industrie (bijv. vestiging van productie in landen ver weg van de consumentenmarkten (*off-shoring*)). Prognos gaat er van uit dat de transportprijs van ondergeschikt belang is in vergelijking met andere prijselementen (bijvoorbeeld arbeidskosten, belastingen, lokale prijzen voor implantaties etc.).

## 5. CONCLUSIE

Voorspelde economische groei en groei in bevolking zullen zorgen voor een groeiende vraag naar goederen en goederentransport in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest. Tegen 2035 wordt verwacht dat het getransporteerd volume zal stijgen met 5,63% vanuit de stad en 5,89% richting de stad. Om duurzaamheidsdoelstellingen te halen is het van wezenlijk belang om ook goederenvervoer in perspectief te nemen bij het implementeren van een uitstap uit thermische voertuigtechnologieën.

Via het *agent-based transport model* TRABAM werden drie scenario's gesimuleerd om de impact van een implementatie van een uitstap te kwantificeren. Een eerste scenario [1] omvat business-as-usual in 2035, dat uitgaat van een verderzetting van het huidige beleid. Tegenover dit eerste scenario worden twee uitstap-implementatiescenario's afgewogen. Het eerste scenario [2] omvat een volledig verbod van vrachtvoertuigen die als niet-zero-emissie beschouwd kunnen worden. In dit scenario mogen enkel elektrische, plug-in hybride en waterstofvoertuigen het gewest binnen, aangevuld met binnenvaart en spoor. Het tweede uitstapscenari [3] verbiedt enkel de toegang tot het gewest van diesel- en benzine-aangedreven wegvrachtvoertuigen.

De resultaten tonen aan dat het Brussels Hoofdstedelijk Gewest in 2035 in het *business as usual scenario* - zonder ingrijpen - 8.404 bestelwagens en 578 vrachtwagens extra per dag (t.o.v. 2012) te verwerken krijgt. De groei in bestelwagens bevestigt de trend die voorspeld wordt in GOODMOVE.

Bij een invoering van een zero-emissiezone [2] wordt het vrachtvervoer hoofdzakelijk via bestelwagens georganiseerd, maar liefst 13.691 bestelwagens extra per dag ten opzichte van het *business- as usual scenario* [1]. Het aantal vrachtwagens daalt tegelijk met 11.455, waarvan ook een aanzienlijk deel van de stromen via spoor en binnenvaart vervoerd worden. De oorzaak voor deze grote verschuiving is dat zero-emissiegoederenvervoer voor het bestelwagensegment reeds beschikbaar zijn. Voor de zwaardere vrachtvoertuigen worden algemeen inzetbare modellen pas tegen 2030 verwacht, waardoor er geen groot vlootaandeel tegen 2035 verwacht kan worden. De grotere inzet van bestelwagens gaat gepaard met het gedwongen opdelen van een aantal grote stromen voor de industrie, opslag en groothandel in minder efficiënte deeltransporten. Het heeft een negatief effect op externe kosten, en vooral op congestiekosten. Daardoor leidt de invoering van de zero-emissiezone tot meer dan een verdubbeling van de externe kosten ten opzichte van het *business as usual scenario*. De externe kostenbesparing die gepaard gaat met de modale verschuiving vindt voornamelijk buiten het Brussels Hoofdstedelijk Gewest plaats. De resultaten vereisen een indringende verandering van de transportorganisatie. Logistieke dienstverleners uit heel het land moeten de Brusselse transportvraag beantwoorden. Daarnaast moeten bestelwagens het transport van grote stromen mee verzorgen, hetgeen leidt tot vele up- en downstream uitdagingen zoals vele leveringen aan winkels, fabrieken en distributiecentra.– Dit is geen wenselijk scenario. Dat kan het enkel worden mits een snellere ontwikkeling en marktevolutie van zero-emissievoertuigen in het zware wegvervoersegment. Als overheid kan daarop ingezet worden, maar dit vereist een nationaal, en zelfs Europees engagement dat verder gaat dan het huidige.

In het derde scenario wordt een invoering van een diesel- en benzineban [3] gesimuleerd. De toename in aantal bestelwagens per dag ten opzichte van de *business as usual* [1] is beperkter (+ 191). Tegelijk zullen er 25 vrachtwagens per dag minder in het Gewest rondrijden ten opzichte van het *business as usual* scenario. Verkeersplanmatig is de impact van dit scenario dus miniem, en ook de transportorganisatie blijft onveranderd. Het valt wel op dat de percentages voor de voertuigkilometers per aandrijvingstechnologie gelijklopend zijn met de percentages van de vlootverdeling. Dit impliceert dat in dit scenario ook maximaal alle toegelaten aandrijvingen gebruikt worden. Met slechts 15% tot 30% van de voertuigvloot – afhankelijk van het type voertuig - die in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest worden toegelaten, is het ook een logisch resultaat. Gezien duurzame aandrijvingstechnologieën maximaal gebruikt worden, biedt dat overheden de kans om ook ondersteunend beleid te maximaliseren. Hierbij kan gedacht worden aan het voorzien van laad- en tankinfrastructuur, subsidies en dergelijke. De implementatie van een diesel- en benzineban is duurzamer (reductie van 13,56% in externe kosten in vergelijking met de *business as usual*) dankzij minder luchtvervuiling, minder uitstoot van broeikasgassen en minder geluidsoverlast. Goederentransport zal echter niet als zero-emissie beschouwd kunnen worden zoals Europa het vereist.

## 6. REFERENTIES

- Beuthe, M., Jourquin, B. & Urbain, N. (2014) Estimating Freight Transport Price Elasticity in Multi-mode Studies: A Review and Additional Results from a Multimodal Network Model, *Transport Reviews*, 34:5, 626-644
- Bickel, P., Friedrich, R., Droste-Franke, B., Bachmann, T. M., Greßmann, A., Rabl, A., ... Tidbald, J. (2005). ExternE: Externalities of Energy Methodology 2005 Update. Luxembourg.
- BISA – Brussels Instituut voor Statistiek en Analyse, online databank
- Brussel Mobiliteit (2019). Chiffres clés sur le transport de marchandises à Bruxelles. Edition 2019
- Clean Power for Transport prognose
- Collins, J. M., & McLarty, D. (2020). All-electric commercial aviation with solid oxide fuel cell-gas turbine-battery hybrids. *Applied Energy*, 265, 114787. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114787>
- European Commission. (2011). WHITE PAPER - Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system.
- Federaal Planbureau, online databank
- Horni, A., Nagel, K., & Axhausen, K. W. (2016). The Multi-Agent Transport Simulation MATSim (Andreas Horni, K. Nagel, & K. W. Axhausen, Eds.). <https://doi.org/10.5334/baw>
- Hydrogen Council, 2017, Hydrogen scaling up. A sustainable pathway for the global energy transition.
- International Energy Agency, 2017, The Future of Trucks: Implications for Energy and the Environment
- Kleiner, Özdemir, Schmid, Beerman, Çatay, Moran, Friedrich (2015). Electrification of transport logistic vehicles: A techno-economic assessment of battery and fuel cell electric transporter. *EVS28*.
- Kollamthodi, Norris, Dun, Brannigan, Twisse, Biedka, Bates (Ricardo-AEA) (2016) The role of natural gas and biomethane in the transport sector.
- Lebeau, Macharis, Van Mierlo (2019). How to Improve the Total Cost of Ownership of Electric Vehicles: An Analysis of the Light Commercial Vehicle Segment. *World Electric Vehicle Journal* 2019, 10, 90; doi:10.3390/wevj10040090
- Luyten S. & Van Hecke E. (2007). De Belgische Stadsgewesten. Statistics Belgium, Working Paper, FOD Economie, Algemene Directie Statistiek en Economische Informatie, Leuven, KULeuven, Instituut voor Sociale en Economische Geografie.
- Marynissen, Jacobs, Huybrechts (VITO), 2018, Beste Beschikbare Technieken (BBT) voor verdeling van LNG. Finale draft.
- McKinsey (2018) The potential impact of electric vehicles on global energy systems
- Mommens, K., van Lier, T., & Macharis, C. (2016). Loading Unit in Freight Transport Modelling. *Procedia Computer Science*, 83, 921–927. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.04.186>

Mommens, K., van Lier, T., & Macharis, C. (2017). Freight demand generation on commodity and loading unit level. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 17(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.18757/ejtir.2017.17.1.3179>

Mommens, K., Lebeau, P., Verlinde, S., van Lier, T., & Macharis, C. (2018). Evaluating the impact of off-hour deliveries: An application of the TRansport Agent-BASed model. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 62, 102–111. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.02.003>

Mommens, K. (2019) The development of an assessment framework for multimodal freight transport of different cargo types in Belgium. Vrije Universiteit Brussel.

Mommens, K., Brusselaers, N., van Lier, T., Macharis, C., 2019, “A dynamic approach to measure the impact of freight transport on air quality in cities”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 240

Moultak, Lutsey, Hall (ICCT) (2017) Transitioning to zero-emission heavy-duty freight vehicles. White paper.

Nationale Bank van België, online databank

Otten, M., 't Hoen, M., & den Boer, L. C. (2017). STREAM Freight transport 2016: Emissions of freight transport modes. Delft.

Ricardo-AEA, 2017, Oxford Zero Emission Zone. Feasibility and Implementation Study

Schröder, S., & Liedtke, G. (2014). Modeling and analyzing the effect of differentiated urban freight measures – a case study of the food retailing industry. 93rd Annual Meeting of Transportation Research Board. Washington DC.

TNO (Verbeek, van Zyl) en CE Delft (van Grinsven, van Essen) (2014) Brandstoffen voor het wegverkeer. Kenmerken en perspectief. Tweede versie, juni 2014.

TNO (Verbeek), 2015, LNG for trucks and ships: fact analysis. Review of pollutant and GHG emissions. Final

Van Lier, T., Mommens, K., Vanhulle, A., Van Winckel, J., & Macharis, C. (2019). Roadmap voor vermindering van klimaat- en luchtemissies van vrachtovervoer. Brussels.