

Van Mourik Broekmanweg 6
2628 XE Delft
Postbus 49
2600 AA Delft

www.tno.nl

T +31 88 866 30 00
F +31 88 866 30 10

TNO-rapport

TNO 2014 R11133

CO₂-emissiefactoren voor de snelweg

Datum	15 januari 2015
Auteur(s)	Norbert Ligterink & Stephan van Zyl
Exemplaarnummer	2015-TM-RAP-0100281604.
Aantal pagina's	30
Aantal bijlagen	-
Opdrachtgever	RWS/WVL (Paul Fortuin en Henk Stoelhorst)
Projectnaam	CO2 emissiefactoren
Projectnummer	060.12087

Alle rechten voorbehouden.

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

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

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

© 2014 TNO

Samenvatting

Het wegverkeer is een bron van CO₂-emissies, die afhankelijk is van het veranderde wagenpark en het rijgedrag op de weg. RWS wil de CO₂-emissies van het wegverkeer kunnen bepalen. Dit behoeft CO₂-emissiefactoren die representatief zijn voor verschillende voertuigcategorieën die in 2015 gebruik zullen maken van het Nederlandse wegennet. Uit deze CO₂-emissiefactoren kan vervolgens het praktijkbrandstofverbruik worden afgeleid. De hierboven genoemde CO₂-detail emissiefactoren zullen in deze studie bepaald worden.

Jaarlijks levert TNO emissiefactoren op aan het Ministerie van IenM die voor verschillende doeleinden worden gebruikt, zoals luchtkwaliteitsmodellen. CO₂-emissiefactoren maken geen deel uit van deze jaarlijks gepubliceerde set emissiefactoren, omdat het onderscheid tussen emissiefactoren van luchtvervuilende stoffen plaatsvindt op basis van andere voertuigkenmerken. Zo wordt de afname van luchtvervuilende emissies gedreven door andere Europese wetgeving (bijvoorbeeld Euroklassen) dan de CO₂-emissies. Luchtvervuilende emissies zijn mede daardoor vooral afhankelijk van de Euroklasse (bouwjaar) en brandstofsoort terwijl CO₂-emissies sterk afhangen van snelheid, voertuiggewicht, rijgedrag en bouwjaar.

In de rapportage naar internationale organisaties, zoals UNFCCC en de EU, worden CO₂-emissies van voertuigvloten veelal bepaald enkel op basis van de brandstofverkoopcijfers. Maar voor het effect van maatregelen, zoals de verandering van de snelheidslimiet, is het noodzakelijk de emissiefactoren te hebben, die bijvoorbeeld onderscheid maken tussen snelheidsregimes, bouwjaar en aandelen van verschillende voertuigcategorieën.

Een gemiddelde CO₂-emissie voor de gemiddelde situatie is over de andere omstandigheden en het wagenpark, vereist drie stappen:

1. een totaal praktijkbrandstofverbruik voor relevante voertuigcategorieën,
2. de aandelen van deze voertuigen in het verkeersbeeld, en
3. hoe de CO₂-emissies van deze categorieën variëren met het rijgedrag en wegtype.

Uit de juiste combinatie van deze drie stappen kan de specifieke emissie bepaald worden.

In deze studie worden de volgende factoren gecombineerd voor alle relevante voertuigtypen die relevant zijn voor de CO₂-uitstoot op de Nederlandse snelwegen:

- het globale beeld dat ontstaat uit brandstofverbruiksmonitoring,
- de ontwikkeling van het wagenpark, en
- de metingen aan voertuigen

Op basis van

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
1	Inleiding	5
1.1	Koolstofinhoud van brandstof	6
1.2	SRM-II methodiek	6
1.3	Wagenparkontwikkelingen	7
1.4	Het effect van rijgedrag op CO ₂ -emissies	7
1.5	Onbekende omstandigheden en de zichtbare effecten	8
2	Resultaten ter onderbouwing emissietotalen	9
2.1	Brandstofverbruikscijfers	9
2.2	Eerdere studies naar CO ₂ -emissies door wegverkeer	9
2.3	Het modelleren van CO ₂ -emissies van vrachtwagen	10
2.4	Brandstofverbruik op basis van Truck-van-de-Toekomst monitoring	10
2.5	Verkennd onderzoek emissies bij verhoging van de maximumsnelheid naar 130 km/h	11
2.6	Travelcard tank-pas analyses	12
2.7	CO ₂ -emissiefactoren	12
2.8	CBS-TNO bottom-up CO ₂ -berekeningen	13
2.9	Marginale CO ₂ -emissies in relatie tot motorbelasting	14
2.10	De noodzakelijke nauwkeurigheid	15
3	VERSIT+ emissiefactoren op basis van metingen	17
3.1	Licht wegverkeer en snelheidslimieten	17
3.2	Zwaar wegverkeer en belading	18
4	Wagenparkontwikkelingen	19
4.1	CO ₂ -targets, energielabel en wetgeving	19
5	Kalibratie naar wagenparkgemiddelden	20
5.1	Kalibratie personenauto's	21
5.2	Emissiemodel voor bestelauto's	22
5.3	Kalibratie van zwaar wegverkeer	22
5.4	Stratificatie over categorieën: onafhankelijke effecten	23
6	Emissiefactoren	25
7	Conclusies	27
8	Referenties	28
9	Ondertekening	30

1 Inleiding

Bij de plannen voor verhoging van de maximumsnelheid op het hoofdwegennet (HWN) van november 2011, naar 130 km/h waar mogelijk, is bepaald dat dit zou leiden tot een toename van 0,4 Mton CO₂. [DVS 2011a, DVS 2011b] TNO heeft hiervoor in 2011 een inschatting gemaakt dat het verschil 5% is in CO₂-emissies tussen de snelheidslimieten van 120 km/h en 130 km/h. [Lange 2011] Dit is gedaan op basis van de gegevens verkregen op de vier proeftrajecten.

Ondertussen is onderzoek gedaan naar de mogelijkheid om het aantal wisselingen van maximumsnelheden te verminderen. De maximumsnelheden op het HWN hebben ook effect op de CO₂ emissies. Om deze CO₂-emissies in kaart brengen op basis van het snelheidsbeeld 2015 is het noodzakelijk om de CO₂ emissiefactoren te hebben voor het wagenpark van 2015 bij de verschillende snelheden.

TNO levert al vele jaren emissiefactoren van verschillende schadelijke stoffen die worden uitgestoten door voertuigen, onder andere voor het gebruik in luchtkwaliteitsmodellen. [ER] In hetzelfde proces worden voor intern gebruik, ter referentie, ook CO₂-emissiefactoren bepaald. Deze waarden worden normaal niet uitgeleverd omdat ze niet zijn gekalibreerd. Recent, in samenwerking met CBS, zijn er voor het eerst CO₂ emissies bepaald op basis van het aantal gereden kilometers en het voertuigenpark ("bottom-up" bepalingen). [Staats 2014, Willems 2014] Deze emissies zijn vergeleken met de standaardresultaten op basis van brandstofverkoop. [CBS 2014]

Daarnaast is TNO betrokken bij meerdere, nationale en internationale monitoringsprogramma's waarin de effecten van CO₂-beleid worden geëvalueerd. Door deze studies is er goed inzicht in de verschillen tussen "laboratoriumwaarden" en de praktijk. Uit recent onderzoek van TNO is gebleken dat de CO₂-emissies in de praktijk minder snel dalen dan de laboratoriumwaarden en dat het verschil tussen beide de afgelopen jaren steeds verder toeneemt. Daardoor heeft nationaal en Europees beleid ten behoeve van de reductie van CO₂-emissies minder effect dan mag worden verwacht op basis van opgave van fabrikanten. [Ligterink 2014, Ligterink 2013a, Ligterink 2013b, Ligterink 2012a, Ligterink 2012b, Ligterink 2010, Ligterink 2009, Mock 2013, Ntziachristos 2014]

De CO₂-emissiefactoren voor het evalueren van de bijdrage van snelwegen aan de CO₂-emissies kunnen bepaald worden met de dezelfde methodiek die wordt gebruikt voor het bepalen van de emissiefactoren voor luchtvervuilende emissies. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een door TNO ontwikkeld emissiemodel, genaamd VERSIT+. Deze hieruit volgende CO₂-emissiefactoren zullen vervolgens geschaald en gekalibreerd worden op basis van onafhankelijke bepalingen van de emissietotalen op basis van verbruikscijfers. Dit compenseert de CO₂-emissies voor de veelal onbekende omstandigheden, die in de testen niet worden meegenomen, zoals extra gewicht, lage temperaturen, neerslag, lage bandenspanning, etc., maar wel zichtbaar zijn in de praktijkwaarden. Daarnaast zal een inschatting worden gemaakt van de ontwikkeling van de wagenparksamenstelling, waarbij rekening wordt gehouden met het bestaande (stimulerings)beleid.

Het brandstofverbruik en de CO₂-uitstoot van wegvoertuigen is van vele factoren afhankelijk. Voertuiggewicht, snelheid, en dynamiek (de hoeveel acceleratie en deceleratie) zijn de drie belangrijkste aspecten. Maar daarnaast zijn ook andere factoren van belang voor accurate inschattingen van de CO₂-uitstoot. Zo veroorzaakt het weer en de temperatuur een jaarlijkse variatie van ongeveer 7% in de CO₂-emissies per kilometer. Het positieve effect van de ontwikkeling van voertuigtechnologie op CO₂-emissies, vooral zuinigere motoren, wordt deels teniet gedaan door grotere vermogens voor hetzelfde voertuig en gewichtstoename. Voor vrachtwagens blijven van de reducties die bereikt worden op motorniveau maar ongeveer de helft over in de praktijk op de weg.

1.1 Koolstofinhoud van brandstof

Totale en gemiddelde CO₂-emissies kunnen het beste en meest nauwkeurig worden bepaald op basis van het brandstofverbruik. Aangezien de totale hoeveelheid in Nederland getankte brandstof wordt gemonitord, zijn er voor de totalen nauwkeurige en onafhankelijke verificaties beschikbaar voor de totale hoeveelheid geëmitteerde CO₂-emissies. De CO₂-emissies toekennen aan specifieke voertuigen en specifieke omstandigheden is een stuk moeilijker.

De directe link tussen brandstofverbruik en CO₂-emissies helpt bij het kalibreren aan de praktijk. Als vuistregels worden de volgende waarden gebruikt:

- Diesel 1.00 [l/100km] = 26.5 [g/km] CO₂
- Benzine 1.00 [l/100km] = 23.7 [g/km] CO₂

Voor benzine is deze omrekenfactor aan een kleine verandering onderhevig, vanwege de bijmenging van biobrandstof. Een waarde van 23.6 is dan ook wel gebruikelijk na 2010. Bij diesel compenseert de brandstofdichtheidsverandering de lagere koolstoffractie van de bio-bijmenging grotendeels.

1.2 SRM-II methodiek

Voor schadelijke emissies is er een langlopend programma [ER, RIVM] om de emissiefactoren te bepalen van wegverkeer. In dit programma komen meerdere aspecten samen:

1. Wetgevingsklassen van voertuigen waarop de relevante voertuigcategorieën worden gebaseerd.
2. Rijgedrag van voertuigen, op verschillende wegen, en bij verschillende congestiegraden.
3. Aandelen van de verschillende voertuigcategorieën op de weg.

Jaarlijks worden de emissiefactoren opnieuw vastgesteld. Deze worden vanaf maart van het jaar gebruikt in de luchtkwaliteitsmodellen, zoals het NSL (Nationaal Samenwerkingsprogramma Luchtkwaliteit). Over het algemeen zijn nieuwe metingen aan voertuigen de belangrijkste reden om getallen bij te stellen, aanpassingen in de methodiek en de referentievoertuigen en situaties komen ook voor maar minder vaak, en met kleinere aanpassingen tot gevolg. Deze aanpassingen worden jaarlijks gerapporteerd.

1.3 Wagenparkontwikkelingen

Sinds het jaar 2000 is CO₂-emissiereductie een speerpunt van de Europese Unie, nationale en lokale overheden, en bedrijven die een groen en duurzaam beleid nastreven. Het gevolg is een sterke ontwikkeling in de wagenparksamenstelling en voertuigtechnologie. Bijvoorbeeld hybride aandrijving is direct gekoppeld aan een lager brandstofverbruik en een lagere CO₂-uitstoot. Sinds 2007 is hybride aandrijving wijd beschikbaar en een substantieel aandeel geworden in de totale vloot.

Nederland heeft één van de laagste gemiddelde normverbruik van nieuwverkochte personenauto's in heel Europa. In de periode van de laatste tien jaar is de gemiddelde typekeuringswaarde van 175 g/km naar 105 g/km gegaan. Als de typekeuringswaarde maatgevend is voor het praktijkverbruik zijn er enorme stappen gemaakt. Maar in praktijk zijn de effecten kleiner, zoals blijkt uit monitoringsprogramma's.

Ook vrachtwagenmotoren worden in rap tempo efficiënter, ongeveer met één procent per jaar sinds 1990. Dit wordt bepaald in een motorproefstand test. In praktijk neemt het motorvermogen ook toe, zodat de motorverliezen groter worden, en van het effect op het niveau van de motor maar de helft overblijft in praktijk. De motorverliezen zijn ongeveer 3% van het motorvermogen, zodat motorverliezen voor een typische trekker-oplegger op de snelweg ongeveer 65 g/km CO₂-emissies verantwoordelijk is. Met 10% extra motorvermogen is dat dan 7 g/km meer. Als deze gegevens bekend zijn, kan daar expliciet in het wagenpark rekening mee gehouden worden, zoals is gedaan bij de CBS-TNO bottom-up analyse. [Willems 2014] Voor personenauto's zijn er vergelijkbare trends gaande, maar deze zijn moeilijker te onderscheiden van andere ontwikkelingen, omdat er geen aparte motortest is. Voor personenauto's is de verwachting dat het toegenomen vermogen tot ongeveer 2,5 g/km extra CO₂-emissies heeft geleid.

1.4 Het effect van rijgedrag op CO₂-emissies

Snelheid en dynamiek (accelereren en decelereren) zijn de belangrijkste componenten in het rijgedrag die de CO₂-uitstoot per kilometer beïnvloeden. Op basis van fysische principes is de toename van de luchtweerstand het belangrijkste aspect in de CO₂-uitstoot boven de 100 km/h. De weerstand neemt kwadratisch toe met de snelheid. Aangezien bij 100 km/h ongeveer driekwart van het vermogen nodig is om de luchtweerstand te overwinnen, neemt de luchtweerstand van 100 km/h naar 120 km/h met 44% toe en het gevraagde motorvermogen met ongeveer 33%. Kleinere motoren hebben vaak hogere toerentallen nodig om bij deze snelheid te rijden, zodat het verbruik relatief hoger is. Grote motoren hebben nog reserves in het vermogen, zodat het extra verbruik mogelijk iets kleiner is.

Vrachtwagens rijden niet harder dan 90 km/h, omdat ze met een snelheidsbegrenzer (tachograaf) zijn uitgerust. Daarnaast is de luchtweerstand ook een kleiner aandeel in het totale vermogen, omdat de massa een groter aandeel heeft. [Kuiper 2013] Effecten van snelheidsvariaties zijn hierdoor kleiner. Tussen 80 km/h en 90 km/h is de toename in CO₂-emissie ongeveer 12%, omdat luchtweerstand ongeveer de helft van het gevraagde vermogen is.

Dergelijke vuistregels zijn gebaseerd op rijden met een constante snelheid, bij gelijkblijvende overige omstandigheden. De invloed van gewicht is hierdoor geminimaliseerd, en speelt alleen een rol in de rolweerstand. De vuistregel voor rolweerstand is ongeveer 16-20 [g/km] CO₂-emissies per ton voertuiggewicht voor alle voertuigen. Waarbij het lage getal voor zwaardere, nieuwere voertuigen met een dieselmotor geldt, en het grotere getal voor kleine, oudere voertuigen met een benzinemotor. Absoluut zijn de CO₂ emissies van zwaardere voertuigen hoger, maar per gewichtseenheid iets lager. Hierin zijn de effecten van het verschillende rijgedrag niet meegenomen.

Het rijgedrag dat gebruikt wordt voor emissiefactoren is gebaseerd op metingen op de weg. De snelheid wordt opgenomen tijdens proeven. Een aantal van deze ritprofielen worden ook gebruikt om in het laboratorium de situatie op de weg na te bootsen tijdens een emissietest. Deze testen vormen de basis van de emissiefactoren die in Nederland worden gebruikt. Het rijgedrag dat gedistilleerd is uit de praktijkproeven worden gecombineerd met de emissies bij dit rijgedrag. Dit is de kern van het VERSIT+ emissiemodel: de verschillende emissietesten worden gecombineerd naar een emissiefactor per voertuigcategorie en genormaliseerd rijgedrag. [Lange 2011]

1.5 Onbekende omstandigheden en de zichtbare effecten

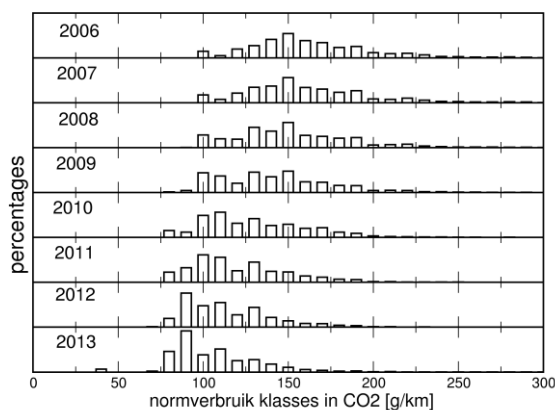
Tussen verschillende bestuurders van dezelfde auto kan tot 40% verschil zitten in brandstofverbruik. Dit verschil is opgebouwd uit heel veel factoren, die allemaal een aandeel hebben van een paar procent. [Ligterink 2012b] Dit maakt het moeilijk om de omstandigheden goed te modelleren. Daarvoor is er een grote dataset nodig die de resultaten middelt over alle omstandigheden en variaties tussen de verschillende automobilisten. Dat vraagt de gegevens van duizenden voertuigen die over een langere tijd gevolgd worden, of de betreffende data van brandstofverkoop gekoppeld aan het aantal gereden kilometers van deze voertuigen. Dergelijke data wordt gebruikt om de resultaten uit emissiemodellen te kalibreren aan de totalen. Doordat zoveel kleine effecten samen het totaal geven, is er slechts een zwakke koppeling tussen de relatieve CO₂-emissie van situatie naar situatie, en de absolute emissies gemiddeld over alle situaties. Bijvoorbeeld, extra gewicht in het voertuig geeft in alle gevallen een hogere CO₂-emissie, het kan in eerste orde onafhankelijk beschouwd worden van het rijgedrag en wegtype. Daarom kunnen de emissiefactoren uit het meetprogramma gekalibreerd worden met de totalen uit de monitoringsprogramma's.

2 Resultaten ter onderbouwing emissietotalen

CO₂ emissies zijn gekoppeld aan het brandstofverbruik wat het gevolg is van het gevraagde vermogen van de motor. Daarom zijn er verschillende databronnen die naast er gelegd moeten worden voor een zo consistent mogelijk beeld. In dit hoofdstuk wordt een aantal belangrijke bronnen kort beschreven. De in dit onderzoek bepaalde CO₂-emissiefactoren worden gekalibreerd aan de meest betrouwbare en recente gegevens over het brandstofverbruik.

2.1 Brandstofverbruikscijfers

Voordat de huidige testcyclus (NEDC) werd geïntroduceerd voor het bepalen van het brandstofverbruik volgens de officiële fabrieksopgave, werd het brandstofverbruik voor stad (ECE/UDC, ongeveer 18 km/h), met 90 km/h constante snelheid, en met 120 km/h gegeven. De waarden eind tachtiger jaren lagen respectievelijk rond de 9, 6 en 8 liter/100 km, voor gangbare benzineauto's. Dieselveertuigen waren er nog weinig, maar hadden een beduidend lager normverbruik. De winsten in normverbruik sindsdien hebben voornamelijk plaatsgevonden bij het lagere stadsverbruik dan in het verbruik bij hogere snelheden en lagere dynamiek. De laatste jaren daalt het normverbruik snel.



Figuur 1 het normverbruik van nieuwverkochte personenauto's naar aandelen in de totale verkoop over de jaren. [Ligterink 2014]

2.2 Eerdere studies naar CO₂-emissies door wegverkeer

Voor Rijkswaterstaat zijn er in het verleden scenario doorrekeningen gedaan door TNO waarbij CO₂-emissies van het wegverkeer zijn bepaald. Onder andere voor de projecten: Anders Betalen voor Mobiliteit, de Mobiliteitsaanpak, en Vuistregels Prijsbeleid zijn er studies gedaan. In alle gevallen ging het om een beperkte analyse, waarmee alleen relatieve effecten goed bepaald konden worden. De bepaling van de totale hoeveelheid CO₂-emissies, waarvoor dit onderzoek de noodzakelijke invoer levert vraagt een totaalbeeld, waarin alle relevante voertuigcategorieën en situaties op de weg zijn meegenomen.

2.3 Het modelleren van CO₂-emissies van vrachtwagen

Historisch, rond 1995, is er een simpel TNO model gemaakt voor het bepalen van het brandstofverbruik van vrachtwagens op basis van fysische eigenschappen: rolweerstand en luchtweerstand. Het verbruik was een functie van gewicht en snelheid. Dit model is door meerdere partijen nog lang gebruikt, ondanks de veranderingen in de technologie. Dergelijke modellen van andere bronnen, zoals voertuigsimulatiemodellen, zijn nog steeds in zwang. [Ntziachristos 2014]

In 2009 is het model opnieuw gemaakt, aan de hand van de recent beschikbare metingen aan Euro-V vrachtwagens op de weg. [Ligterink 2012a] De gegevens voor gemiddeld rijgedrag, en de bijbehorende dynamiek, zijn in dat model uitgesplitst naar verschillende gemiddelde snelheden. De belangrijkste conclusie was dat het motorvermogen, naast het gewicht, een belangrijke invloed had op het praktijkverbruik. Dit kan niet uit de officiële testen volgen, omdat de test wordt aangepast aan het vermogen van de motor: een grotere motor wordt zwaarder belast in de test, maar niet op de weg. De vergelijking voor de CO₂ [g/km] uitstoot bij de gemiddelde snelheid, en de normale dynamiek is:

$$\text{CO}_2 = (465 \cdot M + 48.1 \cdot P) / v + 32.4 \cdot M + 0.89 \cdot P - (0.48 \cdot M + 0.0256) \cdot v + (0.000889 \cdot M + 0.00041) \cdot v^2$$

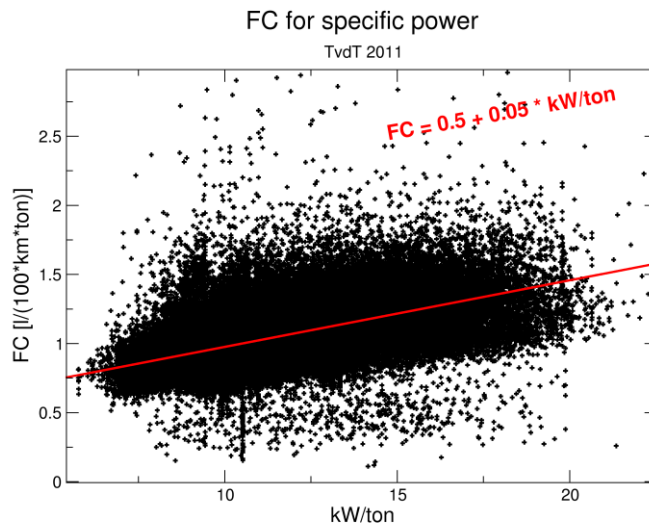
Waar v [km/h] de snelheid, M [ton] het totaalgewicht, en P [kW] het motorvermogen.

Uit deze formule is af te leiden dat een hoger vermogen leidt tot een hoger brandstofverbruik. Deels komt dat door een lagere efficiëntie bij lagere last, maar mogelijk geeft een hogere specifiek vermogen (kW/ton), ook aanleiding tot een meer dynamisch rijgedrag, met een hoger verbruik per ton gewicht. Het feit dat een zwaarbeladen truck (10 kW/ton en minder) zijn optimale snelheid bij 85 km/h heeft, en een lichtere truck bij een lagere snelheid (70 km/h) geeft al een indicatie dat de, van nature, lagere dynamiek bij hoge snelheden op de snelweg vooral in het voordeel van de zwaarbeladen vrachtwagens werkt.

2.4 Brandstofverbruik op basis van Truck-van-de-Toekomst monitoring

Met het monitoringsprogramma, Truck van de Toekomst, dat meerdere jaren heeft gelopen, is het effect van lading en motorvermogen op het brandstofverbruik, dat eerder gevonden was, onafhankelijk bevestigd. [TvdT] Als een vuistregel kan gesteld worden dat voor vrachtwagens per ton een halve liter per 100 km nodig is. Per kW vermogen is er nog 0,05 liter per 100 km extra nodig. Een zware trekker-oplegger combinatie: 30 ton en 300 kW, verbruikt zodoende gemiddeld 30 liter per 100 km, ongeveer 800 g/km CO₂. Een lichte vrachtwagen: 12 ton en 220 kW, verbruikt 17 liter per 100 km (450 g/km CO₂).

Uitgezet in Figuur 2 staan alle data van verschillende ritten met honderden vrachtwagens. De rode lijn is de vuistregel die hierboven wordt beschreven. Voor het gemiddelde is het een goede regel, maar de variatie tussen individuele trips is ongeveer 15%. Deze spreiding is wel kleiner dan bij personenauto's.



Figuur 2 Truck van de Toekomst data geschaald naar eenheden per ton totaalgewicht. De resultante trend met specifiek vermogen is duidelijk zichtbaar. De spreiding van 15% in de data komt hoofdzakelijk van de verschillende ritten (stad, lange afstand, etc.).

2.5 Verkennend onderzoek emissies bij verhoging van de maximumsnelheid naar 130 km/h

In het onderzoek [Lange 2011] naar emissiefactoren op de snelweg bij de 130 km/h snelheidslimiet, is er een vergelijking gemaakt tussen de situaties bij 120 km/h en 130 km/h. Daaruit is afgeleid dat er een toename van 5% in CO₂-emissies zou zijn van 120 km/h naar 130 km/h, voor licht wegverkeer. Dit is gecombineerd met de inschatting van de een ontwikkeling van het wagenpark in de tijd. Zie Tabel 2. Sindsdien is de ontwikkeling veel sneller gegaan.

Tabel 2 CO₂ emissiefactoren licht wegverkeer voor 130 km/h uit de studie [Lange 2011].

	2010	2015	2020	2030
CO ₂ [g/km]	180	173	161	154

Uit de huidige studie komt een lagere emissiefactor voor 130 km/h voor licht wegverkeer voor 2015: 164.4 g/km. Het verschil met 120 km/h is ook kleiner: 3.7% in plaats van dan eerder bepaalde 5%. De dalende trend is ook met de recente monitoringsdata kleiner dan eerder ingeschat.

Sinds 2011 zijn er veel nieuwe metingen bijgekomen aan voertuigen die nu belangrijk zijn op de weg. In het bijzonder is er een beperkter verschil in CO₂-uitstoot van moderne dieselauto's tussen de 120 km/h en 130 km/h ritprofielen. [

Op basis van deze gegevens heeft RWS een studie gedaan naar de effecten van de invoering van 130 km/h. [DVS 2011a, DVS 2011b] In de onderliggende studie [Lange 2011] worden alleen de 130 km/h en het verschil met 120 km/h belicht. De oorsprong van de lage CO₂ waarden, in vergelijking met deze studie, voor stagnerend verkeer en lagere snelheden (Tabel A.3 in [DVS 2011b]) zijn moeilijk te achterhalen. Wellicht zijn daarvoor andere ritprofielen en oude emissiefactoren voor

gebruikt. [CE 2004] De gemiddelde snelheid en dynamiek in het rijgedrag kan daardoor verschillen.

2.6 Travelcard tank-pas analyses

Sinds 2008 stelt Travelcard Nederland BV de transactiedata van tankpassen van een grote groep voertuigen beschikbaar aan TNO voor analyse. [Ligterink 2009, Ligterink 2010, Ligterink 2013, Ligterink 2014] Dit zijn zakelijke rijders, met mogelijk een wat hogere snelheid en agressievere stijl dan de gemiddelde automobilist. Maar aan de andere kant maken ze veel kilometers zodat ze een groot aandeel hebben in de totale kilometrage. Ze rijden meer op de snelweg, minder in de stad en minder met een koude motor. Er zijn dus redenen om het brandstofverbruik van deze groep als hoger dan het gemiddelde, maar ook lager dan het gemiddelde, in te schatten. Gezien het beperkte effect van het jaarkilometrage, en daarmee gemiddelde rijgedrag en ritsamenstelling, op het daadwerkelijke brandstofverbruik is een redelijke aanname dat de groep representatief is voor het gemiddelde verbruik van voertuigen van een bepaalde leeftijd.

De Travelcard data spant de periode van 2004 tot mei 2014. De trends in brandstofverbruik, in combinatie met de technologische ontwikkelingen, en het lagere normverbruik, kunnen daarom goed gevolgd worden. Dit leidt tot een belangrijke aanpassing van het praktijkverbruik van jaar op jaar. Het praktijkverbruik daalt wel maar het normverbruik is daarvoor niet maatgevend.

2.7 CO₂-emissiefactoren

CO₂-emissiefactoren, op basis van de meetgegevens, worden al jaren binnen TNO afgeleid, met dezelfde methodiek als voor de schadelijke emissies. Maar deze getallen worden niet uitgeleverd voor analyses. Het steekproefprogramma waarbinnen de metingen verricht worden, is bedoeld om een goed beeld te krijgen van de schadelijke emissies in praktijk. De voertuigen worden geselecteerd op relevantie voor schadelijke emissies. De groep geselecteerde voertuigen is qua CO₂-uitstoot niet noodzakelijk representatief voor het Nederlandse wagenpark. Dit is vanwege een simpele reden: nieuwverkochte voertuigen uit een bepaald jaar moeten allemaal aan dezelfde emissielimieten (Euro-klasse) voldoen voor schadelijke emissies. Voor schadelijke emissies zijn de voertuigen gelijk. Voor de CO₂-uitstoot hoeft enkel het gemiddelde van alle nieuwverkochte personenauto's in Europa in 2015 te voldoen aan 130 g/km. Als gevolg daarvan bestaat er bij moderne voertuigen een bandbreedte tussen 85 g/km en 200 g/km. Enkele tientallen voertuigen meten van een bepaalde emissiewetgevingscategorie levert een spreiding in de gemiddelde CO₂ van ongeveer 25 g/km, wat onacceptabel is gezien de gewenste nauwkeurigheid in CO₂ emissies van een paar gram per kilometer.

Een tweede reden waarom het gebruik van de CO₂-emissiefactoren, uit het meetprogramma, ongeschikt is voor de praktijk zijn de omstandigheden. De metingen in het laboratorium zijn verricht onder ideale omstandigheden met een laag gewicht, geen wind, hoge temperaturen, juiste bandenspanning, etc.. Uit praktijkverbruik gegevens is bekend dat de praktijkcijfers hoger zijn dan de resultaten uit de laboratoriumtesten, voor hetzelfde rijgedrag, maar voor een

variatie in , veelal onbekende, omstandigheden. Daar moet in CO₂-emissiefactoren die representatief moeten zijn voor de praktijk voor gecompenseerd worden.

2.7.1 *Internationaal beschikbare data*

De gangbare beschikbare emissiefactoren, die uit Europese studies worden gebruikt (HBEFA, zoals in de laatste versie van het STREAM rapport wordt gebruikt, en COPERT) onderschatten de CO₂-uitstoot van personenauto's. De gegevens die via het CBS beschikbaar zijn, ter evaluatie, geven vergelijkbare waarden, maar aan de hoge kant: de ontwikkelingen in motortechnologie zijn hier niet in meegenomen, zodat de gemiddelde CO₂-emissie rond de 175-180 g/km ligt voor personenauto's, met een beperkte trend.

2.8 **CBS-TNO bottom-up CO₂-berekeningen**

Voor benzine kan men concluderen dat de brandstof die verkocht wordt, hoogst waarschijnlijk wordt gebruikt om benzineauto's mee te laten rijden. De bijdrage van grasmaaiers, buitenboordmotoren, etc. is te verwaarlozen in de totale verkoop van benzine. Op basis van de inzichten dat er 67 miljard kilometers per jaar op benzine worden gereden en de benzineverkoop 5,3 miljard liter bedraagt, kan worden afgeleid dat de gemiddelde CO₂-uitstoot gemiddeld ongeveer 187 g/km is. De benzineverkoop is de laatste jaren nagenoeg constant gebleven. Het aantal kilometers dat met personenauto's in Nederland gereden wordt is echter toegenomen van 57 miljard kilometer in 1995 tot 67 miljard in 2012. Daaruit kan geconcludeerd worden dat benzineauto's in deze periode 15% zuiniger zijn geworden. Dit komt goed overeen met de resultaten uit andere bronnen, zoals Travelcard data.

CBS en TNO hebben in 2013 gezamenlijk gekeken naar de CO₂-uitstoot van personenauto's en vrachtwagens op basis van de kilometers van individuele voertuigen, en het verwachte brandstofverbruik van deze voertuigen. [Staats 2014, Willems 2014] Voor benzinevoertuigen kwam deze aanpak goed overeen met de verkoop van benzine. Voor diesel was de brandstofverkoop groter dan verwacht op basis van het gemiddelde verbruik en jaarkilometrages van individuele voertuigen. Dit wordt nader onderzocht.

2.8.1 *Vrachtwagen en Trekkers*

Het brandstofverbruik van vrachtwagens is sterk afhankelijk van de beladingsgraad, ofwel het gewicht van de voertuigcombinatie op de weg. Uit de meetgegevens van TNO is gebleken dat gewicht en motorvermogen de twee maatgevende aspecten zijn voor brandstofverbruik. De technologische verbeteringen zorgen voor een beperkte maar constante daling van het normverbruik voor dezelfde motor met ongeveer 1% per jaar sinds 1995. [Ligterink 2012a, Kuiper 2013]

TNO en CBS samen hebben in 2013 de jaarkilometrages van de verschillende vrachtwagens gekoppeld aan de technische eigenschappen en de typische beladingen. De voertuiggewichten zijn het resultaat van analyse van de WiM data (Weighing in Motion) op de snelweg. [Kuiper 2013]

Met deze analyse zijn voor het eerst de CO₂-emissies van vrachtverkeer toegekend aan de verschillende voertuigcategorieën. Het verschil tussen de verkoop van diesel en het verwachte verbruik, geeft aanleiding om de totale analyses nog eens tegen het licht te houden. Het tanken buiten Nederland, en rijden op Nederlandse brandstof in het buitenland zijn de meest waarschijnlijke oorzaken van het verschil tussen de afzet van brandstof en het totale brandstofverbruik.

2.8.2 *Personenauto's*

De recente ontwikkeling van het praktijkverbruik van personenauto's laat zien dat dit praktijkverbruik vooral van het normverbruik en het bouwjaar van het voertuig afhangt. Deze relaties zijn door het CBS gebruikt om de jaarkilometrages te koppelen aan het verwachte praktijkverbruik van die voertuigen. Voor benzineauto's, waar het praktijkverbruik kan worden vergeleken met de verkoop van benzine en de totale jaarkilometrages, komen beide op een vergelijkbaar verbruik. Diesel personenauto's bij lange na niet de enige grote afnemers van diesel, en voor deze groep is een dergelijk vergelijking niet mogelijk.

2.9 **Marginale CO₂-emissies in relatie tot motorbelasting**

Marginale veranderingen zijn de extra CO₂-emissies, of emissiereducties, die geassocieerd zijn met een verandering ten opzichte van de referentiesituatie. Bijvoorbeeld, lichten aan, airconditioning, accu laden, etc. leiden nauwelijks tot extra verliezen in de motor, alleen tot een iets hogere belasting. In dat geval is de extra CO₂ niet proportioneel met het aandeel in de totale arbeid, maar met een lager getal. Dit komt omdat bij hogere belasting de motor efficiënter draait. Een belangrijke uitzondering is een substantieel hoger toerental bij een hogere belasting. Dit geeft extra verliezen, die tot een lagere efficiëntie aanleiding kunnen geven. In dit geval moet men denken aan een kleine motor die toerentallen boven de 4000 RPM draait bij hoge snelheden op de snelweg.

De marginale CO₂-emissies bij een marginale verandering van de motorbelasting bij normale werking is in de orde van de CO₂ die geassocieerd is met de optimale motorefficiëntie.

- Benzine personenauto: 720 Δg/ΔkWh (37% optimale efficiëntie)
- Diesel personenauto: 680 Δg/ΔkWh (39% optimale efficiëntie)
- Diesel vrachtwagen: 650 Δg/ΔkWh (40.5% optimale efficiëntie)

Dit stelt men in staat om inschattingen te maken van, bijvoorbeeld, kleine snelheidsveranderingen bij gelijke dynamiek. In dat geval leidt de extra arbeid aan de wielen direct tot extra CO₂-emissies. Voor personenauto's is de referentie situatie 110 km/h. Een snelheidsverhoging of verlaging van 1 km/h is dan geassocieerd met grofweg een één-op-één relatie:

$$\text{Personenauto's: } 1 \Delta[\text{g/km}] \text{ per } 1 \Delta[\text{km/h}]$$

Deze relatie is niet bruikbaar voor snelheden onder de 100 km/h. In dat geval zijn dynamiek en motorefficiëntie belangrijke factoren die deze relatie verstoren. Boven de 120 km/h neemt de luchtweerstand rap toe, zodat ook boven deze snelheid de vuistregel niet bruikbaar is. De consequentie is ook dat de gemiddelde snelheid geen goede maat is voor de effecten. Zo zijn de CO₂-emissies van een auto die 130

km/h rijdt disproportioneel hoger ten opzichte van 110 km/h. Als één op de 50 auto's 130 km/h rijdt, en de rest 110 km/h, dan is de gemiddeld snelheid 110,4 km/h (0,36% hoger) terwijl de CO₂-emissies naar schatting daardoor 0,56% hoger zijn. De gemiddelde snelheid wordt wel gecompenseerd door een tweede auto die 90 km/h rijdt, maar de CO₂ emissies niet.

Voor vrachtwagens maakt het gewicht nauwelijks uit voor het effect van de snelheidsverandering of CO₂-emissies. Grote vrachtwagens en trekker-opleggers hebben vergelijkbare afmetingen die de luchtweerstand veroorzaakt. De verandering van 1 km/h bij 90 km/h geeft:

$$\text{Vrachtwagens: } 4 \Delta[\text{g/km}] \text{ per } 1 \Delta [\text{km/h}]$$

Deze vuistregels gelden in het geval van een veranderende snelheid bij dezelfde dynamiek. Waarbij dynamiek gedefinieerd is als een gelijke variatie in motorvermogen. Dat is de spreiding in acceleraties (Δa) normaliseert naar de snelheid:

$$\text{dynamiek} \sim \Delta a / v_{\text{gemiddeld}}$$

In tegenstelling tot de situatie op snelwegen, resulteert dynamiek bij lage snelheden in een groter onzekerheid op CO₂-emissies. Er zijn redenen om aan te nemen dat de dynamiek door de jaren heen omlaag gaat, door verbeterde infrastructuur ontstaat er een constante stroom voertuigen bij file. Maar aan de andere kant is het toegenomen motorvermogen een reden om te veronderstellen dat de dynamiek toeneemt. Vol beladen vrachtwagens, met de laagste vermogen-massa verhouding hebben de laagste dynamiek.

2.10 De noodzakelijke nauwkeurigheid

Schadelijke emissies hebben een grote bandbreedte, door onbekende factoren, die het functioneren van de emissiereductietechnologie beïnvloeden, en de grote gevoeligheid voor omstandigheden. Voor CO₂-emissies wordt deze bandbreedte veelal niet geaccepteerd. Dit is om drie redenen: er is onafhankelijke validatie van de totalen op basis van brandstofverbruik. Daarnaast wordt brandstofverbruik geassocieerd met fysische principes, die geacht worden bekend te zijn. En als laatste, voor de brandstofkosten en de aanname dat in bedrijfsvoering daar nauwkeurig op gelet wordt, is de veronderstelling dat het verbruik zo laag mogelijk is. Dat wordt geacht een uniek getal te zijn voor de inzet van voertuigen, vanuit economisch oogpunt.

De praktijk is weerbarstiger dan deze positivistische en deterministische veronderstellingen. Dat komt deels door de grote variatie ten gevolge van externe invloeden en rijgedrag. Maar met de juiste opzet van monitoringsprogramma's met voldoende data en analyse is de nauwkeurigheid van het voorspelde gemiddelde praktijkverbruik minder dan 5% afwijking met grote zekerheid. Dit is gebaseerd op de ervaring van de laatste jaren met de beschikbare data, en de onafhankelijke validatie.

De veronderstellingen, zoals fysische principes, die op de absolute emissies een beperkte betrekking hebben, zorgen er wel voor dat relatieve effecten, zoals de

verandering van gemiddelde snelheid of de invloed van de buitentemperatuur, met grotere nauwkeurigheid bekend zijn.

3 VERSIT+ emissiefactoren op basis van metingen

3.1 Licht wegverkeer en snelheidslimieten

Emissiefactoren voor snelwegen zijn op basis van ritprofielen berekend die in een aantal projecten van 2001 tot 2011 gemeten zijn. De laatste gemeten ritprofielen zijn die van de snelheidslimiet van 130 km/h. [Lange 2011] Tijdens de proefperiode bleek dat de gemiddelde snelheid bij 130 km/h beperkt hoger was dan de gemiddelde snelheid bij een snelheidslimiet van 120 km/h. De dynamiek is wel iets hoger bij een snelheidslimiet van 130 km/h. Het gevolg is dat er beperkt verschil is tussen de emissies bij 120 km/h en bij 130 km/h snelheidslimieten.

Trajectcontroles en de lagere snelheidslimieten zorgen beide voor een lage dynamiek, wat de emissies laag houdt. Voor de emissiefactoren is er daarom gekozen om bij afwikkelingsniveaus onderscheid te maken tussen

- file ($v_{\text{gemiddeld}} < 50$ km/h),
- de snelheidslimiet, en
- het handhavingsniveau.

Voor schadelijke emissies zijn de effecten van een lagere dynamiek groter dan voor CO₂ emissies. Dit is zeker het geval voor moderne motoren. De motorefficiëntie is constanter voor constante motorlast en dynamische motorbelasting, dan het voorheen was. De regeltechniek voor het reduceren van de schadelijke uitstoot, in het bijzonder bij dieselveertuigen, is beter afgesteld voor een constante belasting, bij lage dynamiek.

3.1.1 Bestelauto's

Bestelauto's zijn een onderbelichte groep zowel in de wetgeving als in de meetprogramma's. Het is gebruikelijk dat bestelauto's niet volledig getest worden voor de toelating op de Europese wegen. Er zijn tabellen in de wetgeving opgenomen waarvan gebruik gemaakt kan worden bij het bepalen van het normverbruik. Deze tabellen leveren vaak gunstiger waarden voor bestelauto's zodat bij voorkeur niet de volledige test wordt uitgevoerd voor de grotere bestelauto's. Deze voertuigen vormen het grootste aandeel in de groep van alle bestelauto's.

Daarnaast zijn er ontwikkelingen waarbij bestelauto's fungeren als trekker voor een oplegger (de BE-combi's). Het gewicht van deze voertuigcombinatie is vaak substantieel hoger van de 3,5 ton die een bestelauto's alleen mag wegen. Mogelijk zal daardoor, vooral in de toekomst, de inschatting van emissies hoger zijn dan op basis van de bestelauto alleen.

Voor het moment moet de CO₂-emissies van bestelauto's geschat worden op basis van het praktijkverbruik uit monitoringprogramma's gedifferentieerd naar leeggewicht, wat het beste correleert met de variatie in het praktijkverbruik.

3.2 Zwaar wegverkeer en belading

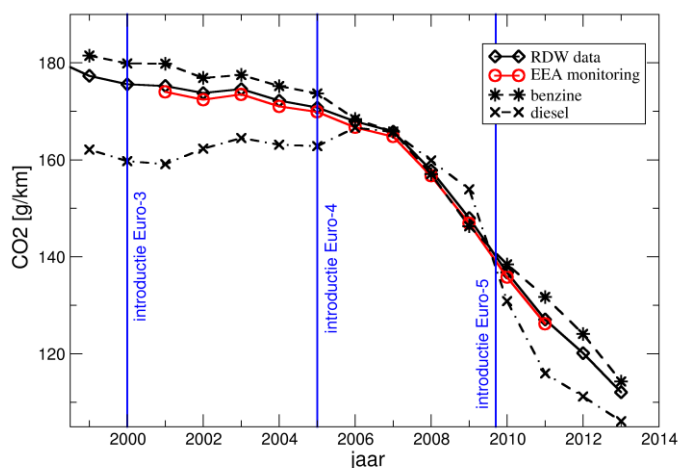
De PEMS testen in het heavy-duty steekproef programma dat TNO al enkele jaren uitvoert voor het ministerie van IenM, leveren de beste directe voorspellingen van de CO₂-uitstoot van vrachtwagen combinaties, van kleine naar groot, van leeg tot vol beladen. De monitoringsprogramma's zoals Truck-van-de-Toekomst bevestigen deze resultaten. Het nadeel van monitoringsprogramma's is dat ze geen onderscheid kunnen maken naar wegtype en congestie, omdat deze gegevens niet bekend zijn. Er is alleen een gemiddelde verbruiksgetal, uit kilometerstanden en brandstofverkoop. Maar het emissiemodel VERSIT+ voor vrachtverkeer levert een goede voorspelling voor de moderne vrachtwagens. De CO₂-emissies van oudere vrachtwagens worden geëxtrapoleerd aan de hand van de verbeteringen in motorefficiëntie die zichtbaar zijn in motortesten. Een 0.5% verbetering in brandstofverbruik blijft over als gecompenseerd wordt voor het toegenomen motorvermogen, waardoor een modernere motor relatief met een lagere last draait. Over de periode van 1970 tot 2012 is het gemiddelde motorvermogen van een trekker jaarlijks met 3,3 kW toegenomen tot boven de 320 kW. Dat levert, los van de technologische ontwikkeling, voor een moderne motor, per jaar 0,7 g/km extra CO₂ emissies, door de autonome ontwikkeling van de toename van het motorvermogen.

4 Wagenparkontwikkelingen

Tot 2000 was de motortechnologie-ontwikkeling ongeveer in evenwicht met de toename van het gewicht. De toename van gewicht deed de verbetering van technologie grofweg teniet. Het comfort en de veiligheid veroorzaakten dat het gewicht van voertuigen van de jaren tachtig opgelopen is tot ongeveer 2005. Daarom is het brandstofverbruik in deze periode slechts beperkt gedaald. Na 2005 is met gewichtsreducties de daling van het brandstofverbruik snel gedaald.

4.1 CO₂-targets, energielabel en wetgeving

De grootste daling van het normverbruik is op papier. Gezien de belangen die gemoeid zijn met een lage normwaarde worden de grenzen van de testprocedure opgezocht. Vanaf 2004 geldt dit voor de zuinigere auto's. Het verschil tussen de norm en de praktijk groeit voor deze groep de laatste tien jaar. Sinds een jaar of vier groeit het verschil voor alle voertuigen, ook de auto's met 150 g/km CO₂-emissies en meer.



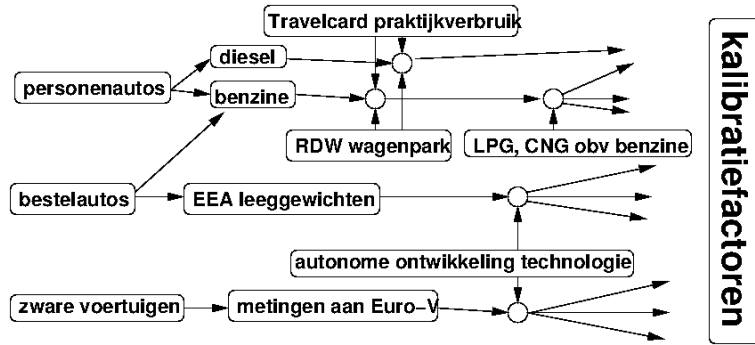
Figuur 3 Het gemiddelde normverbruik op basis van de Europese monitoring (EEA), en de totale inclusief import (RDW). De laatste is ook uitgesplitst naar benzine en diesel. De verschillende Euro-klassen staan aangegeven. De grote daling voor benzine voertuigen ingezet in 2007, voor diesel in 2009.

In Nederland is er een grote verschuiving naar lager normverbruik. Nederland hoort daarmee tot landen met het laagste CO₂-normverbruik van nieuwe voertuigen. In 2013 is daar een extra dimensie aan toegevoegd door de verkoop van substantiële aantallen plug-in voertuigen, die elektrisch kunnen laden, maar waarvan het normverbruik nog nauwelijks een relatie heeft met de praktijk.

5 Kalibratie naar wagenparkgemiddelden

Op basis van de informatie, kort beschreven in de vorige hoofdstukken, worden de CO₂-emissiefactoren geschaald ten opzichte van de waarden die direct uit het meetprogramma komen naar de waarden voor het nationale gemiddelde. De absolute, of totale, emissieniveaus worden vastgesteld op basis van monitoringsprogramma's en andere onafhankelijke informatie. De ervaring met niet-gekalibreerde CO₂-emissiefactoren en brandstofverbruiksmonitoring geeft het volgende beeld voor de kalibratie van de emissiefactoren:

1. Vrachtverkeer Euro-V emissiefactoren komen overeen met de monitoring. Oudere voertuigen worden geschaald aan de hand van 0.5% hoger verbruik per jaar, terug tot Euro-II.
2. CO₂-emissiefactoren van benzine- en dieselpersonenauto's hebben zowel een systematische afwijking naar beneden en een variatie die gecompenseerd moet worden door Travelcard monitoringsdata te matchen met het Nederlandse wagenpark.
3. Voor bestelauto's is onvoldoende data beschikbaar voor een onafhankelijke evaluatie. Emissiefactoren worden geschaald op basis van leeggewicht en het gemiddelde meerverbruik van deze voertuigen. Het effect van CO₂-wetgeving is nog beperkt zichtbaar. Een autonome ontwikkeling gelijk aan die van het vrachtverkeer wordt meegenomen, bij gebrek aan betere inzichten.
4. CO₂-emissiefactoren van voertuigen op alternatieve brandstoffen, LPG, CNG, en ethanol worden geschaald op basis van de koolstofinhoud, met benzinevoertuigen als referentie.
5. Alternatieve aandrijvingen, zoals plug-in hybride voertuigen, volgen dezelfde trend als andere zuinige voertuigen. Het praktijkverbruik wordt op deze manier gecompenseerd. Er is onvoldoende bekend over de toekomstige ontwikkeling om een meer gedetailleerdere methodiek te gebruiken.
6. Toekomstige Euro-6 personenauto's worden geschaald aan de hand van de ontwikkeling van Euro-4 naar Euro-5, met een normverbruikstarget voor Euro-6 van 95 g/km, die goed overeenkomt met de extrapolatie naar 2015.
7. Euro-VI vrachtwagens volgen de autonome trend en worden verondersteld 2% zuiniger te zijn dan Euro-V.

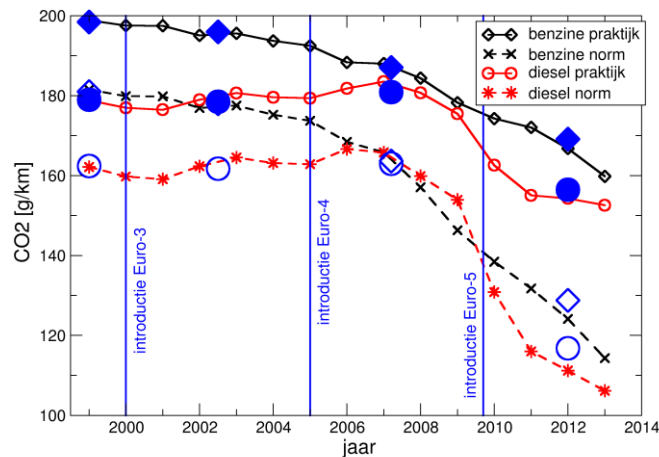


Figuur 4 De flowchart van het tot stand komen van de verschillende kalibratiefactoren waarmee de meetgegevens geschaald worden naar verbruiksgegevens.

De schaling kan alleen gebeuren voor de totalen, omdat monitoringsprogramma's over het algemeen geen inzicht geven wat de aandelen bij de verschillende wegtypen en congestiegraden zijn. Vanuit de SRM-methodiek is er wel een onderliggende verdeling van wegtypen en congestiegraden. De totalen uit de SRM worden vergeleken met de totalen uit de monitoringsprogramma's. Daaruit volgt een schalingsfactor.

5.1 Kalibratie personenauto's

De SRM gaat uit van personenauto's per Euro-klasse en brandstofsoort. Binnen een enkele Euro-klasse, die ongeveer vier jaren omvat zijn er recent grote veranderingen geweest. Het is daarom noodzakelijk om het Nederlandse wagenpark te wegen naar bouwjaar en normverbruik om zo tot een gemiddelde te komen.



Figuur 5 Het praktijkverbruik per bouwjaar van het Nederlandse wagenpark van personenauto's. De Euro-klasse gemiddelden zijn als blauwe symbolen (ruit: benzine, cirkel: diesel) zichtbaar voor norm en praktijk.

De Euro-6 factoren veronderstellen dat de ontwikkeling vanaf 2005 zich op dezelfde manier verder doorzet richting de Europese targets van 95 g/km normverbruik. Dat geeft aanleiding tot een proportionele daling van het praktijkverbruik.

Tabel 3 De Euroklasse gemiddelden van het totale praktijkverbruik. Dit bevat een weging over stad, buitenweg, en snelweg.

	Benzine		Diesel	
	Praktijk	Norm	Praktijk	Norm
Euro-0..2	198	181	179	162
Euro-3	196	178	178	162
Euro-4	187	164	181	163
Euro-5	169	129	156	117
Euro-6	151	95	141	95

Voor alternatieve brandstoffen zijn er eerder in de taakgroep al correctiefactoren bepaald die hiervoor toegepast kunnen worden:

Tabel 4 De lagere CO₂ emissies geassocieerd met alternatieve brandstoffen, voor vonkontsteking technologie.

LPG	Ethanol	CNG
-10.4%	-2.7%	-23.4%

5.2 Emissiemodel voor bestelauto's

Omdat het inzicht in de CO₂-emissies van bestelauto's zeer beperkt is, zowel op inzet als op de ontwikkeling in de jaren, is er gekozen voor een simpele robuuste aanpak om de emissiefactoren te schalen op basis van het voertuiggewicht in monitoringprogramma's.

Het gemiddelde gewicht van de ongeveer vijftigduizend nieuwverkochte bestelauto's per jaar in Nederland is ongeveer 1780 kg. [EEA] Dat is de afgelopen jaren ongeveer gelijk gebleven. Hieruit is af te leiden dat er waarschijnlijk vooral Class III bestelauto's worden verkocht. Het gemiddelde normverbruik heeft een beperkte waarde, maar is van twee jaar geleden jaar (2012) 179 g/km, naar afgelopen jaar (2013) 174 g/km gegaan (2.8% daling). De gereconstrueerde norm, een lineaire functie op basis van gewicht, en voertuigen die daadwerkelijk getest zijn, zou 190 g/km zijn. Het praktijkverbruik is 230 g/km (8.7 liter per 100 km). De autonome ontwikkeling, door de verbetering van motortechnologie wordt in deze getallen wel meegenomen, gebaseerd op basis van vrachtwagens. De referentiecategorie, voor 230 g/km, is de zware bestelauto Euro-5. De andere categorieën worden relatief ten opzichte van deze categorie geschaald.

Voor bestelauto's op benzine, LPG, en CNG is de veronderstelling dat dit vooral gaat om kleinere Class I voertuigen. Voor deze voertuigen worden de waarden gelijkgesteld aan die van personenauto's voor de referentie van Euro-5. Dit is slechts een kleine groep voertuigen.

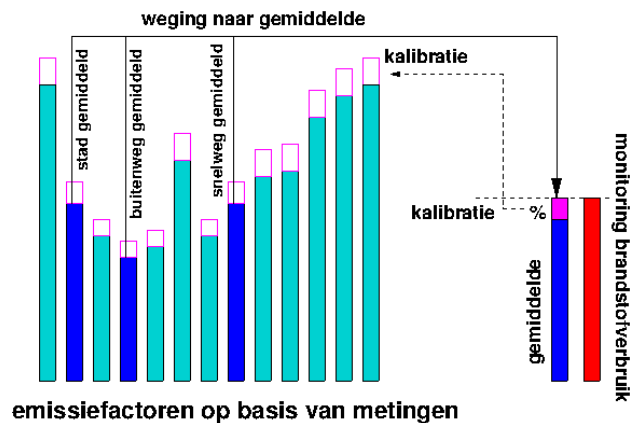
5.3 Kalibratie van zwaar wegverkeer

Het grote PEMS (Portable Emission Measurement Systems) meetprogramma aan Euro-V vrachtwagens is een goede basis voor absolute CO₂ emissiefactoren. [Ligterink 2012a] De niveaus van deze voertuigen worden onafhankelijk bevestigd door het brandstofverbruik monitoringsprogramma's en gegevens die door de

transportbedrijven ter beschikking worden gesteld. De autonome ontwikkeling van voertuigtechnologie is de enige kalibratie die op deze emissiefactoren uitgevoerd moet worden. Dat kan op twee manieren: De ontwikkeling van motorvermogen meenemen in de ontwikkeling van het wagenpark, of het effectief in de kalibratie meenemen. In de CBS/TNO bottom-up analyse is de eerste weg gevolgd voor de totalen van CO₂ uitstoot op basis van gereden kilometers, maar omdat er voor oudere voertuigen geen goede meetgegevens beschikbaar zijn voor CO₂-emissies, is er voor gekozen om de veranderingen in motorvermogen en het relatieve effect op de motorverliezen bij gelijke absolute motorbelasting, in de kalibratie te verdisconteren. In praktijk betekent dat vanaf Euro-V terug de CO₂ emissies 2% hoger worden verondersteld voor Euro-IV, en 4% voor Euro-III, en 6% voor Euro-II en eerder.

5.4 Stratificatie over categorieën: onafhankelijke effecten

De belangrijkste aanname voor het bepalen van CO₂-emissiefactoren is dat de totalen op basis van de weging van detailemissiefactoren geschaald kunnen worden op basis van de totalen op basis van brandstofverbruik. Dus als het verschil tussen brandstofverbruik en CO₂-emissiefactor 10% is, dat alle detailemissiefactoren, bijvoorbeeld voor stad, buitenweg, en snelweg allemaal met dit percentage opgeschaald kunnen worden. Gezien de percentages over het algemeen klein zijn, zijn de mogelijke fouten die hierdoor ontstaan in de individuele emissiefactoren klein.



Figuur 6 De toepassing van de kalibratie voor elke voertuigcategorie apart: het gemiddelde verbruik op basis van de weging van de individuele emissiefactoren worden geschaald naar het verbruik uit monitoring. Alle factoren, per voertuigcategorie krijgen dezelfde relatieve kalibratie.

De weging van CO₂-emissiefactoren naar een gemiddelde over alle wegtypen wordt gedaan met een standaardverdeling voor elke voertuigtype op basis van de inzet van dat type voertuig.

Het feit dat de verbeteringen van de voertuigtechnologie vooral bij lage motorlast gehaald worden is reeds zichtbaar in de lagere CO₂-emissies bij hoge congestie. Deze verschuiving staat los van de kalibratie van de totale emissies. In de meeste gevallen zijn de kalibratiefactoren kleiner dan de variaties in de CO₂-emissiefactoren zelf voor de verschillende verkeerssituaties.

De kalibratiefactoren variëren met de verschillende voertuigcategorieën en brandstofsoorten. Voor licht wegverkeer zijn de opslagfactoren bijna altijd positief, zoals verwacht. Benzine heeft opslagfactoren tussen 15% en 30%, voor diesel zijn deze iets groter. LPG en CNG hebben lagere factoren, omdat in het verleden vooral grotere voertuigen werden gemeten in deze categorieën. Voor zwaar wegverkeer zijn de kalibraties kleiner, en zijn de meetwaarden meer in lijn met de praktijk. Het gaat om een range van -15% tot 5%. aanpassingen van de gemeten emissiefactoren.

6 Emissiefactoren

De emissiefactoren zijn bepaald voor 2013, ter referentie, en 2015. Het jaar 2013 is geen zichtjaar met een prognose voor de onderliggende wagenparksamenstelling, maar wel het jaar van de laatste brandstofverbruiksgegevens. Voor de personenauto's komen de interpolaties van CO₂-emissies tussen 2010 en 2015 voor 2013 goed overeen met de extrapolatie terug van 2020. Voor zwaar wegverkeer is er een trendbreuk, omdat voor Euro-V en Euro-VI er categorieën zwaarbeladen trekker-opleggers zijn gekomen, die in 2010 niet in zicht waren.

Tabel 5 CO₂-emissiefactoren voor de snelweg voor het jaar 2015. (MSH: Met strenge handhaving, veelal trajectcontrole)

Jaar	2013						
	Stagnatie	80 km/h MSH	80 km/h	100 km/h MSH	100 km/h	120 km/h	130 km/h
Licht	258.6	131.0	139.1	146.4	148.5	162.8	169.0
middelzwaar	747.4	490.6	490.6	490.6	490.6	490.6	490.6
zwaar	1523.1	757.9	757.9	757.9	757.9	757.9	757.9

In de periode van twee jaar is er een autonome daling van ongeveer 2.5% in het brandstofverbruik van licht en middelzwaar verkeer. Voor zwaar wegverkeer is de daling kleiner, ongeveer 1%. Het effect wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het grotere aandeel oudere voertuigen in de eerste twee groepen dat verdwijnt tussen 2013 en 2015.

Tabel 6 CO₂-emissiefactoren voor de snelweg voor het jaar 2015. (MSH: Met strenge handhaving, veelal trajectcontrole)

Zichtjaar [g/km]	2015						
	Stagnatie	80 km/h MSH	80 km/h	100 km/h MSH	100 km/h	120 km/h	130 km/h
Licht	251.6	127.8	136.4	142.8	144.8	158.6	164.4
middelzwaar	731.6	478.6	478.6	478.6	478.6	478.6	478.6
Zwaar	1514.4	748.6	748.6	748.6	748.6	748.6	748.6

Voor de gemiddelde snelheden voor 120 km/h en 130 km/h snelheidslimieten zijn de effecten op CO₂-uitstoot relatief groot. Dit heeft te maken met dynamiek en vooral de oudere auto's en benzineauto's. Variaties in vermogen, bij hoge last, geven blijkbaar extra hoge emissies. Voor modernere technologie wordt het verschil kleiner.

Uitgezet tegen de snelheidslimieten zelf is het effect juist klein. Het verschil in de emissiefactor voor licht wegverkeer van 120 km/h en 130 km/h is 3.7%. Dat is weinig in vergelijking met het verschil in CO₂-emissies bij daadwerkelijke snelheidsverandering van 120 km/h naar 130 km/h dat in de orde van 11%-13% ligt. Het kleinere effect wordt veroorzaakt doordat de daadwerkelijke gemiddelde snelheid slechts beperkt omhoog is gegaan, tijdens de proeven, en ruim onder de

snelheidslimiet blijft. [Lange 2011] Dat de extra emissies nu kleiner zijn dan eerder ingeschat is vooral het gevolg aan de nieuwe metingen aan Euro-5 dieselloertuigen. Deze voertuigen hebben blijkbaar slechts beperkt hogere CO₂-emissies ten gevolge van de hogere dynamiek. Dit suggereert, dat de motor is geoptimaliseerd op een laag brandstofverbruik bij hoge snelheden en dynamiek.

7 Conclusies

Voor het eerst zijn er CO₂-praktijkemissiefactoren afgeleid voor de hele Nederlandse voertuigvloot. Dit is gedaan voor een groot aantal voertuigcategorieën op basis van emissiemetingen en praktijkverbruiksgedaten. Op deze manier kunnen zowel relatieve effecten, zoals verschillen ten gevolge van de verschillende snelheidslimieten, en de absolute niveaus, zoals in emissietotalen, goed bepaald worden. Deze resultaten kunnen door RWS/WVL gebruikt worden om de effecten van veranderingen in de CO₂-emissies door te rekenen.

De praktijk CO₂-emissiefactoren voor de snelweg zijn bepaald. Dit wordt gedaan voor 2013 om een vergelijk te kunnen maken met de monitoringsdata van bijvoorbeeld Travelcard, en 2015 voor gewenste doorrekening van effecten op CO₂-emissies.

De algemene trend is dat de CO₂-emissies toenemen met de snelheidslimiet en afnemen door minder dynamiek, bijvoorbeeld als gevolg van strenge handhaving van de maximumsnelheid. De hoogste CO₂-emissies per kilometer treden op in het geval van file. De effecten zijn kleiner dan met op grond van (simplistische) fysische modellen op basis van rolweerstand en luchtweerstand, in combinatie met de snelheidslimiet, zou verwachten. Daarvoor zijn twee oorzaken. Ten eerste is bij een hogere snelheidslimiet het verschil tussen de snelheidslimiet en de daadwerkelijke gemiddelde snelheid groter. Ten tweede, voor dezelfde mate van handhaving, neemt over het algemeen de dynamiek af bij hogere gemiddelde snelheden. Het onderscheid tussen 120 km/h en 130 km/h vormt daarop een uitzondering: De gemiddelde snelheid is nagenoeg gelijk, maar de dynamiek is groter bij 130 km/h.

Het onderzoek uit 2011 gaf iets grotere effecten dan nu zijn bepaald. Voor het kleinere verschil tussen 120 km/h en 130 km/h zijn emissiemetingen aan nieuwe voertuigen verantwoordelijk. De andere trend over de jaren is vooral het gevolg van het CO₂-beleid.

8 Referenties

[CE 2004] L.C. den Boer en J.P.L. Vermeulen, *Snelheid en milieu*, CE rapport 2004.

[CBS 2014] www.cbs.nl en statline.cbs.nl

[DVS 2011a] *Onderzoek invoering 130 km/h*, DVS november 2011.

[DVS 2011b] *Toelichting op aanpak analyse kosten en baten verhoging maximumsnelheid naar 130 km/h*, DVS, december 2011.

[EEA] www.eea.europa.eu

[ER] www.emissieregistratie.nl

In het bijzonder: Amber Hensema, Norbert Ligterink, en Gerben Geilenkirchen, *VERSIT+ Emissiefactoren voor Standaard rekenmethode 1 en 2 – 2012 update 2012*, TNO 2013 R10040.

Taakgroep Verkeer en Vervoer (red. John Klein, CBS), *Methods for calculating the emissions of transport in the Netherlands*, 2014.

[Kuiper 2013] Kuiper, E. en Ligterink, N.E., *Voertuigcategorieën en gewichten van voertuigcombinaties op de Nederlandse snelweg op basis van assen-combinaties en as-lasten*, rapport TNO-2013-R12138.

[Lange 2011] Ronald de Lange et al. *Emissiefactoren voor licht wegverkeer bij een maximum snelheid van 130 km/h op de snelweg*, rapport TNO-060-DTM-2011-03219.

[Ligterink 2014] Norbert E. Ligterink and Arjan, R.A. Eijk, *Update analysis of real-world fuel consumption of business passenger cars based on Travelcard Nederland fuelpass data*, rapport TNO 2014 R11063.

[Ligterink 2013a] Ligterink, N.E. and Smokers, R.S.M, *Praktijkverbruik van zakelijke auto's en plug-in auto's*, TNO rapport 2013 R10703.

[Ligterink 2013b] Norbert E. Ligterink, Richard T.M. Smokers and Mark Bolech, *Fuel-electricity mix and efficiency in Dutch plug-in and range-extender vehicles on the road*, EVS27 conference, 2013.

[Ligterink 2012a] Norbert E. Ligterink, Lóránt A. Tavasszy, en Ronald de Lange, *A velocity and payload dependent emission model for heavy-duty road freight transportation*, Transportation Research Part D 17 (2012) 487–491.

[Ligterink 2012b] Ligterink, N.E., Kraan, T.C., & Eijk, A.R.A., *Dependence on technology, drivers, roads, and congestion of real-world vehicle fuel consumption*, Sustainable Vehicle Technologies: Driving the Green Agenda, 14-15 November 2012, Gaydon, Warwickshire.

[Ligterink 2010] Ligterink, N.E. & Bos, B., *CO₂ uitstoot in norm en in praktijk – analyse van zakelijke rijders* rapport TNO-MON-2010-00114.

[Ligterink 2009] Ligterink, N.E., De Lange, R, & Passier, G.L.M., *Trends in real-world CO₂ emissions of passenger cars*, proceedings of the ETTAP09, Toulouse, June 2009

[Mock 2013] Peter Mock, John German, Anup Bandivadekar, Iddo Riemersma, Norbert Ligterink, Udo Lambrecht, *From laboratory to road: a comparison of official and 'real-world' fuel consumption and CO₂ values for cars in Europe and the United States*, ICCT white paper 2013.

[Ntziachristos 2014] Ntziachristos L.D. et al., *In-use vs. type-approval fuel consumption of current passenger cars in Europe*, Energy Policy 67 (2014) 403–411.

[RIVM] http://www.rivm.nl/Onderwerpen/G/GCN_GDN_kaarten_2014

[Staats 2014] Koen Staats, Hermine Molnár-in 't Veld, Rob Willems, en Norbert Ligterink, *Bottom-up berekening CO₂ personenauto's*, CBS rapport, 12-3-2014.

[TNO 2012] TNO-EAE-Ricardo-HIS Global Insights, *Supporting Analysis regarding Test Procedure Flexibilities and Technology Deployment for Review of the Light Duty Vehicle CO₂ Regulations*, report for European Commission – DG CLIMA, 2012.

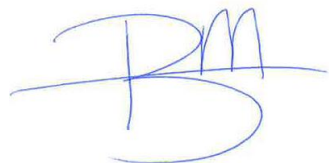
[TvdT] <http://www.truckvandetoekomst.nl>

[Willems 2014] Rob Willems, Hermine Molnar-in 't Veld, en Norbert Ligterink, *Bottom-up berekening CO₂ van vrachtauto's en trekkers*, CBS rapport, 29-4-2014.

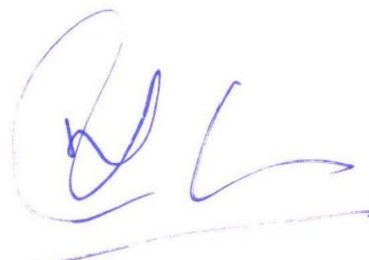
9 Ondertekening

Delft, 15 januari 2015

TNO

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'MB' with a horizontal line through the middle and a large loop at the bottom.

Projectleider

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'NL' with a large loop at the top and a horizontal line at the bottom.

Merle Blok Norbert Ligterink
Auteur