

Fijnstofuitstoot van elektrische voertuigen

**Literatuurreview en analyse van metingen aan
bandenslijtage**

TNO 2025 R12677 – 3 maart 2026

Fijnstofuitstoot van elektrische voertuigen

Literatuurreview en analyse van metingen aan bandenslijtage

Auteurs	Thijs Oosterbeek, Quinn Vroom
Exemplaar nummer	2025-STL-RAP-100359514
Aantal pagina's	35 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	3
Opdrachtgever	Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
Projectnaam	MAVE 2025
Projectnummer	060.62727

Alle rechten voorbehouden

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

© 2026 TNO

Samenvatting

In de afgelopen decennia heeft de Europese Unie steeds strengere emissienormen ingevoerd voor nieuwe wegvoertuigen. Deze normen richtten zich aanvankelijk vooral op uitlaatemissies, zoals stikstofoxiden (NO_x) en fijnstof. De fijnstofemissies uit de uitlaat zijn sinds de introductie van een fijnstofilmiert voor deeltjesaantallen sterk afgenomen. Moderne voertuigen, zowel op diesel als op benzine, zijn voorzien van een roetfilter en stoten hierdoor relatief weinig fijnstof uit via de uitlaat. De snel elektrificerende Nederlandse vloot zal op termijn steeds minder voertuigen bevatten met een uitlaat. Uitlaatemissies zijn echter niet de enige vorm van fijnstof die door een voertuig worden uitgestoten. Fijnstof komt ook vrij door middel van slijtage. De uitlaatemissies zijn ook niet langer de dominante bron van fijnstof in het wegverkeer. De Nederlandse emissieregistratie laat zien dat in 2022 78% van de uitgestoten fijnstofmassa (PM₁₀) door wegverkeer niet uit de uitlaat kwam (Emissieregistratie, 2022).

Er is nog veel onzekerheid over de hoogte en samenstelling van slijtage-emissies van wegvoertuigen. Ook is er weinig data beschikbaar over de uitstoot van slijtage-emissies in de praktijk. Binnen Euro 7 wordt een begin gemaakt met de regulering van slijtage-emissies. De geplande wetgeving is nog niet allesomvattend, zo wordt er bijvoorbeeld bij banden enkel gekeken naar slijtage en niet de emissies, en zal de wetgeving niet alle gezondheidseffecten van slijtage inperken. Binnen dit onderzoek zijn de huidige, in de literatuur beschikbare inschattingen voor fijnstofemissies door moderne wegvoertuigen inzichtelijk gemaakt en zijn de inschattingen voor elektrische voertuigen vergeleken met die voor voertuigen met een verbrandingsmotor.

Op basis van de huidige inschattingen stoten elektrische voertuigen per kilometer minder fijnstof uit dan voertuigen met een verbrandingsmotor. Hoewel de som van de fijnstofemissies kleiner is voor EVs zijn de in de nationale emissieregistratie gemodelleerde emissies van bandenslijtage hoger voor elektrische personenwagens en vrachtwagens, vanwege het hogere motorvermogen en het hogere gewicht. Voor bestelbussen is het verschil relatief klein. De huidige emissiefactoren voor banden- en remslijtage in de emissieregistratie zijn gebaseerd op oude getallen die beperkt onderbouwd zijn en daarom met veel onzekerheid zijn omgeven. De deeltjesgrootteverdeling van rem- en bandenstof is tevens gebaseerd op gedateerde literatuurgegevens en aannames. Een groot deel van de studies, waar de getallen voor bandenslijtage uit zijn verkregen, zijn niet meer representatief voor de huidige bandenmarkt, aangezien het materiaal van het loopvlak van banden sterk is veranderd. Er is brede consensus over dat het grootste deel van de bandenslijtage-emissies neerslaat. Er is echter binnen het onderzoeksveld geen consensus over het deel van de deeltjes, ontstaan als gevolg van bandenslijtage, dat klein genoeg is om als zwevend stof (PM₁₀) in de lucht te blijven.

De belangrijkste kennislacune op het gebied van banden- en remslijtage is het gebrek aan metingen in de praktijk. Ook in de recente literatuur blijkt dat de meeste gaten in de kennis nog niet gevuld zijn. Voor remmen van personenvoertuigen zijn er nieuwe inzichten die de huidige emissiefactoren kunnen verbeteren, hoewel deze hoofdzakelijk gebaseerd zijn op testen onder laboratoriumcondities en niet in de praktijk. Voor vrachtwagens is er zowel voor banden- als remslijtage minder bekend dan voor personenvoertuigen.

Onderzoeken naar het effect van elektrificatie van voertuigen op de slijtage-emissies laten wisselende resultaten zien. Met name voor bandenslijtage lijken toenames in voertuigmassa en motorvermogen een rol te spelen. De beschikbare studies zijn consistent met de verwachting dat voor elektrische voertuigen de remslijtage, en de emissies hierdoor, lager zijn dan voor conventionele voertuigen. De verwachting gebaseerd op de emissieregistratie is dat de bandenslijtage en de emissies hiervan voor elektrische voertuigen hoger zijn dan voor conventionele voertuigen. De gemeten bandenslijtage van opleggetrekkers in dit rapport ligt in lijn met deze verwachting. Voor bakwagens is dit niet gevonden. Meer praktijkinzichten op het gebied van banden- en remslijtage-emissies zijn benodigd om naast verbeterde inschattingen van het emissieprobleem ook nieuwe inzichten op te leveren voor wetgeving. Bovendien is meer onderzoek nodig om de gezondheidseffecten van fijnstof afkomstig van slijtage te bepalen. Die zijn per eenheid emissie niet noodzakelijk hetzelfde als voor fijnstof uit de uitlaat.

Voor dit onderzoek is een grote dataset beschikbaar gesteld van bandenvervanging van diesel-, LNG- en elektrische vrachtwagens uit de vloot van een Nederlandse transporteur. Uit nadere analyse is naar voren gekomen dat de bandenslijtage per kilometer in deze vloot voor elektrische opleggetrekkers gemiddeld 2,1 keer zo hoog is als bij opleggetrekkers op diesel en LNG. Vanwege deze opvallende observatie is nader gekeken naar mogelijke onderliggende factoren. Verschillen in inzet, uitgedrukt in jaarkilometrage, in voertuigleeftijd en in motorvermogen zijn bekeken, maar boden geen directe relatie met bandenslijtage per kilometer. Een mogelijke reden voor de hogere bandenslijtage kan een verschil in rijgedrag zijn die voortkomt uit een combinatie van verhoogde beschikbare voertuigprestaties van elektrische voertuigen ten gevolge van verhoogd motorkoppel en een daardoor gefaciliteerde “sportiever” rijgedrag van de bestuurder. Denk hierbij aan verhoging in frequentie en magnitude van acceleraties en deceleraties tijdens het rijden en hogere voertuigsnelheid in de bochten. Met de beschikbare informatie in de dataset was het niet mogelijk om deze hypothetische verklaring te evalueren. Hiervoor is additionele data nodig, bijvoorbeeld in de vorm van rijgedrag-monitoring van enkele voertuigen.

Voor bakwagens, ingezet voor de bevoorrading van detailhandel is ook gekeken naar het verband tussen bandenslijtage en jaarkilometrage. Hieruit kwam duidelijk naar voren dat de gemiddelde bandenslijtage en de spreiding in de bandenslijtage het hoogste zijn bij de laagste jaarkilometrages. De conclusies geven aanleiding om de geobserveerde hogere bandenslijtage bij elektrische opleggetrekkers nader te onderzoeken om zo onderliggende factoren te kunnen achterhalen en mogelijke mitigerende maatregelen te kunnen formuleren.

Met behulp van de opgedane inzichten zijn aanbevelingen voor vervolgonderzoek opgesteld. Met betrekking tot bandenslijtage zijn de aanbevelingen:

- Voertuigen monitoren op gebruik en inzet voor het achterhalen van onderliggende oorzaken die invloed hebben op de bandenslijtage en het formuleren van mogelijke mitigerende maatregelen, zoals beperking van de voertuigprestaties of gebruik van andere banden (speciaal voor EVs).
- Uitgebreide profielfdieptemetingen aan banden verrichten om scheef afslijten in de praktijk in kaart te brengen en mee te nemen in de inzichten voor o.a. emissieregistratie.
- Inzichten in dichtheid van bandenloopvlakrubber van recente banden opdoen om zo beschikbare data van bandenslijtage uitgedrukt in profielfdiepteverlies of volumeverlies om te rekenen naar massaverlies per kilometer.
- Bandenslijtage van opleggers analyseren om een beter totaalbeeld te krijgen van bandenslijtage-emissies van trekker-trailercombinaties.

- Bandenslijtage van personenvoertuigen in de praktijk onderzoeken door middel van het verkrijgen en analyseren van grote datasets van profieldiepteverlies over gereden afstand van een vloot met voertuigen, om zo ook voor personenvoertuigen de huidige beperkte inzichten te kunnen verbeteren en onderliggende factoren voor bandenslijtage te onderzoeken.
- De in dit rapport beschreven data-analyse periodiek herhalen met een grotere dataset om zo een beter beeld te krijgen van de praktijk en veranderingen in bandenslijtage over de tijd te monitoren.

Met betrekking tot remslijtage zijn de aanbevelingen:

- Slijtage van remmaterialen in de praktijk bij personenvoertuigen en vrachtwagens onderzoeken door middel van het verkrijgen en analyseren van grote datasets van vervanging van remonderdelen van een vloot met voertuigen, om zo de huidige inzichten te kunnen verbeteren en mogelijke verschillen in remslijtage tussen voertuigen met verschillende aandrijflijnen te kunnen herkennen.
- Emissies van remslijtage voor personenvoertuigen en vrachtwagens nader onderzoeken door praktijkcondities te achterhalen en emissietesten onder praktijkcondities uit te voeren om zo de (zeer beperkte) huidige inzichten te kunnen verbeteren en aanbevelingen voor de toekomst te kunnen formuleren. Factoren als regeneratief/non-frictie remmen zijn bestuurder afhankelijk en hebben mogelijk grote invloed op slijtage in de praktijk.

Inhoudsopgave

Samenvatting	3
1 Inleiding.....	7
1.1 Leeswijzer	8
2 Fijnstofuitstoot van wegverkeer: huidige emissiefactoren	9
2.1 Personenvoertuigen	10
2.2 Bestelbussen.....	11
2.3 Vrachtwagens.....	11
3 Literatuuronderzoek naar fijnstofuitstoot ten gevolge van slijtage.....	13
3.1 Bronnen gebruikt voor de nationale emissieregistratie	13
3.2 Nieuwe informatie omtrent slijtage-emissies.....	14
3.3 Vergelijking van elektrische en niet-elektrische voertuigen	15
3.4 Euro 7.....	16
3.5 Verspreiding van slijtage-emissies.....	16
3.6 Kennislacunes	17
4 Onderzoek naar bandenslijtage bij vrachtwagens	19
4.1 Levensduur van de banden	19
4.2 Slijtage per kilometer	20
4.3 Effect van leeftijd, inzet en vermogen op slijtage	22
4.4 Discussie	24
5 Conclusies en aanbevelingen.....	26
Referenties	28
Ondertekening.....	30
Bijlagen	
Bijlage A: PM10-emissiefactoren volgens emissieregistratie	31
Bijlage B: Methoden voor bepaling van slijtage-emissies uit praktijkdata over vervanging banden bij vrachtwagens	33
Bijlage C: Additionele grafieken	35

1 Inleiding

In de afgelopen decennia heeft de Europese Unie steeds strengere emissienormen ingevoerd voor nieuwe voertuigen. Deze normen richtten zich aanvankelijk vooral op uitlaatemissies, zoals stikstofoxiden (NO_x) en fijnstof. De fijnstofemissies uit de uitlaat zijn sinds de introductie van een fijnstoflimiet voor deeltjesaantallen sterk afgenomen. Moderne voertuigen, zowel op diesel als op benzine, zijn voorzien van een roetfilter en stoten hierdoor relatief weinig fijnstof uit via de uitlaat. De snel elektrificerende Nederlandse vloot zal op termijn steeds minder voertuigen bevatten met een uitlaat. Uitlaatemissies zijn echter niet de enige vorm van fijnstof die door een voertuig worden uitgestoten. Fijnstof komt ook vrij door middel van slijtage. De uitlaatemissies zijn ook niet langer de dominante bron van fijnstof in het wegverkeer (Lewis & Moller, 2019). Dit is tevens terug te zien in de nationale emissieregistratie van Europese lidstaten. De Nederlandse emissieregistratie laat zien dat in 2022 78% van de uitgestoten fijnstofmassa (PM_{10}) door wegverkeer niet uit de uitlaat kwam (Emissieregistratie, 2022).

Slijtage-emissies ontstaan voornamelijk door rem-, banden- en wegdekslijtage. In dit rapport ligt de focus op remmen en banden. Door de frictie tussen banden en wegdek en tussen de remonderdelen vormen zich deeltjes die in het milieu belanden. Slijtage-emissies komen onder andere vrij in de vorm van fijnstof en kunnen zware metalen (remmen) en microplastics (banden) bevatten. Er is nog veel onzekerheid over de hoeveelheid en samenstelling van slijtage-emissies.

De relevantie van banden- en remslijtage wordt steeds groter naarmate de Nederlandse vloot elektrificeert. Door het wegvallen van uitlaatemissies kan het beperken van slijtage-emissies nog een grote stap leveren voor het behalen van de grenswaarden voor de concentratie fijnstof in de lucht, zoals vastgelegd in Europese wetgeving voor luchtkwaliteit, en de advieswaarden van de WHO. De beperkte kennis over de omvang en aard van slijtage-emissies en de gezondheidsimplicaties die deze emissies veroorzaken maakt dat er nader onderzoek nodig is om deze emissies effectief te kunnen verminderen.

Elektrische voertuigen produceren geen uitlaatemissies, maar wel emissies door slijtage van remmen, banden, en wegdek. Slijtage-emissies bij elektrische voertuigen verschillen mogelijk van die van voertuigen met een verbrandingsmotor. Elektrische voertuigen zijn in de regel zwaarder en hebben meer motorvermogen, wat kan leiden tot hogere slijtage van banden en remmen. Elektrische voertuigen maken ook gebruik van regeneratief remmen, wat juist een verlagend effect kan hebben op de remslijtage.

Er is weinig data beschikbaar over de uitstoot van slijtage-emissies in de praktijk. In tegenstelling tot fijnstof uit de uitlaat is het bepalen van slijtage-emissies complex, omdat de deeltjes niet via een gecontroleerde stroom vrijkomen en daardoor lastig te meten zijn. De inschattingen binnen de nationale emissieregistratie omtrent slijtage-emissies van wegvoertuigen zijn gebaseerd op beperkte inzichten vanuit de literatuur (Witt, et al., 2025). Binnen Euro 7 worden eerste stappen gezet om de slijtage-emissies te reguleren. Er zullen limieten komen voor de bandenslijtage (mg/km) en de fijnstofemissies afkomstig van remmen. De geplande wetgeving is nog niet allesomvattend en zal nog niet alle gezondheidseffecten van slijtage inperken.

Zaken waar verder naar gekeken dient te worden zijn namelijk: de relatie tussen hoeveel banden afslijten en de emissies van fijnstof die daardoor veroorzaakt worden, het aandeel ultrafijnstof in deze emissies, de correlaties tussen metingen bij de typekeuring en emissies in de praktijk en de gezondheidsimpact van verschillende componenten in de emissies.

Het in dit rapport beschreven onderzoek is uitgevoerd namens het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat als onderdeel van de programmatische samenwerking tussen IenW en TNO op het gebied van voertuigemissies. Daarnaast gaat er bijzondere dank uit naar Wim Roks van Simon Loos voor het beschikbaar stellen van data en het delen van zijn kennis en ervaring.

1.1 Leeswijzer

Deze rapportage geeft in vier delen een overzicht van de beschikbare kennis over slijtage-emissies. Reeds beschikbare kennis is aangevuld aan de hand van een analyse op nieuwe data. Na de introductie volgt hoofdstuk 2, over het verschil in gemodelleerde fijnstofuitstoot tussen moderne voertuigtypes met een verbrandingsmotor en elektrische alternatieven. Er wordt een overzicht gegeven over de totale fijnstofuitstoot en de fracties slijtage- en uitlaatemissies met de huidige getallen in de nationale emissieregistratie. Hoofdstuk 3 bevat een korte literatuurstudie waarbij de nieuw verzamelde kennis wordt vertaald naar potentiële impact op de berekende emissies. Tevens wordt verder ingegaan op de huidige kennislacunes op het gebied van slijtage-emissies. Hoofdstuk 4 bevat een analyse op basis van praktijkdata van de slijtage van vrachtwagenbanden binnen de vloot van Simon Loos.

2 Fijnstofuitstoot van wegverkeer: huidige emissiefactoren

Voor het vergelijken van de fijnstofuitstoot van elektrische voertuigen met die van voertuigen voorzien van een verbrandingsmotor is gebruik gemaakt van de meest recente emissiefactoren in de nationale emissieregistratie (Witt, et al., 2025). Er is geselecteerd op de fijnstofuitstoot afkomstig van de uitlaat, remmen en banden. De emissieregistratie bevat onderliggende algemene emissiefactoren per voertuigtype, emissieklasse en wegtype, die terug te vinden zijn in de tabel behorend bij het methoderapport (Emissieregistratie, 2025). Voor de emissieregistratie wordt gebruik gemaakt van een zogenaamde bottom-up berekening, waar voor ieder individueel voertuig in de Nederlandse vloot jaarlijkse emissies worden berekend. In het geval van de fijnstofuitstoot afkomstig van remmen en banden van een individueel voertuig, worden de algemene emissiefactoren nader bijgesteld op basis van aandrijflijn, voertuigmassa en vermogen. De exacte methodiek staat beschreven in het methoderapport (Witt, et al., 2025). De op deze manier afgeleide individuele emissiefactoren zijn gebruikt om voertuigen te vergelijken.

Voor de vergelijking beschouwen we de emissies binnen de bebouwde kom, aangezien daar de meeste blootstelling aan fijnstofemissies plaatsvindt. Er zijn voor drie voertuigcategorieën voertuigen geselecteerd waarvan er zowel een elektrische uitvoering als een uitvoering met een verbrandingsmotor verkrijgbaar is. De fijnstofuitstoot van de verschillende aandrijfvarianten van hetzelfde merk en type voertuig is met elkaar vergeleken. In onderstaande tabel staan de geselecteerde voertuigen.

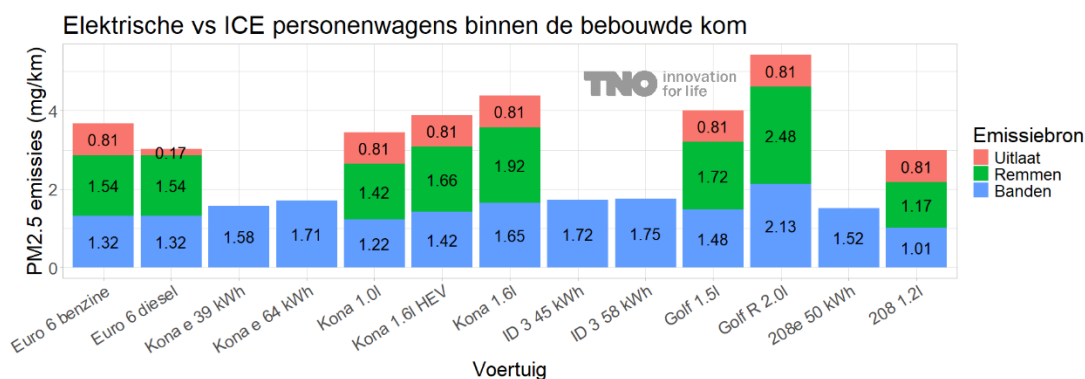
Tabel 2.1: Voertuigen waarvan fijnstofuitstoot vergeleken is met getallen uit de emissieregistratie.

Merk	Model met verbrandingsmotor			Elektrisch model	
Personenwagens					
Hyundai	Kona 1.0l	Kona 1.6l	Kona 1.6l hybride	Kona electric	Kona electric
Volkswagen	Golf 1.5l	Golf R 2.0l		ID 3 45kWh	ID 3 58 kWh
Peugeot	208			208e	
Bestelbussen					
Toyota	Proace city			Proace city electric	
Mercedes-Benz	Sprinter			e-Sprinter	
Vrachtwagens					
Volvo	FH			FH electric	
Volvo	FL			FL electric	
Renault	Trucks D			Trucks D E-tech	

2.1 Personenvoertuigen

De elektrische voertuigen hebben binnen de nationale emissieregistratie een lagere PM_{2.5}-uitstoot (fijnstofmassa van deeltjes met een kleinere diameter dan 2,5 micrometer) dan de varianten van dezelfde modellen met verbrandingsmotor (ICE). In Figuur 2.1 zijn de berekende PM_{2.5} emissies van de gekozen personenwagenmodellen afgebeeld, alsmede de gemiddelde emissiefactoren voor Euro 6 benzine- en dieselveertuigen. Alle fijnstofemissies uit de uitlaat vallen binnen de PM_{2.5}-categorie. Voor banden- en remslijtage ligt de PM_{2.5}/PM₁₀-verhouding binnen de emissieregistratie respectievelijk op 20% en 15%. Hierdoor spelen slijtage-emissies relatief gezien een kleinere rol bij PM_{2.5} dan bij PM₁₀ (Bijlage A). Hoe kleiner de deeltjes hoe verder deze in het ademhalingssysteem kunnen doordringen. Vandaar dat PM_{2.5} belangrijk wordt geacht als proxy voor de schadelijkheid van het uitgestoten fijnstof (Vroom, 2024). Daarnaast spelen de bestanddelen van het fijnstof een rol in de schadelijkheid ervan. In dit rapport wordt hier verder niet op ingegaan, maar dit maakt wel dat het lastig is om verschillen in de hoeveelheden van emissies uit verschillende fijnstofbronnen, uitgedrukt in gewicht, te interpreteren in termen van gezondheidsimpact.

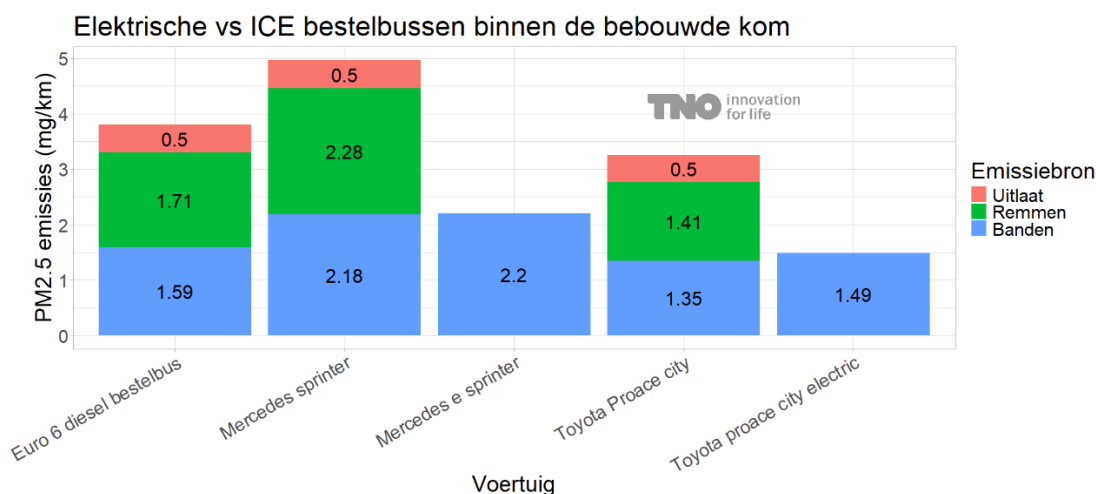
Figuur 2.1 laat voor PM_{2.5} zien dat fijnstofuitstoot uit de uitlaat van personenwagens relatief laag is vergeleken met de gemodelleerde uitstoot van rem- en bandenslijtage. De remslijtage van elektrische voertuigen wordt binnen de emissieregistratie door de aanwezigheid van regeneratief remmen geschat op 0. Elektrische voertuigen stoten ook geen uitlaatgassen uit. Hiermee is de gemodelleerde totale fijnstofuitstoot van elektrische personenwagens significant lager dan die van voertuigen met een verbrandingsmotor. De emissies voor bandenslijtage van elektrische modellen zijn daarentegen over het algemeen hoger dan die van de brandstofversies. In de gekozen personenwagens zijn er echter twee uitzonderingen: de Kona 1.6 en de Golf R 2.0. Hoewel deze modellen niet directe tegenhangers zijn van de andere gekozen varianten, zijn deze toegevoegd aan de analyse om het effect van prestaties en gewicht te illustreren. De Golf R heeft prestaties qua accelereren die vergelijkbaar zijn met die van de elektrische Volkswagen ID3 en de Kona 39 kWh heeft een gewicht dat vergelijkbaar is met dat van de Kona benzinevariant. Dit biedt de mogelijkheid om te zien hoe de emissies zich verhouden als voertuigmassa of prestaties vergelijkbaar zijn. De Hyundai Kona 1.6l heeft hogere emissiefactoren voor bandenslijtage vergeleken met de Kona electric 39 kWh. Ook de Golf R 2.0l sportvariant stoot meer uit vergeleken met de ID3 varianten. Binnen de emissieregistratie hebben gewicht en vermogen een grote impact op de berekende bandenslijtage. De kleine batterij van de Kona electric 39 kWh zorgt voor een relatief beperkte voertuigmassa die gepaard gaat met relatief lage emissies voor bandenslijtage. Het hoge vermogen van de Golf R zorgt voor de relatief hoge fijnstofemissies van remmen en banden.



Figuur 2.1: PM_{2.5}-emissies van elektrische personenwagens en personenwagens met een verbrandingsmotor binnen de bebouwde kom. PM₁₀ emissies zijn terug te vinden in Bijlage A.

2.2 Bestelbussen

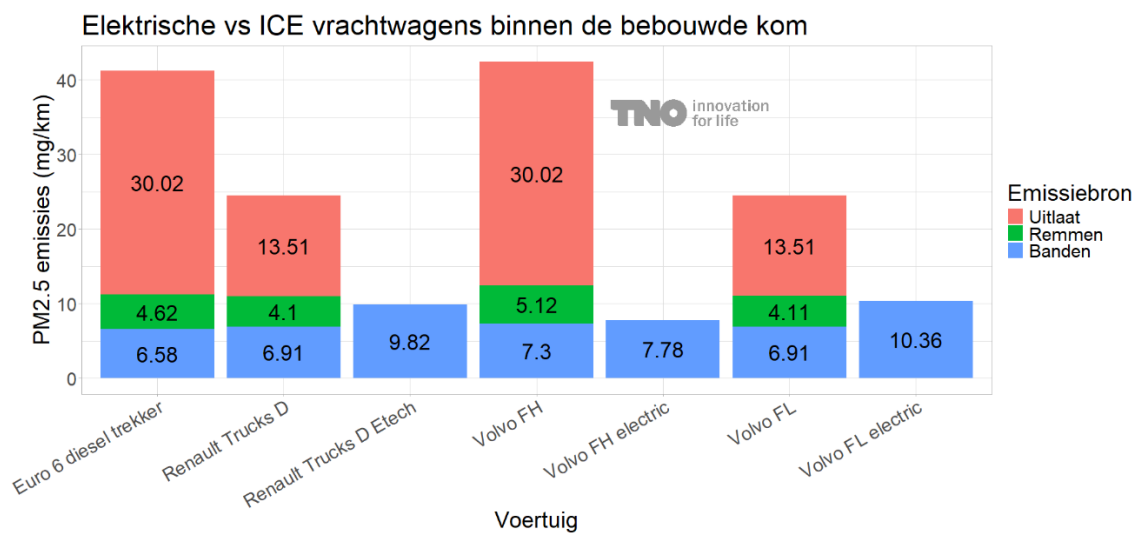
In Figuur 2.2 is de volgens de methodiek van de nationale emissieregistratie berekende PM_{2.5}-uitstoot van verschillende bestelbussen afgebeeld, alsmede de gemiddelde emissiefactor voor Euro 6 bestelbussen op diesel. Het beeld is vergelijkbaar als bij de personenwagens. De uitlaatgassen hebben een groter aandeel in de totale PM_{2.5} dan in de totale emissie van PM₁₀ (Bijlage A). Kijkend naar PM_{2.5} produceren de elektrische voertuigen aanzienlijke lagere fijnstofemissies ten opzichte van de brandstofvoertuigen. Vergeleken voor hetzelfde model stoten bestelvoertuigen met een verbrandingsmotor meer dan twee keer zoveel fijnstof uit als de elektrische varianten.



Figuur 2.2: PM_{2.5}-emissies van elektrische en conventionele bestelbussen binnen de bebouwde kom.

2.3 Vrachtwagens

Bij vrachtwagens hebben uitlaatemissies een groter aandeel in de totale fijnstofemissies vergeleken met personenwagens en bestelbussen. Dit zorgt ervoor dat elektrische alternatieven bij vrachtwagens een grotere relatieve reductie in de totale PM-emissies opleveren dan bij andere voertuigcategorieën. Het verschil in bandenslijtage tussen elektrische varianten en varianten met verbrandingsmotor is relatief groot voor vrachtwagens. Een oorzaak hiervoor is het hoge gewicht van de elektrische vrachtwagens. Vrachtwagens verbruiken veel energie, en het verschil in energiedichtheid tussen een brandstoftank en een batterij levert dan bij vergelijkbare actieradius een groter verschil in gewicht op bij vrachtwagens dan bij andere voertuigtypen. De totale fijnstofuitstoot is bij vrachtwagens aanzienlijk lager voor elektrische voertuigen.



Figuur 2.3: PM_{2.5}-emissies van elektrische en conventionele vrachtwagens binnen de bebouwde kom.

3 Literatuuronderzoek naar fijnstofuitstoot ten gevolge van slijtage

De huidige emissiefactoren, zoals opgenomen in de nationale emissieregistratie en geïllustreerd in het vorige hoofdstuk, zijn gebaseerd op oude studies en berusten op weinig praktijkmetingen. Om te onderzoeken of recent gepubliceerde artikelen nieuwe inzichten leveren over slijtage-emissies is een literatuurstudie uitgevoerd. Eerst is de huidige basis voor de emissieregistratie onder de loep genomen.

3.1 Bronnen gebruikt voor de nationale emissieregistratie

De Nederlandse emissiefactoren voor banden en remslijtage zijn gebaseerd op oude getallen waarvan veel van de originele papers niet meer op internet beschikbaar zijn. De verdeling van slijtagestof naar de verschillende compartimenten (lucht, water & grond) is gebaseerd op informatie gecategoriseerd als level D: *“Een getal gebaseerd op een gering aantal metingen, aangevuld met schattingen op basis van aannames”* (Ten Broeke, Hulskotte, & Denier van der Gon, 2008). De totale bandenslijtage wordt aangemerkt als categorie B: *“een getal gebaseerd op een aantal metingen aan een deel van de voor de sector representatieve locaties”* (Ten Broeke, Hulskotte, & Denier van der Gon, 2008). De deeltjesgrootteverdeling van rem- en bandenstof is ook gebaseerd op aannames. Hiernaast is een groot deel van de studies, waar de getallen uit zijn verkregen, niet meer representatief voor de huidige bandenmarkt, aangezien het materiaal van bandenprofielen sterk is veranderd.

De totale slijtage-emissies, zoals berekend voor de emissieregistratie, zijn gebaseerd op emissiefactoren per voertuigkilometer (Witt, et al., 2025). Voor elektrische voertuigen is aangenomen dat er geen emissies uit remmen optreden, alhoewel er wel beperkt mechanische remming plaatsvindt. De uitstoot van PM_{2.5} resp. PM₁₀ wordt berekend door middel van fracties van de totale slijtage. De PM_{2.5}/PM₁₀ fracties voor banden en remslijtage zijn onbetrouwbaar en berusten vooral op aannames uit de literatuur. De onzekerheid op de emissiefactoren voor PM₁₀ en PM_{2.5} wordt geschat op respectievelijk 100 en 200% (Witt, et al., 2025).

Een artikel door Luhana et al. is een belangrijke bron voor de emissieregistratie en één van de meest geciteerde artikelen voor emissiefactoren van slijtage-emissies. In deze studie is voor vijf personenwagens de bandenslijtage gemeten over een periode van enkele jaren (Luhana, et al., 2004). Hiernaast zijn er fijnstofmetingen uitgevoerd in een tunnel waar met chemische analyse de fracties van de emissies uit verschillende bronnen zijn bepaald (weergegeven in Tabel 3.1). Ook voor emissiefactoren voor remslijtage in de emissieregistratie wordt Luhana et al. aangehaald als één van de belangrijkste bronnen. Dit is echter een artikel uit 2004 waarvan de getallen erg onzeker zijn of gebaseerd op weinig voertuigen (slechts vijf in totaal). Metingen in een tunnel zijn ook niet één op één vergelijkbaar met de emissies buiten een tunnel.

De vaste snelheid, ander wegdek en verkeerssituatie geeft geen representatief beeld voor de gemiddelde slijtage-emissies en de bijdragen van verschillende bronnen.

Tabel 3.1: Fracties van fijnstof uit verschillende bronnen in een tunnel (Luhanna, et al., 2004).

Bron	Fractie deeltjes aantallen
Diesel uitlaat	25%
Benzine uitlaat	21.6%
Banden en remmen	22.6%
Wegdek	12.2%

3.2 Nieuwe informatie omtrent slijtage-emissies

Er zijn geen doorbraken binnen de recente literatuur over bandenslijtage en informatie uit nieuwe studies wijkt niet sterk af van de getallen in de nationale emissieregistratie.

Voor remslijtage is nieuwe informatie beschikbaar in de vorm van laboratoriumtesten. Emissies gebaseerd op laboratoriumtesten komen hoger uit dan de emissiefactoren in de nationale emissieregistratie. In Tabel 3.2 staat een overzicht van de studies die in dit rapport aan bod komen.

In de handleiding voor emissieregistratie van de EEA en de EMEP, waar veel landen hun nationale emissieregistratie op baseren, zijn recentelijk grote updates uitgevoerd (Ntziachristos, Boulter, & Karageorgiou, 2025). Voor remslijtage heeft dit als effect dat de emissiefactoren zijn vernieuwd. Deze emissiefactoren zijn gebaseerd op laboratoriumtesten met de WLTP-cyclus. Voor PM₁₀ liggen de vernieuwde emissiefactoren voor remslijtage in de handleiding rond de 100% hoger dan de getallen in de nationale emissieregistratie. Het verschil is het grootst voor de emissiefactoren binnen de bebouwde kom. De PM_{2.5}/PM₁₀ fractie ligt ook hoger in de handleiding vergeleken met de emissieregistratie (resp. 39% en 15%) (Ntziachristos, Boulter, & Karageorgiou, 2025) (Witt, et al., 2025). Deze verschillen zorgen ervoor dat de emissiefactoren in de handleiding significant hoger zijn dan in de huidige Nederlandse emissieregistratie.

Studies waarbij bandenslijtage in de praktijk is gemeten zijn schaars (Mennekes & Nowack, 2022). Er is echter wel wat nieuw werk verricht op het onderwerp na de laatste update van de nationale emissieregistratie. In (Polukarova, Hjort, & Gustafsson, 2024) zijn voor Zweden slijtage-emissies bepaald. Deze studie is gebaseerd op de gemiddelde levensduur van een band, het gemiddelde gewicht dat een band verslijt, en de jaarlijkse afstand die op een band gereden is. De resultaten komen overeen met de huidige getallen in de emissieregistratie.

Een studie door Saladin et al. analyseerde informatie over bandenslijtage-emissies in studies van de afgelopen jaren. De meeste studies zijn uitgevoerd aan de hand van fijnstofmetingen waar met chemische analyse de fracties van de emissies uit verschillende bronnen zijn bepaald. De gemiddelde PM₁₀-emissie door bandenslijtage van personenwagens blijkt uit deze analyse lager te zijn dan de waarde die in de nationale emissieregistratie wordt gehanteerd. Uit deze analyse kwam dat door verkeerde citaties en een laag aantal gebruikte studies de gemiddelde PM₁₀-emissie in secundaire literatuur 2,4 keer zo hoog ligt als wat er in primaire studies gerapporteerd is (6.5 resp. 2.7 mg/vkm) (Saladin, Boies, & Giorio, 2024).

Tabel 3.2: Overzicht van de recente literatuur behandeld in dit rapport.

Paper	Type artikel	Omschrijving
<i>Banden</i>		
<i>Mennekes et al. 2022</i>	Review	Brede review van de huidige kennis over bandenslijtage
<i>Polukarova et al. 2024</i>	Analyse op basis van data	Emissiefactoren voor Zweden gebaseerd op beschikbare data en informatie uit de markt.
<i>Saladin et al. 2024</i>	Review	Inventarisatie op emissiefactoren uit recente onderzoeken. Vooral gebaseerd op gemeten fracties van opgevangen fijnstof.
<i>Liu et al. 2022</i>	Analyse op basis van metingen in een proefopstelling	Gemeten slijtage bij elektrische en conventionele personenwagens
<i>Woo et al. 2022</i>	Analyse op basis van praktijkmetingen	Gemeten slijtage bij hybride en conventionele taxi's
<i>Foroutan et al. 2025</i>	Analyse op basis van aannames	Verandering van slijtage-emissies als gevolg van een elektrificerend wagenpark
<i>Grigoratos et al. 2018</i>	Analyse op basis van metingen op wegdek simulator	Slijtvastheid van banden vergeleken
<i>Wilkinson et al. 2023</i>	Analyse op basis van metingen op wegdek simulator	Slijtvastheid van banden vergeleken
<i>Ly et al. 2023</i>	Review	Bandenslijtage onderzocht als oorzaak van microplastics
<i>Baensch-baltruschat et al. 2021</i>	Analyse op basis van literatuur en beschikbare data	Verspreiding van slijtage-materiaal onderzocht
<i>Remmen</i>		
<i>Zhang et al. 2024</i>	Analyse op basis van metingen onder laboratoriumcondities	Uitstoot van remslijtage vergeleken tussen elektrische en conventionele voertuigen
<i>Alemaní et al. 2015</i>	Analyse op basis van metingen onder laboratoriumcondities	Effect van temperatuur op remslijtage-uitstoot
<i>Ntziachritos et al. 2025</i>	Handleiding emissiefactoren EEA en EMEP	Emissiefactoren gebaseerd op oude en recente onderzoeken (banden en remmen)

3.3 Vergelijking van elektrische en niet-elektrische voertuigen

Studies waarin slijtage-emissies in de praktijk worden vergeleken tussen elektrische voertuigen en voertuigen met een verbrandingsmotor zijn schaars (Giechaskiel, et al., 2024). Door het gebrek aan studies waarbij voertuigen over langere afstand gemonitord zijn, is het effect van elektrificatie op slijtage van banden en remmen nog onzeker. De hieronder besproken studies ondersteunen de verwachting dat bandenslijtage voor elektrische voertuigen hoger ligt en remslijtage maar beperkt voorkomt bij elektrische voertuigen. Dit is in lijn met de getallen in de nationale emissieregistratie.

Voor banden kennen we twee studies die met beperkte praktijkdata de bandenslijtage van hybride, elektrische en conventionele voertuigen vergelijken (Liu, et al., 2022) (Woo, Jang, Lee, & Lee, 2022). Deze studies leveren aanwijzingen voor hogere bandenslijtage, en emissies als gevolg hiervan, voor elektrische voertuigen (hybride en vol elektrisch). Verder nemen veel studies aan dat bandenslijtage van voertuigen direct gerelateerd is aan het gewicht van het voertuig (Foroutan, Aryal, Craine, & Rakha, 2025). Binnen de emissieregistratie zijn de emissiefactoren ook gespecificeerd als functie van onder andere het gewicht. Doordat elektrische voertuigen in de regel zwaarder zijn, worden de bandenslijtage-emissies voor elektrische voertuigen hoger ingeschat. Woo et al. vonden echter dat hybride voertuigen met een gelijk gewicht als benzinevoertuigen een 35% hogere slijtage vertoonden. Dit geeft aan dat het verschil in slijtage niet enkel door het hogere gewicht komt.

Er is een tekort aan studies waarin met praktijkdata de remslijtage-emissies van elektrische voertuigen zijn bepaald. Bij metingen in laboratoria geven elektrische voertuigen aanzienlijk lagere remslijtage-emissies (Zhang, et al., 2024).

Zhang et al. zagen dat de remslijtage van EVs significant verschilde van die van benzinevoertuigen. Onder continue remmen in een labtest is het aantal ultrafijne deeltjes dat elektrische voertuigen produceren 3 ordes van grootte lager dan bij conventionele voertuigen (Zhang, et al., 2024). Gedurende WLTP-cycli kwam ook de PM₁₀-uitstoot van elektrische en plug-in hybride voertuigen resp. 92,4% en 60,6% lager uit dan de gemeten waarden voor voertuigen zonder regeneratief remmen (Zhang, et al., 2024). Deze reductie kwam overeen met de energie terugwin-efficiëntie van het regeneratieve remsysteem van respectievelijk 90% en 60%. Deze correlatie met energieregeneratie biedt ook een mogelijke nieuwe manier voor het bepalen van de remslijtage van elektrische voertuigen in het lab en op de weg.

De temperatuur van het remblok wordt als mogelijk bepalende factor aangegeven voor de lagere emissies van voertuigen waarin regeneratief remmen wordt toegepast (Zhang, et al., 2024). De temperatuur van de remblokken van elektrische voertuigen bleef in de tests significant lager dan bij voertuigen met een verbrandingsmotor (resp. 46 en 170 °C) (Zhang, et al., 2024). In eerder onderzoek is gevonden dat de fijnstof-uitstoot significant toeneemt boven een kritische temperatuur van de remblokken tussen de 165 en 190 °C (Alemani, Nosko, Metinoz, & Olofsson, 2015).

3.4 Euro 7

Voor Euro 7 zijn de limieten voor remslijtage lager voor elektrische personenvoertuigen. Vanaf eind 2026 mogen nieuwe elektrische personenvoertuigen 3 mg/km (PM₁₀) uitstoten, waar de limiet voor personenvoertuigen met een verbrandingsmotor op 7 mg/km ligt (EU parlement, 2024). Voor bandenslijtage zijn nog geen definitieve limieten bepaald. Wel staat vast dat voor bandenslijtage alleen gekeken zal worden naar de slijtage in g/1000km en niet naar de fijnstofemissies die vrijkomen.

3.5 Verspreiding van slijtage-emissies

In de emissieregistratie zijn de banden- en remslijtagedeeltjes opgedeeld in deeltjes die in de lucht kunnen blijven zweven (PM₁₀) en deeltjes die hier te groot voor zijn. Er is brede consensus dat het grootste deel van de bandenslijtage-emissies neerslaat. Er is echter binnen het onderzoeksveld geen consensus over welk deel van de bandenslijtage als zwevend stof (PM₁₀) in de lucht blijft.

Schattingen voor deze fractie liggen tussen de 0,1 en 10% van de totaal afgesloten massa (Grigoratos, Gustafsson, Eriksson, & Martini, 2018) (Wilkinson, et al., 2023) (Ly & El-Sayegh, 2023) (Ntziachristos, Boulter, & Karageorgiou, 2025). In de emissieregistratie is deze fractie geschat op 5%, wat binnen de spreiding ligt van de schattingen uit de genoemde recente literatuur. Voor remslijtage is dit 49% in de emissieregistratie.

De grote slijtagedeeltjes komen vooral terecht in de grond langs de weg of in de waterzuivering of het oppervlaktewater. In de emissieregistratie wordt aangenomen dat deze deeltjes binnen de bebouwde kom voor 40% in de grond en voor 60% in de waterzuivering terechtkomen (Witt, et al., 2025). Buiten de bebouwde kom belandt 90% in de grond en 10% in het oppervlaktewater (Witt, et al., 2025). In Nederland zijn tegenwoordig echter veel straatkolken op het schoonwaterriool aangesloten, dat direct loost op het oppervlaktewater. Dit feit meenemend is de fractie die terecht komt in de waterzuivering in de emissieregistratie mogelijk overschat.

Er is weinig literatuur over de verspreiding van slijtagedeeltjes. In één Duitse studie is er recent onderzoek naar gedaan. Volgens deze studie over bandenslijtage belandt 66-76% van de slijtage deeltjes die niet in de lucht komen in bermen en grond langs wegen (Baensch-Baltruschat, Kocher, Kochleus, & Stock, 2021). 12-20% van de bandenslijtage eindigt in het oppervlaktewater. In deze studie is de Duitse situatie beschouwd, inclusief de mate van uitspoeling van de weg en het gedeelte dat hiervan door de waterzuivering gereinigd wordt. In de waterzuivering wordt waarschijnlijk een groot deel van de slijtagedeeltjes opgevangen (Baensch-Baltruschat, Kocher, Kochleus, & Stock, 2021). Het filtraat van waterzuiveringsinstallaties kan worden gebruikt als meststof. Het is onbekend hoeveel van de opgevangen deeltjes daarmee weer verspreid worden over landbouwgrond (Baensch-Baltruschat, Kocher, Kochleus, & Stock, 2021). Verdere schattingen uit recente studies van de deeltjes die belanden in het oppervlaktewater variëren tussen de 3-40% (Baensch-Baltruschat, Kocher, Kochleus, & Stock, 2021). Vergeleken met deze studie zou de in de emissieregistratie gehanteerde waarde voor de fractie die in de grond belandt aan de hoge kant van het spectrum liggen. Daarentegen zal dit ook per land verschillen. Dit ligt onder andere aan de hoeveelheid sloten en ander oppervlaktewater dichtbij wegen en de hoeveelheid neerslag die er valt.

Een studie naar de concentratie bandenrubber in de bermen liet zien dat de concentratie sterk daalt naarmate er verder van de weg gemeten wordt. De concentratie daalde met 80% over een afstand van 30 meter vanaf de weg (Ly & El-Sayegh, 2023). Baensch-Baltruschat et al. achten het onwaarschijnlijk dat de deeltjes zich richting het grondwater bewegen, aangezien de concentratie sterk daalde met de diepte in de bodem. Hieruit valt te concluderen dat het grootste deel van de massa aan slijtage-emissies in een relatief smalle strook langs de weg blijft liggen.

3.6 Kennislacunes

Er is nog gebrek aan kennis over slijtage in de praktijk. De meeste praktijkdata is afhankelijk van de invloed van het rijgedrag van slechts enkele personen doordat beperkte sets testvoertuigen zijn gebruikt. Om kennis uit te breiden zullen grote datasets, zoals in dit project gebruikt voor vrachtwagens, ook nodig zijn voor personenwagens en bestelbussen. Met dergelijke datasets zouden ook onderliggende factoren beter onderzocht kunnen worden, wat ook weer inzichten kan opleveren voor beleid om slijtage-emissies te beperken.

Ook ontbreekt nog onderzoek waarin slijtage-emissies bij elektrische voertuigen goed vergeleken worden met die van voertuigen met een verbrandingsmotor, met daarbij de onderliggende factoren die zorgen voor de verschillen.

Een vergelijking in slijtage-emissies tussen elektrische voertuigen en voertuigen met een verbrandingsmotor is op basis van de huidige studies nog niet volledig mogelijk.

Daarnaast is er gebrek aan gestandaardiseerde testmethodieken voor het bepalen van emissies naar de lucht die vrijkomen bij bandenslijtage. In Euro 7 zijn limieten vastgesteld voor het gewichtsverlies van de band gedurende het gebruik, maar niet voor de emissies naar de lucht. Een gestandaardiseerde testmethodiek voor de emissies van bandenslijtage zou een limiet op daadwerkelijke emissies dichterbij kunnen brengen, met een beter onderbouwd effect op de luchtkwaliteit tot gevolg. Een gestandaardiseerde testmethodiek zou ook inzicht geven in hoeveel PM, deeltjesaantallen (PN) en ultrafijnstof (UFP) er daadwerkelijk vrijkomt in de praktijk.

Voor remslijtage van personenvoertuigen is er inmiddels wel een gestandaardiseerde testmethodiek beschikbaar voor emissiemetingen in het lab, zie UNECE GTR24. In eerder werk heeft TNO de praktijkcondities van remmen onderzocht. Daarbij werden hogere temperaturen en heftigere remacties waargenomen in de praktijk dan in de gestandaardiseerde WLTP remcyclus (Vroom, 2024). Er is weinig onderzoek beschikbaar waarin testen zijn uitgevoerd onder realistische condities en mogelijk zijn de fijnstofemissies onder deze condities een stuk hoger. Praktijktesten of labtesten met aangepaste cycli zouden van toegevoegde waarde zijn voor het inzicht in praktijkemissies.

Voor vrachtwagenremmen is nog heel weinig bekend van de uitstoot. Er is nog geen officiële gestandaardiseerde test, er zijn maar enkele labs die vrachtwagenremmen kunnen testen en er is weinig bekend over de totale slijtage van remvoeringen in de praktijk. Meer testen onder praktijkcondities zouden eventuele eerdere inschattingen kunnen valideren en de condities kunnen identificeren waarin een groot deel van de slijtage-emissies wordt uitgestoten. Ook is het nog niet bekend wat verschillende typen remmen en de gebruikte remvoeringen voor effect hebben op de slijtage-emissies van remmen.

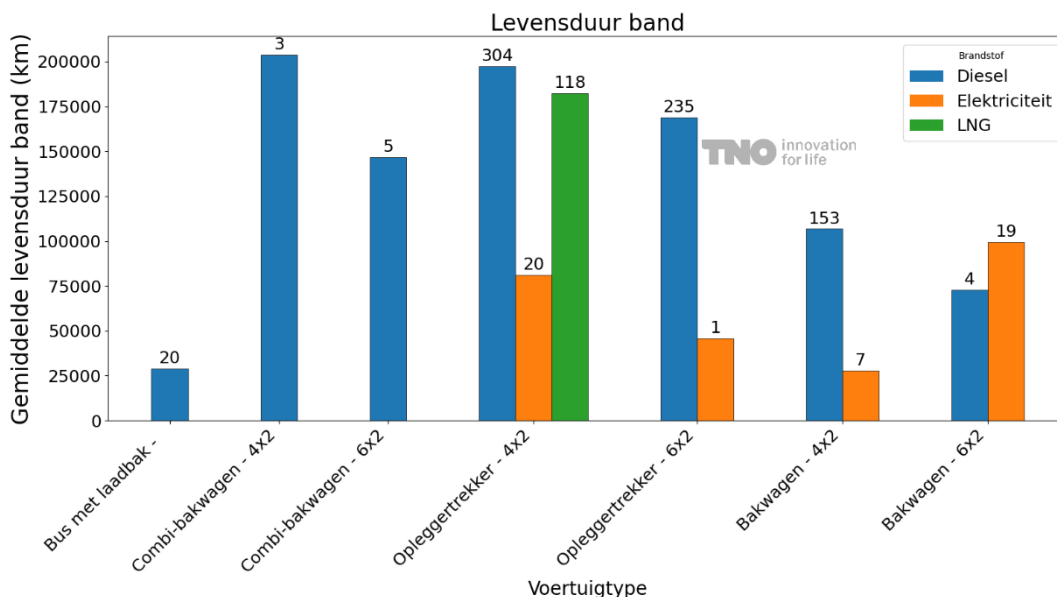
Als laatste zijn er nog kennislacunes omtrent de toxiciteit en andere gezondheidseffecten van slijtage-emissies, mede vanwege de grote diversiteit van de stoffen waaruit de deeltjes bestaan en de verschillen daarin tussen de verschillende bronnen. Er is nog veel onbekend, bijvoorbeeld van de schadelijkheid van het fijnstof zelf, en van de stoffen die uit de bandendeeltjes lekken.

4 Onderzoek naar bandenslijtage bij vrachtwagens

Voor dit onderzoek zijn we in contact gekomen met transportbedrijf Simon Loos, waar al sinds 2019 wordt bijgehouden wat er met de banden op de voertuigen in hun vloot gebeurt. In een database wordt van ieder voertuig bijgehouden wanneer banden vervangen worden. Daarbij noteren ze de reden van vervanging, het resterende profiel op de versleten band en het profiel van de nieuwe. Simon Loos is één van de grootste logistieke vervoerders van Nederland met een vloot van circa 1.400 voertuigen. De vloot bestaat voornamelijk uit opleggertrekkers en bakwagens: in de dataset zitten 678 opleggertrekkers, waarvan 21 elektrisch, en 183 bakwagens, waarvan 26 elektrisch. Uit contact met Simon Loos kwam naar voren dat ze merkten dat banden van hun elektrische vrachtwagens aanzienlijk minder lang mee gaan dan bij hun diesel- en LNG-vrachtwagens. Ook gaven ze aan dat ze elektrische voertuigen harder zagen optrekken op de parkeerplaats en dat de banden tijdens het optrekken te horen waren. Mogelijke oorzaken voor de kortere levensduur van banden zijn een verschil in inzet van de voertuigen, de rijstijl van de bestuurder en voertuigeigenschappen zoals motorvermogen en gewicht. Om de slijtage van vrachtwagenbanden nader te onderzoeken is er een analyse op de beschikbare data uitgevoerd.

4.1 Levensduur van de banden

De eerste stap in de analyse betreft de levensduur van de banden uitgezet tegen het type voertuig. In Figuur 4.1 is bij de opleggertrekkers en de bakwagens 4x2 te zien dat de elektrische varianten sneller hun banden verslijten dan de varianten met verbrandingsmotor. Voor bakwagens 6x2 is het verschil een stuk kleiner en zijn het de varianten met verbrandingsmotor waarvan iets sneller de banden moeten worden vervangen. Voor bepaling van de emissies draait het echter niet alleen om de levensduur van een band, maar ook om de hoeveelheid materiaal die een band afslijt, uitgedrukt in volume of massa per gereden kilometer.

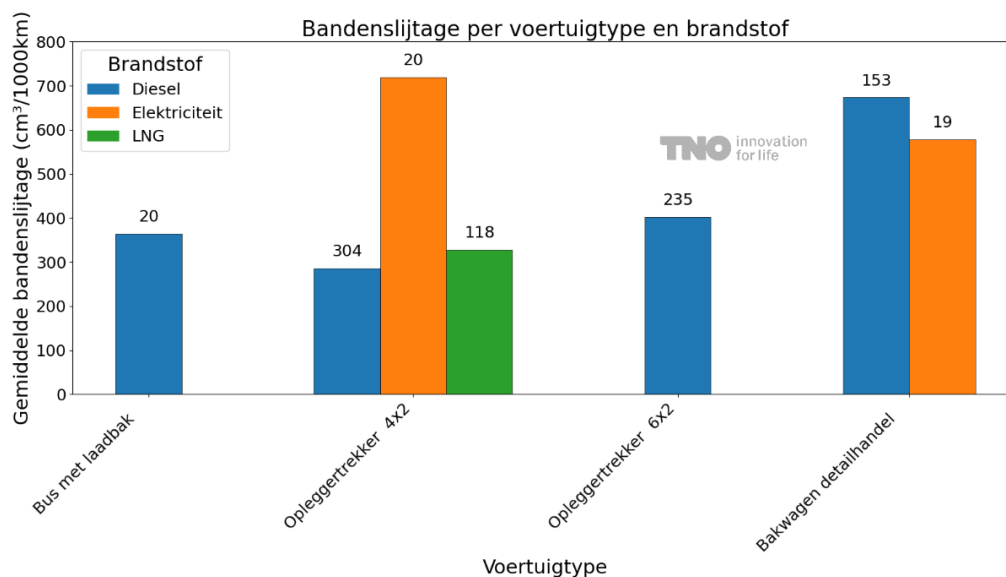


Figuur 4.1: Gemiddelde levensduur van HD-banden. Het aangegeven getal boven iedere staaf betreft het aantal voertuigen waarover het gemiddelde is berekend.

4.2 Slijtage per kilometer

In deze stap is gekeken naar het verlies van profieldiepte over de levensduur van een band, waarbij diameter, breedte en patroon van het profiel een belangrijke rol spelen in de berekende slijtage. Meer details over het omrekenen van levensduur naar slijtage per kilometer zijn te vinden in Bijlage B.

De berekende bandenslijtage per voertuigtype, uitgedrukt in volumeverlies per kilometer, is afgebeeld in Figuur 4.2. Deze toont een vergelijkbaar beeld als Figuur 4.1, maar wijkt met name af voor de categorie bus met laadbak. Hoewel de gemiddelde levensduur van de banden zeer kort was, bleek dit omgerekend een hoeveelheid slijtage per kilometer te zijn die vergelijkbaar is met die van andere voertuigcategorieën. Dit komt door de kleinere banden die op de bus met laadbak gemonteerd worden ten opzichte van de andere typen voertuigen. Verder zijn in Figuur 4.2 de diesel 4x2 bakwagens en de elektrische 6x2 bakwagens gegroepeerd tot bakwagen detailhandel. Dit is gedaan aangezien de 6x2 elektrische bakwagens de 4x2 diesel bakwagens vervangen en vergelijkbaar in gebruik zijn.

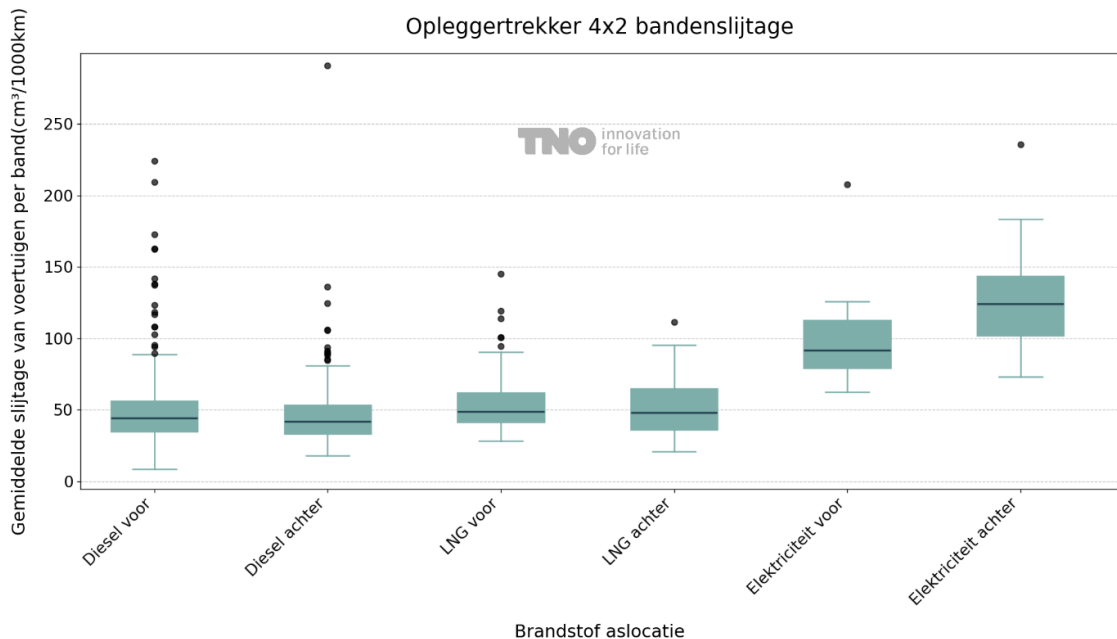


Figuur 4.2: Gemiddelde bandenslijtage per voertuigtype en brandstofklasse, uitgedrukt in volumeverlies per kilometer. Het getal boven iedere staaf geeft aan hoeveel voertuigen in het voertuigtype zijn meegenomen.

In het algemeen vertonen de bakwagens een hogere slijtage per kilometer dan de opleggertrekkers. Daarbij is het belangrijk om op te merken dat bij opleggertrekkers de banden van de opleggers in deze studie niet zijn meegenomen. Voor de bakwagens die rijden voor bevoorrading van detailhandel valt op dat de bandenslijtage voor de elektrische variant lager is dan voor de diesel variant.

In de verdere analyse is vooral ingezoomd op opleggertrekkers met een 4x2-configuratie, omdat er van dit voertuigtype de meeste data beschikbaar is voor alle drie de varianten (diesel, EV en LNG). Kijkend naar de varianten met verbrandingsmotoren valt op dat de gemiddelde bandenslijtage van LNG trekkers iets hoger ligt dan van de dieselvarianten, hoewel dit verschil vrij klein is. Bij de elektrische opleggertrekkers 4x2 ligt de gemiddelde bandenslijtage aanzienlijk hoger dan bij de varianten met verbrandingsmotor, vergelijkbaar aan het inzicht bij de levensduur van de banden. Dit laat zien dat de verkorte levensduur van de banden van elektrische opleggertrekkers het gevolg is van daadwerkelijk snellere slijtage, en dus niet komt door eventuele onderlinge verschillen zoals bandenmaat. Gemiddeld ligt de slijtage van een band onder een elektrische opleggertrekker 2,1 keer hoger dan van een band onder alternatieven met een verbrandingsmotor (119,3 resp. 55,7 cm³/1000km). In de hele vloot zijn er meer voertuigen met een verbrandingsmotor vergeleken met elektrische voertuigen. Data van meer elektrische voertuigen zou een betere benadering voor de slijtage-emissies opleveren. Desalniettemin is het verschil in slijtage groot genoeg om het resultaat als statistisch significant te mogen beschouwen.

In Figuur 4.3 is er voor de opleggertrekkers 4x2 gekeken naar de spreiding in de gemiddelde slijtage per variant (diesel, EV en LNG) en per aslocatie (voor en achter). Hier is te zien dat de elektrische 4x2 opleggertrekkers zowel bij de voor- als de achterbanden gemiddeld een aanzienlijk hogere slijtage vertonen dan de varianten met een verbrandingsmotor. Het verschil in slijtage tussen voor- en achterbanden is relatief klein voor diesel en LNG, maar duidelijk zichtbaar voor de elektrische varianten. Hoewel de meeste datapunten dicht bij elkaar liggen, zijn er voor de diesel- en LNG-varianten ook verschillende waarnemingen van hoge slijtage (zwarte bolletjes in de figuur). Deze zijn zo hoog dat ze gedeeltelijk of geheel overlappen met de waargenomen slijtage bij de elektrische varianten.



Figuur 4.3: Gemiddelde slijtage per band van vergelijkbare voertuigtypen met verschillende brandstof / energiedrager uitgesplitst naar aslocatie van de band (voor en achter).

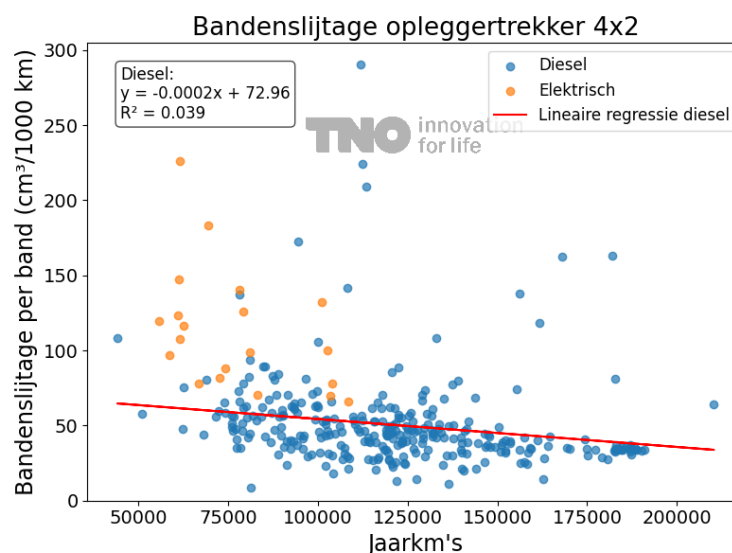
4.3 Effect van leeftijd, inzet en vermogen op slijtage

De hoge uitschieters in de datapunten met betrekking tot bandenslijtage voor de diesel en LNG varianten overlappen met de gevonden bandbreedte voor elektrische trucks. Om te achterhalen of er een gemeenschappelijke oorzaak is, is nader gekeken naar onderliggende factoren. De elektrische opleggertrekkers in de dataset blijken over het algemeen nieuwer en rijden minder kilometers per jaar. De elektrische 4x2 trekkers zijn gemiddeld twee jaar oud en rijden gemiddeld 77.000 kilometer per jaar, de diesel varianten zijn gemiddeld vijf jaar oud en rijden gemiddeld 121.000 kilometer per jaar. Daarnaast bezitten de elektrische trekkers een hoger maximum vermogen.

Allereerst is er aan de hand van het jaarkilometrage gekeken naar het effect van de inzet van voertuigen op de bandenslijtage. Vrachtwagens met een laag jaarkilometrage worden doorgaans vaker ingezet in de bebouwde kom, terwijl voertuigen met een hoog aantal jaarkilometers voornamelijk op lange trajecten en snelwegen rijden. Binnen de bebouwde kom wordt een hogere bandenslijtage per kilometer verwacht, vanwege het frequente accelereren, remmen en het nemen van bochten, tegenover stabiele snelheden en weinig bochten op snelwegen. De hogere bandenslijtage binnen de bebouwde kom is tevens aangenomen in de modellering van de emissieregistratie (Witt, et al., 2025).

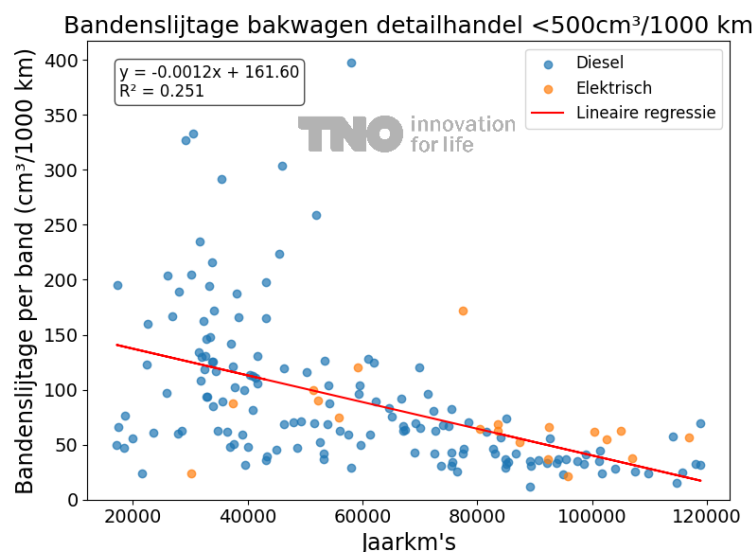
In Figuur 4.4 is de bandenslijtage van diesel en elektrische opleggertrekkers 4x2 uitgezet tegen het jaarkilometrage. Hoewel er door de oogharen gekeken een geringe afnemende trend lijkt te zijn in de bandenslijtage als functie van jaarkilometrage, is het verschil klein en liggen de uitschieters voor zowel lage als hoge jaarkilometrages in dezelfde orde grootte en ver boven de trend. Elektrische voertuigen hebben een hoge slijtage en de minst hard slijtende elektrische voertuigen liggen aan de bovenkant van de diesel bandbreedte.

Bij een dominante afhankelijkheid van jaarkilometrage zou er een nadrukkelijk afnemende trend verwacht worden en zou het niveau in bandenslijtage voor dieselvoertuigen bij lage jaarkilometrages dat van de elektrische varianten moeten benaderen. Aangezien dit niet het geval is, kan voor 4x2 opleggertrekkers worden geconcludeerd dat een laag jaarkilometrage, en daarmee een hoger aandeel binnen de bebouwde kom gereden kilometers, geen of slechts een geringe oorzaak is van de hogere bandenslijtage bij elektrische opleggertrekkers.



Figuur 4.4: Bandenslijtage van diesel 4x2 opleggertrekkers per band als functie van jaarkilometrage.

Bij bakwagens is de hogere slijtage bij voertuigen met lage jaarkilometers daarentegen sterker zichtbaar, dit is te zien in Figuur 4.5. Voor voertuigen die weinig kilometers per jaar rijden is bovendien de variatie in de bandenslijtage groter. Voertuigen die veel kilometers per jaar rijden, vertonen aanzienlijk minder slijtage per kilometer en een kleinere spreiding in deze data. De elektrische bakwagens rijden over het algemeen veel kilometers. De bandenslijtage van elektrische bakwagens liggen in dezelfde spreiding als die van de dieselvoertuigen.



Figuur 4.5: Bandenslijtage van diesel 4x2 bakwagens per band als functie van het aantal kilometers dat een voertuig rijdt in een jaar.

In Bijlage C zijn tevens grafieken opgenomen waarin de slijtage van diesel opleggertrekkers 4x2 is uitgezet tegen de leeftijd van het voertuig en het maximale motorvermogen. De leeftijd van het voertuig blijkt geen invloed te hebben op de bandenslijtage per kilometer. Het motorvermogen geeft ook geen duidelijk verband, al is dat mogelijk het gevolg van de beperkte variatie in vermogen binnen de dataset (290 t/m 360 kW).

4.4 Discussie

Er is weinig informatie over bandenslijtage in de praktijk van personenwagens, maar nog minder van vrachtwagens. De in dit onderzoek beschikbaar gestelde dataset van 5,5 jaar over honderden voertuigen is een waardevolle toevoeging voor het beter kunnen duiden van bandenslijtage in de praktijk bij vrachtwagens en van het verschil daarin tussen conventionele en elektrische voertuigen. Voor zover bekend vormt dit één van de omvangrijkste datasets met praktijkgegevens over bandenslijtage van deze voertuigcategorie.

De slijtagegetallen vanuit de dataset zijn gebaseerd op een enkele waarde voor de profieldiepte, hoewel de profieldiepte en de verandering ervan als gevolg van slijtage kunnen verschillen over de breedte van het loopvlak van de band. Dit kan voor een afwijking hebben gezorgd in de berekende resultaten. Aangezien ook bekend is dat voorbanden van vrachtwagens regelmatig scheef afslijten zouden profieldieptemetingen over de breedte van het loopvlak de schattingen kunnen verbeteren.

Het is bekend dat de meeste van de elektrische opleggertrekkers een aanzienlijk hoger vermogen bevatten vergeleken met de brandstof voertuigen (500-599 kW vergeleken met 290-360 kW). Het aanzienlijk hogere vermogen is een mogelijke verklaring voor de hogere bandenslijtage. De onderliggende hypothese is dat trekkers met een hoger vermogen sneller kunnen optrekken en dit in de praktijk ook daadwerkelijk doen, wat leidt tot grotere krachten op de banden en daarmee versnelde slijtage. Ook het instantane en hoge koppel van elektrische vrachtwagens zorgt mogelijk voor meer bandenslijtage. Deze hypothese zou kunnen worden getoetst met de analyse van een uitgebreidere dataset, waarbij de motorvermogens van alle voertuigen beschikbaar zijn alsmede meer gedetailleerde gegevens over het gebruik van de verschillende vrachtwagens (bijvoorbeeld op basis van monitoringsdata).

Pas als de onderliggende factoren voor hogere bandenslijtage beter bekend zijn, kunnen er verbeterde inschattingen gemaakt worden voor emissieregistratie en kan er gekeken worden naar effectieve mitigerende maatregelen zoals het beperken van het motorvermogen tijdens accelereren.

Meer vermogen en koppel hoeven echter niet te betekenen dat er ook daadwerkelijk harder opgetrokken wordt. De rijstijl van de chauffeur heeft hier een sterke invloed op alsmede de verkeersomstandigheden. De toevoeging van regeneratief remmen is eveneens genoemd als mogelijke oorzaak voor de hoge slijtage. Dit zou voor grotere wrijving (en slijtage) van de banden kunnen zorgen. In de huidige emissieregistratie is de bandenslijtage van elektrische trekkers hoger dan die van dieselloertuigen. Als de factor van 2,1 voor de hogere bandenslijtage van elektrische opleggetrekkers vergeleken met diesel, zoals gevonden in de dataset, toegepast zou worden in de emissieregistratie, dan zou het totale niveau van fijnstofuitstoot van elektrische voertuigen meer in de buurt komen van dat van conventionele voertuigen. Het verkregen inzicht dat bandenslijtage van elektrische opleggetrekkers mogelijk structureel hoger is dan van de varianten met verbrandingsmotor is een opvallend signaal dat met behulp van uitgebreidere monitoring nader onderzocht dient te worden.

5 Conclusies en aanbevelingen

Binnen dit onderzoek is gekeken naar de fijnstofemissies van elektrische voertuigen in vergelijking met alternatieven voorzien van een verbrandingsmotor. De totale fijnstofemissies zijn de som van de fijnstof afkomstig uit de uitlaat en van de slijtage van remmen en banden. Op basis van de huidige inschattingen in de nationale emissieregistratie stoten elektrische voertuigen netto per kilometer typisch minder fijnstof uit dan voertuigen met een verbrandingsmotor, waarbij een van de onderliggende aannames is dat remslijtage van elektrische voertuigen nagenoeg nul is. De in de emissieregistratie gemodelleerde emissies van bandenslijtage komen juist hoger uit voor elektrische voertuigen vanwege het hogere motorvermogen en het hogere gewicht. Bij personenvoertuigen en vrachtwagens is dit duidelijk zichtbaar, maar bij de bestelbussen is dit verschil relatief klein.

De emissiefactoren voor banden- en remslijtage in de emissieregistratie zijn gebaseerd op oude getallen die beperkt onderbouwd zijn en met veel onzekerheid zijn omgeven. De ten behoeve van de emissieregistratie gehanteerde deeltjesgrootteverdeling van rem- en bandenstof is tevens gebaseerd op aannames en beperkt beschikbare studies, waarvan de uitkomsten niet meer representatief zijn voor de huidige bandenmarkt, aangezien het materiaal van het loopvlak sterk is veranderd.

De belangrijkste kennislacune op het gebied van banden- en remslijtage is het gebrek aan metingen in de praktijk. Ook in de recente literatuur blijkt dat de meeste gaten in de kennis nog niet gevuld zijn. Voor remmen van personenvoertuigen zijn er nieuwe inzichten die de huidige emissiefactoren kunnen verbeteren, hoewel deze hoofdzakelijk gebaseerd zijn op testen onder labcondities en niet in de praktijk. Voor vrachtwagens is er zowel voor banden- als remslijtage minder bekend dan voor personenvoertuigen. Onderzoeken naar het effect van elektrificatie van voertuigen op de slijtage-emissies laten wisselende resultaten zien. Met name voor bandenslijtage lijken de toenames in voertuigmassa en motorvermogen als gevolg van elektrificatie een rol te spelen en te leiden tot hogere bandenslijtage. Meer praktijkinzichten op het gebied van banden- en remslijtage en de daaruit voortkomende emissies zijn nodig om naast verbeterde inschattingen van het emissieprobleem ook nieuwe inzichten te verkrijgen ten behoeve van de ontwikkeling van mitigerende (technische) maatregelen en wetgeving om de toepassing daarvan te bevorderen.

In dit onderzoek is een grote dataset beschikbaar gesteld van bandenvervanging bij diesel-, LNG- en elektrische vrachtwagens uit de vloot van een Nederlandse transporteur. Uit nadere analyse is naar voren gekomen dat de bandenslijtage per kilometer in deze vloot voor elektrische opleggertrekkers gemiddeld 2,1 keer zo hoog is als bij opleggertrekkers op diesel en LNG. Vanwege deze opvallende observatie is nader gekeken naar mogelijke onderliggende factoren. Verschillen in inzet, uitgedrukt in jaarkilometrage, in voertuigleeftijd en in motorvermogen zijn bekeken maar boden geen directe relatie met bandenslijtage per kilometer. Voor bakwagens gebruikt in de bevoorrading van detailhandel is geen hogere bandenslijtage gevonden voor elektrische alternatieven.

Een mogelijke reden voor de hogere bandenslijtage kan een verschil in rijgedrag zijn dat voortkomt uit een combinatie van verhoogde beschikbare voertuigprestaties van elektrische voertuigen en een daardoor gefaciliteerde “sportievere” rijstijl van de bestuurder.

Denk hierbij aan verhoging in frequentie en magnitude van acceleraties en deceleraties tijdens het rijden en hogere voertuigsnelheid in de bochten. Met de beschikbare informatie in de dataset was het niet mogelijk om deze mogelijke verklaring te toetsen. Hiervoor is additionele data benodigd, bijvoorbeeld in de vorm van rijgedragmonitoring van enkele voertuigen.

Voor bakwagens die de detailhandel bevoorraden is ook gekeken naar het verband tussen bandenslijtage en jaarkilometrage. Hieruit kwam een duidelijk beeld naar voren dat de gemiddelde bandenslijtage en de spreiding in het bandenslijtage het hoogste zijn bij de laagste jaarkilometrages. Er is voor deze voertuigcategorie echter geen duidelijk verschil zichtbaar tussen elektrische en diesellootvoertuigen. De conclusies geven aanleiding om de geobserveerde hogere bandenslijtage bij elektrische opleggers nader te onderzoeken om zo onderliggende factoren te kunnen achterhalen en mogelijke mitigerende maatregelen te kunnen formuleren.

Met behulp van de opgedane inzichten zijn aanbevelingen voor vervolgonderzoek opgesteld. Met betrekking tot bandenslijtage zijn de aanbevelingen:

- Voertuigen monitoren op gebruik en inzet voor het achterhalen van onderliggende oorzaken voor de hogere bandenslijtage en het formuleren van mogelijke mitigerende maatregelen, zoals beperking van de voertuigprestaties of gebruik van andere banden (speciaal voor EVs).
- Uitgebreide profiel dieptemetingen aan banden verrichten om scheef afslijten in de praktijk in kaart te brengen en mee te nemen in de inzichten voor o.a. de emissieregistratie.
- Inzichten in dichtheid van bandenloopvlakrubber van recente banden opdoen om zo beschikbare data van bandenslijtage uitgedrukt in profiel diepteverlies of volumeverlies om te rekenen naar massaverlies per kilometer.
- Bandenslijtage van opleggers analyseren om een beter totaalbeeld te krijgen van bandenslijtage-emissies van trekker-trailercombinaties.
- Bandenslijtage van personenauto's in de praktijk onderzoeken door middel van het verkrijgen en analyseren van grote datasets van profiel diepteverlies over gereden afstand van een vloot voertuigen, om zo ook voor personenauto's de huidige beperkte inzichten te kunnen verbeteren en onderliggende factoren voor bandenslijtage te onderzoeken.
- De in dit rapport beschreven data-analyse periodiek herhalen met een grotere dataset om zo een beter beeld te krijgen van de praktijk en veranderingen in bandenslijtage over de tijd te monitoren.

Met betrekking tot remslijtage zijn de aanbevelingen:

- Slijtage van remmaterialen in de praktijk bij personenauto's en vrachtwagens onderzoeken door middel van het verkrijgen en analyseren van grote datasets van vervanging van remonderdelen van een vloot met voertuigen, om zo de huidige inzichten te kunnen verbeteren en mogelijke verschillen in remslijtage tussen voertuigen met verschillende aandrijflijnen te kunnen herkennen.
- Emissies van remslijtage voor personenauto's en vrachtwagens nader onderzoeken door praktijkcondities te achterhalen en emissietesten onder praktijkcondities uit te voeren om zo de (zeer beperkte) huidige inzichten te kunnen verbeteren en aanbevelingen voor de toekomst te kunnen formuleren. Factoren als regeneratief/non-frictie remmen zijn bestuurderafhankelijk en hebben mogelijke grote invloed op slijtage in de praktijk.

Referenties

- Aleman, M., Nosko, O., Metinoz, I., & Olofsson, U. (2015). A Study on Emission of Airborne Wear Particles from Car Brake Friction Pairs 2015-01-2665.
- Baensch-Baltruschat, B., Kocher, B., Kochleus, C., & Stock, F. &. (2021). Tyre and road wear particles - A calculation of generation, transport and release to water and soil with special regard to German roads. *Science of the total environment*, 752.
- Emissieregistratie. (2022). *Emissieregistratie*. Opgeroepen op november 2025, van <https://www.emissieregistratie.nl/>
- Emissieregistratie. (2025). *emissieregistratie*. Opgeroepen op november 2025, van [https://www.emissieregistratie.nl/sites/default/files/2025-04/2025-0006%20\(RIVM\)%20Methodology%20report%20Transport%20ER%201990-2023.xlsx](https://www.emissieregistratie.nl/sites/default/files/2025-04/2025-0006%20(RIVM)%20Methodology%20report%20Transport%20ER%201990-2023.xlsx)
- EU parliament. (2024). REGULATION (EU) 2024/1257 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL. Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1257/oj/eng>
- Foroutan, H., Aryal, A., Craine, M., & Rakha, H. (2025). Projecting airborne tire wear particle emissions in the United States in the era of electric vehicles. *Science of the Total environment*, 967.
- Giechaskiel, B., Grigoratos, T., Mathissen, M., Quik, J., Trom, P., Gustafsson, M., . . . Dilara, P. (2024). Contribution of road vehicle tyre wear to microplastics and ambient air pollution. *Sustainability*, 16(522).
- Grigoratos, T., & Martini, G. (2014). *Non-exhaust traffic related emissions. Brake and tyre wear PM*. Ispra: JRC SCIENCE AND POLICY REPORTS.
- Grigoratos, T., Gustafsson, M., Eriksson, O., & Martini, G. (2018). Experimental investigation of tread wear and particle emission from tyres with different treadwear marking. *Atmospheric Environment*, 182, 200-212.
- ImageJ. (2024). *ImageJ Image processing and Analysis in Java*. Opgeroepen op 2024, van <https://imagej.net/ij/>
- Ivanov, V. (2010). Analysis of Tire Contact Parameters Using Visual Processing. *Advances in Tribology*.
- Lewis, A., & Moller, S. J. (2019). *Non-exhaust emissions from road traffic*. Department for Environment, Food and Rural Affairs; Scottish Government; Welsh Government; and Department of the Environment in Northern Ireland.
- Liu, Y., Chen, H., Wu, S., Gao, J., Li, Y., An, Z., . . . Li, T. (2022). Impact of vehicle type, tyre feature and driving behaviour on tyre wear under real-world driving conditions. *Science of the total environment*, 842.
- Luhanna, L., Sokhi, R., Wamer, L., Mao, H., Boulter, P., McCrae, I., . . . Osborn, D. (2004). *European comission project: Characterisation of Exhaust Particulate Emissions from Road vehicles (PARTICULATES) deliverable 8. Measurement of non-exhaust particulate matter*.
- Ly, A., & El-Sayegh, Z. (2023). Tire wear and pollutants an overview of research. *Archives of advanced engineering science*, 1, 2-10.
- Mayer, P. M., Moran, K. D., Miller, E. L., Brander, S. M., & Harper, S. (2024). Where the rubber meets the road: Emerging environmental impacts of tire wear particles and their chemical cocktails. *Science of the total environment*, 927.
- Mennekes, D., & Nowack, B. (2022). Tire wear particle emissions: Measurement data where are you? *Science of the total environment*(830).

- Ntziachristos, L., Boulter, P., & Karageorgiou, T. (2025). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023-Update 2025*. EMEP/EEA.
- Polukarova, M., Hjort, M., & Gustafsson, M. (2024). Comprehensive approach to national tire wear emissions: Challenges and implications. *Science of the total environment*, 924.
- Saladin, S., Boies, A., & Giorio, C. (2024). Airborne tire wear particles: A critical reanalysis of the literature reveals emission factors lower than expected. *Environmental science and technology letters*, 11, 1296-1307.
- Ten Broeke, H., Hulskotte, J., & Denier van der Gon, H. (2008). *Emissies door bandenslijtage afkomstig van het wegverkeer*. Rijkswaterstaat-waterdienst.
- Vroom, G. (2024). Health effects of brake wear particle emissions. Genève. Opgeroepen op 2025, van unece wiki.
- Wilkinson, T., Järllskog, I., Aristéia de Lima, J., Gustafsson, M., Sköld, Y., & Hasselöv, M. (2023). Shades of grey-tire characteristics and road surface influence tire and road wear particle (TRWP) abundance and physicochemical properties. *Frontiers in Environmental Science*.
- Witt, H., Geilenkirchen, G., Bolech, M., Dellaert, S., van Eijk, E., Geertjes, K., & Kosterman, M. (2025). *Methodology for the calculation of emissions from the transport sector RIVM REPORT 2025-0006*. Bilthoven: RIVM.
- Woo, S.-H., Jang, H., Lee, S.-B., & Lee, S. (2022). Comparison of total PM emissions emitted from electric and internal combustion engine vehicles: An experimental analysis. *Science of the total environment*, 824.
- Zhang, Q., Yin, J., Fang, T., Guo, Q., Sun, J., Peng, J., . . . Mao, H. (2024). Regenerative braking system effectively reduces the formation of brake wear particles. *Journal of hazardous materials*.

Ondertekening

TNO › Mobility & Built Environment › Den Haag, 3 maart 2026

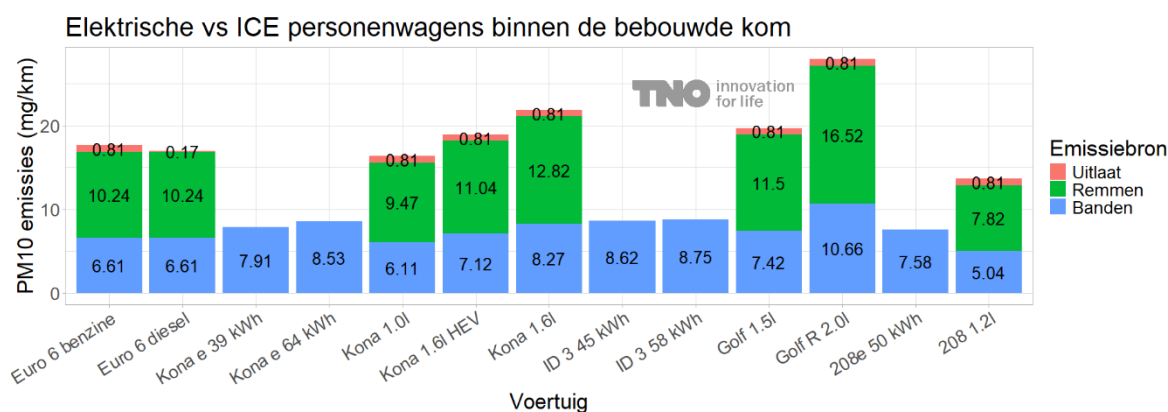
 Valid Signed by Fieke Beemster
on 2026-03-03 11:14:45
Fieke Beemster
Research Manager

 Valid Signed by Thijs Oosterbeek
on 2026-03-02 16:42:14
Thijs Oosterbeek
Auteur

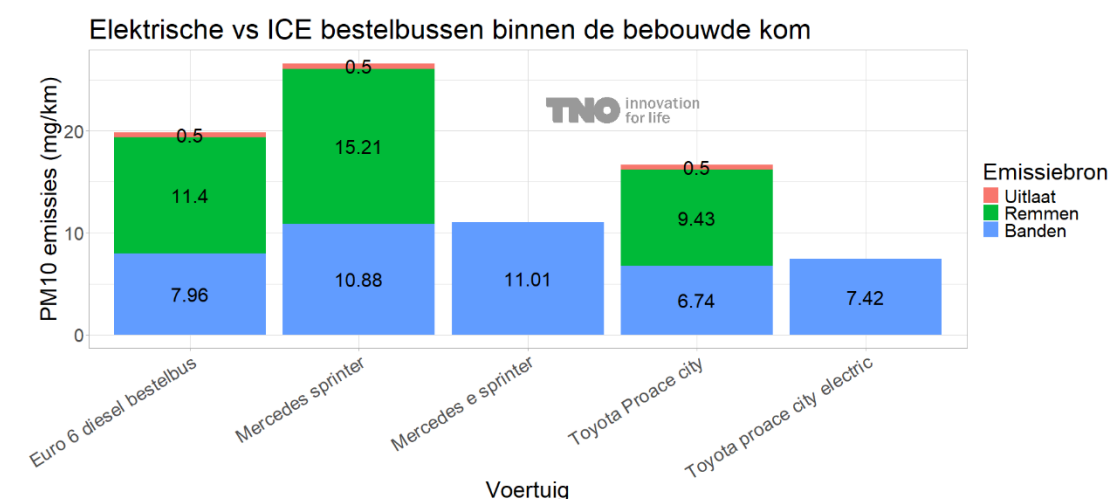
Bijlage A

PM₁₀-emissiefactoren volgens emissieregistratie

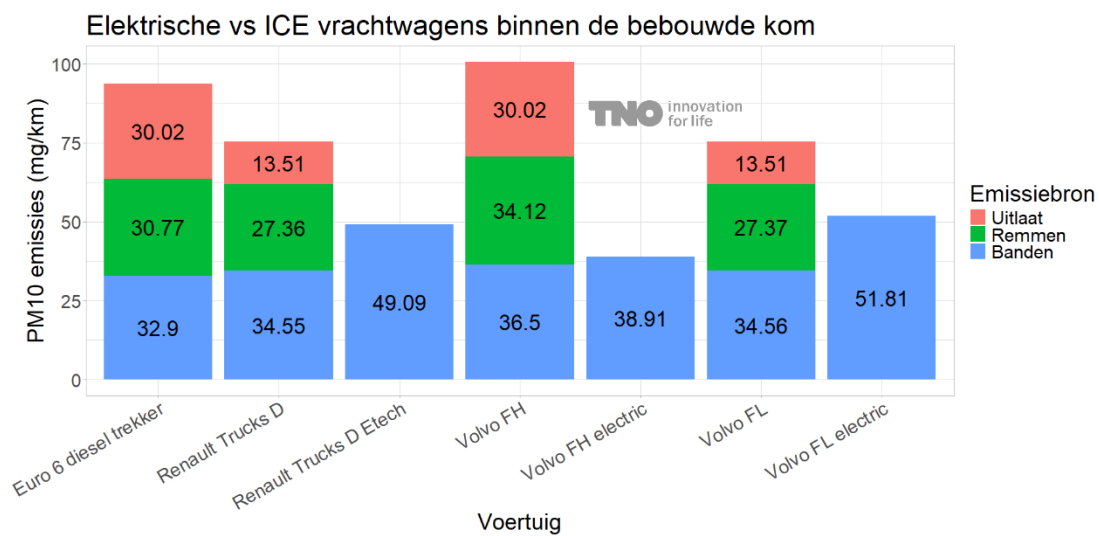
In onderstaande figuren worden, op basis van de methodiek en data zoals gehanteerd binnen de nationale emissieregistratie (Witt, et al., 2025), de PM₁₀-emissies van elektrische voertuigen binnen de bebouwde kom vergeleken met die van voertuigen voorzien van een verbrandingsmotor (ICE). Er wordt onderscheid gemaakt naar de fijnstofuitstoot afkomstig van de uitlaat, remmen en banden.



Figuur A.1: PM₁₀-emissies van elektrische personenwagens en personenwagens met een verbrandingsmotor binnen de bebouwde kom.



Figuur A.2: PM₁₀-emissies van elektrische bestelbussen en bestelbussen met een verbrandingsmotor binnen de bebouwde kom.



Figuur: A.3: PM₁₀-emissies van elektrische en dieselvrachtwagens binnen de bebouwde kom.

Bijlage B

Methoden voor bepaling van slijtage-emissies uit praktijkdata over vervanging banden bij vrachtwagens

Voor het aanvullend onderzoek naar bandenslijtage bij vrachtwagens is gebruik gemaakt van een database van transporteur Simon Loos, waarin al sinds 2019 gegevens worden bijhouden over de vervanging van banden op alle voertuigen in hun vloot.

De gebruikte database is op basis van kenteken gematched met data uit de database van de RDW. Hiermee konden per individueel voertuig indien beschikbaar het voertuigtype, de gewichtsklasse, het vermogen en het brandstoftype van het voertuig bepaald worden. Voor elektrische vrachtwagens is het vermogen in deze database niet beschikbaar.

Filters in de data

De dataset is gefilterd op banden waarmee minder dan 2.000 kilometer was gereden. Voor deze banden kan de slijtage niet accuraat berekend worden, aangezien binnen 2.000 kilometer de verandering in profiel niet te meten valt. Ook zijn de 20 banden die het traagst en snelst zijn versleten handmatig gecheckt. Een deel van deze banden is uit de dataset gehaald doordat er duidelijk een invoerfout was gemaakt (bijvoorbeeld dat bij het tweede datapunt er een andere band was afgehaald dan wat er op datapunt 1 op was gezet). Echter zijn er ook banden die heel hard versleten juist wel in de dataset behouden. Over het algemeen waren dit banden die als enkele band waren vervangen. Doordat deze band meer profieldiepte heeft dan de omringende, deels versleten banden vertonen deze banden meer slijtage.

Berekening volumeverlies

Voor het berekenen van het verloren volume van een band als gevolg van slijtage is het verlies van profiel bepaald tussen de vervangingen. Voor alle voertuigen ouder dan bouwjaar 2018 kon dit pas berekend worden na de tweede vervanging. Het verlies aan profiel is berekend door de profieldiepte van de band wanneer hij eraf is gehaald af te trekken van de profieldiepte waarmee hij erop is gezet. Voor de nieuwere voertuigen is ervan uitgegaan dat de voertuigen met nieuwe banden in gebruik zijn genomen, en kon de slijtage al berekend worden van de eerste vervanging.

Om de ééndimensionale maat van verlies in profieldiepte om te rekenen naar een volume dat verloren is gegaan, is het oppervlakte van het profiel berekend met onderstaande formule:

$$A = Ct * w * \pi * (d + 2t)$$

C_t staat voor de profielsaturatiecoëfficiënt: een maat voor de fractie van de breedte van de band die in aanraking komt met het wegdek (Ivanov, 2010). Parameter d staat voor de diameter van de velg (mm), w staat voor de breedte van de band (mm) en t voor de dikte van de zijwanden (mm). Voor de maten is de bandenmaat gebruikt die in de database was ingevuld. De profielsaturatie is een maat die niet bekend was voor de banden. Voor deze studie is dit bepaald doormiddel van foto's van de drie meest voorkomende banden van bakwagens en opleggertrekkers. Deze foto's zijn bewerkt en geanalyseerd met het afbeeldingsbewerkingsprogramma ImageJ (ImageJ, 2024). Figuur B.1 laat het profiel in wit zien en de groeven in zwart. Het percentage wit in de afbeelding is gebruikt als maat voor de C_t , gecorrigeerd voor de achtergrond. Deze methode is in eerder onderzoek gebruikt en wordt herhaalbaar en betrouwbaar geacht.



Figuur B.1: Foto van vrachtwagenband en omgezet in zwart wit met behulp van ImageJ.

Gemiddeld kwamen de foto's voor beide bandengroepen uit op een C_t van 0,73. Om deze reden is in de analyse 0,73 als vaste waarde gebruikt. Bij verdere analyses zou de nauwkeurigheid kunnen verbeteren door de profielsaturatiecoëfficiënt voor elk type band apart te berekenen, of beschikbaar te hebben.

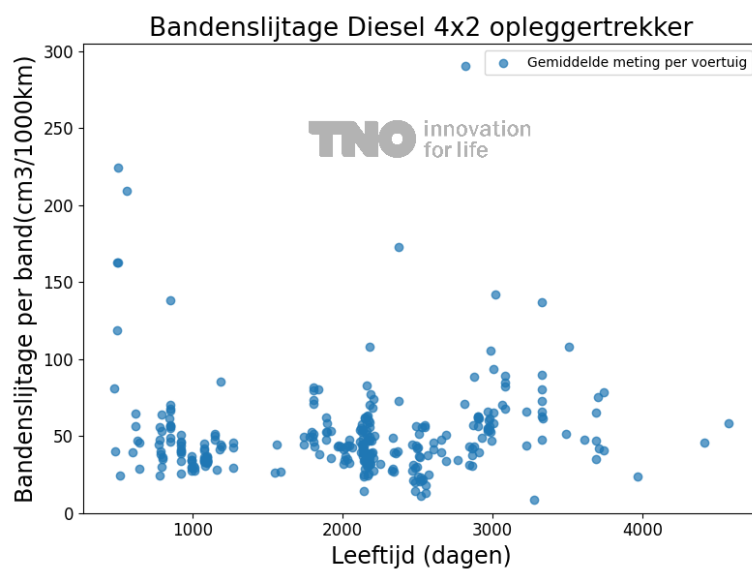
Om de totale bandenslijtage van de voertuigen te bepalen, is een gemiddelde slijtagesnelheid per as van elk voertuig berekend. Hieruit is de gemiddelde slijtage berekend per voertuigklasse. Hierdoor is voorkomen dat voertuigen met een relatief hoge slijtage een groter deel van de dataset vormen en disproportioneel vertegenwoordigd zouden zijn in de resultaten.

Significant verschil tussen aandrijvingen

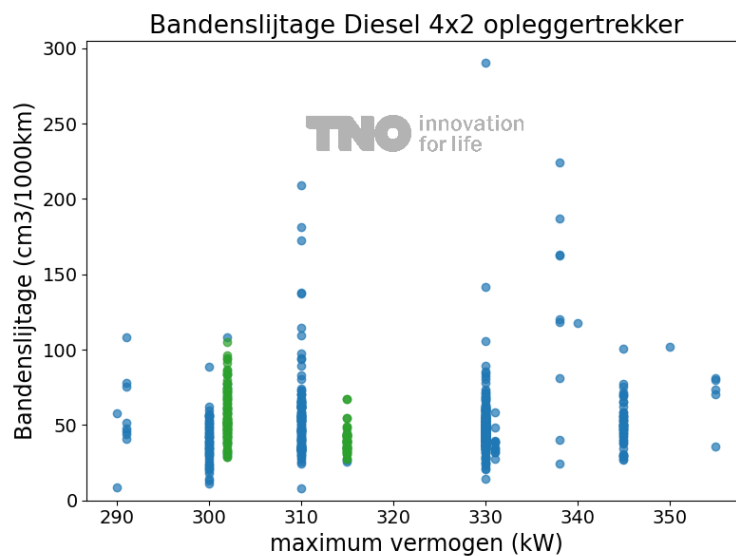
Een paarsgewijze Wilcoxon-toets, uitgevoerd met een Bonferroni-correctie, toont statistisch significante verschillen in slijtagesnelheid tussen de verschillende aandrijftypen van opleggertrekkers.

Bijlage C

Additionele grafieken



Figuur C.1: Bandenslijtage van diesel 4x2 opleggertrekkers per band als functie van de leeftijd van het voertuig in dagen.



Figuur C.2: Bandenslijtage van diesel 4x2 opleggertrekkers per band als functie van het maximum vermogen van een voertuig.

Mobility & Built Environment

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