

TNO-rapport

TNO 2020 R11528

**Onderbouwing AERIUS emissiefactoren
voor wegverkeer, mobiele werktuigen,
binnenvaart en zeevaart**

Traffic & Transport

Anna van Buerenplein 1
2595 DA Den Haag
Postbus 96800
2509 JE Den Haag

www.tno.nl

T +31 88 866 00 00

Datum	8 oktober 2020
Auteur(s)	Norbert E. Ligterink, Jessica M. de Ruiter, Stijn N.C. Dellaert, Jan H.C. Hulskotte, Ruud P. Verbeek, Willar A. Vonk
Exemplaarnummer	2020-STL-RAP-100335016
Aantal pagina's	56 (incl. bijlagen)
Opdrachtgever	RIVM
Projectnaam	RIVM AERIUS emissiefactoren & rapport
Projectnummer	060.44800

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.

© 2020 TNO

Samenvatting

Wegvoertuigen, schepen, mobiele werktuigen, en andere bronnen binnen de sector Verkeer en Vervoer, zoals vliegtuigen en treinen, leveren schadelijke emissies. TNO is verantwoordelijk voor het bijhouden van de laatste inzichten op dit gebied. Deze worden onder meer verkregen door het doen van metingen van praktijkemissies en via internationale samenwerkingen en werkgroepen. Ondanks de verbeteringen in de Europese wetgeving is er op het gebied van NO_x emissies nog steeds een afwijking zichtbaar tussen norm en praktijk. Het is zeer moeilijk om effectieve emissiewetgeving te maken. Daarom is te verwachten dat de praktijk uitstoot een complex probleem blijft. Dit rapport probeert om eenvoudige beelden omtrent emissies en emissiefactoren, die kunnen leven bij partijen, bij te stellen.

Alle beschikbare kennis brengt TNO ook in voor de nationale luchtkwaliteitsmodellen, de Emissieregistratie, en de prognoses voor luchtkwaliteit. Nederland kent een relatief kort proces om vanuit de resultaten van emissiemetingen te komen tot prognoses. Door de steeds complexere motor technologie en metingen staat deze kennisbasis wel onder druk om de laatste inzichten goed te onderbouwen en een compleet beeld te houden van alle mobiele bronnen. Dit rapport probeert daarom ook dat kader goed weer te geven zodat gegevens op hun waarde kunnen worden geschat.

In opdracht van het RIVM zijn dit jaar de onderliggende emissiefactoren van wegverkeer, mobiele werktuigen, binnenvaart, en zeevaart geactualiseerd voor AERIUS. Deze getallen zijn consistent met de laatste inzichten zoals verwerkt in de grootschalige concentratie- en depositiekaarten (GCN/GDN) van Nederland. Dit rapport geeft de achtergrond bij de actualisatie van deze cijfers.

Emissiefactoren worden voor verschillende doeleinden vastgesteld. Daardoor zijn deze in sommige gevallen meer of minder geschikt voor andere toepassingen. Dan bestaat het risico dat ze op een verkeerde manier worden gebruikt. Dit rapport levert ook de context van de cijfers zoals deze door de Taakgroep Verkeer en Vervoer worden bijgehouden.

Dit rapport geeft gebruikers en vergunningverleners van AERIUS verder de handvatten om de emissiegetallen op hun waarde te schatten en alternatieve getallen en inzichten langs de nationale en internationale meetlat te leggen. Ook stelt het gebruikers en beoordelaars in staat om in te schatten wat de beperkingen zijn aan het gebruik van de emissiefactoren. Gepoogd wordt om de kennis die door de jaren heen is opgebouwd op zo toegankelijk mogelijke wijze voor gebruikers van AERIUS te ontsluiten.

Er wordt een toelichting gegeven op de volgende vragen:

- Welke bronnen en emissiefactoren zijn er en wat betekenen ze? Hoe moet je ze interpreteren, en voor welke inzet en middeling gelden ze? Waar kan verdere informatie en onderbouwing gevonden worden?

- Hoe toepasbaar zijn de emissiefactoren voor verschillende specifieke situaties? In hoeverre zijn verschillen in de getallen goed onderbouwd en bruikbaar voor beoordeling van reductiemaatregelen in projecten die inzetten op een verschil in machines/voertuig en verschil in inzet/verkeerssituatie?
- Wat zijn de onderliggende metingen en methodes, en wat moet je doen om op hetzelfde kwaliteitsniveau, maar specifiek voor een bepaald project, zelf getallen in te kunnen vullen in AERIUS, vergelijkbaar met deze praktijkcijfers?

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
1	Inleiding	6
2	Achtergrond	9
2.1	De Emissieregistratie vormt een centrale en publieke database	9
2.2	Inzichten in emissies worden al decennia jaarlijks bijgesteld	9
2.3	De beperkte toepasbaarheid van gegevens in specifieke omstandigheden	11
2.4	Prognoses voor luchtkwaliteit en stikstofdepositie op basis van beleid	12
3	Toelichting bij de emissiefactoren.....	14
3.1	De basis van emissiefactoren.....	14
3.2	Uitstoot reducerende technologieën op dieselmotoren	15
3.3	De gemiddelde uitstoot, in de emissiefactoren, en de specifieke verschillen	16
3.4	De NH ₃ emissiefactoren	17
3.5	De NO ₂ emissiefactoren	18
3.6	Specifieke emissiebronnen en hun impact.....	18
3.7	Verdere tips voor het beoordelen en registreren van gegevens	19
3.8	Retrofit SCR-installaties voor reductie van NO _x emissies	20
3.9	De relatie tussen brandstof, CO ₂ en schadelijke uitstoot	21
3.10	De invloed van de uitlaatgaspluim op verspreidingsmodellen	22
4	Wettelijke limieten en categorieën voor dieselmotoren	24
4.1	Overzicht van emissielimieten voor verschillende toepassingen	24
4.2	Toelichting bij de NH ₃ limieten in combinatie met SCR-katalysatoren	29
4.3	Manipulatie van emissiecontrole systemen.....	29
5	Wegverkeer	30
5.1	Overzicht.....	30
5.2	SRM (GCN/GDN) versus ER emissiefactoren	31
5.3	Emissiefactoren gebaseerd op metingen aan wegverkeer	32
5.4	Beschikbaar gemaakte gegevens voor wegverkeer.....	32
5.5	De invloed van gewicht en belading specificaties op emissies	34
5.6	De invloed van veroudering van voertuigen op emissies	34
5.7	Aparte emissiefactoren voor kiepwagens (kippers) op de weg.....	35
5.8	Uitzonderingen die naar afwijkende emissies kunnen leiden.....	35
5.9	Samenvatting voor de gebruiker.....	36
6	Mobiele werktuigen	37
6.1	Overzicht.....	37
6.2	Beschikbaar gemaakte gegevens voor mobiele werktuigen	38
6.3	Definities die gebruikt worden	38
6.4	Afstemming en literatuur.....	39
6.5	Inzet specificaties	40
6.6	Uitzonderingen die naar afwijkende emissies kunnen leiden.....	40
6.7	Samenvatting voor de gebruiker.....	40
7	Binnenvaart	42
7.1	Beschikbaar gemaakte gegevens voor binnenvaart	42

7.2	Aanpak emissiefactoren, vanuit beschikbare gegevens	43
7.3	Inzet specificaties	44
7.4	Uitzonderingen die naar afwijkende emissies kunnen leiden.....	44
7.5	Samenvatting voor de gebruiker.....	44
8	Zeevaart	45
8.1	Het effect van zwaveleisen aan de brandstof of NO _x emissies.....	45
8.2	Beschikbaar gemaakte gegevens voor zeevaart	46
8.3	Aanpak voor het bepalen van de NO _x uitstoot van zeeschepen	47
8.4	Classificatie van zeeschepen	47
8.5	Afleiding van vermogen uit eigenschappen.....	48
8.6	Uitzonderingen die naar afwijkende emissies kunnen leiden.....	49
8.7	Samenvatting voor de gebruiker.....	49
9	Afsluiting	50
10	Literatuur	51
11	Ondertekening	56

1 Inleiding

TNO is verantwoordelijk voor het bijhouden van de laatste inzichten op het gebied van de schadelijke uitstoot van de sector verkeer en vervoer. Daaronder vallen wegvoertuigen, schepen, mobiele werktuigen, en andere bronnen zoals vliegtuigen en treinen. In dat kader meet TNO ook de praktijkemissies, en TNO is onderdeel van internationale samenwerkingen op het gebied van emissies van mobiele bronnen en van internationale werkgroepen, waar bijvoorbeeld de tekortkomingen van huidige emissiewetgeving en ontwikkeling van nieuwe worden besproken. Er is daardoor een goed overzicht, waar mogelijk, van het emissiegedrag van mobiele bronnen, en er is een continue ontwikkeling om dat verder te verbeteren. Nederland staat daarmee aan het voorfront van het verbeteren van de luchtkwaliteit, in het bijzonder als het gaat om de reductie NO_x uitstoot van dieselmotoren. Deze kennis wordt regelmatig getoetst in de internationaal verband, ook door de fabrikanten en gebruikers van voertuigen en machines. Dat maakt deze kennis van TNO internationaal breed gedragen en doorwrocht. Andere landen nemen de verantwoordelijkheid voor andere elementen in de wetgeving, zoals biobrandstoffen, fijnstofeisen, hybride aandrijving. Nederland heeft zich al decennia ingezet voor het verminderen van de NO_x uitstoot van dieselveertuigen en heeft daarmee aan de wieg gestaan van Europese en mondiale Euro-VI en RDE-wetgeving.

Lange tijd werden de normen, en de limieten daarin, als maatgevend beschouwd voor de praktijkemissies, en de verwachte reducties van emissies. Rond 2009 met de Euro-V vrachtwagens is dat gekanteld, met zeer hoge NO_x emissies op de weg, toen TNO dat voor het eerst goed kon meten. In 2012 is het oude beeld helemaal verlaten voor wegvoertuigen, met de introductie van Euro-5 dieselauto's op de weg. Deze voertuigen stoten meer NO_x uit dan hun Euro-4 voorgangers, ondanks de strengere norm. Dergelijke inzichten van TNO zijn ook de basis geweest voor het dieselschandaal, omdat in Amerika zulke afwijkingen illegaal waren. In Europa ligt de situatie moeilijker. Daardoor blijft de afwijking tussen norm en praktijk voortduren, ondanks de verbeteringen in de Europese wetgeving. Ook voor andere bronnen zijn er problemen, en zijn er ontwikkelingen om de geschatte emissies beter aan te laten sluiten bij de praktijk. Gegeven het feit dat het zeer moeilijk blijkt om emissiewetgeving effectief te maken, is het te verwachten dat de praktijkuitstoot zelf een complex en ongrijpbaar probleem blijft. Dit rapport probeert vooral simplistische beelden die kunnen leven bij partijen, bij te stellen.

Al deze kennis brengt TNO ook in voor de nationale luchtkwaliteitsmodellen, de Emissieregistratie, en de prognoses voor luchtkwaliteit. En dit loopt vaak voorop op andere inzichten in Europa, omdat daar vaak minder aandacht is voor de daadwerkelijke verschillen tussen norm en de brede praktijk. In vergelijking met andere landen in Europa is ook het proces van eerste metingen naar prognose in Nederland relatief kort, met één jaar tot twee jaar. Maar met de complexere motortechnologie, en de complexere metingen, staat deze kennisbasis wel onder druk, om de laatste inzichten goed te onderbouwen en een compleet beeld te houden van alle mobiele bronnen. Dit rapport probeert ook dat kader goed te schetsen, zodat de gegevens op waarde geschat kunnen worden.

Het is al meer dan twintig jaar dat luchtkwaliteitsmodellen en prognoses naar boven bijgesteld moeten worden, terwijl er vaak al conservatieve inschattingen gedaan worden in overleg met PBL. In de laatste jaren zijn deze bijstellingen beperkter geweest voor wegverkeer, maar vooral bij andere bronnen zijn er grotere tegenvallers.

Bijstellingen aan emissiefactoren worden over het algemeen conservatief uitgevoerd. De trend uit het verleden wordt meegewogen in de inschatting van de betrouwbaarheid en blijvende waarde van resultaten op basis van nieuwe metingen. Over het algemeen glijden de praktijkemissies af, na de eerste schonere voertuigen en machines. In de inschattingen wordt deze ruimte meegenomen. Zie bijvoorbeeld TNO Rapport 2016 R10520. Aan de andere kant is er een gebrek aan metingen op bijvoorbeeld schepen, en is het beeld daar verre van compleet. In dat geval worden er stappen gemaakt om de emissiefactoren dichter op de praktijk te laten aansluiten, door de beperkte beschikbare metingen, de kennis van de technologie en de ontwikkelingen daarin.

In opdracht van het RIVM zijn dit jaar de onderliggende emissiefactoren van wegverkeer, mobiele werktuigen, binnenvaart, en zeevaart geactualiseerd voor AERIUS. Deze getallen zijn consistent met de laatste inzichten zoals deze verwerkt zijn in de grootschalige concentratie- en depositiekaarten (GCN/GDN) van Nederland. Dit rapport geeft de achtergrond bij de actualisatie van deze cijfers.

De emissies van verkeer en vervoer relevant voor stikstofdepositie zijn NO_x (stikstofoxides), NO_2 (het stikstofdioxide aandeel in NO_x) en NH_3 (ammoniak). De NO_x emissies zijn veelal geassocieerd met het gebruik van dieselmotoren. De NO_2 fractie en NH_3 emissies hangen samen, voor deze sector, met het gebruik en het functioneren van verschillende typen katalysatoren voor de reductie van schadelijke component in uitlaatgassen.

Aandachtspunt 1

De NO_x uitstoot van de meeste dieselmotoren ligt in de praktijk 50% tot 500% hoger dan de wettelijke emissielimieten die bij de officiële test voor de motor gelden. De officiële test wordt meestal in het laboratorium uitgevoerd. Aanbeveling is, bij de invoer van eigen emissiegetallen in AERIUS, om niet uit te gaan van deze wettelijke emissielimieten of typekeuringsgegevens. De wettelijke eisen zijn niet representatief voor de praktijkemissies in de emissiefactoren van TNO die aan de basis liggen van nationale getallen.

Getallen worden voor verschillende doeleinden vastgesteld. Dat maakt ze in sommige gevallen, meer of minder geschikt voor andere toepassingen. Losse gegevens kunnen daarom op de verkeerde manier gebruikt worden. Dit rapport levert de context van de cijfers zoals deze door de Taakgroep Verkeer en Vervoer worden bijgehouden. De cijfers zijn in eerste instantie bepaald voor nationale totalen in de Emissieregistratie, en dat legt de focus op de grote bronnen.

Specifieke kleine bronnen, en specifieke inzet, hebben daarom beperkte onderbouwing, en zijn veelal deels gebaseerd op expert beoordeling van wetgeving, technologie en inzet. Normale, gemiddelde inzet van normaal materieel is het beste afgedekt door deze emissiefactoren.

Dit rapport geeft gebruikers en vergunningverleners van AERIUS de handvatten om de emissiegetallen op hun waarde te schatten en alternatieve getallen en inzichten langs de nationale en internationale meetlat te leggen. Daarnaast stelt het gebruikers en beoordelaars in staat om in te schatten wat de beperkingen zijn aan het gebruik van de emissiegetallen. In de Taakgroep Verkeer en Vervoer zit meer dan twintig jaar ervaring en ontwikkeling, vooral omdat NO_x emissies van dieselmotoren hoger zijn dan de wettelijke eisen. De afwijking is vaak specifiek voor de technologie en de inzet. Dit rapport doet een poging om de kennis die door de jaren heen is opgebouwd, op toegankelijke wijze te ontsluiten voor gebruikers van AERIUS en vergunningverleners.

Het is voor een berekening van een projecteffect met AERIUS niet altijd verantwoord om de nationale getallen te gebruiken die onder de Taakgroep Verkeer en Vervoer vallen. Voor specifiek deze getallen geldt dat de motoren, de inzet, de technologie, en de omstandigheden voor een specifiek project kunnen afwijken van de gemiddelden zoals deze voor de totalen bepaald worden. Maar een project specifiek resultaat zou wel beoordeeld moeten worden tegen de meest recente inzichten over de schadelijke uitstoot van machines in de praktijk.

Doel van dit rapport is om aan gebruikers van AERIUS een toelichting te geven op de volgende vragen:

- Welke bronnen en emissiefactoren zijn er en wat betekenen ze? Hoe moet je ze interpreteren, en voor welke inzet en middeling gelden ze? Waar kan verdere informatie en onderbouwing gevonden worden?
- Hoe toepasbaar zijn de emissiefactoren voor verschillende specifieke situaties? In hoeverre zijn verschillen in de getallen goed onderbouwd en bruikbaar voor beoordeling van reductiemaatregelen in projecten die inzetten op een verschil in machines/voertuig en verschil in inzet/verkeerssituatie?
- Wat zijn de onderliggende metingen en methodes, en wat moet je doen om op hetzelfde kwaliteitsniveau, maar specifiek voor een bepaald project, zelf getallen in te kunnen vullen in AERIUS, vergelijkbaar met deze praktijkcijfers?

Dit rapport is het overzicht en de leeswijzer voor andere informatie. Voor verdere details staat er een literatuurlijst achteraan in het rapport met de onderliggende studies. Met het project voor Emissieregistratie, de meetprogramma's voor het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat en de Europese Commissie en de internationale samenwerkingen en reviews zijn de huidige emissiefactoren de goede basis voor de praktijkuitstoot. Maar, met specifieke vragen en problemen is nader toegespitst onderzoek wellicht gewenst. Dit rapport geeft aan waar de grenzen liggen.

2 Achtergrond

De emissiefactoren die bij elkaar zijn gebracht hebben veelal hun oorsprong in verschillende onderzoeken in het kader van de Emissieregistratie.

De Emissieregistratie is een groot en langlopend project onder leiding van het RIVM om aan de verschillende internationale verplichtingen te voldoen in het kader van milieurapportages, in het bijzonder, verplichtingen omtrent het halen van Europese luchtkwaliteitsnormen (Richtlijn 2008/50/EG, betreffende de luchtkwaliteit en schonere lucht voor Europa), nationale emissieplafonds (NEC, Richtlijn 2016/2284/EG), Milieu-economische rekeningen (Verordening EU/691/2011), afspraken over grensoverschrijdende emissies (CLRTAP, Convention on Long-Range Trans-boundary Air-Pollution), transparantie volgens het Aarhus verdrag (Nederlands Tractatenblad 2001-73), en rapportages aan de UNFCCC op basis van het Kyoto verdrag.

2.1 De Emissieregistratie vormt een centrale en publieke database

In het kader van internationale en nationale verplichtingen wordt bijgehouden wat in Nederland de totale emissies zijn van schadelijke stoffen. Een overzicht daarvan is te vinden bij de Emissieregistratie. De Emissieregistratie verzamelt informatie over de emissies van circa 375 voor het milieubeleid relevante stoffen en stofgroepen naar zowel bodem, water als lucht; deze gegevens worden gecontroleerd, bewerkt en geregistreerd in de centrale database van de Emissieregistratie. De database bevat de gegevens van individueel geregistreerde puntbronnen (op basis van onder andere Milieujaarverslagen van bedrijven), diffuse bronnen (deze emissies worden berekend door taakgroepen) en waar deze emissies plaatsvinden. Dit geheel vormt de basis voor rapportage over de emissies van deze stoffen in Nederland. Via de website www.emissieregistratie.nl zijn de emissiegegevens voor iedereen in te zien.

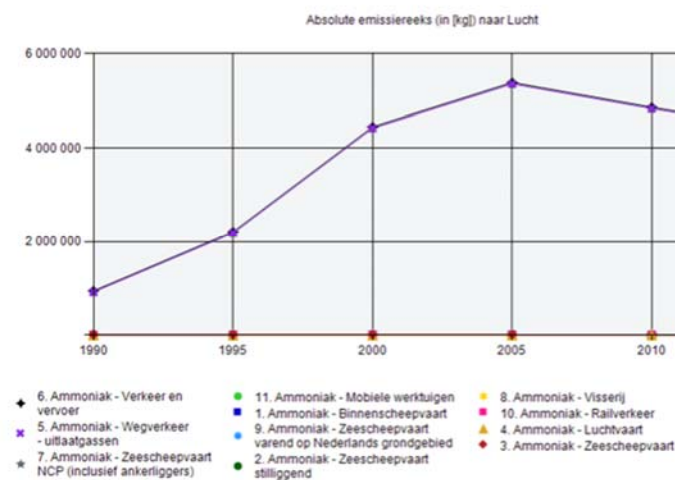
Binnen de taakgroep Verkeer en Vervoer vallen een aantal diffuse bronnen die belangrijk zijn voor de stikstofhuishouding in de Nederlandse natuur en leefomgeving. Dit rapport geeft nadere duiding bij deze bronnen van NO_x, NO₂ en NH₃ emissies, van wegvoertuigen, mobiele machines, binnenvaart en zeeschepen, zodat een gebruiker en beoordelaar de emissiegetallen op hun waarde kan schatten en zo nodig alternatieve getallen en inzichten langs de nationale en internationale meetlat kan leggen. De doelstelling van de Emissieregistratie is de jaarlijkse vaststelling van een dataset met eenduidige emissiegegevens waarover consensus bestaat en die voldoet aan de criteria: actualiteit, juistheid zonder systematische fouten, volledigheid zonder ontbrekende bronnen, transparantie, vergelijkbaarheid, consistentie en nauwkeurigheid. Door het opslaan van deze gegevens in één centrale database kan worden voldaan aan nationale en internationale rapportageverplichtingen van emissiegegevens.

2.2 Inzichten in emissies worden al decennia jaarlijks bijgesteld

De basis van de hier beschreven emissiefactoren ligt grotendeels binnen de Emissieregistratie. Emissieregistratie en de onderliggende meetprogramma's kennen een lange geschiedenis. De meeste meetprogramma's lopen al decennialang en daarom is het moeilijk een overzicht te geven van alle inzichten. De bijbehorende rapportages melden veelal alleen de laatste inzichten.

In dit rapport wordt gepoogd om op toegankelijke wijze een overzicht te geven van de meeste relevant aspecten voor de in AERIUS opgenomen standaard emissiefactoren voor NO_x, NO₂, en NH₃ van de bronnen die onder de taakgroep Verkeer en Vervoer vallen. Op deze manier stelt het gebruikers van AERIUS en vergunningverleners in staat om op een juiste manier de emissiegetallen van bronnen die onder de Taakgroep vallen te gebruiken en te interpreteren. Deze bronnen zijn wegverkeer, mobiele werktuigen, binnenvaart, zeevaart, luchtvaart en spoor, en zijn weer onderverdeeld in verschillende sectoren. De emissiefactoren van spoor en luchtvaart, binnen verkeer en vervoer, vallen buiten deze levering voor AERIUS. Deze worden gerapporteerd in de Emissieregistratie, en vormen wel onderdeel van de emissietotalen en ramingen, zoals weergegeven in Figuur 1 en Figuur 2 voor NO_x en NH₃ onderdeel van de sector Verkeer en Vervoer. Sommige bronnen, zoals een kipper (kiepwagen) op een bouwplaats, zijn voor de nationale totalen beperkt relevant en worden niet apart opgenomen in de standaard nationale rapportages. Maar dergelijke zware dieselmotoren kunnen wel een substantieel deel van de uitstoot leveren van een bouwproject met, bijvoorbeeld, veel grondverzet. Dergelijke bronnen zijn dus wel relevant voor de gebruikers van AERIUS en vergunningverleners en daarom wel apart opgenomen in deze rapportage.

Binnen de taakgroep Verkeer en Vervoer bestaat een lange traditie van openheid over de detailemissies van wegverkeer, naar voertuigcategorieën en wegtypes. Wegverkeer is op nationale schaal een grote bron van o.a. stikstof, die aan veel veranderingen onderhevig is, waardoor een jaarlijkse update noodzakelijk is. Voor mobiele werktuigen, binnenvaart, en zeevaart zijn de jaarlijkse rapportages minder uitgebreid, en de grotere rapportages worden minder frequent gepubliceerd. Deze bronnen hebben met de afnemende verkeersemissies groeiende aandacht. Met de update van wetgeving ongeveer elke vier jaar zijn de emissies van alle bronnen in ontwikkeling. Maar er zijn wel veel onderliggende cijfers beschikbaar die voor een belanghebbende relevant kunnen zijn. Deze maken daarom ook onderdeel uit van deze rapportage. Wel geldt een belangrijke beperking aan het gebruik van deze detailcijfers, zoals beschreven in de volgende paragraaf.



Figuur 1: Rapportage van de website www.Emissieregistratie.nl, onder de Verkeer en Vervoer, alle bronnen van NH₃ uitstoot in nationale jaarlijkse totalen. Wegverkeer is de dominante bron hierin (28-6-2020). Alleen wegverkeer heeft een bijdrage aan de NH₃ emissies, en dat groeit met de bredere toepassing van katalysatorttechnologieën.

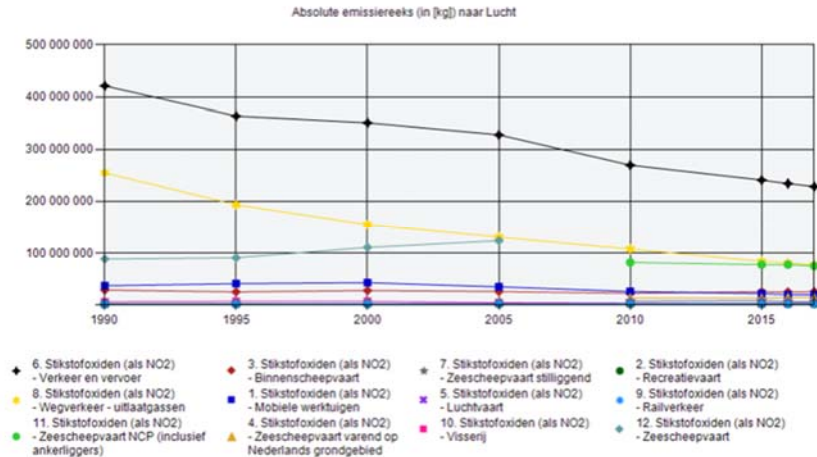
2.3 De beperkte toepasbaarheid van gegevens in specifieke omstandigheden

De gegevens die worden verzameld en verwerkt door de Taakgroep Verkeer en Vervoer voor de Emissieregistratie, zoals emissiefactoren, zijn bedoeld om nationale totalen van de uitstoot van broeikasgassen en luchtverontreinigende stoffen van Verkeer en Vervoer te bepalen en te rapporteren.

Voor projectberekeningen met AERIUS kunnen deze gegevens minder geschikt zijn. Een voorbeeld van zo'n gedetailleerdere toepassing is het onderscheid tussen twee type machines of voertuigen die beperkt worden ingezet in Nederland, omdat de onderliggende gegevens onvoldoende gedetailleerd en gedifferentieerd zijn om een dergelijke nauwkeurige vergelijking toe te staan. Bijvoorbeeld, zwaar beladen vrachtwagens (Euro-V en Euro-VI) op de snelweg hebben lagere NO_x emissies dan licht beladen vrachtwagens. Maar deze verschillen zijn niet toepasbaar in het geval van een bouwplaats. Vergelijkbaar kan een bouwmachine Stage IIIb, vervangen door een Stage V bouwmachine, NO_x reducties leveren, maar bij veel draaien bij lage motorlast zijn de voordelen beperkt. Zo zijn er legio voorbeelden waar verwachte effecten, wellicht op basis van de emissiefactoren zelf, in de juiste context, tot een andere conclusie leiden. Voor het grotere beeld zijn de emissiefactoren uitstekend toepasbaar, maar verschillen tussen emissiefactoren hebben mogelijk een andere oorzaak dan gedacht, omdat daar ook andere aspecten bij komen kijken. Samenvattend, deze emissiefactoren gebruiken om lagere emissies te bereiken door de inzet van ander materieel, met een lagere emissiefactor, kan mogelijk niet het gewenste effect geven. Als bijvoorbeeld, dezelfde arbeid, in kWh, door een grotere machine geleverd is, draait deze machine minder efficiënt en met reële risico's op hogere NO_x emissies dan gemiddeld. Dit wordt hieronder nader toegelicht.

Om de verwerking van de gegevens behapbaar te maken, worden er gemiddelden bepaald per relevante situatie. Dit zijn gemiddelden van de vloot, de inzet, de onderhoudsstaat, en het gedrag in elk van de veel voorkomende situaties die substantieel bijdragen aan de totale nationale uitstoot. Het is daarom veelal niet goed mogelijk om te interpoleren, toe te passen op andere dan de gedefinieerde situaties, of de details in de onderliggende categorieën te gebruiken. In dergelijke sommen is de kans groot dat er oneigenlijke en onbetrouwbare vergelijkingen gemaakt worden. Bij toepassing van deze cijfers voor andere doeleinden dan het berekenen van de nationale emissietotalen is het noodzakelijk om met de onderliggende gegevens, omstandigheden en metingen te vergelijken. De Taakgroep Verkeer en Vervoer, als verantwoordelijke voor deze nationale cijfers, is de partij die hierop goed toe kan zien.

Indien het type machine en de inzet gebruikelijk is kan de emissiefactor vaak zonder beperkingen toegepast worden. Indien de keuze wordt gemaakt om een andere machine toe te passen, omdat daar lagere emissiefactoren bij horen, is het de vraag of de inzet daartoe wel aanleiding geeft, en het voordeel niet teniet wordt gedaan. Indien een machine of motor aangepast is, of voorzien van een retrofit-installatie, om lagere emissies te halen, dan zijn emissiemetingen in de praktijk noodzakelijk om de emissies vast te stellen. Het resultaat van een laboratoriumtest, of een korte proef, volstaan dan niet.



Figuur 2: Rapportage van de website www.Emissieregistratie.nl, onder de Verkeer en Vervoer, alle bronnen van NO_x uitstoot in nationale jaarlijkse totalen (28-6-2020). Wegverkeer was de dominante bron voor lange tijd, maar met de daling van deze emissies worden andere bronnen meer relevant. Deze onderverdeling is de standaard voor Emissieregistratie.

Dit rapport zal geen antwoord geven op alle vragen omtrent emissiebronnen en emissiefactoren: de gemiddelde emissie van een gemiddelde bron, voor een gemiddelde inzet, maar het is vooral bedoeld als basis voor achterliggende rapportages en cijfers. Emissiefactoren geven een goed initieel inzicht in de bijdrages van verschillende bronnen aan luchtkwaliteit en stikstofdepositie. Het geeft een ondergrens voor het gebruik van alternatieve cijfers en inzichten.

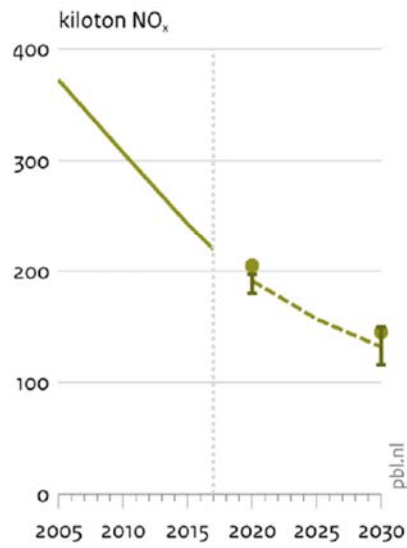
2.4 Prognoses voor luchtkwaliteit en stikstofdepositie op basis van beleid

De emissiefactoren per machine, voertuig of vaartuig, zijn slechts een deel in het totale beeld voor luchtkwaliteit. De aantallen en inzet van de verschillende machines, voertuigen en vaartuigen verandert in de loop van de tijd, gestuurd door economische ontwikkelingen en beleid. Tot op zekere hoogte, bij middeling over categorieën komt dat terug in de emissiefactoren die opgeleverd zijn. In het bijzonder de emissiefactoren van binnenvaart en zeevaart zijn zo bepaald.

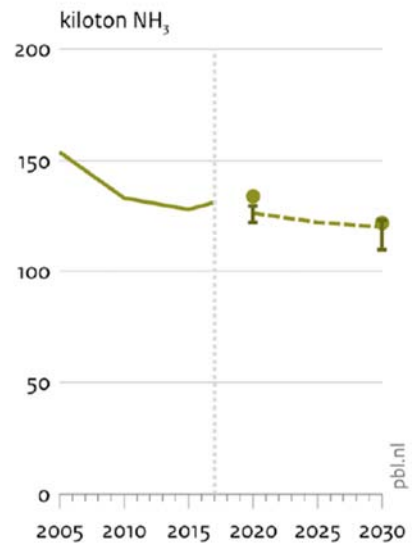
In het algemeen, dienen luchtkwaliteitsmodellen ertoe om een inschatting te kunnen maken van de toestand van de luchtkwaliteit in de toekomst. De huidige situatie en het verleden kunnen grofweg afgeleid worden uit de meetgegevens, maar prognoses zijn nodig voor een inschatting van de toekomstige situatie. De prognoses van de emissies zijn gebaseerd op inschattingen van ontwikkelingen en effecten van beleid. Hierin is PBL de eerste verantwoordelijke, omdat zij de effecten van beleid vertalen naar ontwikkelingen in de vloot van voertuigen, machines en schepen en hun inzet. Dit staat deels los van de onderliggende emissiefactoren per motor. Op dit moment worden er slechts beperkt details gepubliceerd van deze prognoses. Er is geen vraag en opdracht om deze details beschikbaar te maken. PBL publiceert apart haar Emissieramingen en Klimaat en Energie Verkenningen (KEV), zie Figuur 3. Daar waar een toekomstige situatie vergeleken moet worden met een referentiesituatie, zal deze toekomstige referentiesituatie uit de inschattingen van PBL volgen.

Emissie luchtverontreinigende stoffen

Stikstofoxiden



Ammoniak



Figuur 3: PBL emissieramingen 2019.

3 Toelichting bij de emissiefactoren

Praktijkmetingen zijn de basis van de inschattingen van de gemiddelde uitstoot in normaal gebruik. De gemiddelde uitstoot van een homogene groep machines, voertuigen of vaartuigen is samengevat in een emissiefactor. Dit rapport focust op machines, voertuigen en vaartuigen met dieselmotoren. Dit is de grootste bron van NO_x emissies, waarbij de wetgeving de NO_x emissies in praktijk beperkt reduceert. Andere motoren, bijvoorbeeld op benzine, bij tuingereedschap, of LNG, voor een aantal binnenvaartschepen, komen beperkt voor. Maar dit rapport legt de link tussen de problemen met de belangrijkste bronnen en de consequenties voor de praktijkemissies van NO_x en NH₃, met relevantie voor stikstofdepositie. De aandacht is daarom voor dieselmotoren als de grootste bron, in verschillende sectoren.

3.1 De basis van emissiefactoren

De uitstoot van machines is beperkt te zien of te ruiken. Als dat wel zo is dan is de uitstoot ver boven elke limiet die voor een moderne machine geldt. Maar, zoals bekend van het dieselschandaal, dieselmotoren presteren over het algemeen voor NO_x emissies niet zo goed als ze volgens de typekeurdocumentatie zouden doen. Bij de beoordeling van de uitstoot van machines en dieselmotoren, is het daarom belangrijk om uit te gaan van de praktijkuitstoot, en dus niet van de resultaten van een laboratoriumtest, een certificaat, of een beperkte test in het veld, die niet overeenkomt met de normale inzet van de machine.

Voor de nationale cijfers, zoals de Emissieregistratie en de GCN/GDN rapportages, wordt gebruikt gemaakt van metingen in de praktijk. In alle nationale modellen wordt voor de gemiddelde machine, en de gemiddelde inzet gebruik gemaakt van deze gegevens. De emissiefactoren zijn daarom veelal hoger dan de wettelijke limieten bij de officiële test. De ervaring met de uitstoot van wegvoertuigen ligt aan de basis van veel van deze kennis. Voor zowel dieselpersonenauto's als dieselvrachtwagens heeft de kennis van TNO in belangrijke mate bijgedragen aan de verbeteringen van de wettelijke test- en controlemethodes van voertuigen die recent van kracht zijn, en verdere verbeteringen zijn te verwachten. Voor andere dieselmotoren zijn de testmethode in het laboratorium, en de evaluatiemethode van de testresultaten, de grootste tekortkoming aan de wetgeving die ervoor zorgt dat vooral de NO_x uitstoot in de praktijk ver boven de limiet ligt. Metingen aan mobiele werktuigen en schepen door de jaren heen bevestigen dit beeld voor alle bronnen.

Binnen Europa is TNO betrokken bij de verschillende onderzoeken en ontwikkeling van emissiewetgeving. Op het moment zijn de eisen aan vrachtwagens de voorloper op andere sectoren. De problemen en oplossingen voor het beperken van deze NO_x emissies is deels de blauwdruk voor andere sectoren.

De verwachting is dat de RDE (*Real Driving Emissions*) wetgeving voor personenauto's de nieuwe standaard wordt voor toekomstige emissiewetgeving. In het bijzonder wordt momenteel onderhandeld in Brussel over Euro-7/VII wetgeving voor licht en zwaar wegverkeer, die rond 2026 van kracht wordt.

3.2 Uitstoot reducerende technologieën op dieselmotoren

Problemen met dieselmotoren hangen samen met de uitstoot reducerende technologie die daarvoor wordt gebruikt. Daarbij moet onderscheid gemaakt worden tussen passieve technologie, zoals een roetfilter, een oxidatie katalysator, en actieve technologieën, die gemoduleerd kunnen worden tijdens het gebruik, zoals EGR (Exhaust Gas Recirculatie), SCR (Selective Catalyst Reaction) en injectievertraging.

Passieve technologie heeft mogelijk negatieve, maar constante, bijeffecten. In dit geval is de verhoogde NO₂ fractie in NO_x de belangrijkste. De dieseloxydatie katalysator (DOC) zorgt voor hoge NO₂ fracties, deze wordt gebruikt om de fijnstofemissies te verlagen. Vanaf 2011 (Stage IIIb) worden werkzame DOC's gebruikt, en daarmee is de NO₂ fractie veelal hoger (rond 30%) ten opzichte van eerdere technologie (rond 7%). Voor wegvoertuigen is een DOC gangbaar vanaf midden jaren negentig van de vorige eeuw, met de invoering van Euro-2.

Daarnaast is SCR de grootste factor die de NO_x uitstoot beïnvloedt. Maar de SCR moet warm zijn om goed te functioneren (boven 180°C). In de wettelijke test voor o.a. mobiele werktuigen is dat geen probleem (motoren mogen zelfs van tevoren warmdraaien). Maar in de praktijk is het voor een aantal toepassingen juist een probleem om deze temperatuur te behouden door bijvoorbeeld inzetprofielen met lagere motorlast. Dit hangt dus beperkt samen met de buitentemperatuur, maar vooral met de inzet. De SCR is gangbaar op vrachtwagens vanaf 2007, op mobiele werktuigen vanaf 2014 en op dieselpersonenauto's vanaf 2018. De werking ervan is afgelopen jaren verbeterd met strengere wetgeving. Een nadeel van SCR is dat het ook een ureumoplossing gebruikt, die kan leiden tot NH₃ uitstoot. Des te meer de SCR werkt, des te groter de kans dat er ook uitstoot van NH₃ plaatsvindt.

Voor de nationale cijfers wordt er gemiddeld over de verschillende technologieën, de verschillende inzetten en de verschillende vermogensklassen. Dit geeft voor de nationale totalen van de uitstoot van NO_x en NH₃ redelijke voorspellingen, gegeven de relevantie van de verschillende groepen dieselmotoren. Maar voor een willekeurige locatie, een kleine groep van dieselmotoren en een specifieke inzet kan de uitstoot sterk afwijken van dit gemiddelde. Bijvoorbeeld voor de inzet van openbaar vervoer bussen binnen een concessie, wat vaak een grote groep identieke bussen betreft, is het effect navenant. Maar met ontbrekende metingen zijn de emissiefactoren de meest betrouwbare basis. In gevallen waarin er bijzondere afstellingen en inzet verwacht wordt, zou een toegespitst meetprogramma niet misstaan.

Aandachtspunt 2

De spreiding tussen de NO_x uitstoot van motoren die aan dezelfde eisen moeten voldoen lopen op tot een factor 2 tot 5. De grote verschillen gelden vooral voor nieuwere motoren, vooral na 2010, waarna NO_x eisen strenger zijn geworden. Praktijkmetingen die de daadwerkelijke inzet representeren zijn de enige manier om een goede inschatting te krijgen van de emissiefactoren.

3.3 De gemiddelde uitstoot, in de emissiefactoren, en de specifieke verschillen

Bovengenoemde elementen zorgen ervoor dat als de daadwerkelijke uitstoot, van NO_x, NO₂, en NH₃, van een beperkt en specifiek park van dieselmotoren bepaald zou moeten worden, er rekening gehouden moet worden met de volgende elementen:

1. De verschillende wetgeving en testprocedures waaronder de motoren vallen: lichte voertuigen, zware voertuigen, mobiele werktuigen, Rijnvaartcommissie, of IMO. Vaak hangt dit sterk samen met het vermogen en de werking van de machine, als motor (Non Road Engines: NRE), als generator (Non Road Generator: NRG), als scheepsmotor (Inland Waterway Propulsion: IWP), als scheepsgenerator (Inland Waterway Auxiliary: IWA), als locomotief (Rail: R), of als treintractie (Rail Card: RC).
2. De emissie-reducerende technologie die toegepast wordt bij de motor, zoals boven benoemd: EGR (Exhaust Gas Recirculation), SCR (Selective Catalyst Reaction), DOC (Diesel Oxidation Catalyst), of DPF (Diesel Particulate Filter).
3. De inzet van de machines / voertuigen, in combinatie met de type motoren en de toegepaste technologie. Langere periodes van lage motorlast zijn hierin belangrijk omdat de emissies daarvan hoog kunnen zijn. Een beoordeling op basis van emissiefactoren in g/kWh, ofwel, op basis van de geleverde arbeid, volstaat in dit geval niet.

Alhoewel praktijkmetingen het beste beeld geven van de uitstoot in een meer specifieke situatie, kan zonder of met een beperkt aantal praktijkmetingen wel een inschatting gemaakt worden van de uitstoot. Voor een goede beoordeling van de uitstoot, als er geen praktijkmetingen worden gedaan, is het essentieel om de gegevens in bovenstaande lijst te verzamelen. In veel gevallen moet de motorkap open worden gemaakt om het motortype definitief te achterhalen. Het komt wel eens voor dat een oudere motor wordt ingebouwd in een nieuwere machine. Naarmate in meer detail naar machines gekeken wordt, komen dergelijke zaken boven tafel. De leeftijd van de machine is dus niet automatisch maatgevend voor de norm van de motor. Ook bestaat de mogelijkheid dat defecten aan de motor niet op de juiste wijze zijn gerepareerd, met substantieel hogere praktijkemissies tot gevolg.

De inzet in de praktijk kan ingeschat worden door:

1. Het bijhouden van het brandstofverbruik van de motoren.
2. Het bijhouden van het AdBlue verbruik van de motoren, in het geval van SCR.
3. Het bijhouden van de draaiuren van de motoren.
4. Het loggen van het motortoerental en, indien mogelijk, instantaan brandstofverbruik of motorkoppel.

Aandachtspunt 3

Voor dieselmotoren met SCR zijn de langere periodes van stationair draaien funest voor de NO_x emissiereductie van de SCR. Na enige minuten nemen de NO_x emissies toe, omdat er geen AdBlue meer in de SCR wordt geïnjecteerd en de NH₃ buffer van de SCR leeg raakt. En als nadien de motor belast wordt blijft gedurende enige minuten de uitstoot hoog, omdat de reagensbuffer van de SCR leeg is.

Deze gegevens zijn slechts een hulpmiddel voor het bepalen van de schadelijke uitstoot. In gevallen van emissiefactoren in termen van g/kWh, zoals voor mobiele werktuigen, per geleverde arbeid, kan deze arbeid mogelijk bepaald worden uit het brandstofverbruik. Bijvoorbeeld, er is een grove relatie tussen brandstofverbruik, draaiuren en geleverde arbeid. Zie bijvoorbeeld TNO rapport MON-RPT-033-DTS-2008-03854 en

TNO rapport TNO 2016 R10419v3. Als twee van deze gegevens bekend zijn, kan de derde geschat worden:

$$\begin{aligned} \text{brandstofverbruik [liters]} \\ &= 0.245 * \text{arbeid [kWh]} \\ &+ (0.52 + 0.0034 * \text{maximaal vermogen [kW]}) * \text{draaiuren [h]} \end{aligned}$$

Maar noch de arbeid noch de draaiuren alleen zijn bepalend voor de totale NO_x uitstoot. Per liter brandstof is de NO_x uitstoot typisch 3 of meer keer hoger bij stationair draaien en lage last, dan bij hogere vermogens. Dus de verdeling van draaiuren over de verschillende motorlasten is belangrijk voor de uitstoot. Verder zijn de normen voor de meeste machines in termen van arbeid: g/kWh. Bij stationair draaien is er helemaal geen arbeid (kWh=0), maar wel NO_x (en CO₂) uitstoot. Deze wordt niet, of beperkt meegenomen in de vergelijking met de wettelijke limieten. Dat is een grote bron van afwijking tussen de norm en de praktijk. In de wettelijke test zit vaak een korte tijd of klein aandeel stationair draaien.

3.4 De NH₃ emissiefactoren

De totale NH₃ emissies van Verkeer en Vervoer is slechts een kleine bron in de totale NH₃ emissies van Nederland. Dit komt volledig voor rekening van wegverkeer op dit moment. Er is daarom beperkt aandacht geweest voor NH₃ emissies van voertuigen en andere motoren. Daarom zijn deze getallen deels gebaseerd op internationale cijfers. Daarin spelen benzineauto's een dominante rol. Maar met de introductie van SCR-installaties op de modernste dieselmotoren is de kans op hoge NH₃ emissies van dieselmotoren substantieel. TNO meet daarom sinds 2010 min of meer standaard de NH₃ emissies mee met de NO_x emissies.

TNO levert de NH₃ emissiefactoren van wegverkeer aan het RIVM om op te nemen in de modellen voor stikstofdepositie. RIVM heeft deze gegevens de laatste jaren gepubliceerd. Vanuit de Emissieregistratie zijn NH₃ emissies van wegverkeer een kleine bron en daarom is de onderbouwing van NH₃ emissiefactoren beperkt.

Wel zijn er recent verbeteringen geweest in de meettechnieken die TNO toepast voor NH₃ emissies.

Aandachtspunt 4

Een gebruiker of toezichthouder kan grotere problemen met NH₃ emissies op individuele machines zelf herkennen. Ammoniakgas, NH₃, heeft een penetrante geur die al bij lage concentraties, van ongeveer 5 ppm, te ruiken is. De wettelijke limiet voor vrachtwagenmotoren, in het laboratorium, is nu 10 ppm. Dus als er een ammoniakgeur te ruiken is in de buurt van een dieselmotor met SCR-installatie, is er waarschijnlijk sprake van een te hoge dosering van AdBlue, met een NH₃ slip tot gevolg die ruim boven de goede werking van de SCR ligt. Dergelijke problemen komen regelmatig voor, bij vrachtwagens en bouwmachines. Voor vrachtwagens zijn daarvoor emissiefactoren beschikbaar.

3.5 De NO₂ emissiefactoren

Voor de nationale totalen, in de Emissieregistratie, spelen NO₂ emissies op zichzelf geen rol. De NO₂ is onderdeel van NO_x (NO en NO₂ samen) omdat NO en NO₂ in de lucht in elkaar worden omgezet. Voor lokale luchtkwaliteit en stikstofdepositie is de NO₂ fractie in de uitstoot wel relevant. Daarom worden er wel gemiddelde NO₂ fracties per hoofdcategorie bepaald in de GCN/GDN levering. Maar detailcijfers zijn tot nu toe niet beschikbaar gesteld. Omdat NO₂ geen wettelijk vereiste is, is er beperkter aan gemeten, maar de NO₂ fractie kan variëren tussen 0% en 70% afhankelijk van de diesel katalysatortechnologie. Uit de dieselmotor zelf, bij normale verbranding, komt ongeveer 7% NO₂, ook bij schepen en bouwmachines. Maar NO₂ is een belangrijk onderdeel in de werking van zowel het roetfilter (DPF) als de SCR. Dit zorgt voor een grote variatie in NO₂ fracties, ook in samenhang met de regelstrategie van de SCR. Als de SCR goed werkt, wordt daarmee ook veel NO₂ omgezet, met zeer lage fracties van NO₂ tot gevolg.

Met dit rapport, voor AERIUS, wordt een complete set met detail NO₂ emissiefactoren beschikbaar gemaakt voor wegverkeer. TNO meet sinds 2007 min of meer standaard NO₂ emissies mee. Vooral in latere jaren, met SEMS (sensorebaseerde) metingen, wordt de NO₂ fractie, niet bepaald, en is de NO₂ fractie gebaseerd op minder metingen, met PEMS (Portable Emission Measurement System, wettelijke mobiele meettechniek) en in het laboratorium, dan NO_x. De samenhang tussen de technologie en NO₂ fractie is sterk. In het bijzonder hebben verschillende retrofitechnologieën voor fijnstofreducties, grote variaties in de NO₂ fractie tot gevolg. Dit geldt vooral voor motoren met bouwjaar tussen 2000 en 2014. Dit wordt bijvoorbeeld waargenomen bij bussen met een EEV norm.

3.6 Specifieke emissiebronnen en hun impact

De nationale totalen van NO_x en NH₃ emissies zijn opgebouwd uit een overzicht van alle bronnen in alle sectoren. Zie ook Figuur 1 en Figuur 2.

Voor NO_x uitstoot zijn de verschillende dieselmotoren, met vergelijkbare technologie en inzet, verdeeld in verschillende sectoren. Maar dat neemt niet weg dat deze motoren een grote bron zijn van de totale NO_x uitstoot. Niet zozeer de sectoren maar de dieselmotortechnologieën zijn bepalend voor de uitstoot. De verandering in NO_x uitstoot over de jaren hangt samen met de introductie van nieuwe wetgeving voor de verschillende categorieën motoren.

Aandachtspunt 5

Over het algemeen moet gespecialiseerde meetapparatuur gebruikt worden om hoge NO_x uitstoot in de praktijk vast te stellen. Soms is het mogelijk om het "bouquet" van NO_x (NO: zoet en NO₂: scherp, chemisch) uitstoot te ruiken als men in de buurt van de uitlaat komt. De NO₂ is vaak dominant in de geur, ondanks het kleinere aandeel. In het bijzonder bij de Euro-5 bestelauto's (bouwjaren 2010-2015) is het herkenbaar. Dat gaat vaak om voertuigen die de wettelijke limieten met een factor 5 of meer overschrijden in de praktijk. Bij zeer hoge concentraties is de bruine kleur van NO₂ zichtbaar. Bij hoge concentraties is NO₂ dodelijk, bijvoorbeeld bij ongevallen in gierputten.

3.7 Verdere tips voor het beoordelen en registreren van gegevens

Er worden soms technische oplossingen aangeboden voor het reduceren van de uitstoot die in praktijk helemaal niets uithalen. In het bijzonder worden toevoegingen aan de brandstof, magneten in de brandstofleiding en dergelijke oplossingen bedoeld. Zonder praktijkmetingen kan niet worden bewezen dat hieraan significante reducties van de NO_x uitstoot toe te rekenen zijn.

Een betere kwaliteit dieselbrandstof, zoals synthetische diesel, kan mogelijk met oudere motoren wat verbetering geven, maar ook dat is niet een gegeven en hangt af van vele details. Voor moderne motoren, met een goedwerkende SCR, valt daarvan minder voordeel te verwachten. In de nationale cijfers wordt geen rekening meer gehouden met de variaties in soorten diesel. Tot dusverre is er nauwelijks aanleiding geweest verschil te maken. Dit is deels ingegeven door de ervaringen die hierboven zijn aangestipt. Ook hier moet men zich bewust zijn dat wat goed is voor de reductie van broeikasgassen niet automatisch ook een voordeel geeft voor de uitstoot van NO_x, NO₂, of NH₃. Ook moeten nu bijna alle motoren draaien op gewone diesel (EN590), met lage zwavel en andere specificaties. Vergelijkingen met andere referentiebrandstoffen, zoals de oude rode diesel of hoogzwavelige "Referentie I" brandstof in Amerika, is geen goede vergelijking. Die brandstoffen zijn al lang niet meer gangbaar in Europa.

In veel gevallen is het noodzakelijk om emissies te meten of monitoren in de praktijk:

1. Met dezelfde, of een vergelijkbare motor, in dezelfde praktijkomstandigheden.
2. Via een referentiesituatie die past bij de huidige situatie, dus geen oude motoren, afwijkende brandstoffen, of afwijkingen in motorbelastingen die dichter bij de wettelijke eisen dan bij de praktijk liggen.

3. Met voldoende herhalingen om in de inherente spreiding van de meetdata de verschillen in uitkomsten en de betrouwbaarheid op waarde te kunnen schatten.
4. Ook zonder maatregelen worden er veel nieuwere, schonere motoren aangeschaft. Het is daarom noodzakelijk een maatregel waarbij er nieuwe motoren gebruikt worden te vergelijken met de autonome vergroening over dezelfde periode, en niet deze motoren vergelijken met oude motoren, en het verleden.

Een AdBlue vuldop is een goede aanwijzing dat een motor uitgerust is met een SCR-installatie.

Registratie van motoren is ook een belangrijk onderdeel van de tips voor mobiele werktuigen en schepen. Een foto van het motorplaatje (zie Figuur 4) van mobiele werktuigen en schepen is bijna noodzakelijk om zeker te weten dat de motorklasse juist is vastgesteld. Zonder dit bewijs, is de kans groot dat de registratie afwijkt van het daadwerkelijke machinepark.



Figuur 4: Het motorplaatje, waarop de typekeuring volgens Europese Richtlijn 97/68/EC (Stage IIIa, Stage IIIb en Stage IV) genoemd staat. Uit de datum 2 april 2012 en het vermogen volgt dat deze motor aan Stage IIIb limiet van 2 g/kWh moet voldoen in de officiële test.

3.8 Retrofit SCR-installaties voor reductie van NO_x emissies

In de huidige emissiefactoren zitten geen getallen voor retrofit SCR-installaties. In het geval van retrofit installaties moeten daarom eigen getallen gebruikt worden. Maar het is belangrijk om dat op basis van vergelijkbare praktijktesten te bepalen. In het verleden zijn er wel retrofit installaties getest, maar met de beperkte uitrol van SCR retrofit in Nederland was er geen noodzaak om nationale getallen op te stellen. Wel heeft Nederland actief meegewerkt aan een UNECE regelgeving Regulation 132 voor het beoordelen van SCR retrofit installaties. Het is niet bekend of er ooit een installatie gekeurd is volgens deze standaard.

Retrofit SCR-installaties bestaan al lange tijd. Vooral bij bussen is er veel ervaring, bijvoorbeeld in London en Kopenhagen.

Meer dan tien jaar geleden is er UNECE regelgeving gemaakt om de effectiviteit in het laboratorium te certificeren. Voor de toepassing op bouwmaschinen zijn er wel wat zorgen. De verwachting is dat de NO_x reductie-efficiëntie tussen de 20% en 70% ligt in het geval van een goedwerkende installatie. Dit hangt samen met de typische lage en dynamische motorbelasting van veel mobiele machines.

Een laboratoriumtest, of een kortlopende test in het veld, zal niet goed de reductie-effectiviteit bij normale inzet weergeven. Maar het is niet nodig om zich op dergelijke testen te baseren. Een goede retrofit-installatie kan verschillende zelfchecks hebben voor de effectiviteit in de praktijk en dat ook via telematica rapporteren. Bij een oude dieselmotor, zoals bij veel mobiele werktuigen, is een "closed-loop" oplossing noodzakelijk omdat de NO_x massaastroom, en de buffering in de SCR, uit de motor moeilijk te achterhalen is. Dat vraagt de plaatsing van twee NO_x sensoren: voor en na de SCR-installatie.

Een goede retrofit SCR-installatie is dus waarschijnlijk zelf in staat om de NO_x reductie in de praktijk te rapporteren. De NO_x sensor na de SCR, bijvoorbeeld in combinatie met de toerentallen van de motor, geeft een zeer goede indicatie van de daadwerkelijke NO_x uitstoot naar de lucht. In London is het een vereiste voor subsidie voor SCR retrofit installaties op bussen, en toegang tot de stad, dat de NO_x concentraties openbaar gerapporteerd worden. Een dergelijke eis zou in Nederland ook kunnen gelden voor het toekennen van NO_x uitstootreducties, voor gebruik bij vergunningsaanvragen, op basis van retrofittechnologie. Ook in Kopenhagen kon iedereen via een app meekijken met de uitstoot van individuele bussen, dit wordt beëindigd omdat er nu nieuwere bussen gebruikt worden zonder retrofit installaties.

De kosten van de monitoring van de NO_x praktijkuitstoot (die een paar honderd Euro bedragen) van een retrofit-installatie zijn slechts een fractie van de kosten van een dergelijke installatie, die kunnen oplopen van duizenden tot tienduizenden Euro's.

Ook een controle op brandstofverbruik en AdBlue verbruik geeft goede inzichten in de reductie van NO_x emissies.

3.9 De relatie tussen brandstof, CO₂ en schadelijke uitstoot

Het brandstofverbruik en de CO₂ uitstoot van machines zijn onderling gerelateerd, omdat de koolstof in de brandstof (ongeveer 85% van het gewicht van de brandstof) bijna geheel in CO₂ wordt omgezet. Daardoor komt 1 kilogram diesel overeen met 3,1 kilogram CO₂, en 1 liter diesel met 2650 gram CO₂. De energie die beschikbaar is voor het voertuig bij verbranding van de brandstof, oftewel de lage stookwaarde, is rond de 43 MJ/kg. De relatie tussen brandstof en CO₂ aan de ene kant en arbeid in kWh aan de andere kant varieert met de inzet van de motor. Bij hoge motorlast heeft een grote, moderne dieselmotor een efficiëntie van ongeveer 41%, en wordt 43 MJ/kg stookwaarde omgezet in 17,6 MJ/kg (ofwel 4,90 kWh/kg) nuttige arbeid. Dat vertaalt in 204 g brandstof per kWh. Bij normaal lagere motorlast moeten hierbij de interne verliezen opgeteld worden, dat geeft een praktijkefficiëntie voor gemiddelde inzet. Deze getallen zijn opgenomen in de emissiefactoren.

Voor kleinere en oudere motoren ligt dat een paar tot een tiental procenten lager.

Bij lagere motorlast neemt het brandstofverbruik per geleverde arbeid sterk en onbegrensd toe. Bij stationair draaien wordt er helemaal geen arbeid geleverd maar wel brandstof verbruikt en is de motorefficiëntie in dat geval dus nul.

De schadelijke uitstoot van oude motoren gaat grofweg proportioneel met het brandstofverbruik, met een toename in de NO_x emissies per liter brandstof bij lage vermogens. Voor nieuwe motoren met SCR is deze toename veel dramatischer.

De uitlaatgasstroom varieert in eerste instantie met het toerental van de motor. De beperkende factoren zijn vooral de toepassing van EGR, waardoor de gasstroom lager wordt, en het smoren van de gasstroom bij motoren met SCR om de warmte te behouden. Dus voor oude motoren is de uitlaatstroom grofweg:

$$\begin{aligned} \text{Massastroom [kg/h]} \\ &= 2.2 * \frac{(\text{buitentemperatuur [C]} + 273)}{273} * \text{toerental [min}^{-1}] \\ &* \text{cilinderinhoud [liter]} \end{aligned}$$

Voor moderne motoren kan dat tot de helft lager zijn, maar ook hoger als de motor drukvulling heeft door een turbo. De temperatuur van het uitlaatgas bij hoge motorbelasting ligt tussen de 200 en 300° C. Bij lage belasting kan de temperatuur zo laag zijn als 100° C. Door de redelijk constante uitlaatgasstroom kan een goede eerste indicatie gegeven worden van de schadelijke uitstoot van NO_x en NH₃ door de concentratie te meten en de toerentallen bij te houden. Het is gebruikelijk om de NO_x uitstoot uit te drukken in de NO₂ equivalenten. De NO_x (2,553 g/l) uitstoot is daarom 1,59 keer zwaarder dan diesel uitlaatgas (1,2943 g/l).

In veel gevallen hebben sectoren zowel een milieupgave en een klimaatopgave. Daarvoor is het verband tussen de CO₂ uitstoot en de NO_x uitstoot relevant. Er is een sterke relatie tussen beide, voor een gegeven machine in een gegeven inzet. Bij een andere inzet kan de NO_x emissies per kilogram CO₂ snel tot 50% variëren. Voor machines in verschillende wetgevingsklassen kunnen schadelijke emissies per kilogram CO₂ al gauw een factor 2 tot 10 variëren.

3.10 De invloed van de uitlaatgaspluim op verspreidingsmodellen

In de verspreidingsmodellen voor stikstofdepositie wordt er soms ook gebruik gemaakt van de warmte-inhoud en debiet van de uitlaatgasstroom. Over het algemeen worden deze gegevens niet beschikbaar gemaakt voor mobiele werktuigen en voertuigen. Er zijn beperkingen aan generieke gegevens voor deze bronnen, vanwege de dynamische motorbelasting, die voor schepen veel constanter is.

In de verspreidingsmodellen wordt soms ook hoogte van de uitstoot, debiet, uitlaatgastemperatuur en warmtecapaciteit gebruikt. Voor dieselmotoren varieert dat met technologie en inzet. Vooral bij lage motorlast kan het uitlaatgas lage temperaturen hebben, van rond de 150° C, bij alle soorten dieselmotoren en inzet, en beperkt beïnvloedt door de uitlaatconfiguratie. Dit komt door de hoge lucht-brandstofverhouding (lambda-waarde) tussen 5 en 10. Hierdoor zit er ook minder waterdamp in het uitlaatgas, dat daardoor ook een lagere warmtecapaciteit heeft.

Een moderne dieselmotor heeft vaak ook EGR. Deze zorgt ervoor dat de lucht-brandstofverhouding lager is, de temperatuur wat hoger (maar dat laatste is beperkt door de EGR-koeling) en het debiet lager is.

Hierdoor is het nauwelijks te voorspellen wat de thermodynamische eigenschappen zijn van het uitlaatgas van een moderne dieselmotor en hoe deze in de tijd fluctueert. Ook correleert de NO_x emissie sterk met de bedrijfsoperatie van de motor en kan warmer gas zowel hogere als lagere NO_x concentraties bevatten voor een specifieke motor. In het bijzonder is het verschil tussen motoren met en zonder SCR opvallend. Zij vertonen tegenovergesteld gedrag: Warm uitlaatgas met veel water en CO₂ heeft vaak lagere NO_x met een SCR-installatie.

4 Wettelijke limieten en categorieën voor dieselmotoren

De wettelijke NO_x limieten voor dieselmotoren zijn over het algemeen substantieel hoger dan de limieten voor vergelijkbare motoren op een andere brandstof en een ander werkingsprincipe. Ook hier gaat daarom de aandacht uit naar dieselmotoren, zowel in aantallen als in de emissies per machine zijn dieselmotoren de grootste bron van NO_x emissies. Verschillende partijen verwijzen naar deze wettelijke testen. In dit rapport, en in dit hoofdstuk, worden daar de beperkingen van gegeven. Maar de wettelijke eisen zijn vaak wel de basis voor het soort nabehandelingstechnologie, zoals EGR en SCR, er gebruikt worden en de bijbehorende karakteristieken van praktijkemissies.

4.1 Overzicht van emissielimieten voor verschillende toepassingen

In onderstaande tabellen staan de emissielimieten voor dieselmotoren in verschillende toepassingen: in wegverkeer, bouwmachines, binnenvaart en zeevaart. Vanwege deze verschillende toepassingen, zijn de eenheden voor deze limieten ook verschillend. In toepassingen waar afstand bepalend is, bijvoorbeeld voor personenwagens, wordt een limiet in g/km toegepast. Voor voertuigen die veel vermogen moeten leveren (bv. schepen en vrachtwagens) worden de limieten in g/kWh gegeven. In toepassingen waar sprake is van veel stationair draaien kan de limiet in gram per seconde (g/s) uitgedrukt worden, omdat het tijdselment bepalend is. Verder kan de limiet een concentratielimiet zijn, gegeven in parts per million (ppm). Of motoren in de praktijk ook gelijke prestatieniveaus hebben die de limieten suggereren is sterk afhankelijk van de inzet, en de testprocedure voor de emissielimiet. In sommige gebruiksomstandigheden kan de uitstoot zomaar meer dan vijf keer zo hoog zijn. Een goede uitlaatgasnabehandeling brengt NO_x concentraties onder een niveau van 20 ppm (Euro-VI, en Stage IV en V), terwijl de uitstoot van de motor kan oplopen tot meer dan 2000 ppm. In termen van dieselbrandstof loopt de bandbreedte van 1 g tot 100 g NO_x per liter diesel. Een kapotte of gemanipuleerde dieselmotor zal een gemiddelde uitstoot hebben van 30-40 gram NO_x per liter diesel.

De verschillende recente wetgevingen voor de emissies van dieselmotoren:

Onder de kaderrichtlijn: EC/2007/47 (uitgebreid met EC/2018/858 vanaf 1 september 2020, waarin certificering en toezicht formeel geregeld is. De meeste dieselmotoren voldoen, bij steekproefcontroles, aan deze formele eisen, op basis van laboratoriumtesten die aan ze gesteld worden):

- Licht wegverkeer, inclusief bestelauto's: Verordening EC/715/2007 (Euro-5/6)
- Zwaar wegverkeer, inclusief bussen: Verordening EC/692/2008 (Euro-VI)

Onder richtlijn EU/2016/1628

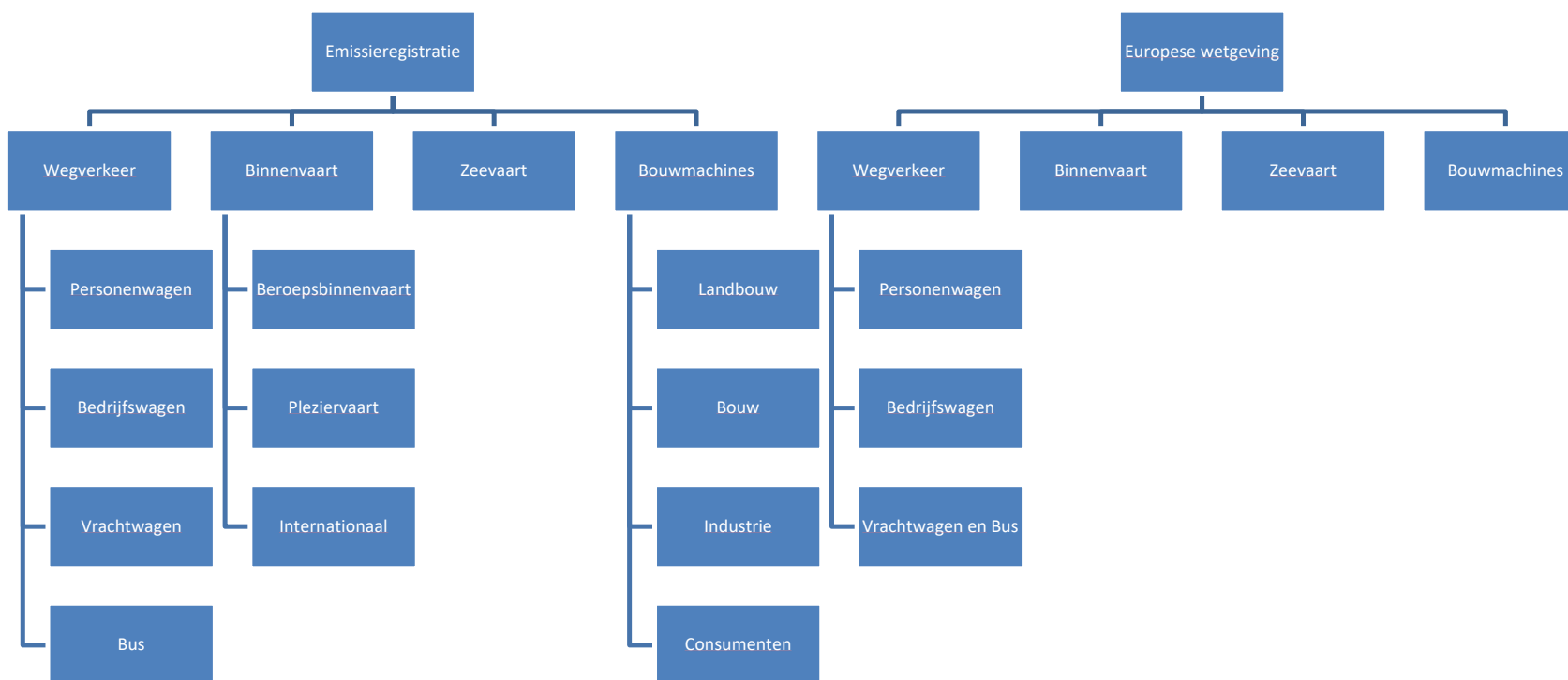
- Mobiele werktuigen: Verordening EC/2017/654 (Stage V)

Onder de Centrale Commissie voor de Rijnvaart

- Reglement CCNR Stage II

Onder de International Maritime Organization (IMO):

- Regulation 13 Tier III.



Figuur 5: Voertuig classificering die gebruikt wordt in de Emissieregistratie, vergeleken met de classificering die in wetgeving gehanteerd wordt. In verschillende velden worden verschillende onderverdelingen en definities gebruikt, die mogelijk tot verwarring kunnen leiden.

Tabel 1: De wettelijke NO_x emissielimieten voor dieselmotoren in verschillende toepassingen (Dieselnet, 2020a, 2020b, 2020c, 2020d). Bij limieten van 2 g/kWh en 80 mg/km of lager wordt er vaak een SCR-installatie gebruikt om deze niveaus te bereiken.

		Klasse	Datum eerste toelating	NO _x [g/km]	NO _x + HC [g/km]
Wegverkeer	Personenwagen	Euro 1	07/1992	-	0,97
		Euro 2	01/1996	-	0,70
		Euro 3	01/2000	0,5	0,56
		Euro 4	01/2005	0,25	0,30
		Euro 5a	09/2009	0,18	0,25
		Euro 5b	09/2011	0,18	0,25
		Euro 6b	09/2014	0,080	-
		Euro 6d TEMP	09/2017	0,080	-
		Euro 6d	01/2020	0,080	-
	Bedrijfswagen N ₁ , Class I (≤ 1305 kg)	Euro 1	01/1994	-	0,97
		Euro 2	01/1997	-	0,7
		Euro 3	01/2000	0,5	0,56
		Euro 4	01/2005	0,25	0,3
		Euro 5a	09/2009	0,18	0,23
		Euro 5b	09/2011	0,18	0,23
		Euro 6	09/2014	0,08	0,17
	Bedrijfswagen N ₁ , Class II (1305-1760 kg)	Euro 1	01/1994	-	1,4
		Euro 2	01/1998	-	1,0
		Euro 3	01/2001	0,65	0,72
		Euro 4	01/2006	0,33	0,39
		Euro 5a	09/2010	0,235	0,295
		Euro 5b	09/2011	0,235	0,295
	Bedrijfswagen N ₁ , Class III (1760-3500 kg)	Euro 1	01/1994	-	1,7
		Euro 2	01/1998	-	1,2
		Euro 3	01/2001	0,78	0,86
		Euro 4	01/2006	0,39	0,46
		Euro 5a	09/2010	0,28	0,35
		Euro 5b	09/2011	0,28	0,35
		Euro 6	09/2015	0,125	0,215
	Bedrijfswagen N ₂ (3500-12000 kg)	Euro 5a	09/2010	0,28	0,35
Euro 5b		09/2011	0,28	0,35	
Euro 6		09/2015	0,125	0,215	

		Klasse	Datum eerste toelating	NO _x [g/km]	NO _x + HC [g/km]
Wegverkeer	Vrachtwagen en bus	Euro I	1992	9,0 ¹	-
		Euro II	10/1996	8,0	-
		Euro III	10/2000	5,0	-
		EEV	10/2000	2,0	
		Euro IV	10/2005	3,5	-
		Euro V	10/2008	2,0	-
		Euro VI Step A	01/2013	0,46 ²	-
		Euro VI Step B	01/2013	0,46	-
		Euro VI Step C	01/2016	0,46	-
		Euro VI Step D	09/2018	0,46 ³	-
	Euro VI Step E	09/2020	0,46	-	
Mobiele Werktuigen, waaronder bouwmachines	130 ≤ P (kW) ≤ 560	Stage I - A ⁴	01/1999	9,2	-
	75 ≤ P (kW) ≤ 130	Stage I - B	01/1999	9,2	-
	37 ≤ P (kW) ≤ 75	Stage I - C	04/1999	9,2	-
	130 ≤ P (kW) ≤ 560	Stage II - E	01/2002	6,0	-
	75 ≤ P (kW) ≤ 130	Stage II - F	01/2003	6,0	-
	37 ≤ P (kW) ≤ 75	Stage II - G	01/2004	7,0	-
	18 ≤ P (kW) ≤ 37	Stage II - D	01/2001	8,0	-
	130 ≤ P (kW) ≤ 560	Stage III A - H	01/2006	-	4,0
	75 ≤ P (kW) ≤ 130	Stage III A - I	01/2007	-	4,0
	37 ≤ P (kW) ≤ 75	Stage III A - J	01/2008	-	4,7
	19 ≤ P (kW) ≤ 37	Stage III A - K	01/2007	-	7,5
	130 ≤ P (kW) ≤ 560	Stage III B - L	01/2011	2,0	-
	75 ≤ P (kW) ≤ 130	Stage III B - M	01/2012	3,3	-
	56 ≤ P (kW) ≤ 75	Stage III B - N	01/2012	3,3	-
	37 ≤ P (kW) ≤ 56	Stage III B - P	01/2013	-	4,7
	130 ≤ P (kW) ≤ 560	Stage IV - Q	01/2014	0,4	
	56 ≤ P (kW) ≤ 130	Stage IV - R	10/2014	0,4	-
	P (kW) < 8	NRE-v/c-1	2019	-	7,50
	8 ≤ P (kW) < 19	NRE-v/c-2	2019	-	7,50
	19 ≤ P (kW) < 37	NRE-v/c-3	2019	-	4,70
37 ≤ P (kW) < 56	NRE-v/c-4	2019	-	4,70	
56 ≤ P (kW) < 130	NRE-v/c-5	2020	0,40	-	

¹ Voor vrachtwagens Euro I – V waren er geen limieten die 'op de weg' golden, deze limieten waren van toepassing op testen van alleen het motorblok

² Voor vrachtwagens Euro VI Step A – C konden emissies genegeerd worden als die uitgestoten werden wanneer het gemiddelde geleverde vermogen minder was dan 20% van het maximum vermogen

³ Voor vrachtwagens Euro VI Step D – E kunnen emissies genegeerd worden als die uitgestoten worden wanneer het gemiddelde geleverde vermogen minder is dan 10% van het maximum vermogen, in Step E wordt koude start ook meegenomen.

⁴ Voor Stage I en II gelden deze limieten voor 'engine out' dus voor de nabehandelingssystemen

		Klasse	Datum eerste toelating	NO _x [g/km]	NO _x + HC [g/km]
	130 ≤ P (kW) ≤ 560	NRE-v/c-6	2019	0,40	-
	P (kW) > 560	NRE-v/c-7	2019	3,50	-
	P (kW) > 560	NRG-v/c-1	2019	0,67	-
Binnenvaart	D (dm ³) ≤ 0.9, ⁵ P (kW) > 37 kW	Stage III - V1:1	2007		7,5
	0.9 < D (dm ³) ≤ 1.2	Stage III - V1:2	2007		7,2
	1.2 < D (dm ³) ≤ 2.5	Stage III - V1:3	2007		7,2
	2.5 < D (dm ³) ≤ 5	Stage III - V1:4	2009		7,2
	5 < D (dm ³) ≤ 15	Stage III - V2:1	2009		7,8
	15 < D (dm ³) ≤ 20, P (kW) ≤ 3300 kW	Stage III - V2:2	2009		8,7
	15 < D (dm ³) ≤ 20, P (kW) > 3300 kW	Stage III - V2:3	2009		9,8
	20 < D (dm ³) ≤ 25	Stage III - V2:4	2009		9,8
	25 < D (dm ³) ≤ 30	Stage III - V2:5	2009		11,0
	19 ≤ P (kW) < 75	IWP/IWA-v/c-1	2019		4,70
	75 ≤ P (kW) < 130	IWP/IWA-v/c-2	2019		5,40
	130 ≤ P (kW) < 300	IWP/IWA-v/c-3	2019	2,10	
	P (kW) ≥ 300	IWP/IWA-v/c-4	2020	1,80	
	Zeevaart⁶	n (rpm) < 130 ⁷	Tier I	2000	17,0
130 ≤ n (rpm) < 2000		2000		45·n ^{-0,2}	
n (rpm) ≥ 2000		2000		9,8	
n (rpm) < 130		Tier II	2011	14,4	
130 ≤ n (rpm) < 2000			2011	44·n ^{-0,23}	
n (rpm) ≥ 2000			2011	7,7	
n (rpm) < 130		Tier III	2016	3,4	
130 ≤ n (rpm) < 2000			2016	9·n ^{-0,2}	
n (rpm) ≥ 2000			2016	1,96	

Tabel 2: Huidige NH₃ emissielimieten voor dieselmotoren in verschillende toepassingen (Dieselnet, 2020b, 2020c). Voor Euro-V alleen demonstratie, geen standaard testprocedure, was noodzakelijk (EC/2005/78).

		Klasse	Datum eerste toelating	NH ₃ [ppm]
Wegverkeer	Vrachtwagen en bus	Euro IV/V	10/2006	25
		Euro VI	01/2013	10
Bouwmachines		Stage III	01/2006	25
		Stage IV	01/2011	25

⁵ D is de cilinderinhoud per cilinder, in dm³

⁶ Deze limieten zijn onderdeel van de 'IMO Marine Engine regulations'. Deze regeling gaat op de Noordzee en de Nederlandse havengebieden in per 2021. De limieten zijn afhankelijk van de motorsnelheid. Grote motoren draaien normaal langzamer.

⁷ n is het maximale motortoerental in rpm.

4.2 Toelichting bij de NH₃ limieten in combinatie met SCR-katalysatoren

Er zijn relatief nog weinig limieten voor NH₃ emissies. Dit is voornamelijk omdat er in het verleden weinig voertuigsoorten en machines werden uitgerust met een SCR-katalysator. SCR-katalysators worden gebruikt om NO_x te reduceren met behulp van ammoniak (uit een ureumoplossing met de merknaam AdBlue). Er bestaat een kans dat niet alle ammoniak die geïnjecteerd wordt in het SCR-systeem ook daadwerkelijk reageert. Hierdoor kan ook ammoniak worden uitgestoten. In verband met de in de toekomst verwachte bredere inzet van SCR-systemen, bv. in bouwmachines vanaf Stage IV, binnenvaartschepen vanaf Stage V, en personen-/bedrijfswagens vanaf Euro 6, zal de uitgestoten ammoniak vermoedelijk ook toenemen. Dit is deels meegenomen in de emissiefactoren van 2020.

Aandachtspunt 6

Een dieselmotor met SCR-installatie verbruikt in normaal gebruik 3%-6% AdBlue in vergelijking tot het verbruik van dieselbrandstof in liters. Als het AdBlue verbruik lager is dan 3% functioneert de SCR-installatie waarschijnlijk onvoldoende en is de NO_x uitstoot hoog. De registratie van het AdBlue verbruik kan helpen bij het aantonen van de behaalde NO_x reductie. De hoeveelheid AdBlue hangt direct samen met de hoeveelheid omgezette NO_x. Bij het handhaven tegen kapotte of gemanipuleerde SCR-systemen is deze registratie ook relevant.

4.3 Manipulatie van emissiecontrole systemen

De SCR-systemen kunnen over hun levensduur minder goed gaan werken. Hierdoor neemt de uitgestoten hoeveelheid NO_x toe. Verder kunnen onderhoud/mankementen en onrechtmatige aanpassingen hier ook invloed op hebben. Deze onrechtmatige aanpassingen, "tampering", kunnen worden uitgevoerd om kosten van reparatie of het verbruik van AdBlue te ontwijken (Vermeulen *et al.*, 2017). Als gevolg hiervan kan de NO_x uitstoot sterk verhoogd zijn. Deze effecten zijn meegenomen voor vrachtwagens, maar nog niet voor andere bronnen.

Reparaties aan het SCR-systeem kunnen tot hoge kosten leiden. Daarom, wordt in een aantal gevallen de SCR uitgeschakeld door hardware en/of software aanpassingen aan de motor. Ook hoeft er dan geen AdBlue meer getankt worden, wat een kostenbesparing geeft van enkele honderden tot duizend Euro per jaar per machine / voertuig. De omvang van dit probleem is onbekend. In een aantal gevallen is het reeds gesignaleerd. In Nederland zijn enkele boetes uitgeschreven voor deze vorm van fraude. De meest accurate inzichten in deze vorm van fraude komen uit de omliggende landen. Hier is de politie actiever met de controle van vrachtwagens op dit soort aanpassingen. Met het stikstof maatregelenpakket dat het kabinet heeft aangekondigd in april 2020, is wel opgenomen dat handhaving van deze fraude bij vrachtwagens zal worden opgezet. Bij mobiele werktuigen en schepen is de verwachting dat vergelijkbare problemen optreden, zonder dat deze gedetecteerd worden.

5 Wegverkeer

Wegverkeer omvat alle gemotoriseerde voertuigen met een kenteken. De RDW ziet toe om de toelating en de onderhoudsstaat van deze voertuigen op de Nederlandse weg. De emissies van verschillende categorieën voertuigen zijn substantieel hoger dan van andere. Het specifieke wagenpark is daarom relevant voor de emissie, maar ander rijgedrag en verandering van snelheid heeft ook een invloed op de uitstoot.

5.1 Overzicht

Emissiefactoren voor wegverkeer worden jaarlijks vastgesteld op basis van de laatste inzichten. In oktober worden de emissiefactoren per voertuigtype en wegtype bepaald voor de Emissieregistratie. Dit heeft betrekking op het verleden en de trends daarin. In maart worden de emissieprognoses voor de toekomst bepaald, en de verwachte effecten van emissie gerelateerd beleid. Hiervoor wordt het verwachte wagenpark voor toekomstige jaren vastgesteld door het PBL, en daarmee worden de gemiddelde emissies van licht, middelzwaar en zwaar wegverkeer berekend, voor niet-snelwegen en snelwegen. De gegevens voor de Emissieregistratie die vastgesteld worden op 1 december zijn zoveel mogelijk consistent zijn met de gegevens voor de luchtkwaliteitsmodellen in maart, waar ze overlappen. Maar dit is niet altijd mogelijk, omdat met de details die voor niet-snelweg en snelweg emissiefactoren nodig zijn, en vaak ook met nieuwe vragen, een nadere nuancering nodig is. Over het algemeen zijn er een aantal details die pas in december worden vastgesteld. Deze hebben vaak te maken met verfijning van inzichten die in het najaar gedeeld zijn op basis van vragen, zoals met onderscheid tussen file en doorstroming, onderscheid dat in de Emissieregistratie niet gemaakt wordt.

De Emissieregistratie publiceert jaarlijks de detailcijfers, per voertuigcategorie, behorende bij het laatste jaar. Een paar maanden later worden de gemiddelde emissiefactoren voor toekomstige jaren vastgesteld, met mogelijk een aantal nieuwe inzichten hierin verwerkt ten opzichte van het voorgaande jaar. De emissiefactoren voor snelwegen en niet-snelwegen die horen bij de prognoses voor licht, middelzwaar en zwaar wegverkeer voor verschillende zichtjaren, worden uiterlijk op 15 maart door de Rijksoverheid gepubliceerd, in het kader van de wettelijke beoordeling van luchtkwaliteit. In verband met de rol van AERIUS, voor het beoordelen van vergunningen voor toekomstige projecten sluiten deze prognosecijfers beter aan bij AERIUS. Simpel gesteld, Emissieregistratie gaat om het verleden, GCN/GDN en vergunningen hebben betrekking op het heden en de toekomst. De GCN/GDN getallen zijn aangeleverd. Onderbouwende rapporten, die vooral ingaan op de nieuwe metingen en de aanpassingen in de methodologie worden door TNO regelmatig gepubliceerd. Maar er is geen totaaloverzicht van alle emissiefactoren en hun onderbouwing beschikbaar. Oudere rapporten kunnen (deels) niet meer bruikbaar zijn door nieuwe inzichten. Bij de jaarlijkse oplevering van de Emissieregistratie voor het Taakveld Verkeer en Vervoer wordt er een methoden rapport beschikbaar gemaakt. Dit is de basis voor de audit van het werk van de Taakgroep.

Voor wegverkeer zijn de dieselveertuigen de grootste bron van NO_x emissies, en de benzinevoertuigen de grootste bron van NH₃ emissies. Ondanks grote stappen in het verlagen van de wettelijke emissielimieten zijn er beperkte reducties geweest in praktijkemissies.

De praktijkemissies zijn vastgesteld volgens de afspraken in SRM1 en SRM2 (Standaard Reken Methodes). Deze omvatten, onder andere:

1. Emissiefactoren voor vastgestelde verkeerssituaties, gegeven door wegtypen, snelheidslimieten, daadwerkelijke snelheden, en dynamiek (bijv. het aantal stoppen per kilometer). Hiervoor gelden landelijke gemiddelden.
2. Een gemiddeld wagenpark per categorie, gebaseerd op de RDW registraties, de jaarkilometrages, en de wegtypeverdeling bij de typische inzet.
3. De frequentie van voorkomen van voertuigtechnologieën en voertuigsamenstelling in elke voertuigcategorie, en het typische gewicht en de typische belading van zware wegvoertuigen, zoals gemeten op de weg.

Alle emissiemetingen worden genormaliseerd naar deze gemiddelde omstandigheden, zoals bepaald uit monitoringprogramma's die vooral zijn bepaald op basis monitoring, terwijl het meetprogramma zo veel mogelijk de normale omstandigheden op de weg probeert te reproduceren. In dit geval is Nederland uniek in de wereld. In bijna alle andere landen worden speciale meetprocedures bedacht en gebruikt om emissies te meten, en zijn modellen nodig om deze te vertalen naar de praktijk. Dit heeft, net zoals de wettelijke testprocedures, zijn beperkingen.

5.2 SRM (GCN/GDN) versus ER emissiefactoren

TNO heeft een complete database van emissiefactoren, die continu bijgehouden en aangevuld wordt. Van daaruit doet TNO jaarlijks twee officiële leveringen die beide relevant zijn voor AERIUS.

De levering aan AERIUS zelf bevat elementen die niet in de andere leveringen zitten, door de combinatie van elementen:

Onderdeel	Emissieregistratie (ER)	GCN/GDN (SRM)	AERIUS
Euroklassen	X		X
Zichtjaren		X	
Congestiegraden		X	
Wegtype gemiddelde	X		X
Snelheidslimieten		X	
NO ₂ emissiefactoren		X	X
NH ₃ emissiefactoren	X		X
Historische jaren	X		
Nieuwe wetgeving		X	X

De jaarlijkse leveringen zijn de referentiepunten, waarnaar verwezen kan worden. Omdat AERIUS grofweg aansluit bij de GCN/GDN kaarten is ervoor gekozen om voor AERIUS het referentiepunt van de GCN/GDN leveringen van SRM

emissiefactoren ("*emissiefactoren voor snelwegen en niet-snelwegen*") te gebruiken, zodat de getallen hiermee consistent zijn waar ze overlappen.

5.3 Emissiefactoren gebaseerd op metingen aan wegverkeer

De NO_x, NO₂ en NH₃ emissies van wegverkeer worden gemeten op de weg. Voor vrachtwagens is dit over het algemeen tijdens normaal gebruik, terwijl voor personenwagens dit vaak een combinatie is van normaal gebruik en routes die gereden worden conform bepaalde 'standaard testrit' eisen. De metingen worden uitgevoerd door het monitoren van sensoren in de uitlaat van het voertuig en met behulp van het meetsysteem SEMS (Smart Emission Measurement System, (Spreeen *et al.*, 2016; Vermeulen *et al.*, 2019)). Achteraf worden de gemeten emissieniveaus geanalyseerd. Omdat de metingen voor een groot deel gedaan worden tijdens normaal gebruik kan een veel beter beeld geschetst worden van de werkelijke NO_x uitstoot (Vermeulen *et al.*, 2018a, 2018b). De uitstoot kan namelijk erg variëren afhankelijk van de rijomstandigheden.

De emissies die (bijvoorbeeld met SEMS) gemeten worden in de uitlaat worden omgerekend met behulp van andere signalen van het voertuig (bijvoorbeeld snelheid) tot g/km. Dit wordt dan geaggregeerd op niveau van voertuigklasse en wegtype. Tegenwoordig wordt tot duizenden uren meetdata per voertuigcategorie verzameld als er een nieuwe voertuigcategorie wordt toegevoegd aan de lijst met emissiefactoren. Voor veel verkeerssituaties is er dan ruim voldoende data beschikbaar. Het aantal voertuigen per categorie varieert van enkele bij de eerste versie van de emissiefactor, tot enkele tientallen, voor een oudere voertuigcategorie.

Verder wordt ook gebruik gemaakt van 'remote sensing'. Met deze techniek kan van grote aantallen passerende voertuigen een momentopname worden gemaakt van de uitstoot. Deze techniek kan gebruikt worden om een indicatie te krijgen van de uitstoot van voertuigen die een uitzonderlijk hoge uitstoot vertonen (zogenaamde 'high emitters'), hetzij vanwege mankementen, of onrechtmatige aanpassingen.

5.4 Beschikbaar gemaakte gegevens voor wegverkeer

Voor wegverkeer zijn er twee sets emissiefactoren geleverd aan AERIUS voor NO_x, NO₂ en NH₃, één voor het zichtjaar 2020 en één voor het zichtjaar 2025. Dit zijn de getallen die onder de niet-snelweg en snelweg emissiefactoren van maart 2020 liggen voor die zichtjaren 2020 en 2025. Tussenvallende jaren worden geïnterpoleerd uit deze zichtjaren. Per voertuigklasse is er een emissiefactor voor de wegtypes stad, buitenweg en snelweg, in g/km. De voertuigklassen bevatten personenwagens, bedrijfswagens, middelzwaar en zware vrachtwagens, lichte en zware trekkers en bussen. Per voertuigtype wordt er ook onderscheid gemaakt tussen brandstoftype, bouwjaar, euroklasse, en eventuele nabehandelingssystemen. Voor een aantal klassen wordt ook onderscheid gemaakt voor gewicht. De twee zichtjaren verschillen alleen in de NO_x emissies van benzineauto's, die toenemen met de leeftijd. In het geval dat andere voertuigcategorieën worden beoordeeld is de conservatieve inschatting op basis van de 2020 dataset.

Als gegevens van benzineauto's worden aangepast, door de gebruiker van AERIUS, is een meer gedetailleerde aanpak met 2020 en 2025 gegevens nodig. Deze emissiefactoren zijn niet ontsloten in AERIUS Calculator, maar zijn beschikbaar op de TNO website voor AERIUS getallen.

Achtergrond bij definities van de verkeerssituaties voor emissiefactoren :
 Er worden drie verschillende wegtypes gebruikt: stad, buitenweg en snelweg. Hierbij worden aannames gemaakt over de verhoudingen van file, stagnerend, en doorstromend verkeer. File wordt aangeduid door een snelheid minder dan 50 km/h op de snelweg, en in de stad een gemiddelde snelheid van minder dan 20 km/h. Het onderscheid van wegtypes wordt deels gedaan op basis van de snelheid, en deels op basis van de maximumsnelheid, of snelheidslimiet en het soort weg waar het voertuig zich op bevindt.

Het is belangrijk om te realiseren dat:

- De gemiddelde snelheid een beperkte relatie heeft met de snelheidslimiet. De daadwerkelijke snelheid is over het algemeen lager. Maar de extra dynamiek bij een hoge snelheidslimiet, die niet door alle auto's wordt gevolgd, lijkt de grootste bron van extra emissies bij hogere snelheidslimieten. Het is daarmee vooral de spreiding in snelheden die een maat is voor de verschillen in uitstoot.
- In de emissiefactoren voor niet-snelwegen en snelwegen (SRM) is het onderliggende wagenpark in de stad anders dan op de buitenweg, en anders dan op de snelweg. Op de snelweg zijn de voertuigen over het algemeen nieuwer en is het aandeel dieselauto's groter. Het is daarom niet verantwoord om emissiefactoren te interpoleren tussen verschillende wegtypen en snelheidslimieten.

De algemeen beschikbare emissiefactoren voor SRM en Emissieregistratie (ER) zijn:

Naam	Beschrijving
WS1	Stad stagnatie, onder de 15 km/h, 10 stops per kilometer (SRM)
WM1	Stad normaal, tussen 15 en 30 km/h, 2 stops per kilometer (SRM)
WF1	Stad doorstromend, tussen 30 en 45 km/h, 1,5 stops per kilometer (SRM)
WT1	Stad gemiddeld (ER)
WT2	Buitenwegen (N-wegen), 60 km/h gemiddeld, (SRM en ER)
WT3	Snelweg (A-wegen) gemiddeld (ER)
WS3	Snelweg file, onder de 50 km/h (SRM)
W80MSH	Snelweg 80 km/h limiet met trajectcontrole (SRM)
W80ZSH	Snelweg 80 km/h limiet zonder trajectcontrole (SRM)
W100MSH	Snelweg 100 km/h limiet met trajectcontrole (SRM)
W100ZSH	Snelweg 100 km/h limiet zonder trajectcontrole (SRM)
W120	Snelweg 120 km/h limiet (SRM)
W130	Snelweg 130 km/h limiet (SRM)

Aandachtspunt 7

Bij lage snelheden nemen de emissies in g/km snel toe. Voor stagnerend verkeer in de stad en op de snelweg is er een gemiddelde snelheid en dynamiek vastgesteld. In de stad is de gemiddelde snelheid in congestie 12 km/h, op de snelweg 22 km/h. Als de daadwerkelijke gemiddelde snelheid lager is dan zijn de emissies hoger. In deze gevallen is de uitstoot hoofdzakelijk proportioneel met de tijd dat de motor aanstaat, en niet met de afgelegde afstand.

5.5 De invloed van gewicht en belading specificaties op emissies

De emissiefactor van elke voertuigklasse is gebaseerd op een gemiddelde van de inzet van die voertuigklasse op een bepaald wegtype. Dus in het geval van een emissiefactor van vrachtwagens worden alle voertuigen samen gemiddeld. In de emissiefactor is daarom geen onderscheid te maken tussen een zwaarbeladen (bijv. bouwverkeer) of een licht beladen (bijv. sierteelt) vrachtwagen. Ook zijn de categorieën voor vrachtverkeer zeer ruim. Er zijn drie gewichtsklassen: licht (3.5-10 ton maximaal gewicht), middelzwaar (10-20 ton maximaal gewicht), en zwaar (20 ton en meer maximaal gewicht). Voertuigen van uiteenlopend gewicht kunnen dus in dezelfde categorie vallen. Er is een zeer zwakke correlatie tussen het voertuiggewicht van vrachtwagens en de NO_x en NH₃ emissies. Er is daarom geen aanleiding emissies te corrigeren voor een afwijkend gewicht ten opzichte van het referentiegewicht in de categorie.

De Euroklassen van de meeste voertuigen zijn beschikbaar via de openbare registers van de RDW (www.rdw.nl en opendata.rdw.nl). Deze gegevens zijn gekoppeld aan het kenteken van het voertuig. Als een individuele vloot wordt opgegeven kan de Euroklasse op basis van deze informatie achterhaald worden.

Aandachtspunt 8

Vanaf Euro-V heeft een vrachtwagen met een hogere belading over het algemeen een lagere NO_x uitstoot dan hetzelfde voertuig met een lagere belading. Door de hogere motorlast zijn de motor en de SCR warmer, en functioneren daardoor beter. Daarom hebben deze vrachtwagens ook lagere NO_x emissies bij hogere snelheden. In het bijzonder boven de 70 km/h zijn emissies van Euro-V en Euro-VI vrachtwagens substantieel lager dan bij lagere snelheden. Dit is ook de reden dat er een beperkt verband is tussen NO_x en CO₂ emissies, voor voertuigen met SCR. Dit is dus geen fout in de lijst met emissiefactoren, zoals vaak gedacht.

5.6 De invloed van veroudering van voertuigen op emissies

Emissiefactoren voor een gegeven voertuig kunnen met de jaren veranderen. Daarom zijn zichtjaren 2020 en 2025 beschikbaar gemaakt, consistent met de GCN/GDN kaarten.

Er zijn verschillende technologieën die aan veroudering onderhevig zijn, of defecten ontwikkelen met hoge emissies tot gevolg die in onderhoud en inspectie onopgemerkt blijven. Voorheen hadden oude benzineauto's (Euro-1 en Euro-2) hogere emissies naarmate ze ouder worden. Recent is vastgesteld dat benzineauto's na 150.000 kilometer stijgende NO_x emissies hebben. Dat is in de nationale gegevens en dus in de geleverde emissiefactoren meegenomen.

5.7 Aparte emissiefactoren voor kiepwagens (kippers) op de weg

De inzet van kiepwagens (kippers), zoals deze op de bouwplaats opereren is substantieel anders dan de inzet van kiepwagens op de weg. Op de weg zijn de typische emissiefactoren van Euro-VI kiepwagens, op basis van de metingen aan een representatieve kipper:

Tabel 3: Nieuwe emissiefactoren op basis van metingen aan een Euro-VI kipper voor kippers in verschillende verkeerssituaties. De NO₂ fractie is 30%.

	NO _x [g/km]	NH ₃ [g/km]
Stad stagnatie	8.41	0.276
Stad normaal	6.57	0.274
Stad doorstromend	4.74	0.258
Buitenweg	5.31	0.244
Snelweg file	9.04	0.223
Snelweg doorstromend	2.41	0.093

In een aantal gevallen is het onderscheid tussen de bouwplaats en de doorgaande weg, qua locatie, niet duidelijk onderscheidbaar. Na langdurig stationair draaien zijn de emissies op wegen rond de bouwplaats nog hoog, ook bij normaal verkeer. Deze getallen zijn opgenomen bij de emissiefactoren voor bouwmachines. De stad stagnatie, die moeilijk te onderscheiden is van bouwplaats verkeer, is daarom op basis van een extrapolatie van stad normaal en stad doorstromend. Voor de buitenweg zijn 70 km/h wegen genomen, die ver van de bouwplaatsen af lagen.

5.8 Uitzonderingen die naar afwijkende emissies kunnen leiden

Een bijzonder wagenpark, zoals bijvoorbeeld een busconcessie met een groot aantal bussen van hetzelfde merk en type, kan leiden tot emissies en emissiefactoren, die afwijken van het nationale gemiddelde. In sommige gevallen wil de fabrikant van de motor wel meewerken aan het kalibreren en afstellen van de motor en de nabehandeling en het monteren van meer hardware, om extra lage NO_x en NH₃ emissies te halen in de praktijk. Dit is de meest succesvolle manier om emissies op een bestaande vloot te reduceren, en gaat soms ten koste van een lichte verhoging van brandstofverbruik. Fabrikanten maken dergelijke aanpassingen alleen als dat de moeite waard is, en dat betekent dat het tientallen of meer voertuigen of werktuigen moet betreffen. Het is noodzakelijk om het resultaat van een dergelijke maatregel in de praktijk te laten testen.

Over het algemeen is het niet goed mogelijk om zonder de medewerking van de motorfabrikant substantiële reducties van de NO_x emissies te halen.

Het temperatuurmanagement van de motor en inzichten in de variaties in de emissiecontrole strategieën zijn cruciaal om een nabehandelingssysteem effectief te krijgen. In de andere gevallen zijn de reducties in de praktijk, onder dynamische omstandigheden, vaak erg laag.

De emissiefactoren voor wegverkeer op de weg zijn op basis van belangrijke groepen voertuigen in gemiddelde omstandigheden op de weg. Dus zowel een afwijkende groep voertuigen als afwijkende omstandigheden kunnen andere emissies geven. Over het algemeen zijn deze emissies hoger omdat motoren worden ontwikkeld voor de grote groepen voertuigen en de normale omstandigheden. Op andere gevallen wordt waarschijnlijk niet geanticipeerd en geoptimaliseerd. Voor vrachtwagens zijn de emissies het laagst wanneer ze vol beladen op volle snelheid, 85 km/h, rijdend op de snelweg. Dit is meer dan de helft van het gebruik van vrachtwagens.

5.9 Samenvatting voor de gebruiker

Emissiefactoren van wegverkeer gelden voor gemiddelde voertuigen in gemiddelde verkeerssituaties. In een concrete situatie kan zowel het voertuig, als de verkeerssituatie afwijken. Het is over het algemeen niet verantwoord om te interpoleren tussen de verschillende emissiefactoren. Ook zijn de fabrieksopgaves van de emissies beperkt representatief voor de praktijkemissies op de weg. Voor modernere voertuigen is er geen relatie tussen brandstofverbruik en de uitstoot van NO_x.

6 Mobiele werktuigen

Mobiele werktuigen worden voor verschillende doeleinden ingezet, in de bouw, de landbouw, groenvoorziening, handel, en de industrie. Voor de emissies van mobiele werktuigen wordt er dusverre weinig onderscheid gemaakt in welke sector ze worden ingezet. Dus voor trekkers in de bouw en grondbewerking zijn dezelfde emissiefactoren beschikbaar als voor de landbouw. Dit zijn de gemiddelde waarden over de verschillende sectoren.

Bij de NO_x uitstoot van mobiele werktuigen is het belangrijk om met de volgende elementen rekening te houden:

- De leeftijd en de vermogensklasse van de machine. Kleine, moderne machines hebben vaak vergelijkbare hoge NO_x uitstoot als decennia geleden, omdat de normen nauwelijks zijn aangepast. Vanaf 1999 tot 2019 zijn de limieten van de laagste vermogensklasse verzwaaard van 9,2 naar 7,5 g/kWh. Terwijl er voor grotere machines aanscherpingen zijn geweest van de normen, van 9,2 naar 0,4 g/kWh. Het kan daarom zijn dat een kleine moderne machine in absolute termen een hogere uitstoot heeft dan een grote moderne machine.
- De draaiuren van machines. Sommige machines staan de hele werkdag aan, zoals aggregaten en bouwlamp-aggregaat combinaties, en sommige machines staan voltijds aan, zoals pompen. Tot voor kort hadden machines geen stop-start systeem en draaiden ze continue. Veelal zijn deze draaiuren meer bepalend voor de totale uitstoot van NO_x dan de arbeid die verricht wordt.
- De lage last operatie is bij zware, moderne machines met een SCR-installatie een lastig werkgebied om de SCR-installatie op bedrijfstemperatuur te krijgen en dus NO_x te laten reduceren. Bij lage motorlast functioneert de SCR minder goed, en kunnen de emissies sterk toenemen. In de inzet van mobiele werktuigen is het belangrijk om een inzicht te hebben in de motorbelastingen.
- De technologie die toegepast wordt om emissies te reduceren is bepalend. SCR komt beperkt voor op Stage IIIa en Stage IIIb, maar is niet gangbaar, terwijl veel werktuigen met Stage IV en Stage V motoren wel SCR hebben, maar dus niet altijd. Dit kan per fabrikant en gebruiksgroep verschillen.
- De normen voor grote machines zijn sterk aangescherpt, maar daardoor is het verschil tussen norm en praktijk emissies groeiende, deels afhankelijk van de inzet van de machines.

Voor mobiele werktuigen is er geen registratie zoals voor wegvoertuigen. Dat heeft twee consequenties. Ten eerste is het onbekend hoeveel machines er zijn en wat de leeftijdsverdeling is. Ten tweede kan het daarmee moeilijk zijn om de emissieklasse van mobiele werktuigen te achterhalen. Het is mogelijk dat de motor substantieel ouder is dan de verkoopdatum van het werktuig. Het vraagt bijzondere aandacht om de juiste motorklasse vast te stellen.

6.1 Overzicht

Met de geleverde cijfers kunnen de emissiefactoren van verschillende mobiele machines bepaald worden. Het gaat om de emissies van NO_x en NH₃.

Naast de typische inzet, kunnen ook de emissies tijdens 'idle' (lage last) draaien worden bepaald. Verdere specificatie is mogelijk in de vorm van de brandstofsoort, vermogensklasse en bouwjaar/emissienormering van de machine.

Zonder verdere kennis kan aangenomen worden dat in 30% van de tijd de machine staat te 'idlen'. Op basis van draaiuren kan de daarmee geassocieerde emissie bepaald worden. Deze hangt samen met de cilinderinhoud van de motor. Als het werktuig in bedrijf is kan de gemiddelde motorlast, typisch 60%, samen met de draaiuren en het maximaal vermogen, een totale arbeid in kWh geven. Met behulp van de emissiefactor in g/kWh kan de geassocieerde emissie worden uitgerekend. De emissies bij bedrijf en de 'idle' emissies samen zijn de totale emissies van het werktuig.

Brandstofverbruik en draaiuren kunnen gebruikt worden om de inschattingen van de gemiddelde motorlast en het aandeel 'idlen' te controleren. Bij hoge last, van een grote, moderne motor, kan een arbeid van 1 kWh geassocieerd zijn met ongeveer een kwart liter diesel. Bij lagere last, en kleinere of oudere motoren, wordt de hoeveelheid brandstof per arbeid hoger.

6.2 Beschikbaar gemaakte gegevens voor mobiele werktuigen

Voor mobiele werktuigen zijn de volgende gegevens geleverd:

- De efficiëntie en NO_x emissiefactoren in g/kWh geleverde arbeid. De factoren zijn geleverd per specifiek werktuigtype, technologie/normklasse, brandstof en vermogen.
- De cilinderinhoud in liters en NO_x emissiefactoren in g/hr en motorinhoud voor 'idle' draaien van dieselmachines.
- NH₃ emissiefactoren per brandstoftype, in g/MJ brandstof.
- De stookwaarde van brandstoffen, per jaar, in MJ/kg brandstof.

Aan de mobiele werktuigen binnen AERIUS die standaard onder Europese NRMM wetgeving vallen is de kiepwagen, of kipper, toegevoegd, die onder wegverkeer valt. De typische emissies op de bouwplaats uitgedrukt in de kentallen voor de bouwmaschinen zijn apart bepaald voor deze studie. Op een bouwplaats rijdt dit voertuig langzaam, en is vooral met het laden en lossen van grondstoffen bezig. Deze handelingen zijn meegenomen in de emissiefactoren van mobiele werktuigen, alhoewel het voertuig onder de eisen van een wegvoertuig valt. Deze categorie voertuigen is duidelijk onderscheidbaar van zware vrachtwagens die vooral bedoeld zijn voor transport over lange afstanden.

Andere typen motoren dan dieselmotoren worden typisch niet geassocieerd met hoge NO_x emissies. Er zijn wel emissiefactoren beschikbaar voor deze motoren, zoals benzinemotoren van kleine werktuigen.

6.3 Definities die gebruikt worden

Belasting (werk): dit staat voor de gemiddelde motorbelasting tijdens normaal draaien van de mobiele machine, 'idle' draaien is hierin niet meegenomen.

Belasting ('idle'): dit staat voor de gemiddelde motorbelasting wanneer de machine 'idle'/op lage last draait, onder 10% van het maximaal vermogen.

Dit is de motorbelasting op momenten dat de machine is ingeschakeld, en mogelijk systemen verwarmt of op druk houdt, maar geen werk verricht.

2-takt/4-takt: 2 vormen van benzinemotoren. Bij een 2-takt motor wordt arbeid geleverd bij iedere neergaande beweging van de zuiger in de cilinder. Bij een 4-takt motor is dit bij iedere tweede neergaande beweging. Er zijn specifieke verschillen in het gewicht, benodigde onderhoud, brandstofverbruik en emissieprofiel van deze twee typen benzinemotoren.

Cilinderinhoud: het totale volume van alle cilinders in de motor, vaak uitgedrukt in cc of liter. De cilinderinhoud hangt samen met het vermogen van de motor. De cilinderinhoud is tevens belangrijk bij het bepalen van de emissies en brandstofgebruik tijdens 'idle' draaien.

Efficiëntie: de hoeveelheid brandstof (in gram) die een motor gebruikt voor het leveren van 1 kWh arbeid.

Stookwaarde: de energie-inhoud in MJ per kg brandstof.

Dichtheid: het gewicht in kg per liter brandstof.

TAF-factor: Bijstelling van brandstof- of emissiefactor als gevolg van snel-veranderende motorbelasting, of dynamische inzet. Dit was de oude manier om het verschil tussen norm en praktijk te presenteren.

TAF-type: indeling van machines naar categorieën met bijpassende TAF-factor.

6.4 Afstemming en literatuur

Bij de metingen, analyses, en resultaten uit de literatuur zijn de volgende onderliggende afspraken gebruikt:

Belasting (werk): overeengekomen in overleg tussen experts van TNO en brancheverenigingen (BMWT, CUMELA, Federatie Agrotechniek) zie Hulskotte & Verbeek (2009).

Belasting ('idle'): standaardfactor voorgesteld door experts van TNO, op basis van metingen aan werktuigen. Zie TNO Rapport 2018 R10465.

Cilinderinhoud: Gerekend met een gemiddelde inhoud van 1 liter per 20 kW vermogen zonder drukvulling met behulp van een turbo.

Stookwaarde: CBS, 2017

Efficiëntie: voor brandstofgebruik zijn de basisfactoren afkomstig van TREMOD MM (IFEU, 2004). Voor dieselmotoren zijn deze factoren op basis van expertkennis van TNO aangepast om effecten van efficiëntieverbetering mee te nemen (gerekend met gemiddeld 0,3% verbetering per jaar). Voor benzine en LPG is voor STAGE V met dezelfde factor gerekend als voor STAGE II.

Emissiefactoren voor alle motorklassen zijn het resultaat van meerdere updates en aanpassingen.

De belangrijkste inzichten komen uit:

- Voor NO_x emissies zijn de basis-emissiefactoren afkomstig van TREMOD MM (IFEU, 2004).
 - Voor emissiefactoren van dieselmotoren voor STAGE IIIb, IV en V zijn aanvullingen en aanpassingen gedaan vanuit het EMEP/EEA Guidebook (2019) en vanuit expertkennis binnen TNO.
 - Voor benzine en LPG zijn de basisfactoren afkomstig van TREMOD MM (IFEU, 2004) met aanvulling vanuit het EMEP/EEA Guidebook (2019) voor STAGE V emissiefactoren voor motoren >66 cc.

- De NH₃ emissiefactoren voor diesel en benzine zijn afkomstig van Ntziachristos & Samaras (2000).

TAF-factoren en typen: onderzoek door US EPA (2004).

6.5 Inzet specificaties

Voor ieder machinetype is een typische gemiddelde motorbelasting en een belasting bij 'idle' draaien vastgesteld. In de emissiefactoren wordt geen verdere informatie over het specifieke belastingprofiel meegenomen. Er zijn beperkte inzichten hoe 'idle' varieert met het type werktuig en de inzet of activiteit. Mogelijk blijft de motor in de wintermaanden ook vaker draaien om de cabine warm te houden.

6.6 Uitzonderingen die naar afwijkende emissies kunnen leiden

Er zijn beperkte metingen aan de praktijkemissies van mobiele werktuigen. Om beter inzicht te krijgen in de emissies van bouwmachines, en relevante afhankelijkheden, strekt tot aanbeveling om meer te meten en monitoringsdata te verzamelen en te evalueren. Maar in bijna alle gevallen geven korte meetprogramma's minder aandacht aan 'idle' en lage last, dan uit de monitoring van mobiele werktuigen volgt, waarbij deze voor maanden gevolgd worden. Ook de gegevens die fabrikanten op afstand verzamelen geven aanwijzingen dat veel werktuigen veel lage last draaien en daarbij hoge uitstoot hebben. In de meting aan emissies van werktuigen is het dus essentieel om ook een goed beeld te hebben van de echte inzet, en de geassocieerde emissies. In ideale omstandigheden bij hoge last en een warme motor kunnen de NO_x emissies een factor 10 lager zijn dan in normaal gebruik.

Verschillen in dieselbrandstoffen hebben beperkte invloed op de uitstoot van NO_x en NH₃. Het predicaat, of certificaat, biobrandstof is wellicht relevant voor broeikasgassen, maar niet tot nauwelijks voor de uitstoot van NO_x en NH₃. Aan de andere kant zijn er, naast de inzet, wel andere factoren die een substantiële invloed kunnen hebben op de uitstoot. Dat zijn onderhoud en manipulatie, of tampering. Emissiereductiesystemen op moderne machines zijn kostbaar en onderhoudsgevoelig. Bij het afschakelen van dergelijke systemen, via bijvoorbeeld chiptuning, worden kosten bespaard zonder dat het werktuig slechter functioneert. Alleen de schadelijke uitstoot neemt flink toe: een moderne dieselmotor produceert rond de 12 g NO_x per kWh, dat door de emissiereductiesystemen tot een veel lager niveau wordt teruggebracht. Zonder dergelijke systemen is de uitstoot vergelijkbaar met een motor van dertig jaar oud.

6.7 Samenvatting voor de gebruiker

Het is essentieel te bepalen in welke emissieklasse en vermogensklasse de mobiele werktuigen zich bevinden. De emissies kunnen sterk variëren met deze klasse. Daarnaast is de wettelijke emissielimiet een beperkte maat voor de praktijkuitstoot, waarbij de afwijking tussen norm en praktijk voor modernere machines met strengere limieten groter is.

Bij de inzet is het vooral belangrijk om het aandeel lage last en stationair draaien goed in kaart te hebben, omdat dit medebepalend is voor de uitstoot.

De manier waarop een machine gebruikt wordt kan veel invloed hebben op de NO_x emissies. In een TNO onderzoek aan Stage IIIB en Stage IV machines, kwam naar voren dat 10% - 50% van de NO_x uitstoot afkomstig is van stationair draaien. Stationair draaien verminderen kan dus een enorme reductie aan NO_x uitstoot opleveren. Daarnaast vermindert het het brandstofverbruik en CO₂ emissie met ca 10%.

7 Binnenvaart

Binnenvaartschepen werken grotendeels op dieselmotoren en hebben vaak ook dieselgeneratoren aan boord, die bij stilliggen een grote bron van NO_x kunnen zijn. Vergelijkbare inzichten hierover bij mobiele werktuigen zijn nog niet voor binnenvaart meegenomen. Voor binnenvaartschepen zijn SCR-installaties nog beperkt toegepast. Daarom worden er nog geen NH₃ emissies bij de binnenvaart meegenomen. In de Emissieregistratie worden de emissies van binnenvaart gekoppeld aan de activiteit van de schepen, ofwel de afgelegde weg. De daadwerkelijke totale uitstoot wordt bepaald door totale activiteitsdata te combineren met de motorbelasting en de emissies. De recente veranderingen hebben vooral toepassing op de belading van schepen en de geleverde arbeid bij varen. Het is daarom niet triviaal om de emissies terug te rekenen naar individuele bronnen of schepen. Daar worden aannames voor gemaakt, nader beschreven in dit hoofdstuk. Dieselmotoren zijn standaard in de binnenvaart, op een handvol bijzondere schepen na, zoals LNG-schepen.

Bij de emissieberekening van de binnenvaart wordt rekening gehouden met de hoeveelheid energie die wordt verbruikt door de dieselmotoren van de binnenschepen voor zowel de aandrijving (voorstuwings- en boegschroefmotoren) als voor de generatoren. Het stationair draaien speelt in deze bepaling geen rol, emissies bij lage motorlast, los van de afgelegde afstand zijn in de laatste aanpassingen van de Emissieregistratie meegenomen. Er zijn daarvoor inschattingen geleverd als emissiefactoren bij stilligen. Er is beperkt inzicht in de draaiuren bij lage motorlast van de hoofdmotor en generatoren aan boord van een schip.

Het specifieke energieverbruik van de dieselmotoren en de bijbehorende emissiefactoren zijn afhankelijk van het bouwjaar van de motoren. Hierbij wordt rekening gehouden met de ingangsdata van de normstelling voor binnenvaartschepen (CCNR 1 en CCNR 2, EU stage IIIa en EU stage V). Om de vernieuwing van de motoren in de tijd te kunnen volgen wordt een parkmodel gehanteerd. Na ongeveer 15 jaar is de helft van alle nieuwe scheepsmotoren nog in bedrijf. Na ongeveer 30 jaar is 20% van de motoren nog steeds in bedrijf. De vervanging hangt met name af van het aantal draaiuren dat een scheepsmotor per jaar maakt. Dat varieert ruwweg tussen 1500 en 6000 uur per jaar afhankelijk van of een schip in bezit is van een éénmansbedrijf of een rederij die continuvaart bedrijft.

7.1 Beschikbaar gemaakte gegevens voor binnenvaart

Voor binnenvaart zijn de volgende gegevens gebruikt voor het bepalen van de emissiefactoren die zijn geleverd:

- De NO_x emissiefactoren in g/kWh geleverde arbeid. De factoren zijn geleverd per normklasse (pre-CCR, CCRI, CCRII en Stage V en per brandstofsoort (dieselbrandstof of LNG).
- Het specifiek brandstofverbruik van binnenvaart motoren, rekening houdend met de normklasse.
- De gemiddelde belasting van de motoren, o.a. via data van motorleveranciers, mede bevestigd door PROMINENT data.

- NH₃ emissiefactoren per brandstoftype, in g/MJ brandstof.
- De stookwaarde van brandstoffen, per jaar, in MJ/kg brandstof.

7.2 Aanpak emissiefactoren, vanuit beschikbare gegevens

Bij de berekening van het energiegebruik, en daarmee de emissies, wordt een fysisch model toegepast (Bolt, 2003) waarbij rekening wordt gehouden met:

1. Afmetingen van de schepen (lengte, breedte, diepgang (afhankelijk van belading)).
2. Afmetingen van de vaarwegen (VIN-data).
3. Vaarsnelheden (AIS-data) en gemiddelde stroomsnelheid van het water (globale jaargemiddelden).

De uitkomst van het fysisch model levert een vermogen op bij een bepaalde combinatie van een scheepstype (met gegeven snelheid en belading) op een bepaalde vaarweg. Van ieder scheepstype is tevens het gemiddelde vermogen afgeleid zodat de actuele motorbelasting berekend kan worden.

De scheepsindeling zelf is afkomstig van Rijkswaterstaat. Er wordt daarbij onderscheid gemaakt tussen motorschepen (13 typen), koppelverbanden (7 typen), en duwstellen (11 typen). De afmeting van de vaarwegen is ingedeeld volgens CEMT (9 CEMT-klassen) waarbij tevens voor een aantal rivieren (Waal, Lek en IJssel) apart afmetingen en stroomsnelheid zijn vastgelegd. Bij stroming is de motorbelasting anders.

De beschrijving van de emissieberekening voor historische jaren is gegeven in een EMS-protocol (Hulskotte, 2018). In dit stuk staat tevens de basis van de emissiefactoren vermeld. Er zijn een tweetal validatie-studies uitgevoerd door middelen van metingen in scheepspluimen langs vaarwegen: (Duyzer *et al.*, 2007) en (Erbrink, 2014). De eerste studie is aanleiding geweest om de emissiefactoren van NO_x aan te passen. De tweede studie heeft een aanbeveling gedaan voor de toepassing van een aangepaste warmte-output van binnenvaartschepen in de verspreidingsberekening.

Er is een model (PRELUDE) gemaakt waar modellers van luchtkwaliteit en depositie langs vaarwegen gebruik van kunnen maken. Dit model geeft een gemiddelde voor onderliggende variaties in vaarbeweging. Met behulp van dit model kan per vaarwegtype de emissie worden bepaald door het aantal schepen op te geven volgens de scheepsindeling van Rijkswaterstaat. Tevens moet het emissiejaar worden opgegeven en de belading van het schip (alsmede de vaarrichting op een rivier).

De basis van de emissiefactoren is:

$$Emissiefactor = \frac{som(emissie)}{som(gevaren\ afstand)}$$

Onderliggend aan de som emissies, liggen allerlei details over belading, stroomopwaarts, stroomafwaarts, kanalen, diepgang, manoeuvreren in havens en bij sluizen. Ook zijn het additioneel energieverbruik op de hoofdmotor en de boegschroefmotoren belangrijk voor de totale uitstoot. In de huidige getallen zijn deze details niet beschikbaar, en wordt er een gemiddelde gegeven voor de

afgelegde afstand per vaarweg, met onderscheid tussen stroomopwaarts en stroomafwaarts voor rivieren.

Voor de toekomstige jaren is in het PRELUDE-model gebruik gemaakt van POTAMIS. Met dit model wordt een inschatting gemaakt van de toekomstige verkeersintensiteit (verdeeld over de verschillende scheepstypen en vaarwegen) en de introductie van nieuwe technologie (o.a., introductie van stage V en gebruik LNG als brandstof).

De actuele en toekomstige emissiefactoren uit PRELUDE zijn aangeleverd ten behoeve van AERIUS. Dit betreft de getallen die consistent zijn met de totale emissies en de afgelegde kilometers voor een gegeven zichtjaar.

7.3 Inzet specificaties

De emissies worden berekend aan de hand van de volgende gegevens:

- Specificatie van het schip: type schip (31 typen in totaal), gemiddeld over afmetingen, breedte, en diepgang.
- Afmetingen van de vaarwegen (VIN-data) ingedeeld volgens 9 CEMT klassen.
- Vaarsnelheden uit AIS-data en gemiddelde stroomsnelheid van het water.

7.4 Uitzonderingen die naar afwijkende emissies kunnen leiden

De testcyclus voor de emissietest van de typekeuring is al 40 jaar hetzelfde, terwijl er bijvoorbeeld voor wegtransport compleet nieuwe cycli zijn gekomen. De zogenaamde E3 cyclus voor schepen, kent vier motorbelastingpunten met weegfactoren. De gemiddeld belasting is 67%, terwijl door onderzoek is aangetoond dat bij binnenvaart de gemiddelde belasting tussen 30% en 40% ligt (o.a. PROMINENT). Een simpele aanpassing van de weegfactoren en toevoegen van het stationair punt ('idle') zou een enorme verbetering geven en het risico van hogere praktijkemissies verkleinen. Dat moet wel op Europese schaal geregeld worden. Hoe lager de emissielimiet, des te belangrijker het wordt om de juiste weegfactoren te hanteren en ook 'idle' toe te voegen. Het gevolg is dat bij lage motorlast de emissies veel hoger zijn dan de limiet. Met modernere motoren, en strengere limieten zijn deze afwijkingen over het algemeen groter dan voor oudere motoren. Voor schepen met een continue hoge belasting, bijvoorbeeld volle tankers stroomopwaarts vanuit de zeehaven, kunnen de emissies hierdoor lager zijn.

7.5 Samenvatting voor de gebruiker

De emissiefactoren voor binnenvaart zijn op basis van de afgelegde afstand. Ze zijn onderverdeeld naar de scheepcategorieën op basis van de emissieklasse van de motoren. Dit zijn gemiddelden, waarin details zoals belading en vaarsnelheid niet beschikbaar zijn. In de emissiefactoren is er over deze situaties gemiddeld. Voor een specifieke inzet of belading kunnen de emissies afwijken van dit gemiddelde. In het bijzonder zijn lage last, stilliggen, en manoeuvreren in haven en bij sluizen aparte situaties, die tot andere totale emissies kunnen leiden.

8 Zeevaart

De totale NO_x emissies van zeevaart in het Nederlandse territorium is een grote bron, waarvan een groot deel buitengaats op de Noordzee plaatsvindt. Omdat zeevaart een internationale aangelegenheid is, vallen de eisen aan deze scheepsmotoren onder de IMO (International Maritime Organisation). Samen met de andere landen aan de Noordzee wordt daarnaast gewerkt aan het beperken van NO_x emissies op het Continentaal Plateau, in de NECA (*NO_x Emission Control Area*). In de toekomst kunnen er dus nieuwe NO_x reducerende technologieën aan boord van zeeschepen komen. De verwachting is dat dat niet tot significante NH₃ emissies zal leiden.

De maximale NO_x uitstoot van schepen wordt gereguleerd door IMO (Regulation 13).

De Tier klasse welke van toepassing is wordt bepaald door de 'kiellegdatum', het begin van de bouw van het schip:

- Tier I: vanaf 2000 t/m 2010
- Tier II: vanaf 2011 (voor alle schepen wereldwijd)
- Tier III: voor de NECA (*NO_x Emission Control Area*), afhankelijk van de regio: voor Europa (Noordzee en Baltische zee) wordt dit 2021.

De maximale NO_x uitstoot voor de Tier klassen is afhankelijk van het maximale motortoerental, zoals weergegeven in onderstaande grafiek. In praktijk betekent dit dat grotere motoren meer NO_x mogen uitstoten.

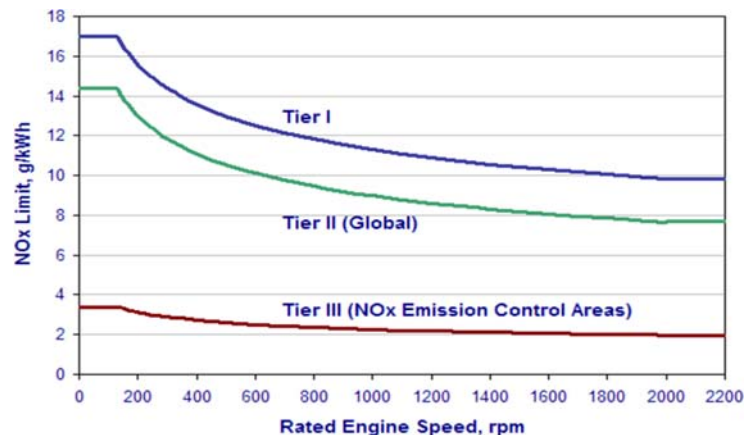


Figure 6: NO_x emissielimieten voor IMO Tier I-III in g/kWh.

8.1 Het effect van zwaveleisen aan de brandstof op NO_x emissies

Naast NO_x zijn zwaveleisen van belang. De zwaveleisen zijn van toepassing op alle schepen en niet alleen op nieuwe schepen. De zwaveleisen hebben in de meeste gevallen ook invloed op de NO_x emissie, omdat een ander type brandstof gebruikt wordt. Laagzwavelige brandstof kan tot ca 10% NO_x reductie leiden ten opzichte van een hoogzwavelige brandstof. De zwaveleisen zijn geformuleerd in IMO Regulation 14.

Het bestaat uit zowel een wereldwijde eis, als een eis voor een SECA (Sulphur Emission Control Areas):

- Wereldwijd: $S < 3,5\%$ vanaf 2012 en $S < 0,5\%$ vanaf 2020
- SECA: $S < 0,1\%$. De Noordzee en Baltische zee zijn SECA sinds 2015.

8.2 Beschikbaar gemaakte gegevens voor zeevaart

De gegevens die beschikbaar zijn gebruikt om emissiefactoren voor de zeevaart vast te stellen:

- AIS gegevens: daardoor is precies na te gaan hoe snel schepen varen, wat de vaarroute is, welk type schip het is, en hoe lang de schepen stil liggen (voor en in de haven).
- Bunkergegevens: de havenbedrijven registreren de hoeveelheden en typen gebunkerde brandstof. Het type brandstof heeft invloed op de emissies.
- De configuratie en specificaties van de aandrijflijn van schepen, motor, as, overbrenging, en schroef, zijn via diverse platforms in te zien.

De zeevaart kent een flink aantal brandstoftypen, hetgeen ook te maken heeft met het gebruiken van residuale brandstoffen (restproducten uit de raffinaderij) in de zeevaart.

Mede door aanscherping van regio afhankelijke zwaveleisen, zijn een aantal sub varianten ontstaan:

- MGO: Marine Gas Oil, een volledig gedistilleerde brandstof met een zwavelgehalte lager dan 0,1%
- MDO: Marine Diesel Oil, een blend van residuale en gedistilleerde brandstof
- HFO: Heavy Fuel Oil, een residuale brandstof, standaard met een hoog zwavelgehalte ($< 3,5\%$). Maar ook in laag zwavel varianten:
 - o VLSFO – very low sulphur fuel oil: $S < 0,5\%$
 - o ULSFO – ultra low sulphur fuel oil: $S < 0,1\%$

Zowel MGO als ULSFO mogen in het Noordzeegebied en in de havens gebruikt worden⁸. De naam ULSFO kan verwarrend werken in vergelijking tot wegtransport, volgens EN 590 specificatie. Bij wegtransport heeft een ULSD (ultra low sulphur diesel) een maximaal zwavelgehalte van 10 ppm (0,001%), terwijl ULSFO een maximaal zwavelgehalte heeft van 0,1%, een factor 100 hoger dus. De lagere zwavel heeft ook beperkt positieve effect op de NO_x uitstoot.

Naast diesel brandstof, is ook LNG, vloeibaar aardgas, in opkomst. De Nederlandse vloot kent ca 11-12 schepen welke varen op LNG. LNG motoren hebben over het algemeen een lage uitstoot van NO_x, SO_x en fijnstof. Hiervoor zijn aparte emissiefactoren.

⁸ De Noordzee is een zogenaamde ECA (Emission Control Area) waarvoor de strenge zwaveleis geldt. Dit mag ook gerealiseerd worden door toepassing van hoog zwavelige brandstof in combinatie met een SO_x scrubber.

8.3 Aanpak voor het bepalen van de NO_x uitstoot van zeeschepen

De zeeschepen nabij de kust en in de haven hebben speciale aandacht. Er gelden daar bijvoorbeeld andere eisen aan brandstoffen, zoals de zwavelinhoud. Bij de jaarlijkse bepaling van de emissie van zeeschepen wordt rekening gehouden met een groot aantal factoren:

1. Soort aandrijfmotor (dieselmotor, gasturbine, stoomturbine)
2. Type dieselmotor (slow speed, medium/high speed)
3. Inzet van voortstuwingsmotoren, hulpmotoren en boilers
4. Brandstofsoort (en het eventuele overschakelen hiervan)
5. Bouwjaar van de motor en daaraan gekoppelde normstelling en motorefficiëntie
6. Ontwerp vermogen
7. Ontwerp snelheid
8. Het bruto-tonnage
9. Momentane motorbelasting (Ontwerpsnelheid, Vaarsnelheid)

Hoe er in een concrete emissieberekening rekening gehouden wordt met deze factoren staat beschreven in de bijlage van het rapport (Kaufmann *et al.*, 2020). Ook is in het rapport beschreven wat de bronnen zijn van de cijfers die worden toegepast in de berekeningen.

In dit rapport staat beschreven hoe de emissies over 2018 zijn bepaald in de Nederlandse havengebieden en op het Nederlands Continentaal Plat (NCP). In deze berekening is rekening gehouden met alle genoemde individuele ontwerpkenmerken van de zeeschepen die in 2018 gevaren hebben op deze wateren. Bovendien is rekening gehouden met de gemeten vaarsnelheden en met de verblijftijden van de individuele schepen in havens en op ankerplaatsen. Een belangrijke bron van snelheid en locatie van de schepen vormen de AIS-data die door de kustwacht aan MARIN worden geleverd.

Om gebruikers behulpzaam te zijn met het berekenen van emissies zijn eenvoudige emissiekentallen (gemiddelden) berekend die afgeleid zijn van de complete uitkomsten van de emissieberekening zoals vermeld in het rapport (Kaufmann *et al.*, 2020). Uit de totalen van de emissies zijn gemiddelden voor verschillende situaties afgeleid. De aan AERIUS geleverde emissiekentallen zijn uitgedrukt als hoeveelheid per gevaren kilometer (kg/km) voor varende schepen of hoeveelheid per uur (kg/uur) voor stilliggende schepen. Om de modellen voor de verspreidingsmodellen te ondersteunen zijn tevens kentallen berekend die nodig zijn om deze modellen te voeden namelijk de gemiddelde uitworfhoogte, verticale spreiding, schoorsteenhoogte, en de warmte-output, van de uitlaatgassen. Dergelijke gegevens kunnen gebruikt worden om de stijging van het uitlaatgas te bepalen. De methoden die toegepast zijn voor afleiding van deze kentallen zijn beschreven in het rapport (Hulskotte, 2019).

8.4 Classificatie van zeeschepen

In dit onderzoek zijn kentallen bepaald voor de jaren 2014 tot en met 2030 voor de scheepstypen die zijn ingedeeld volgens Tabel 4.

Tabel 4: Toegepaste scheepstype indeling in dit rapport

Scheepstype	EMS_type_upd_decode
Hoofdgroep 1: Olietankers, overige tankers	Oil tanker
	Chemical/LNG/LPG tanker
Hoofdgroep 2: Bulkschepen	Bulk carrier
Hoofdgroep 3: Container, GDC (stukgoed), RoRo	Container ship
	General Dry Cargo
	RoRo Cargo / Vehicle
Hoofdgroep 4: Passagiersschepen	Passenger
Hoofdgroep 5: Koelschepen en Vissereschepen	Reefer
	Fishing
Hoofdgroep 6: Sleepboten, werkschepen en overige	Miscellaneous
	Tug/Supply
	Non Merchant

Er is een indeling in grootteklassen, maximaal gewicht, van de schepen gemaakt bij de afleiding van de emissiefactoren. Deze staat weergegeven in Tabel 5.

Tabel 5: Grootteklassen (Grosston, GT)

Size	Van Grosston t/m Grosston
1	100 – 1599
2	1600 – 2999
3	3000 – 4999
4	5000 – 9999
5	10000 – 29999
6	30000 – 59999
7	60000 – 99999
8	≥ 100000

Anders dan voor andere bronnen, zijn er voor zeeschepen meerdere brandstoffen mogelijk. Deze hebben vooral effect op uitstoot van de zwaveloxides en de vorming en uitstoot van deeltjes. Voor NO_x emissies zijn de effecten van brandstoffen kleiner. Het is wel zo dat een modern schip wellicht niet meer geschikt is voor alle soorten brandstoffen. Hierin is geen onderscheid gemaakt in de geleverde emissiefactoren.

De generatoren aan boord van een schip kunnen bij aanmeren, in de haven, een grote bron zijn van NO_x emissies. In dat geval is het relevant om de informatie over mobiele werktuigen te gebruiken om een indicatie te krijgen van de grootte van deze bron en hoe dat samenhangt met de inzet. Maar qua emissiewetgeving vallen generatoren op zeeschepen ook onder IMO Tier II en Tier III.

8.5 Afleiding van vermogen uit eigenschappen

Voor elke type schip wordt een aandrijflijnvermogen berekend aan de hand van de gemiddelde vaarsnelheid per gebied, het type schip (inclusief tonnageklasse), de belading, de NO_x emissieklasse, het type motor en de brandstofsoort. Het vermogen van de generator sets, belangrijk voor wachten op zee en in de havens, wordt met aparte kentallen bepaald. De NO_x emissie wordt berekend aan de hand van deze belasting en emissieklasse en grootte van de motor.

8.6 Uitzonderingen die naar afwijkende emissies kunnen leiden

De volgende uitzonderingen kunnen leiden tot hogere emissies:

- Omdat schepen vaak residuale brandstoffen gebruiken kunnen er koolwaterstoffen of andere (chemische) componenten in de brandstof komen, die er niet in mogen zitten en kunnen leiden tot uitstoot van ongewenste emissies. Naar verwachting heeft dit geen grote invloed op de stikstofemissie (NO_x , NH_3).
- Soms gebruiken de schepen op de Noordzee brandstof met een te hoog zwavelgehalte. Dit leidt maar heel beperkt tot NO_x toename, maar leidt wel tot toename van de SO_x en fijnstof emissie.
- Bij Tier III zal een aparte NO_x reductietechnologie toegepast worden. Meestal in de vorm van een SCR de NO_x katalysator. Deze is uitschakelbaar, waardoor de NO_x emissie een factor 3 tot 4 omhoog kan gaan. Het belang van handhaving of monitoring van het correct gebruik van de NO_x reductie technologie groeit wordt dus belangrijk.
- De toegepast E3 testcyclus heeft beperkingen. Het laagste belastingpunt is 25% vermogen en het gemiddeld vermogen is 67%. In een onderzoek (Chih-Wen Cheng et al. 2018), is vastgesteld dat bij een vijftal schepen de NO_x op basis van het werkelijk belastingprofiel ca 30% hoger uitvalt dan volgens de typekeuringstest. Bij Tier III zou dat getal kunnen oplopen tot 50% - 60%. Ook kan bij Tier III, bij laag vermogen, bijvoorbeeld bij manoeuvreren in de havens, de NO_x emissie sterk omhoog gaan onder 25% belasting. Dit omdat de NO_x reductie technologie niet effectief meer werkt of niet optimaal gekalibreerd wordt voor dat belastinggebied.

8.7 Samenvatting voor de gebruiker

De emissiefactoren van zeevaart zijn beschikbaar voor gemiddeld varen, in de verschillende de situaties, in kg/km, en gemiddeld stilliggen in kg/uur. Omdat het grote en hoge bronnen zijn, zijn daarbij ook schoorsteeneigenschappen en warmtestromen beschikbaar. De emissiefactoren zijn gemiddeld over de IMO motorklasse, en gedifferentieerd naar, sloopstypen, en gewichtsklasse. Zeeschepen kunnen op verschillende brandstoffen draaien, dat heeft een grote invloed op de fijnstofuitstoot maar kleine invloed op de NO_x emissies.

9 Afsluiting

Dit rapport geeft een overzicht van de aspecten die samenhangen met de NO_x (en daarin NO₂) en NH₃ uitstoot van mobiele bronnen, wegverkeer, mobiele werktuigen, binnenvaart en zeevaart. Onderliggende literatuur, benoemd in de literatuurlijst, kan verdere toelichting en verduidelijking geven bij de aspecten die geschetst worden in het rapport. Omdat veel van achterliggende onderzoeken gericht zijn geweest op de nationale totalen en de gemiddelde uitstoot per brontype, ontbreekt het soms aan details, die relevant kunnen zijn voor een specifieke situatie.

In het bijzonder kan aanvullend onderzoek noodzakelijk zijn als er NO_x en NH₃ reductiepotentieel wordt verondersteld door een verandering van de inzet, of de toepassing van specifieke technologieën.

Europese en wereldwijde wetgeving voor emissies van motoren hebben tot dusver een beperkte effectiviteit, met hoge NO_x emissies in praktijkcondities tot gevolg, vooral voor dieselmotoren. Over het algemeen wordt het technische reductiepotentieel niet gehaald. De hoge praktijkemissies en het technische potentieel van de huidige technologie verantwoorden verdere en stevige inzet door de Nederlandse overheid op strengere emissie-eisen die beter zijn afgestemd op de praktijkinzet. Goed internationaal onderzoek, beleid en regelgeving biedt ook een goede basis om concrete nationale en lokale maatregelen te nemen, om emissies aan de bron te reduceren. De concrete problemen die voorkomen in de Nederlandse praktijk, bij het reduceren van NO_x emissies, kunnen ook helpen om internationaal tot betere inzichten en maatregelen te komen.

10 Literatuur

- [Ntziachristos & Samaras 2000] L. Ntziachristos, Z. Samaras: *COPERT III computer programme to calculate emissions from road transport: Methodology and emission factors (version 2.1)*: ETC/AEM 2000
- [TNO 2003] J. Oonk, J. H. J. Hulskotte, W. W. R. Koch, and G. Kuipers: *Methodiek voor afleiding van emissiefactoren van binnenvaartschepen* : TNO, 2003. — TNO MEP R2003/437
- [IFEU 2004] U. Lambrecht, H. Helms, K. Kullmer, W. Knörr: *Entwicklung eines Modells zur Berechnung der Luftschadstoffemissionen und des Kraftstoffverbrauchs von Verbrennungsmotoren in mobilen Geräten und Maschinen*: Heidelberg, 2004
- [US EPA 2004] *Exhaust and Crankcase Emission Factors for Nonroad Engine Modeling--Compression-Ignition*: Report NR-009c, 2004
- [TNO 2007] J. Duyzer, H. Westrate, A. Hensen, and A. Kraai: *Onderzoek Naar Emissiefactoren Voor Fijnstof En Stikstofoxiden Voor de Binnenscheepvaart (Eindrapport)* : TNO, 2007. — TNO 2007-A-R0791/B
- [Wang *et al.* 2008] D. Y. Wang, S. Yao, M. Shost, J.-H. Yoo, *et al.*: Ammonia Sensor for Closed-Loop SCR Control. In: *SAE International Journal of Passenger Cars - Electronic and Electrical Systems* (2008), Nr. 1
- [TNO 2009] J.H.J. Hulskotte, R.P. Verbeek: *Emissiemodel mobiele machines gebaseerd op machineverkopen in combinatie met brandstofafzet (EMMA)*: TNO, 2009. TNO-034-UT-2009-01782_RPT-ML
- [Chih-Wen Cheng, Jian Hua & Daw-Shang Hwang, 2018]. Nitrogen oxide emission calculation for post-Panamax container ships by using engine operation power probability as weighting factor: A slow-steaming case, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 68:6, 588-597, DOI: 10.1080/10962247.2017.1413440
- [Hulskotte *et al.* 2012] J. H. J. Hulskotte and E. Bolt: EMS-protocol Emissies door binnenvaart: verbrandingsmotoren, versie 4, Taakgroep Verkeer en Vervoer (Emissieregistratie) (2012)
- [TNO 2012] A. Hensema, P. van Mensch, and R. J. Vermeulen: *Tail-Pipe Emissions and Fuel Consumption of Standard and Tampered Mopeds* : TNO, 2012. — TNO 2013 R10232
- [Knörr *et al.* 2013] W. Knörr, C. Heidt, M. Schmied, and B. Notter: Aktualisierung der Emissionsberechnung für die Binnenschifffahrt und Übertragung der Daten in TREMOD (Endbericht), IFEU Heidelberg & INFRAS (2013)
- [TNO 2013] A. Hensema, N. E. Ligterink, and G. Geilenkirchen: *VERSIT+ Emissiefactoren voor standaard rekenmethode 1 en 2 - 2013 update* : TNO, 2013. — TNO 2013 R11083
- [DNV GL 2014] J. J. Erbrink: *Metingen En Modelontwikkeling Binnenvaart; Modelvalidatie* : DNV GL, 2014. — DNV GL-14-3202
- [Wijnbelt 2014] M. Wijnbelt: Output of IVR database: TNO-60028758.xlsx (2014)
- [TNO 2014a] T. C. Kraan, N. E. Ligterink, and A. Hensema: *Uncertainties in Emissions of Road Traffic: Euro-4 Diesel NOx Emissions as Case Study* : TNO, 2014. — TNO 2012 R11316
- [TNO 2014b] Hulskotte, J., Gebruikershandleiding POTAMIS, Prognosis Of Transport Air emissions Model of Inland Shipping – 27 augustus 2014, Utrecht: TNO

- [TNO 2014c] Hulskotte, J., POSEIDON gebruikershandleiding Prognosis Of Shipping Emissions by Improved enDuring Observation of Navigation, Utrecht: TNO
- [TNO 2014d] Hulskotte, J., MEPHISTO gebruikershandleiding Machinery Emissions Prognosis Helped by Information on Sales of Technology and Oils, Utrecht: TNO
- [TNO 2015a] P. S. van Zyl, N. E. Ligterink, G. Kadijk, J. Borken-Kleefeld, *et al.*: *In-Use Compliance and Deterioration of Vehicle Emissions* : TNO, 2015. — TNO 2015 R11043
- [TNO 2015c] U. Stelwagen and N. E. Ligterink: *NH3 Emission Factors for Road Transport* : TNO, 2015. — TNO 2015 R11005
- [TNO 2015d] G. Kadijk, N. E. Ligterink, and J. S. Spreen: *On-Road NOx and CO2 Investigations of Euro 5 Light Commercial Vehicles* : TNO, 2015. — TNO 2015 R10192
- [TNO 2015e] R. P. Verbeek and J. H. J. Hulskotte: *Review Voorstel Voor Europese Emissienormering van de Binnenscheepvaart* : TNO, 2015. — TNO 2015 R10424
- [Traa 2015] M. Traa: Trendextrapolatiemodel voor vrachtautoparken. In: *Den Haag: PBL* (2015)
- [TNO 2016a] V. a. M. Heijne, N. E. Ligterink, and U. Stelwagen: *2016 Emission factors for diesel Euro-6 passenger cars, light commercial vehicles and Euro-VI trucks* : TNO, 2016. — TNO 2016 R10304
- [TNO 2016b] J. S. Spreen, G. Kadijk, R. J. Vermeulen, V. A. M. Heijne, *et al.*: *Assessment of Road Vehicle Emissions: Methodology of the Dutch in-Service Testing Programmes* : TNO, 2016. — TNO 2016 R11178v2
- [TNO 2016c] R. F. A. Cuelenaere and N. E. Ligterink: *Assessment of the Strengths and Weaknesses of the New Real Driving Emissions (RDE) Test Procedure* : TNO, 2016. — TNO 2016 R11227
- [TNO 2016d] N. E. Ligterink: *Dutch Market Fuel Consumption for GHG Emissions* : TNO, 2016. — TNO 2016 R10700
- [TNO 2016e] N.E. Ligterink, *On-road determination of the average Dutch driving behaviour for vehicle emissions*, TNO, 2016. — TNO 2016 R10188.
- [TNO 2016g] G. Kadijk, N. E. Ligterink, P. van Mensch, and R. T. M. Smokers: *NOx Emissions of Euro 5 and Euro 6 Diesel Passenger Cars - Test Results in the Lab and on the Road* : TNO, 2016. — TNO 2016 R10083
- [TNO 2016h] V. a. M. Heijne, G. Kadijk, N. E. Ligterink, P. J. van der Mark, *et al.*: *NOx Emissions of Fifteen Euro 6 Diesel Cars: Results of the Dutch LD Road Vehicle Emissions Testing Programme 2016* : TNO, 2016. — TNO 2016 R11177
- [TNO 2016i] R. J. Vermeulen, W. A. Vonk, R. N. van Gijlswijk, and E. G. Buskermolen: *The Netherlands In-Service Emissions Testing Programme for Heavy-Duty Vehicles 2015-2016 - Annual Report* : TNO, 2016. — TNO 2016 R11270
- [TNO 2016j] N. E. Ligterink and R. T. M. Smokers: *Uitstoot van auto's bij snelheden hoger dan 120 km/u* : TNO, 2016. — TNO-2016-TL-NOT-0100295342
- [TNO 2016k] N.E. Ligterink and A.R.A Eijk, *Uncertainty and development of vehicle emission factors underlying European air-quality models* : TNO 2016 R10520.
- [Geilenkirchen *et al.* 2016] G. P. Geilenkirchen, H. ten Broeke, and A. Hoen: Verkeer en vervoer in de Nationale Energieverkenning 2015. In: *Den Haag: PBL* (2016)

- [CBS 2017] O. Swertz, S. Brummelkamp, J. Klein, N. Ligterink: *Adjustment of heating values and CO2 emission factors of petrol and diesel*: CBS, 2017.
- [TNO et al. 2017] TNO, Multronic, SGS, BAW, et al.: D5.7 Technical evaluation of procedures for Certification, Monitoring & Enforcement - Grant Agreement 633929, Prominent (2017)
- [European Commission 2017] L. Ntziachristos, W. A. Vonk, G. Papadopoulos, P. van Mensch, et al.: *Effect Study of the Environmental Step Euro 5 for L-Category Vehicles* : European Commission, 2017. — ET-04-17-619-EN-N
- [TNO 2017b] N. E. Ligterink and T. Smit: *Inzicht in het energieverbruik, de CO2 uitstoot en de NOx-uitstoot van het spoorgoederenvervoer* : TNO, 2017. — TNO 2017 R11414
- [Traa et al. 2017] M. Traa and G. Geilenkirchen: Koterpa 2.0: Ramingsmodel voor het personenautopark en zijn gebruik. In: *Den Haag: PBL* (2017)
- [TNO 2017c] R. J. Vermeulen, R. P. Verbeek, and S. van Goethem: *Mogelijkheden om manipulatie van AdBlue-systemen bij vrachtwagens vast te stellen en terug te dringen - eindrapport* : TNO, 2017. — TNO 2017 R11421
- [Schoots et al. 2017] K. Schoots, M. Hekkenberg, and P. Hammingh: Nationale Energieverkenning 2017. In: *Petten: ECN* (2017)
- [TNO 2017d] G. Kadijk, R. J. Vermeulen, E. G. Buskermolen, M. Elstgeest, et al.: *NOx Emissions of Eighteen Diesel Light Commercial Vehicles: Results of the Dutch Light-Duty Road Vehicle Emission Testing Programme 2017* : TNO, 2017. — TNO 2017 R11473
- [Koninklijke BLN - Schuttevaer 2017] Koninklijke BLN - Schuttevaer: "Resultaten enquête vergroening & duurzaamheid binnenvaart." URL <https://www.verbrandingsmotor.nl/document/resultaten-enquete-vergroening-duurzaamheid-binnenvaart>. - <https://www.verbrandingsmotor.nl/document/resultaten-enquete-vergroening-duurzaamheid-binnenvaart> (March 6, 2019). — VIV - verbrandingsmotor.nl
- [TNO 2017f] N. E. Ligterink: *The Fleet Composition on the Dutch Roads Relevant for Vehicle Emissions* : TNO, 2017. — TNO 2017 R10517
- [Pouwels et al. 2017] M. Pouwels, M. van der Spoel, and T. de Wit: Verbetering huidig en toekomstig vaarwegennet met behulp van AIS data, CBS Heerlen (2017)
- [TNO et al. 2018] TNO, SPB, and STC: D2.8 / D2.9 Standardized model and cost/benefit assessment for right-size engines and hybrid configurations - Grant Agreement 633929, Prominent (2018)
- [TNO 2018a] N. E. Ligterink, R. Louman, E. G. Buskermolen, and R. P. Verbeek: *De inzet van bouwmaschinen en de bijbehorende NOx- en CO2-emissies* : TNO, 2018. — TNO 2018 R10465
- [TNO 2018d] G. Kadijk, M. Elstgeest, N. E. Ligterink, and P. J. van der Mark: *Emissions of Twelve Petrol Vehicles with High Mileages* : TNO, 2018. — TNO 2018 R11114
- [Hulskotte 2018] J. H. J. Hulskotte: EMS-protocol Emissies door binnenvaart: verbrandingsmotoren, versie 5, Taakgroep Verkeer en Vervoer (Emissieregistratie) (2018)
- [TNO 2018e] M. Elstgeest, V. a. M. Heijne, and N. E. Ligterink: *Nederlandse wagenparksamenstelling 2017* : TNO, 2018. — TNO 2018 R10367

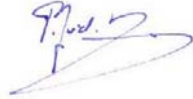
- [TNO 2018f] R. J. Vermeulen, R. N. van Gijlswijk, and S. van Goethem: *Tail-Pipe NOx Emissions Euro VI Buses in Daily Operation in the Netherlands* : TNO, 2018. — TNO 2018 R11328
- [TNO 2018g] R. J. Vermeulen, R. N. van Gijlswijk, D. van Heesen, E. G. Buskermolen, et al.: *Tail-Pipe NOx Emissions of Refuse Collection Vehicles with a Euro VI Engine in Daily Operation in the Netherlands* : TNO, 2018. — TNO 2018 R10313
- [EEA/EMEP 2019] M. Winther, C. Dore: *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019: Non-road mobile sources and machinery*.
- [TNO 2019a] R. J. Vermeulen, R. N. van Gijlswijk, D. van Heesen, E. G. Buskermolen, et al.: *Dutch In-Service Emissions Testing Programme 2015-2018 for Heavy-Duty Vehicles: Status Quo Euro VI NOx Emission* : TNO, 2019. — TNO 2019 R10519
- [PBL 2019] PBL: Effecten ontwerp klimaatakkoord. In: *Den Haag: PBL (2019)*
- [TNO 2019b] A. P. Indrajana, R. N. van Gijlswijk, N. E. Ligterink, and R. T. M. Smokers: *Effects of a Software Update on NOx Emissions and Performance of a VW Polo* : TNO, 2019. — TNO 2019 R10541
- [Ligterink et al. 2019] N. E. Ligterink, G. Kadijk, M. Elstgeest, and P. van Mensch: Emission compliance over the lifespan of a vehicle. In: *Transport and Air Pollution Conferene in Thessaloniki, Greece, 15-17 May 2019, 1-9 (2019)*
- [TNO 2019c] J. H. J. Hulskotte: *Kentallen Zeeschepen Ten Behoeve van Emissie-En Verspreidingsberekeningen in AERIUS, Actualisatie 2018* : TNO, 2019. — TNO 2019 R11040
- [Hammingh et al. 2019] P. Hammingh, M. Menkveld, C. Volkers, J. van Minnen, et al.: Kortetermijnraming voor emissies en energie in 2020. In: *Den Haag: PBL (2019)*
- [TNO 2019d] P. van Mensch, R. F. A. Cuelenaere, N. E. Ligterink, and G. Kadijk: *Update: Assessment of Risks for Elevated Emissions of Vehicles under the Boundaries of RDE. Identifying Relevant Driving and Vehicle Conditions and Possible Abatement Measures* : TNO, 2019. — TNO 2019 R10534
- [TNO 2019e] Ligterink, N.E. et al, *De groeiende ammonia-emissies van dieselveertuigen en machines*, Tijdschrift LUCHT 2019-1.
- [Dieselnet 2020a] Dieselnet: "Emission Standards: Europe: Cars and Light Trucks." URL <https://dieselnet.com/standards/eu/ld.php>. - <https://dieselnet.com/standards/eu/ld.php> (June 8, 2020)
- [Dieselnet 2020b] Dieselnet: "Emission Standards: Europe: Heavy-Duty Truck and Bus Engines." URL <https://dieselnet.com/standards/eu/hd.php>. - <https://dieselnet.com/standards/eu/hd.php> (June 8, 2020)
- [Dieselnet 2020c] Dieselnet: "Emission Standards: Europe: Nonroad Engines." URL <https://dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php>. - <https://dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php> (June 8, 2020)
- [Dieselnet 2020d] Dieselnet: "Emission Standards: IMO Marine Engine Regulations." URL <https://dieselnet.com/standards/inter/imo.php#nox>. - <https://dieselnet.com/standards/inter/imo.php#nox> (June 8, 2020)
- [TNO 2020a] A. P. Indrajana, N. E. Ligterink, and P. J. van der Mark: *Monitoring-Based Assessment of the NOx-Emissions of a Renault Talisman and a Volkswagen Caddy* : TNO, 2020. — TNO 2020 R10438
- [TNO 2020b] N. E. Ligterink: *Petrol Fuel and Blending Ethanol Analyses* : TNO, 2020. — TNO 2020 R10138

[Hulskotte 2020] J. H. J. Hulskotte: *POSEIDON v1.2*, 2020

[Marin 2020] K. F. Kaufmann and J. H. J. Hulskotte: *Sea Shipping Emissions 2018: Netherlands Continental Shelf, 12 Mile Zone and Port Areas* : Marin, 2020. — MARIN report no. 32419-10MSCN-Rev.2

11 Ondertekening

Den Haag, 8 oktober 2020

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'P. van der Mark', with a stylized flourish at the end.

Peter J. van der Mark
Projectleider

TNO

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'N. Ligterink', with a stylized flourish at the end.

Norbert E. Ligterink
Auteur