

TNO-rapport**TNO 2021 R12305****AUB (AdBlue verbruik, Uren, en
Brandstofverbruik): een robuuste schatting
van NO_x en NH₃ uitstoot van mobiele
werktuigen****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	10 december 2021
Auteur(s)	Norbert E. Ligterink, Stijn Dellaert, Pim van Mensch
Exemplaarnummer	2021-STL-RAP-100342672
Aantal pagina's	30 (incl. bijlagen)
Opdrachtgever	RIVM
Projectnaam	Update Aerijs emissiefactoren
Projectnummer	060.47477

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.

© 2021 TNO

Samenvatting

RIVM heeft TNO gevraagd om een door TNO gebruikte methodiek uit te werken die het bepalen van de NO_x en NH₃ emissies van mobiele werktuigen vereenvoudigd in AERIUS. De huidige methodiek in AERIUS is gebaseerd op de aanpak die in de Emissieregistratie werd toegepast. Met nieuwe inzichten uit nieuwe metingen is deze aanpak in de Emissieregistratie veranderd in 2020 en complexer geworden. Zonder metingen of aannames van de specifieke motorbelasting kunnen de emissies nog moeilijk ingeschat worden met de nieuwe aanpak van de Emissieregistratie.

De NO_x en NH₃ emissies van mobiele werktuigen hangen sterk samen met de technologie en de inzet. Een projectmanager, uitvoerder, of een kostencalculator van een project met mobiele werktuigen heeft in principe inzicht in de specifieke inzet van de mobiele werktuigen voor bepaalde werkzaamheden. De nieuwe aanpak van de emissieberekeningen in AERIUS maakt gebruik van andere invoergegevens. Deze gegevens zijn te bepalen als er toegang is tot, en ervaring is met, de specifieke machines en de werkzaamheden.

De aanpak is gebaseerd op drie soorten registratiegegevens: AdBlue-verbruik, Uren, en Brandstofverbruik (kortweg AUB). Met deze drie gegevens kan redelijk betrouwbaar de uitstoot van machines worden vastgesteld. Sterker nog, emissies hangen sterk af van deze gegevens en verschillende soorten inzet en de werking van emissiecontrole technologie zullen zichtbaar zijn in deze gegevens. Een lager brandstofverbruik hangt samen met een lage motorbelasting, en een hoog AdBlue-verbruik met een goedwerkend SCR systeem dat de NO_x uit het uitlaatgas filtert.

In vergelijking met de eerdere methodes is het onderscheid tussen machines hiermee teruggebracht tot de meest relevante voor de uitstoot. Met brandstofverbruik gegevens is motorvermogen en brandstofsoort alleen nog relevant voor de indeling in de zeven categorieën, vijf voor dieselmotoren (X, A, B, C, en D, waarbij de C en D met SCR technologie zijn), één voor benzine en LPG, en twee voor zware wegvoertuigen (middelzware en zware vrachtwagens) op de bouwplaats.

De emissieberekeningen zijn daarmee:

$$\text{Emissies [kg]} = C_u * \text{Draai[uren]} + C_b * \text{brandstof [liters]} + C_a * \text{AdBlue [liters]},$$

waarin de C's de coëfficiënten zijn per machinecategorie en voor NO_x en NH₃ apart.

De vergelijking tussen de methoden om emissies te berekenen hangt sterk af van de aannames van de input parameters en de invoergegevens. In het bijzonder is het AdBlue-verbruik cruciaal voor de inschatting van NO_x emissies van nieuwere en grotere machines, met SCR. De huidige inschatting is 3% en 6% van AdBlue-verbruik van brandstofverbruik, voor categorie C (NO_x limiet meer dan 1 g/kWh) en categorie D (NO_x limiet van minder dan 1 g/kWh).

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
1	Inleiding	4
1.1	Een probleemschets	4
1.2	Achtergrond	5
2	Wetgevingsklassen NRMM en de brede toepassing van SCR voor het reduceren van NO_x	8
2.1	Het verschil tussen de wettelijke 2 g/kWh en 0,4 g/kWh limieten	8
2.2	De directe relatie tussen AdBlue verbruik en NO _x reductie	8
2.3	Problemen met praktijkemissies: verschil tussen wettelijke test en normale inzet ...	9
2.4	Hogere limieten bij lagere vermogensklassen; het groeperen van machines	12
3	Hoge emissies bij lage motorlast, invloedfactoren zoals aandrijflijn en inzet	15
3.1	Motorlast bij stand-by, effect van technologieën zoals vaste as, hydrauliek, en transmissie	15
3.2	Typische motorlasten in EMMA, en de effecten op de emissies	15
4	Onderbouwing van de AUB (AdBlue, Uren, Brandstof) methode	17
4.1	Beschikbare informatie uit metingen, monitoring, en telematica	18
4.2	Registreerbare gegevens voor een gebruiker	19
5	Drie methoden naast elkaar: g/kWh, mg/s, en AUB	20
5.1	Afleiding van brandstofverbruik en richtgetallen AdBlueverbruik	20
5.2	Vergelijkingen: invoergegevens, aannames, voordelen en nadelen	21
5.3	Model robuustheid: afhankelijkheid van uitkomsten van invoergegevens en verwachte variaties	25
5.4	Typische aannames voor omrekeningen tussen methodes	25
6	Beoordelen van SCR retrofit en gebruik van motortesten	27
6.1	Retrofit installaties beoordelen	27
6.2	AUB methodiek op basis van wettelijke motortesten	28
7	Conclusies	29
7.1	Verwachte ontwikkelingen	29
7.2	Validatie en controle mogelijkheden	29
7.3	Caveats	29
8	Ondertekening	30

1 Inleiding

Tot dusverre is in AERIUS gebruik gemaakt van de methodiek om emissies te bepalen zoals deze in de Emissieregistratie en het model EMMA gebruikt is. Het EMMA model is bedoeld om nationale totalen te bepalen op basis van beperkte metingen en monitoring. Met de brede introductie van SCR installaties bij mobiele werktuigen is deze aanpak minder geschikt voor het inschatten van emissies van individuele machines.

Voor de gebruikers van AERIUS zijn de invoergegevens van EMMA niet direct voorhanden, of te bepalen. In het bijzonder is de arbeid die een motor verricht (in kWh) zeer moeilijk te achterhalen, en steeds minder maatgevend voor de emissies uit een machine. De motorbelastingprofielen worden gebruikt om EMMA te verbeteren, maar deze gegevens kunnen alleen bepaald worden met specifieke meetprogramma's zoals TNO ze uitvoert.

De metingen aan mobiele werktuigen laten zien dat er goede en robuuste alternatieven zijn om de NO_x en NH₃ uitstoot te bepalen, voor eigenaren en operateurs van mobiele machines, en toezichhouders van de werkzaamheden. RIVM heeft TNO gevraagd deze methode verder uit te werken en beschikbaar te maken voor AERIUS. Dit rapport geeft de onderbouwing en toelichting bij de methodiek die de AUB-aanpak wordt genoemd naar de drie soorten invoergegevens: AdBlueverbruik, Uren, en Brandstofverbruik.

Bij een project worden werkzaamheden gedefinieerd. Daarin wordt de inzet van machines vastgelegd. Het aantal dagen werkzaamheden van machines bepaalt mede de projectduur, maar details zoals draaiuren, brandstofverbruik, en AdBlueverbruik zullen nog niet altijd goed bekend zijn. Het is belangrijk dat partijen deze registratie op orde hebben voor de machines en ervaring opbouwen. Hiermee kan de projectplanning gekoppeld worden aan relevante details. Deze specifieke details van de inzet bepalen uiteindelijk grotendeels de uitstoot van de machines.

1.1 Een probleemschets

Om te beginnen volgt een korte probleemschets om de noodzaak van deze wijzigingen te duiden. Met de komst van SCR technologie bij mobiele machines vindt bijna de helft van de NO_x emissies van mobiele werktuigen plaats bij lage last wanneer de SCR slecht of niet functioneert.¹ Maar de hoeveelheid emissies bij lage last, stand-by, of stationair draaien hangt sterk af van de motorlast in die situatie. Machines met een vaste as, zoals een koelaggregaat, pomp, of compressor kunnen zonder enige nuttige arbeid te verrichten al snel 12% tot 15% van het maximale vermogen aan interne verliezen hebben bij het draaien van pompen. Een machine met hydrauliek, zoals een graafmachine of wiellader, hebben interne verliezen in de orde van 8% tot 12%. En machines met een transmissie, zoals landbouwtractoren, hebben verliezen in de orde van 3% tot 8%.

¹ Real-world emissions of non-road mobile machinery, TNO rapport 2021 R10221, en De inzet van bouwmaschinen en de bijbehorende NO_x- en CO₂-emissies, TNO rapport 2018 R10465.

Het gevolg is dat de NO_x uitstoot, tijdens stationair en stand-by draaien, een factor vijf kan schelen, en daarmee een factor twee verschillen in de totale uitstoot van een mobiel werktuig in een gegeven typische inzet, afhankelijk van de specifieke aandrijftechnologie en de regeling van de motor en systemen aan boord. Deze belangrijke verschillen in interne verliezen zijn vooral goed zichtbaar in het brandstofverbruik. Een motor van 150 kW kan stationair draaiend tussen de één en vijf liter dieselbrandstof verbruiken.

Op dit moment zijn voor de nationale getallen de inzichten in gemiddelde inzet van mobiele werktuigen beperkt. Een aantal onderzoeken geeft meer inzicht, maar het beeld is verre van compleet.² In het bijzonder is het brandstofverbruik een grote onbekende, maar mede bepalend voor de schadelijke uitstoot. Hopelijk zullen met aandacht voor dergelijke harde gegevens in de bepaling van NO_x en NH₃ de inzichten in de inzet van mobiele werktuigen ook verbeteren.

1.2 Achtergrond

De wettelijke limiet op basis van de verrichte arbeid in de typegoedkeuringstest ligt aan de basis van de afwijking tussen de wettelijke emissie-eisen van een motor en de emissies in de praktijk. Een limiet in grammen per kWh kan een grote groep motoren, met lage en hoge vermogens onder dezelfde wetgeving scharen, maar de praktijk laat zien dat emissies hoog zijn bij lage last, waar geen arbeid verricht wordt, en waarop de motor niet wettelijk wordt afgerekend. Sterker nog, er zijn meerdere gevallen bekend waarbij de absolute emissies van NO_x, in grammen per uur, bij stationair draaien, hoger zijn dan bij hoge last. Dat was niet altijd het geval, maar de steeds strengere eisen zorgen ervoor dat er specifiek geoptimaliseerd wordt voor de vereisten van de wettelijke test. Omdat er in de wettelijke test afgerekend wordt op basis van de geleverde arbeid, moet er in de test wel arbeid verricht worden. Het probleem met stationair, of lage last, draaien is dat er geen of nauwelijks arbeid verricht wordt. Daarom speelt dat nauwelijks een rol in de wettelijke testen. Dit is niet alleen het geval voor mobiele werktuigen, maar ook voor vrachtwagens.

De jarenlange ontwikkeling van wetgeving bij vrachtwagens vormt een stap-voor-stap reparatie van dit fundamentele mankement van wetgeving op basis van een limiet in termen van g/kWh, waar er geen plek is voor lage last, en zeker niet voor stationair draaien. Sinds 2019 worden vrachtwagens beoordeeld op normaal gebruik met minimaal 10% motorlast. Dat was vanaf 2014 minimaal 20% motorlast.³

De praktijkemissies van vrachtwagens, binnenvaartschepen, en mobiele machines zijn jarenlang via de omweg van energiegebruik beoordeeld. In eerste instantie werd de arbeid bepaald, en daarna werd deze arbeid omgezet naar emissies, met een vaste g/kWh. Voor oudere motoren was daarmee de fout, door het onbekende aandeel stationair draaien, waarmee geen arbeid geassocieerd was, beperkt. Maar voor moderne machines, waarbij regelmatig de helft van de totale NO_x emissies bij stationair draaien wordt geproduceerd, is de fout zeer groot.

² Eindrapport data onderzoek mobiele machines in Nederland, 2021, TNO rapport R11086, en Ruimtelijke verdeling bouwmaschinen, 2020, TNO rapport R12319.

³ Real-World Emissions of Euro VI Heavy-Duty Vehicles, AECC-TNO, SAE-2021-01-5074.

Vanaf 2019 werd daarom gevraagd het aandeel stationair draaien op te geven, om daaraan additionele emissies te koppelen.

Maar ook de aanpak waarbij stationair draaien apart meegenomen wordt heeft zijn beperkingen. Zoals aangegeven, de ene motor heeft een transmissie, waar bij stationair draaien nog geen 3% van de maximale motorlast overwonnen moet worden aan interne verliezen. Terwijl andere motoren, zonder arbeid te verrichten, draaiende onderdelen in beweging houden en bijvoorbeeld hydraulische systemen onder druk brengen. Dat kan al snel 10% van de maximale motorlast vragen. Het gevolg is dat de NO_x emissies drie keer hoger zijn dan in het eerste geval. In principe, als de emissiecontrole technologie niet, of beperkt, functioneert, dan zijn er nog steeds drie keer hogere interne verliezen in de motor en de gekoppelde systemen, en drie keer hogere emissies. Kortom, er is niet zoiets als een typisch stationair, of stand-by, draaien, en verschillende motoren en systemen hebben in dit geval verschillende emissieniveaus.

Van een afstand, generiek, vallen deze verschillen moeilijk te achterhalen en te duiden. Maar met directe toegang tot de machine zoals de operateur of de eigenaar, is het brandstofverbruik een goede basis voor de hoeveelheid uitlaatgas en de schadelijke emissies. Een machine met veel interne verliezen, en daarmee een hoge NO_x uitstoot, zal ook een hoog brandstofverbruik hebben bij stationair draaien.

Schadelijke emissies worden geproduceerd in de verbrandingsprocessen. Hoe meer brandstof er verbrand wordt, hoe meer schadelijke emissies er uit de motor komen. Brandstofverbruik, mits deze gegevens beschikbaar zijn, is daarmee een goede maat voor de hoeveelheid schadelijke emissies. Op deze generieke relatie zijn twee belangrijke beperkingen. Ten eerste is bij lage last de hoeveelheid NO_x per liter brandstof hoger dan bij hogere last. Dit geldt voor de meeste dieselmotoren. Het gevolg is dat als een liter diesel in een uur verbrand wordt, de NO_x emissies lager zijn dan in twee uren. Dus naast de NO_x emissies per liter diesel is er nog een zwakkere relatie met de duur dat de motor draait.

Een tweede belangrijke beperking aan de directe relatie tussen brandstofverbruik en NO_x emissies is de SCR, waarin NO_x omgezet wordt naar onschadelijke producten. De SCR werkt vaak niet bij lage motorlast, omdat de SCR dan te koud is, om AdBlue (een ureum oplossing⁴) te kunnen injecteren, of te koud is om in de katalysator de reagens met uitlaatgas te laten reageren. Dus pas als er AdBlue geïnjecteerd wordt, vindt er omzetting plaats van NO_x. Eén liter AdBlue kan 460 gram NO_x omzetten, gegeven de chemische samenstelling. Dus voor elke liter AdBlue die verbruikt wordt, en de SCR goed werkt, kan er een vast aandeel van de NO_x uit de motor weggenomen worden. Zolang AdBlue niet als ammoniak uit de uitlaat komt, is dit een vaste relatie.

Dus, brandstofverbruik, draaiuren, en AdBlue verbruik vormen samen een goede maat om de NO_x emissies van een motor op een robuuste manier te schatten. Daarvoor moeten deze gegevens goed geregistreerd worden.

⁴ AdBlue is een geregistreerd handelsmerk van de ureum oplossing voor SCR systemen, volgens specificaties van de VDA (*Verband der Automobilindustrie*). Het wordt ook wel reagens of DEF (*diesel emission fluid*) genoemd. Omdat AdBlue de meest gangbare term is wordt deze in het rapport gebruikt.

Voor de introductie van SCR, evenals bij de eerste SCR systemen waren er wel andere gangbare methoden om de NO_x emissies te reduceren. Dat kan ook met EGR (Exhaust Gas Recirculation) en met brandstofinjectie dosering. Maar dergelijke methoden kunnen hoogstens 40% van de NO_x reduceren in normaal gebruik, met allerlei technische en onderhoudsproblemen, die uiteindelijk de aanleiding waren voor het dieselschandaal. Terwijl door hogere injectiedrukken en lagere lucht-brandstofverhoudingen de NO_x emissies in de motor omhoog gaan met moderne motoren, zonder emissiecontrole technologie.

Er moet dus wel wat onderscheid gemaakt worden tussen machines van verschillende leeftijden, maar uiteindelijk is de SCR verantwoordelijk voor het grootste deel van de NO_x reductie op de modernste machines, tot niveaus van 0,4 g/kWh en lager bij hogere last. Gegeven dat een dieselmotor zonder emissiecontrole technologie normaal 8 tot 12 g/kWh uitstoot, is dat een grote reductie, van 95% of meer. Deze limiet geldt voor Stage IV en Stage V. Voor Stage IIIB maakte de limiet van 2 tot 3,3 g/kWh de SCR ook al noodzakelijk, maar met 75% reductie ten opzichte van de emissies bij verbrandingsprocessen zelf was de SCR minder essentieel, en een deel kon afgevangen worden door motormaatregelen. Verschillende fabrikanten zijn op verschillende momenten meer op de SCR gaan rekenen om de eisen te halen.

De andere motormaatregelen hebben hun nadelen. De lage last in de praktijk leidt bij moderne machine soms tot onderhoudsproblemen. De lange periodes stationair draaien, zoals gebruikelijk bij veel toepassingen, leiden tot verstoppingen van het EGR systeem en duur onderhoud. Dat zorgde ook voor een technologieontwikkeling richting SCR. Dat verschilt wel wat per toepassing. Bijvoorbeeld, landbouwtrekkers opereren normaal minder bij lage motorlast, met daarbij beperkte NO_x uitstoot. De verschuiving was niet zozeer per toepassing, maar per fabrikant en de toepassingen waar deze fabrikant vooral actief was. Een dieselmotor wordt ingebouwd in vele toepassingen. De markt van mobiele machines is niet groot genoeg om voor elke toepassing een andere motor te ontwikkelen.

Al deze aspecten in overweging nemend, en vooral de meetresultaten aan meerdere machines van meerdere generaties in meerdere toepassingen, geeft dat deze aanpak voor NO_x en NH₃ emissievoorspellingen robuuster is dan methodieken waarbij de motorbelasting moet worden geschat.

2 Wetgevingsklassen NRMM en de brede toepassing van SCR voor het reduceren van NO_x

Wetgeving, omtrent mobiele werktuigen zeker sinds Stage V uit 2019, is een brede wetgeving die bijna alle motoren beslaat buiten wegvoertuigen, vliegtuigen en zeeschepen.

2.1 Het verschil tussen de wettelijke 2 g/kWh en 0,4 g/kWh limieten

Met Stage IIIB (2011-2012) en een emissielimiet van 2 – 3,3 g/kWh werd het voor het eerst noodzakelijk om SCR technologie te gebruiken. Maar met Stage IV (2014) en de limiet van 0,4 g/kWh werd het belang van een goedwerkende SCR groter. Daarmee is de SCR filterefficiëntie verschoven van ongeveer 65% bij Stage IIIB naar boven de 95% voor Stage IV en Stage V in de wettelijke test.

Tabel 1: De wettelijke eisen aan mobiele werktuigen met een dieselmotor.

Wetgeving	NO _x [g/kWh]	Maximaal vermogen [kW]						
		Periode	<19	19-37	37-56	56-75	75-130	13-560
Stage-V	2019-...	7,5	4,7	4,7	0,4	0,4	0,4	3,5
Stage-IV	2014-2018				0,4	0,4	0,4	
Stage-IIIB	2012-2013			4,7	3,3	3,3	2	
Stage-IIIA	2007-2011		7,5	4,7	4,7	4	4	
Stage-II	2003-2006		8	7	7	6	6	
Stage-I	2000-2003			9,2	9,2	9,2	9,2	

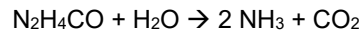
De dikgedrukte limieten (**0,4**) vereisen een SCR, die het grootste deel van de NO_x uit de motor reduceert. De schuingedrukte limieten (2 – 3,3) maken mogelijk gebruik van een SCR installatie om de limieten te halen. Sommige invoerdatums hangen af van de vermogensklassen. De datum die in de tabel wordt aangehouden gaat uit van de grotere motoren. Het is mogelijk dat een nieuwe machine een oude motor heeft. De NRMM of Stage wetgeving betreft de motor, en het is daarmee belangrijk om het bouwjaar of emissieklasse van de motor te vinden en te gebruiken, en niet af te gaan op het bouwjaar van de machine.

2.2 De directe relatie tussen AdBlue verbruik en NO_x reductie

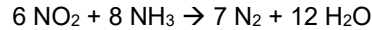
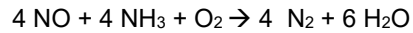
SCR technologie werkt op basis van een reagens, AdBlue. Zonder AdBlue is er geen SCR. In kleine toepassingen kan AdBlue bij onderhoudsbeurten bijgevuld worden, maar voor bijna alle moderne toepassingen moet, naast diesel, ook regelmatig AdBlue bijgevuld worden. Bij een goed functionerende SCR moet er voor elke 100 liter diesel ook drie tot zes liter AdBlue getankt worden.

AdBlue is een 32,5% ureum oplossing met een dichtheid van 1090 g/liter. Ureum zelf heeft de molecuulformule N₂H₄CO met een molair gewicht van 60 gram.

In de SCR wordt dat omgezet naar twee ammoniak moleculen (NH₃) en koolstofdioxide⁵ (CO₂) met behulp van water (H₂O) in het uitlaatgas:



De reacties die NO_x reduceren met behulp van NH₃ zijn:



Dus grofweg 1 mol NH₃ zet 0,85 mol NO_x om, gegeven een typische 50% ratio NO₂/NO_x door het gebruik van diesel oxidatie katalysatoren die NO in NO₂ omzetten.

Er komt 200 gram NH₃, met een molair gewicht van 17 gram vrij uit een liter AdBlue:

$$(2 * 17/60) * 0.325 * 1090 = 200 \text{ g NH}_3/\text{liter AdBlue.}$$

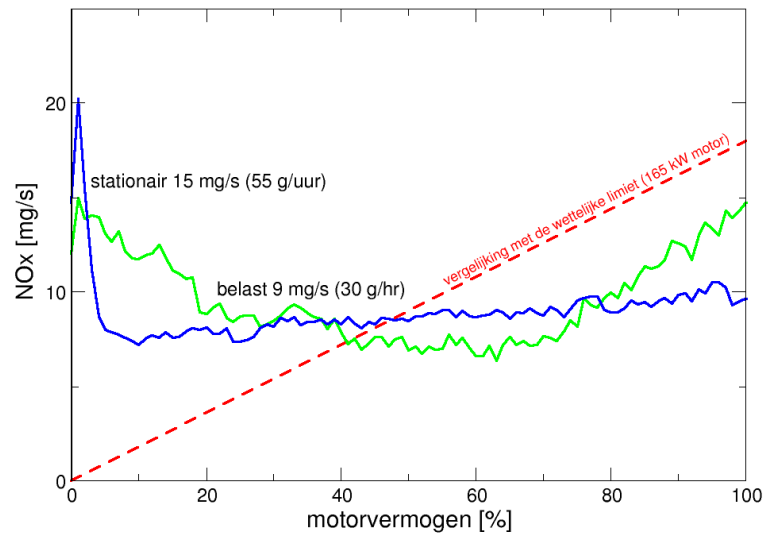
Daarom is de NO_x reductie $(200/17_{\text{g-NH}_3}) * 46_{\text{g-NO}_x} * 0,85$, ofwel 460 g NO_x reductie per 1 liter AdBlue. Dit geldt als er geen ammoniak uitgestoten wordt en de omzetting van ammoniak in de slipkatalysator, die de ongewenste uitstoot van ammoniak moet reduceren, beperkt is. En, aan de andere kant, bij een lager aandeel NO₂ in NO_x is de hoeveelheid NO_x die omgezet wordt met een liter AdBlue iets groter. Een molecuul NO omzetten vraagt één molecuul NH₃, terwijl de omzetting van een molecuul NO₂ 1,33 moleculen NH₃, ofwel 33% meer AdBlue.⁶

2.3 Problemen met praktijkemissies: verschil tussen wettelijke test en normale inzet

Bij moderne machines met SCR hangt de NO_x uitstoot minder samen met de motorbelasting.

⁵ CO₂ emission from urea consumption in SCR after-treatment systems in heavy-duty vehicles, TNO rapport 2014 R11513.

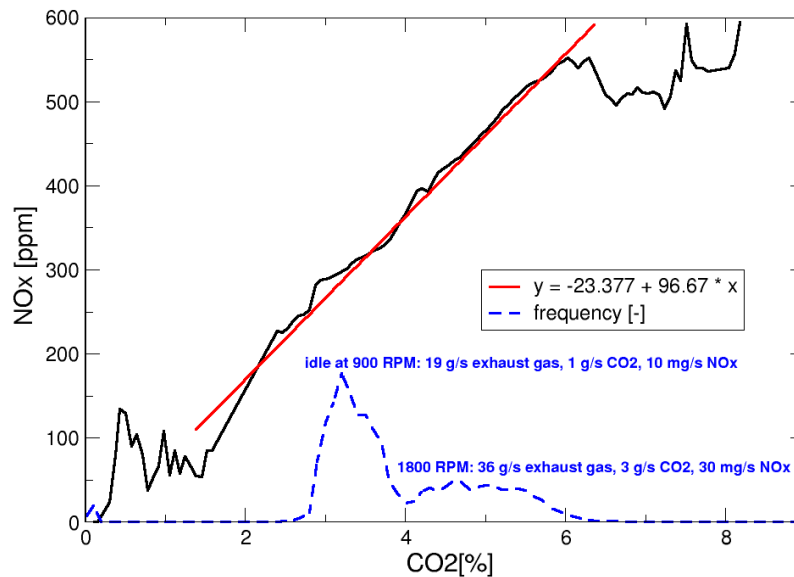
⁶ In de rapportages wordt altijd de molaire massa van NO₂ gebruikt voor de uitstoot van zowel NO als NO₂.



Figuur 1: Twee voorbeelden van motoren, van 159 en 171 kW, die aan de limiet van 0,4 g NO_x per kWh moeten voldoen. Bij een hoge motorlast zijn de emissies ruim onder de limiet, maar bij lage last zijn de emissies vele malen hoger dan op basis van de limiet te verwachten is.

Figuur 1 illustreert het probleem van NO_x emissies van moderne machines. Een typische machine draait gemiddeld 30% motorlast, en daar zijn de emissies 50% of meer hoger dan de limiet, omdat de geleverde arbeid beperkt is. Als de 30% motorlast het resultaat is van de helft van de tijd 60% motorlast en de andere helft van de tijd stationair draaien, zijn de emissies nog eens 25% hoger, bijna twee keer de limiet, omdat bij stationair draaien de emissies in milligrammen per seconde substantieel hoger zijn dan bij een belaste motor.

Een oudere machine heeft vaak een heel ander patroon qua emissies. Deze emissies zijn proportioneel met het brandstofverbruik en de verhouding tussen de concentratie NO_x en CO₂ in het uitlaatgas is nagenoeg constant. Een koelaggregaat van minder dan 19 kW, in Figuur 2, is een typisch voorbeeld van deze directe relatie.

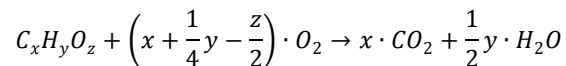


Figuur 2: De relatie tussen de NO_x concentratie en de CO₂ concentratie in uitlaatgas voor een koelaggregaat is nagenoeg constant over het grootste deel van de operationele condities.

Als niet de CO₂ concentratie, maar de O₂ concentratie gemeten wordt, kan daaruit de CO₂ concentratie afgeleid worden:

$$\text{CO}_2[\%] = 0,68 \cdot (20,8 - \text{O}_2[\%])$$

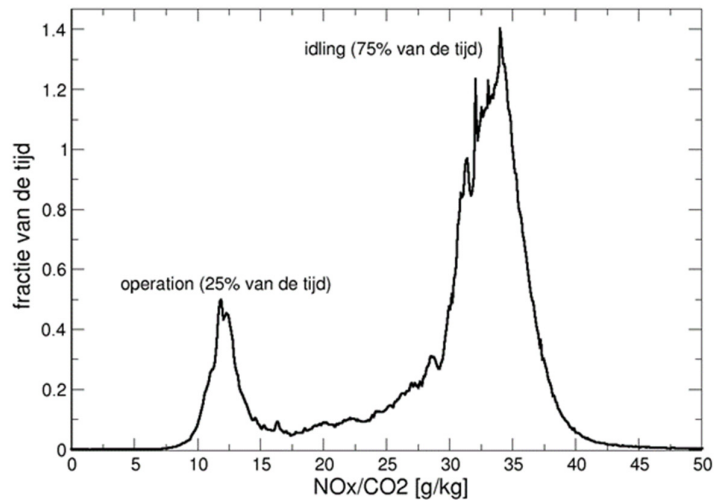
Waar 20,8 de typische zuurstofconcentratie in de buitenlucht is.⁷ Met behulp van zuurstof wordt brandstof, met een C:H:O verhouding van x:y:z omgezet in CO₂ en H₂O:



Dus $x+y/4-z/2$ mol zuurstof wordt omgezet in x mol CO₂. Voor een typische dieselbrandstof (CH_{1.86}O_{0.007}) is dat $x/(x+y/4-z/2) = 1/(1+1.86/4-0.007/2) = 0.68$. Voor elke kilogram CO₂ wordt er 0,377 liter diesel brandstof verbrand.

Sommige, vooral grotere, oudere motoren zijn geoptimaliseerd op een laag brandstofverbruik bij stationair draaien. In dat geval zijn de NO_x emissies bij stationair draaien, per liter diesel, soms wel drie keer zo hoog als bij hogere motorlast, maar het brandstofverbruik is dan laag. Bijvoorbeeld spoorlocomotieven vertonen dat emissiegedrag. In combinatie met een groot deel stationair draaien vinden de NO_x emissies van deze motoren voor de helft plaats bij lage last.

⁷ De referentiewaarde van zuurstof in buitenlucht is 20,9%, maar op locaties waar machines draaien en voertuigen rijden is 20,8% een representatieve waarde.



Figuur 3: De NO_x/CO₂ verhouding van een diesellocomotief. Dit vertaalt zich in 32 g NO_x per liter diesel terwijl de trein rijdt (en ongeveer 8 g/kWh), en 85 gram NO_x per liter diesel als de trein stilstaat, waar er nauwelijks arbeid wordt verricht.⁸

Een dergelijk verschil tussen NO_x per liter brandstof bij een hoge en lage motorlast laat zien dat de hoeveelheid brandstof in liters al een betere maat is voor de NO_x emissies dan arbeid in kWh, maar nog steeds onvoldoende. Een opslag in emissies op basis van het aantal draaiuren verdisconteert de hogere NO_x/CO₂ ratio's bij een lagere motorlast. Als de machine veel lage motorlast draait is het aantal draaiuren per hoeveelheid brandstof hoger.

2.4 Hogere limieten bij lagere vermogensklassen; het groeperen van machines

De NO_x limieten en de technologie die nodig is om in de test deze wettelijke eisen te halen, kunnen gebruikt worden om machines in categorieën in te delen. Die loopt van X (hoge emissies), naar A (enige emissiecontrole maatregelen), naar B (specifieke hardware voor emissiecontrole, maar geen SCR), C (toepassing van SCR), naar D (geavanceerde toepassing van SCR).

Tabel 2: Het groeperen van categorieën met vergelijkbare emissielimieten en technologie. Het verschil tussen B (zonder SCR) en C (met SCR) is de toepassing van een SCR als NO_x emissiecontrole technologie.

Classificatie	[...-2001]	[2002-2005]	[2006-2010]	[2011-2013]	[2014-2018]	[2019-...]
Vermogen [kW]	Stage-I	Stage-II	Stage-IIIA	Stage-IIIB	Stage-IV	Stage-V
(...-56)	X	X	X	A	A	A
[56-75)	X	X	A	A	D	D
[75-560)	X	A	B	B/C	D	D
[560-...)	X	X	X	X	X	B/C

⁸ Inzicht in het energieverbruik, de CO₂ uitstoot en de NO_x-uitstoot van het spoorgoederenvervoer, 2017, TNO rapport R11414.

Drie aparte andere toepassingen van verbrandingsmotoren in mobiele werktuigen zijn:

1. Machines met benzine- en LPG-motoren (E).
2. Lichte kiepwagens en andere wegvoertuigen actief op de bouwplaats (tot 19,5 ton maximaal voertuiggewicht, twee assen) (Middelzware Utiliteitsvoertuigen: MUT).
3. Zware kiepwagens en wegvoertuigen actief op de bouwplaats (meer dan 19,5 ton, drie of meer assen, ZUT: Zware Utiliteitsvoertuigen).

Alle emissies van NO_x en NH₃ worden bepaald aan de hand van AdBlue verbruik, Uren en Brandstofverbruik. Voor veel machines speelt brandstofverbruik een belangrijke rol, behalve voor wegvoertuigen waar het brandstofverbruik op de bouwplaats moeilijk van het brandstofverbruik op de weg te scheiden is. Wegvoertuigen worden beoordeeld op basis van het aantal uren op de bouwplaats, of een andere werklocatie, met de motor aan.

De NO_x en NH₃ emissies worden bepaald aan de hand van de formules:

$$\text{NO}_x \text{ [kg]} = \text{Qb} * \text{liter brandstof} + \text{Qu} * \text{draaiuren} + \text{Qa} * \text{liter AdBlue}$$

en:

$$\text{NH}_3 \text{ [kg]} = \text{Pb} * \text{liter brandstof} + \text{Pu} * \text{draaiuren}$$

Tot dusverre blijkt uit de metingen dat NH₃ verbruik hoofdzakelijk gekoppeld is aan het brandstofverbruik, voor motoren met en zonder SCR apart.

Voor elke categorie zijn er apart waarden van de coëfficiënten: **Qa**, **Qu**, **Qb**, **Pb** en **Pu**.

Tabel 3: De coëfficiënten voor alle categorieën van machines.

	X	A	B	C	D	E	MUT	ZUT	
Qb	0.03	0.02	0.015	0.025	0.033	0.004			per liter
Qu	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005		0.12	0.2	per uur
Qa				-0.46	-0.46				AdBlue
Pb	0.0000075	0.0000075	0.0000075	0.00024	0.00024	0.0000075			per liter
Pu							0.00088	0.00147	per uur

Voor benzine en LPG-motoren zijn er beperkte eisen aan machines. Dit is deels omdat ze in de groep met kleinere motoren vallen, onder 56 kW, maar vooral omdat in Europa deze groep ontzien lijkt in de wetgevingseisen. Ook komt de beperkte wetgeving niet met realistische duurzaamheidseisen voor het functioneren van de emissiecontrole technologie over de levensduur van de machine, en zal de katalysator, als deze al wordt toegepast gedurende de normale inzet, beperkt functioneren. In het verleden was het probleem met benzinewerktuigen de hoge uitstoot van koolwaterstoffen, maar met de efficiëntieverbetering van benzinemotoren voor mobiele werktuigen is er een verschuiving gekomen naar NO_x emissies. De limiet is voor NO_x en HC (*hydrocarbons*; koolwaterstoffen) samen. Dit volgt een vergelijkbare trend als bij bromfietsen, waar de eisen strenger zijn en meer ontwikkeling ondergaan. Er is zeer beperkt gemeten aan deze machines op benzine en LPG, en daarom worden de normen in veel gevallen vertaald naar praktijkemissies.

Het risico is dat emissies veel hoger zijn, en de emissies van tweewielers zijn daarvan het voorbeeld.⁹ De AUB methodiek geeft voor bepaalde benzine en LPG motorcategorieën andere resultaten dan voorheen, door de uniformering van deze groep. Voor NH₃ zijn de metingen nog beperkter, omdat NH₃ niet is gereguleerd. In dit geval worden de emissiefactoren van het EEA Guidebook NRMM 2019 gebruikt.¹⁰ Hiermee zijn de factoren geüpdatet naar de meest recente inzichten van het Europese Milieuagentschap voor de rapportage van emissies van mobiele werktuigen.

Tabel 4: Relevante eisen aan benzine en LPG machines ("positive ignition engines"). Een recente strenge eis van 0,4 g/kWh, met een typische motorefficiëntie van 30% vertaald naar 1 g NO_x per liter benzine of LPG bij hogere last.

Bougie		NO _x [g/kWh]	NO _x +HC [g/kWh]
Benzine en LPG	Motor en toepassing		
Stage - V	56-560 kW	0,4	
Stage - V	> 560 kW, generators	0,67	
Stage - V	> 560 kW, mobiel werktuig	3,5	
Stage - V	19 - 56 kW, voertuigtoepassing		2,7

Als er meetgegevens beschikbaar komen voor de laatste generatie Stage V benzine en LPG motoren 56-560 kW, en deze blijvend lagere emissies hebben, kan deze groep als een aparte categorie opgenomen worden. Tot dusverre zijn deze machines zeer zeldzaam en geeft ervaring bij tweewielers, met vergelijkbare motoren en eisen, daar geen aanleiding toe.

⁹ Report ET-04-17-619-EN-N Effect study of the environmental step Euro 5 for L-category vehicles.

¹⁰ <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019>

3 Hoge emissies bij lage motorlast, invloedfactoren zoals aandrijflijn en inzet

3.1 Motorlast bij stand-by, effect van technologieën zoals vaste as, hydrauliek, en transmissie

In de aanpassingen aan EMMA wordt er nu rekening gehouden met de typische motorbelastingen op basis van aandrijfconfiguratie en inzet.

De aandrijfconfiguratie die worden onderscheiden zijn:

1. Vaste as met variabele belasting (bijvoorbeeld stroomaggregaten en pompen) → ~12% verliezen, belasting ~35%;
2. Vaste as met constante (hoge) belasting (bijvoorbeeld liften) → ~12% verliezen, belasting ~ 65%;
3. Hydraulische aandrijving (bijvoorbeeld graafmachines en wielladers) → 9% verliezen, ~65% belasting;
4. Versnellingsbak (bijvoorbeeld landbouwtractors) → ~3% verliezen, 65% belasting.

De soorten inzet verschillen in het aandeel stationair, of stand-by, draaien:

- a) Continue inzet (bijvoorbeeld landbouwtrekker) → ~30% stand-by;
- b) Wisselende inzet (bijvoorbeeld graafmachines) → ~45% stand-by.

Aan de hand van meet- en monitoringsprogramma's zijn de aandelen in de tijd van verschillende belastingpunten ingeschat voor de verschillende aandrijftechnologie, motorbelasting en inzet combinaties.

Tabel 5: De verschillende motorbelastingen die in EMMA onderscheiden worden.

aandrijving	motorbelasting	inzet	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	gemiddeld
vaste as	beperkt	wisselend	0.0%	60.0%	17.0%	1.0%	1.0%	1.0%	5.0%	7.0%	5.0%	2.0%	1.0%	25.3%
transmissie	dynamisch		34.3%	12.9%	10.0%	7.2%	6.6%	6.1%	5.5%	3.9%	2.8%	3.9%	7.2%	29.9%
hydrauliek			34.3%	10.7%	6.2%	2.2%	2.8%	5.5%	7.7%	11.0%	8.8%	5.0%	6.1%	36.7%
vaste as	hoge last	constant	32.1%	9.6%	5.6%	1.7%	2.8%	5.5%	16.5%	11.0%	4.4%	5.5%	5.5%	38.0%
transmissie	hydrauliek		24.5%	10.9%	10.0%	9.1%	8.4%	7.7%	7.0%	4.9%	3.5%	4.9%	9.1%	37.0%
vaste as			24.5%	8.1%	5.1%	2.8%	3.5%	7.0%	9.8%	14.0%	11.2%	6.3%	7.7%	45.6%
			21.7%	6.7%	4.4%	2.1%	3.5%	7.0%	21.0%	14.0%	5.6%	7.0%	7.0%	47.3%

3.2 Typische motorlasten in EMMA, en de effecten op de emissies

De laatste jaren is gebleken dat mobiele machines veel lage last, stand-by, en stationair draaien. Ook zijn er grote verschillen. Dieselloos draaien 75% stationair, om allerlei inspecties van de systemen onder druk te kunnen uitvoeren.

Landbouwtractoren draaien gemiddeld ongeveer 25% stationair. Voor alle machines geldt dat brandstofverbruik en emissies proportioneel hoger zijn bij lage motorlast, vanwege de interne motorverliezen, die er ook zijn als er geen arbeid wordt geleverd. Een typische waarde van 4% motorverliezen, betekent dat bij 30% motorlast, de motorverliezen $0,04/0,3 = 13\%$ van de geleverde arbeid zijn. Bij de wettelijke test, normaal E3, ligt de aandacht op hoge last, en zijn motorverliezen absoluut iets hoger door de hogere motorsnelheid, maar relatief veel lager (ongeveer 5%).

Dat was van oudsher een beperking van emissiefactoren in termen van g/kWh, dat pas echt duidelijk is geworden door het monitoren van motorbelastingen in de praktijk.

Omdat stationair draaien beperkt in de wettelijke test zit, lijken motoren bij stationair draaien geoptimaliseerd op een laag brandstofverbruik, met een hogere NO_x uitstoot tot gevolg. De dieselloot in Figuur 3 is daar een sprekend voorbeeld van. Dat leidt tot een hogere aandeel van lage motorlast in NO_x emissies. Door SCR is deze situatie nog verder versterkt.

4 Onderbouwing van de AUB (AdBlue, Uren, Brandstof) methode

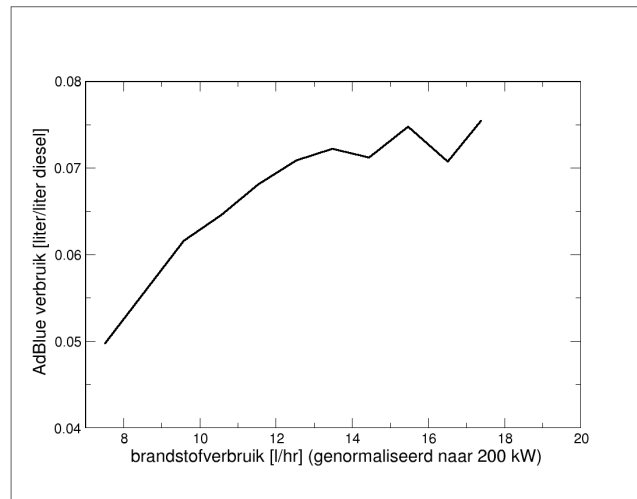
Zoals al eerder aangegeven zijn er twee centrale aspecten in NO_x emissies.

Ten eerste de verbranding van brandstof, waarbij NO_x wordt gevormd. Ten tweede, de omzetting van NO_x naar onschadelijke producten in de SCR, met behulp van AdBlue reagens. Dit zijn de twee centrale elementen in de bepaling van de NO_x emissies. Onder de aanname dat een motor onder hoge motorlast, zoals in de wettelijke test, voldoet aan de eis, zou de NO_x per kWh vertaald kunnen worden naar een NO_x uitstoot per liter diesel. Uitgaande van vaste motorverliezen, kan de limiet per kWh keer vier, ofwel 4,7 gNO_x/kWh wordt dan 18,8 gNO_x/liter diesel. Bij veel lage last draaien kan het brandstofverbruik navenant laag zijn, en dat wordt gecompenseerd door een vaste 5 gNO_x/uur, die bij hogere motorvermogens minder relevant is.

Voor motoren met een SCR wordt uitgegaan van een typische efficiëntie van de eerste generatie SCR installaties (Stage IIIB) van 60% NO_x reductie, en ten opzichte van emissies van de motor zelf (pre-SCR) van 25 g NO_x per liter diesel, en dus 10 g/liter uit de uitlaat bij hogere motorlast. Bij de latere generatie (Stage IV/V) wordt aangenomen dat de SCR 95% van de NO_x reduceert bij hogere motorlast. Het NO_x-niveau uit de motor zelf is daarmee toegenomen, naar 33 g/liter, met de verbetering van de SCR installaties. Een reductie door de SCR van 95% bij hoge motorlast houdt daar 1,65 g/liter van over, en daarmee in de beste omstandigheden 0,4 g/kWh.

Het uiteindelijke emissieniveau wordt bepaald door de effectiviteit van de SCR, die in de praktijk sterk kan variëren met de regelstrategie. Een operateur kan de effectiviteit van de SCR beoordelen aan de hand van de hoeveelheid AdBlue per hoeveelheid dieselbrandstof. Vooral het AdBlue verbruik ten opzichte van het dieselvebruik is relevant. Een moderne machine die een laag AdBlue verbruik heeft zal, naar verwachting, hoge NO_x emissies hebben. Een goed functionerende SCR kan tot wel 7% AdBlue/diesel verbruiken, terwijl de eerdere generaties niet veel boven de 4% AdBlue-diesel verhouding kwamen, zelfs in de meest optimale gebruikscondities.

Onderstaand figuur laat een analyse van AdBlue verbruik als functie van het genormaliseerde brandstofverbruik zien. Dit genormaliseerde brandstofverbruik geeft een indicatie van de motorbelasting (laag brandstofverbruik duidt op een lage motorbelasting). Figuur 4 laat zien dat het AdBlue verbruik lager is bij een lage motorbelasting (laag brandstofverbruik), de SCR katalysator lijkt daar dus minder effectief te zijn bij deze machines.



Figuur 4: AdBlue verbruik als functie van het genormaliseerde brandstofverbruik per dag (maximaal piekverbruik voor 220 kW motor is ongeveer 50 l/uur).

4.1 Beschikbare informatie uit metingen, monitoring, en telematica

Het meten van de emissies zelf aan de uitlaat in normale gebruikscondities geeft het beste inzicht in de uitstoot. Dat is nog duur en lastig. Een beperkte aanpak is het meten van alleen de concentratieniveaus in de uitlaat. Concentraties zijn met brandstofverbruik redelijkerwijs te vertalen naar uitstoot in gram per kWh of in gram per liter diesel. Een beperkte test, waarbij niet alle gebruikscondities worden afgedekt, zal met SCR niet altijd de representatieve resultaten geven over de praktijkuitstoot. Hiervoor is monitoring of een uitgebreidere emissiemeting benodigd.

Brandstof en AdBlue worden door, of op verzoek van, de gebruiker bijgevuld. Het zal niet altijd van machine tot machine apart bijgehouden worden hoeveel brandstof en AdBlue er getankt wordt. Vaak wordt immers gewerkt met een brandstoftank op de bouwplaats waaruit de verschillende machines bijgevuld worden. Een dergelijke administratie is, echter, redelijkerwijs en met relatief beperkte moeite op te zetten. Bijvoorbeeld door een vulpistool met geïntegreerde literteller toe te passen, in combinatie met een registratie per machine. Dat maakt ook controle ter plaatse bij de inzet mogelijk, en kan leiden tot een groter bewustzijn over, en het bijstellen van, de milieubelasting van de inzet van machines. Bijna alle machines hebben een teller voor de draaiuren, relevant voor onderhoud, zoals een kilometer teller op een voertuig. De draaiurenstanden kunnen bij aanvang en in de loop van de inzet geregistreerd worden.

Grotere, modernere machines hebben de mogelijkheid om gegevens over het AdBlue-verbruik, draaiuren en het brandstofverbruik uit te lezen via een boardcomputer. Steeds vaker kunnen voertuig- en gebruiksgegevens ook op afstand gemonitord worden, middels zogenaamde telematica systemen. De hoeveelheid en type data die uit te lezen zijn, worden steeds uitgebreider, maar verschillen per type systeem. Informatie rondom draaiuren en brandstofverbruik is bij de meeste systemen beschikbaar, net als bijvoorbeeld locatie en onderhoudsgegevens.

Informatie omtrent AdBlue verbruik is minder gebruikelijk, maar is soms ook beschikbaar. Bij sommige systemen kan jaren worden teruggekeken, en bij sommige systeem zijn details tot drie maanden terug op te vragen. Het is overigens goed mogelijk dat telematica systemen niet direct voor iedereen toegankelijk zijn, er kunnen extra kosten voor deze service gevraagd worden.

Naast telematicasystemen die af-fabriek worden geleverd, zijn er ook universele systemen op de markt voor online-monitoring, ook daar verschillen de mogelijkheden vaak per systeem. De beschikbaarheid van telematica data is in opkomst, maar is nog niet gestandaardiseerd.

4.2 Registreerbare gegevens voor een gebruiker

Voor een machine en voertuigenpark dat alle mogelijke machines bevat, moet de gebruiker in totaal 15 getallen bijhouden en opgeven. In veel gevallen worden niet alle machinegroepen of voertuigen ingezet, en dan is daarmee het aantal te registeren getallen kleiner dan 15. Hieronder wordt met een voorbeeld aangegeven welke getallen nodig zijn.

Tabel 6: Getallen die een gebruiker moet opgeven om de NO_x en NH₃ emissies te bepalen.

Invoergegevens	Diesel					Benzine/LPG	Diesel	
	Zonder SCR			Met SCR				
Machinegroep	X	A	B	C	D	E	MUT	ZUT
brandstof [liters]	30	30	20	110	100	40	-	-
draaiuren [hr]	30	15	12	20	20	-	100	120
AdBlue [liters]	-	-	-	3	2	-	-	-

Op deze getallen worden twee controles uitgevoerd: Voor machine groep C mag het AdBlueverbruik niet hoger zijn dan 4% van het diesilverbruik.

Voor machinegroep D mag het AdBlueverbruik niet hoger zijn dat 7% van het diesilverbruik. Door een hoog AdBlueverbruik op te geven kan de NO_x uitstoot zeer laag ingeschat worden. Als waarden te hoog zijn worden ze afgekapt op de maximale waarden, en daarmee lage NO_x emissies.

Het is belangrijk dat deze getallen, ondanks de relatieve onbekendheid tot nu toe, realistisch ingeschat worden. Het wordt aanbevolen om hier richtlijnen en handvatten voor op te stellen voor het verzamelen, registeren en controleren van deze cijfers in de praktijk. De combinatie met een vorm van toezicht en inspectie op de aangeleverde cijfers is van belang om de kwaliteit van getallen te waarborgen.

5 Drie methoden naast elkaar: g/kWh, mg/s, en AUB

5.1 Afleiding van brandstofverbruik en richtgetallen AdBlueverbruik

Brandstofverbruik, bij hogere last wordt vaak geciteerd door de fabrikant om aan te geven wat de motorefficiëntie is. Dit brandstofverbruik is niet representatief voor lagere of dynamische motorlast. Typische waarden voor machines van rond 2010 is 210 g/kWh diesel voor grotere mobiele dieselmotoren,¹¹ en daarmee 0,250 liter diesel per kWh. De motorefficiëntie verbeterd jaar op jaar, en sinds die tijd worden er ook waarden van onder de 200 g/kWh opgegeven. De verschillen zijn beperkt.

Er zijn een aantal centrale waarden om de omrekening te maken tussen de verschillende emissiebepalingen:

- **“4 kWh per liter diesel”** geldig voor hogere motorbelasting (> 15%) en grotere en modernere motoren (>10 kW en na 1980). In andere gevallen, en ook bij LPG- en benzinemotoren is het aantal kWh per liter lager, richting de 3 kWh/liter voor benzine en 2,5 kWh per liter LPG.
- **“interne verliezen zijn 2% tot 15% van het maximaal vermogen”**, de lage waarden zijn voor grotere, modernere machines met transmissie, de hogere waarden zijn voor kleinere, oudere machines met een vaste as waarop pompen en dynamo's meedraaien.
- **“1 liter diesel geeft 2650 gram CO₂”** is licht afhankelijk van de dichtheid van diesel, rond de 840 g per liter, en de koolstofinhoud van ongeveer 86%.
- **“1 liter benzine geeft 2370 gram CO₂”** is licht afhankelijk van de dichtheid van benzine, rond de 750 g per liter, en de koolstofinhoud van ongeveer 86%.
- **“Maximaal AdBlue varieert van 3% tot 7% van het dieselverbruik”**, waarbij dit toeneemt met strengere limieten van 3 g/kWh naar 0,4 g/kWh.

De aanpak om het brandstofverbruik af te leiden staat bekend als de Willans lijn, waarbij er geen rekening gehouden wordt met het effect van de motordraaisnelheid:¹²

$$\text{Brandstofverbruik [g/sec]} = (210/3600) \cdot (A \cdot P_{\text{max}}[\text{kW}] + P_{\text{motor}}[\text{kW}])$$

Ofwel:

$$\text{Brandstofverbruik [liter/uur]} = 0,25 \cdot (A \cdot P_{\text{max}}[\text{kW}] + P_{\text{motor}}[\text{kW}])$$

Waar de interne verliezen, A, tussen de 0,02 en 0,15 liggen, en P_{motor} het vermogen is dat de motor aan de as levert: $P_{\text{motor}} = \text{motorkoppel} \cdot \text{draaisnelheid}$.

Hieruit kan bijvoorbeeld worden afgeleid dat:

- Bij stationair draaien het brandstofverbruik van een 150 kW machine met 8% interne verliezen gelijk is aan:

$$150 \cdot 0,08 / 4 = 3,0 \text{ liter/uur}$$

¹¹ Correlation factors between European and World harmonised test cycles for heavy-duty engines, TNO 2008 MON-RPT-033-DTS-2008-03854, en Dutch CO₂ emission factors for road vehicles, 2016, TNO R10449.

¹² Correlation factors between European and World harmonised test cycles for heavy-duty engines, TNO rapport 2008 MON-RPT-033-DTS-2008-03854.

- Voor een Stage V motor die aan de emissielimiet van 0,4 g/kWh voldoet in het volle motorbereik, de NO_x[ppm]/CO₂[%] verhouding lager is dan:

$$\text{NO}_x/\text{CO}_2 < 10000 * (0,4/46)/(2650/(4 * 44)) = 5,7 \text{ [ppm/\%]}$$
- Bij de typische motorlast van 35% bij een motor van 150 kW is het brandstofverbruik, zonder het aandeel stationair draaien te weten:

$$0,35 * 150/4 = 13,1 \text{ liter/uur}$$
- Bij de typische motorlast van 35% bij een motor van 150 kW is het brandstofverbruik, maar nu gegeven 30% stationair draaien met 4% interne verliezen:

$$0,35 * 150/4 + 0,3 * 0,04 * 150/4 = 13,6 \text{ liter/uur}$$

Dus 0,5 liter/uur extra door stationair draaien, ten opzichte van een resultaat op basis van motorarbeid alleen, zonder kennis van stationair draaien.
- Bij een brandstofverbruik van 20 liter in 2 uur, waarbij de motor een half uur stationair heeft gedraaid, met 3 liter per uur, dan is het geleverde vermogen:

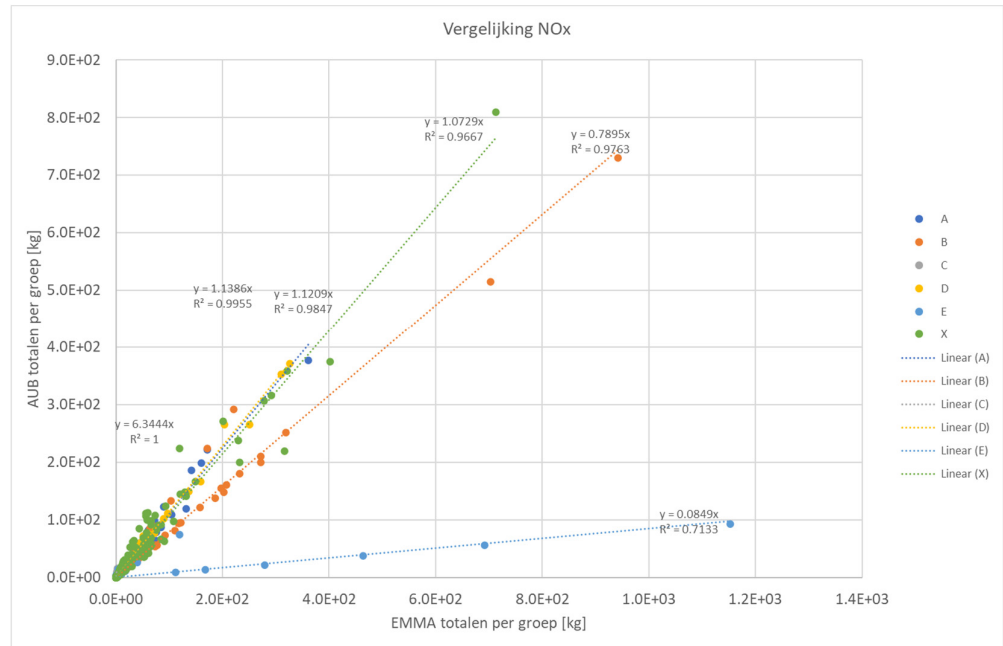
$$4 * (20 - 3 * 0,5)/(2,0 - 0,5) = 49,3 \text{ kWh}$$
- Bij 4% AdBlue-verbruik ten opzichte van het diesilverbruik, is de reductie van de NO_x emissies in de SCR:

$$0,04 * (-460)/4 = -4,6 \text{ g/kWh}$$

5.2 Vergelijkingen: invoergegevens, aannames, voordelen en nadelen

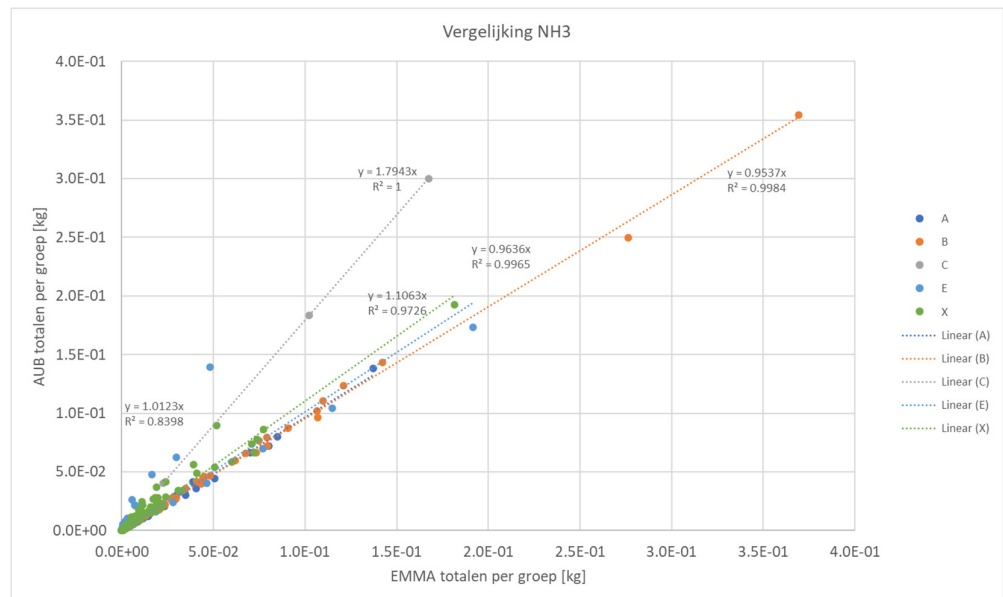
De wettelijke emissielimiet in g/kWh metriek heeft ervoor gezorgd dat motoren bij hogere motorlast veel schoner zijn geworden, maar bij lage motorlast de emissies minder gedaald zijn. Van oudsher zijn de NO_x emissies bij stationair draaien al disproportioneel hoger (per liter brandstof). Maar met de toepassing van SCR is dat effect groter geworden. Voor categorieën C en D wordt resp. 3% en 6% AdBlue verbruik ten opzichte van diesilverbruik aangenomen voor de vergelijking. Verschillen in de praktijk kunnen groot zijn door afwijkend AdBlue verbruik. Een beperkt verschil van 1% meer of minder AdBlue verbruik ten opzichte van de 3% en 6%, kan al snel 50% meer of minder NO_x geven, afhankelijk van de machinegrootte en omstandigheden.

Figuur 5 en Figuur 6 laten de correlatie zien tussen de modelresultaten voor het machinepark uit het EMMA model op basis van de AUB methode en de mg/s methode uit het EMMA model. Gegeven de eerder genoemde verschillen tussen deze methoden, zijn de verschillen tussen de modelresultaten voor NO_x beperkt, behalve voor LPG machines en grote benzinemotoren met een cilinderinhoud van 100-225 cc. Voor de tweede groep is er duidelijk een fout in de internationale cijfers die verbeterd moet worden. De emissiefactoren voor NO_x zijn gebaseerd op een vaste verhouding tussen NO_x en HC (koolwaterstoffen), terwijl door de verbetering van technologie en motorefficiëntie er een verschuiving van HC naar NO_x is geweest. Hierdoor is de geur van benzine niet langer dominant bij het opereren van kettingzagen en andere machines. Van LPG motoren, hoofdzakelijk in vorkheftrucks, werd aangenomen dat ze beter presteerden dan andere motoren met een vonkontsteking. Tot dusverre is er geen duidelijke reden om dat onderscheid te maken, en daarmee zijn alle benzine en LPG motoren in een enkele groep "E" genomen.



Figuur 5: Vergelijking tussen het huidige EMMA model op basis van NO_x emissies in grammen per seconde en de AUB aanpak. De afwijkingen in E worden grotendeels veroorzaakt door vorkheftrucks op LPG. De waarden in EMMA wijken af van het gemiddelde van benzine en LPG zowel naar boven als naar beneden, en gebaseerd op een vaste verhouding HC en NO_x in de samengestelde limiet HC + NO_x.

Voor NH₃ zijn de verschillen vooral groot voor categorie C (zie Figuur 6). De nieuwe metingen laten zien dat de NH₃ emissies van machines met SCR proportioneel zijn met het brandstofverbruik. Dat leidt tot een bijstelling.



Figuur 6: De vergelijking van de totalen per machine groep van de NH₃ emissies met de huidige EMMA methodiek, op basis van emissies per seconde, en de AUB methodiek.

Tabel 7 en Tabel 8 laten de berekende emissies zien op basis van de drie verschillende methodieken, voor een selectie aan veel gebruikte mobiele machines in Nederland. Inderdaad zien we voor NO_x vooral grotere verschillen bij de C en E klassen. Voor klassen A en D geeft de AUB methode typisch iets hogere NO_x emissies dan de EMMA mg/s methode, terwijl dit voor klasse B andersom geldt.

Tabel 7: Vergelijking berekende NO_x emissies voor verschillende machinetypen.

Machine naam	AUB klasse	Brandstof	Actief aantal	Draaiuren	Brandstofverbruik (liter)	AdBlueverbruik (liter)	g/kWh	mg/s	AUB
							NO _x (ton)		
Bladblazers	E	benzine	182,955	1,801,401	1,868,342	-	2	3	7
Generatoren, bouw	A	diesel	518	521,226	2,937,894	-	43	62	61
Generatoren, bouw	B	diesel	343	554,390	5,986,355	-	99	128	93
Generatoren, bouw	C	diesel	9	9,554	763,764	20,830	2	2	10
Generatoren, bouw	E	benzine	15,099	2,375,358	3,303,275	-		16	13
Generatoren, bouw	X	diesel	7,173	4,987,609	35,761,311	-	731	929	1,098
Graafmachines	A	diesel	5,225	5,639,591	25,948,620	-	499	480	547
Graafmachines	B	diesel	2,597	3,080,591	40,103,289	-	786	747	617
Graafmachines	D	diesel	5,695	9,476,272	116,529,768	6,991,786	610	617	677
Graafmachines	X	diesel	20,494	15,467,093	47,372,537	-	1,382	1,355	1,499
Grasmaaiers	E	benzine	836,060	16,247,952	24,354,024	-	143	145	97
Hoogwerkers	A	diesel	377	173,973	1,065,154	-	14	17	22
Hoogwerkers	B	diesel	53	23,848	219,221	-	4	5	3
Hoogwerkers	D	diesel	648	325,209	2,246,566	134,794	10	12	14
Hoogwerkers	X	diesel	791	313,649	1,110,626	-	22	30	35
Laadschoppen op banden	A	diesel	3,731	3,603,969	28,597,031	-	418	508	590
Laadschoppen op banden	B	diesel	1,815	2,241,245	43,273,065	-	608	717	660
Laadschoppen op banden	D	diesel	3,266	5,049,335	98,554,926	5,913,296	412	423	557
Laadschoppen op banden	X	diesel	4,957	3,432,385	20,664,454	-	465	561	637
Landbouwtrekkers	A	diesel	9,817	5,248,034	48,315,420	-	926	870	993
Landbouwtrekkers	B	diesel	15,026	12,209,437	149,634,504	-	2,987	2,816	2,306
Landbouwtrekkers	D	diesel	13,913	12,731,195	158,764,255	9,525,855	859	837	921
Landbouwtrekkers	X	diesel	36,171	8,164,077	72,690,083	-	2,463	2,272	2,222
Trilplaten/stampers	A	diesel	964	434,666	430,050	-	5	4	11
Trilplaten/stampers	E	benzine	8,152	1,413,104	1,636,720	-	9	9	7
Trilplaten/stampers	X	diesel	8,155	2,760,394	2,854,612	-	73	59	99
Vorkhefrucks	A	diesel	2,509	2,051,916	10,977,031	-	233	179	230
Vorkhefrucks	B	diesel	359	290,650	4,519,691	-	111	81	69
Vorkhefrucks	D	diesel	831	792,728	8,316,055	498,963	52	45	49
Vorkhefrucks	E	lpg	7,301	5,513,322	57,135,005	-	2,865	2,870	229
Vorkhefrucks	X	diesel	2,632	1,039,073	6,343,868	-	197	154	196

Voor NH3 laat Tabel 8 een goede overeenkomst zien tussen de AUB en mg/s methoden voor klasse A, B en D.

Tabel 8: Vergelijking berekende NH3 emissies voor verschillende machinetypen.

Machine naam	AUB klasse	Brandstof	Actief aantal	Draaiuren	Brandstofverbruik (liter)	g/kWh	mg/s	AUB
						NH3 (ton)		
Bladblazers	E	benzine	182,955	1,801,401	1,868,342	0.004	0.004	0.014
Generatoren, bouw	A	diesel	518	521,226	2,937,894	0.046	0.022	0.022
Generatoren, bouw	B	diesel	343	554,390	5,986,355	0.110	0.050	0.045
Generatoren, bouw	C	diesel	9	9,554	763,764	0.114	0.102	0.183
Generatoren, bouw	E	benzine	15,099	2,375,358	3,303,275		0.008	0.025
Generatoren, bouw	X	diesel	7,173	4,987,609	35,761,311	0.298	0.199	0.268
Graafmachines	A	diesel	5,225	5,639,591	25,948,620	0.225	0.199	0.195
Graafmachines	B	diesel	2,597	3,080,591	40,103,289	0.367	0.314	0.301
Graafmachines	D	diesel	5,695	9,476,272	116,529,768	28.362	24.518	27.967
Graafmachines	X	diesel	20,494	15,467,093	47,372,537	0.369	0.330	0.355
Grasmaaiers	E	benzine	836,060	16,247,952	24,354,024	0.063	0.062	0.183
Hoogwerkers	A	diesel	377	173,973	1,065,154	0.007	0.009	0.008
Hoogwerkers	B	diesel	53	23,848	219,221	0.002	0.002	0.002
Hoogwerkers	D	diesel	648	325,209	2,246,566	0.409	0.500	0.539
Hoogwerkers	X	diesel	791	313,649	1,110,626	0.006	0.007	0.008
Laadschoppen op banden	A	diesel	3,731	3,603,969	28,597,031	0.167	0.224	0.214
Laadschoppen op banden	B	diesel	1,815	2,241,245	43,273,065	0.260	0.329	0.325
Laadschoppen op banden	D	diesel	3,266	5,049,335	98,554,926	15.804	20.189	23.653
Laadschoppen op banden	X	diesel	4,957	3,432,385	20,664,454	0.113	0.151	0.155
Landbouwtrekkers	A	diesel	9,817	5,248,034	48,315,420	0.395	0.379	0.362
Landbouwtrekkers	B	diesel	15,026	12,209,437	149,634,504	1.212	1.171	1.122
Landbouwtrekkers	D	diesel	13,913	12,731,195	158,764,255	34.491	33.248	38.103
Landbouwtrekkers	X	diesel	36,171	8,164,077	72,690,083	0.549	0.518	0.545
Trilplaten/stampers	A	diesel	964	434,666	430,050	0.002	0.002	0.003
Trilplaten/stampers	E	benzine	8,152	1,413,104	1,636,720	0.003	0.004	0.012
Trilplaten/stampers	X	diesel	8,155	2,760,394	2,854,612	0.011	0.011	0.021
Vorkheftrucks	A	diesel	2,509	2,051,916	10,977,031	0.117	0.088	0.082
Vorkheftrucks	B	diesel	359	290,650	4,519,691	0.049	0.034	0.034
Vorkheftrucks	D	diesel	831	792,728	8,316,055	2.395	1.762	1.996
Vorkheftrucks	E	lpg	7,301	5,513,322	57,135,005	0.476	0.477	0.429
Vorkheftrucks	X	diesel	2,632	1,039,073	6,343,868	0.062	0.049	0.048

De huidige aanpak op basis van motorbelastingprofielen, in Tabel 5, en grammen per seconde emissies, is ontwikkeld om de typische prestaties van moderne Stage V motoren, zoals in Figuur 1, goed te kunnen representeren naast de oudere motoren. De emissies in grammen per seconde zijn nagenoeg constant voor de volledige range in motorbelasting. Er is een kleine toename te zien bij zeer lage last, stationair en stand-by.

De verschillen in emissies bij verschillende inzet laat zien dat kWh meer dan 100% kan variëren (een bandbreedte van 25% tot 75% gemiddelde motorbelasting), maar bij hetzelfde aantal draaiuren zijn de emissies nagenoeg gelijk. Het gevolg is dat het gebruik van emissiefactoren in g/kWh voor Stage V tot grote verschillen kan leiden bij verschillende motorbelastingen, die in de praktijk niet gezien worden.

De emissiefactoren in mg/s, zoals nu gebruikt worden in EMMA, vragen motorbelastingprofielen. Deze zijn alleen beschikbaar uit monitoringsprogramma's. De resultaten zijn gekoppeld aan inzet en aandrijftechnologie. Deze gegevens zijn niet algemeen beschikbaar of relevant voor een specifieke situatie. De gemiddelde motorbelasting kan het beste worden afgeleid uit uren en brandstofverbruik:

$$\text{belasting [\%]} = 0,25 * \text{liters diesel [l]} / (\text{draaiuren [hr]} * \text{maximaal vermogen [kW]})$$

5.3 Model robuustheid: afhankelijkheid van uitkomsten van invoergegevens en verwachte variaties

AdBlue verbruik, uren en brandstofverbruik, geven een goed beeld van, respectievelijk, de effectiviteit van SCR, de motorbelasting, en de geleverde arbeid. Alle drie deze gegevens zijn noodzakelijk om een goede inschatting te maken van de emissies van een moderne mobiele machine. In de praktijk draaien motoren veel lage motorlast, met zowel een lagere motorefficiëntie en dus meer verbranding, brandstofverbruik en schadelijke emissies dan men op basis van de geleverde arbeid zou verwachten, als een lagere SCR efficiëntie waardoor de periodes van lage motorlast dominant zijn in NO_x emissies van moderne machines met SCR.

Zoals eerder vermeld kan een beperkt verschil van 1% meer of minder AdBlue verbruik ten opzichte van de aangenomen 3% en 6%, al snel tot 50% meer of minder NO_x leiden, afhankelijk van de machinegrootte en omstandigheden.

5.4 Typische aannames voor omrekeningen tussen methodes

De aannames die worden gebruikt zijn:

- Motorbelastingprofielen in Tabel 5;
- AdBlue-verbruik categorie C: 3%;
- AdBlue-verbruik categorie D: 6%;
- Verband tussen motorvermogen en brandstofverbruik: Zie Tabel 9.
 - 1% verbetering per jaar in motorefficiëntie bij motorlast tussen 1996 en 2021¹³;
 - 0,5% verbetering per jaar in motorefficiëntie bij stationair draaien tussen 1996 en 2021;
 - Een efficiëntie van de motor die lineair toeneemt met het maximaal vermogen.

¹³ Onderbouwing AERIUS emissiefactoren voor wegverkeer, mobiele werktuigen, binnenvaart en zeevaart TNO rapport 2020 R11528.

Tabel 9: Het brandstofverbruik in liters per uur per bouwjaar en maximaal vermogen, op basis van een gemiddelde motorlast van 35%. De optimale efficiëntie geeft het laagste brandstofverbruik aan per kWh, typisch bij hogere motorlast.

bouwjaar	motorefficiëntie	optimale efficiëntie	maximaal vermogen [kW]											
			5	10	20	30	50	75	100	150	200	250	300	400
1996	1.1495	267.0	1.37	1.89	2.93	4.05	6.34	9.22	12.09	17.84	23.59	29.33	35.08	46.58
1997	1.1381	264.3	1.36	1.88	2.91	4.01	6.28	9.13	11.97	17.67	23.36	29.05	34.74	46.12
1998	1.1268	261.7	1.35	1.86	2.88	3.98	6.22	9.04	11.86	17.50	23.13	28.77	34.40	45.68
1999	1.1157	259.1	1.34	1.85	2.86	3.94	6.17	8.96	11.75	17.33	22.91	28.49	34.07	45.23
2000	1.1046	256.6	1.33	1.83	2.83	3.91	6.11	8.87	11.64	17.16	22.69	28.22	33.74	44.80
2001	1.0937	254.0	1.32	1.82	2.81	3.87	6.05	8.79	11.52	17.00	22.47	27.94	33.42	44.36
2002	1.0829	251.5	1.31	1.80	2.78	3.84	6.00	8.71	11.42	16.83	22.25	27.67	33.09	43.93
2003	1.0721	249.0	1.30	1.79	2.76	3.80	5.94	8.62	11.31	16.67	22.04	27.41	32.77	43.51
2004	1.0615	246.5	1.29	1.77	2.73	3.77	5.88	8.54	11.20	16.51	21.83	27.14	32.46	43.09
2005	1.0510	244.1	1.28	1.76	2.71	3.73	5.83	8.46	11.09	16.36	21.62	26.88	32.14	42.67
2006	1.0406	241.7	1.27	1.74	2.69	3.70	5.78	8.38	10.99	16.20	21.41	26.62	31.83	42.26
2007	1.0303	239.3	1.26	1.73	2.66	3.67	5.72	8.30	10.88	16.04	21.20	26.37	31.53	41.85
2008	1.0201	236.9	1.25	1.71	2.64	3.63	5.67	8.22	10.78	15.89	21.00	26.11	31.22	41.44
2009	1.0100	234.6	1.24	1.70	2.62	3.60	5.62	8.15	10.68	15.74	20.80	25.86	30.92	41.04
2010	1.0000	232.3	1.23	1.69	2.59	3.57	5.56	8.07	10.58	15.59	20.60	25.61	30.62	40.65
2011	0.9900	229.9	1.22	1.67	2.57	3.53	5.51	7.99	10.47	15.44	20.40	25.36	30.32	40.25
2012	0.9801	227.6	1.21	1.66	2.55	3.50	5.46	7.92	10.37	15.29	20.20	25.12	30.03	39.86
2013	0.9703	225.4	1.20	1.64	2.53	3.47	5.41	7.84	10.28	15.14	20.01	24.87	29.74	39.47
2014	0.9606	223.1	1.19	1.63	2.50	3.44	5.36	7.77	10.18	14.99	19.81	24.63	29.45	39.08
2015	0.9510	220.9	1.19	1.62	2.48	3.41	5.31	7.69	10.08	14.85	19.62	24.39	29.16	38.70
2016	0.9415	218.7	1.18	1.60	2.46	3.38	5.26	7.62	9.98	14.71	19.43	24.15	28.88	38.32
2017	0.9321	216.5	1.17	1.59	2.44	3.35	5.21	7.55	9.89	14.57	19.24	23.92	28.60	37.95
2018	0.9227	214.3	1.16	1.58	2.42	3.32	5.16	7.48	9.79	14.42	19.06	23.69	28.32	37.58
2019	0.9135	212.2	1.15	1.57	2.40	3.29	5.11	7.41	9.70	14.29	18.87	23.46	28.04	37.21
2020	0.9044	210.1	1.14	1.55	2.37	3.26	5.07	7.34	9.61	14.15	18.69	23.23	27.77	36.85
2021	0.8953	207.9	1.13	1.54	2.35	3.23	5.02	7.27	9.52	14.01	18.51	23.00	27.50	36.49

De gemiddelde trend op basis van machines van het jaar 2015 is:

$$\text{liter/uur} = 0,095 * P_{\max} [\text{kW}] + 0,54$$

Dit kan toegepast worden op alle machines met redelijke nauwkeurigheid. De grootste onzekerheid is de gemiddelde motorlast. Als, in plaats van de gemiddelde 35%, een motorlast van 30% of 40% verwacht wordt, scheelt dat in beide gevallen 16% in het berekende brandstofverbruik.

Meer in het algemeen zijn de gebruikte formules:¹⁴

- Dieselmotor bij motorbelasting $P_{\text{inzet}}[\text{kW}]$:

$$\text{CO}_2[\text{g/s}] = 0,5 * (1 + F[\text{jaar}]) * (0,4 + 0,0025 * P_{\max} [\text{kW}]) + 0,20 * F[\text{jaar}] * (1 + \exp(-P_{\max}[\text{kW}]/5)) * P_{\text{inzet}}[\text{kW}]$$
- Benzinemotor: $\text{CO}_2 [\text{g/s}] = 1,17 * \text{Dieselmotor CO}_2[\text{g/s}]$
- LPG-motor: $\text{CO}_2 [\text{g/s}] = 1,07 * \text{Dieselmotor CO}_2[\text{g/s}]$
- Brandstofverbruik $[\text{g/s}] = \text{CO}_2[\text{g/s}]/3,1$ (diesel en benzine)
- Brandstofverbruik LPG $[\text{g/s}] = \text{CO}_2[\text{g/s}]/2,8$
- Motorefficiëntieverandering vanaf 1996: $F[\text{jaar}] = 1,01^{(2010-\text{jaar})}$

¹⁴ TNO rapporten: TNO 2016 R10419, TNO 2020 R11528, TNO 2018 R10465, en TNO 2008 DTS-0854, en CBS basisgegevens.

6 Beoordelen van SCR retrofit en gebruik van motortesten

Het retrofitten, het monteren van een SCR op een oude machine met hoge NO_x emissies, is geen triviale zaak. De werking van de SCR is niet automatisch gegarandeerd. In het bijzonder is het uitlaatgas vaak te koud om de SCR te laten werken. Het uitlaatgas moet dan verhit worden. Dat vraagt tot een derde van het maximale vermogen van de machine die ge-retrofit wordt. Bijvoorbeeld, een motor van 180 kW vraagt een verwarmingselement van 60 kW om het uitlaatgas warm te houden. In het bijzonder bij lage motorlast is er relatief veel warmte nodig. Elektrische verwarming via een generator is een nieuwe bron van emissies, waardoor de vraag rijst of de oplossing een verbetering is ten opzichte van het originele probleem.

Een tweede probleem met retrofit-installaties is de compacte vorm, die mogelijk tot een inhomogene werking van de katalysator leidt. Een goede menging van uitlaatgas en de ammoniak uit ureum zorgt voor een homogene werking van de katalysator, en een vergelijkbare reductie door de katalysator heen. Een compact ontwerp en de plaatsing van sensoren te dicht op de SCR zelf kan een te rooskleurig beeld geven. In een deel van de katalysator kan de omzetting van NO_x hoog zijn. Dit is dan niet vergelijkbaar met metingen aan het einde van de uitlaat waar al het gas vermengd is tot een gemiddelde uitstoot.

Een derde probleem met retrofit SCR katalysatoren is de procedure om ze te meten. Menig meetrapport laat niet duidelijk zien hoe de motor belast wordt, en of dat vergelijkbaar is met normaal gebruik van de machine. Bijvoorbeeld, als in een rapport over een retrofitmachine, de gemeten temperaturen boven 220 graden en zuurstof concentraties onder de 9% zijn, wekt dat de indruk dat de machine met retrofit SCR alleen getest is bij hoge motorlast. In die omstandigheden zal zelf de meest simpele, en beperkt robuuste, SCR-installatie nog goed functioneren.

Eigenlijk moet een goede test ook tenminste 15 minuten stationair draaien bevatten. Dat is een kritische situatie voor de werking van de SCR, met lage uitlaatgastemperaturen, en over het algemeen hoge NO_x concentraties voor de hoeveelheid brandstof. Hierin kunnen de goede SCR-installaties van de slechte onderscheiden worden.

Kort gezegd, de ene retrofit is de andere niet. En de eisen aan duurzaamheid en veroudering van mobiele werktuigen lijkt niet gangbaar voor de retrofit-installaties. Goede wet- en regelgeving ontbreekt. Er is een procedure voor het testen van retrofit-installaties onder UNECE, die een afgeleide en versimpelde procedure is ten opzichte van de testen aan nieuwe motoren. Maar deze procedure wordt over het algemeen niet gevolgd en de werking van retrofit installaties lijkt veelal gebaseerd op beperkte informatie, die geen reflectie is van langdurige normale inzet van de machines.

6.1 Retrofit installaties beoordelen

Metingen aan retrofit-installaties in de praktijk laten dan ook grote variatie zien in NO_x emissies.

Om de werking van de SCR en de NO_x emissies uit te drukken in AUB (AdBlue verbruik, Uren, en Brandstof) zijn in principe twee metingen nodig: De NO_x/CO₂ concentratie in het uitlaatgas bij 1) lage en 2) hoge motorlast, als de SCR uit staat, en 3) het brandstofverbruik bij stationair draaien. Eventueel kan de CO₂ concentratie afgeleid worden uit de zuurstof (O₂) concentratie.

De concentratie ratio NO_x/CO₂ bij hoge last vertaald naar de NO_x emissiefactor voor brandstofverbruik. Het verschil tussen de ratio bij hoge last en lage last en het brandstofverbruik bij lage last geeft de NO_x per uur factor. De reductie per liter AdBlue is een vaste factor van 460 gram NO_x reductie.

Bijvoorbeeld, zonder een actieve SCR: 12 gram NO_x per 1 kilogram CO₂ bij lage last, en 8 gram NO_x per kilogram CO₂ bij hoge last, en 0,8 liter brandstof per uur tijdens stationair draaien geeft:

$$\text{NO}_x [\text{g}] = 8,5 * \text{uur} + 21 * \text{liter diesel} - 460 \text{ gram per liter AdBlue},$$

waarbij $8/0,377 = 21 \text{ g/liter}$ en $0,8*(12-8)/0,377 = 8,5 \text{ g/uur}$.

Zelfs met een beperkte retrofit is het mogelijk om de NO_x emissies te bepalen op basis van brandstofverbruik, draaiuren, en AdBlue-verbruik.

6.2 AUB methodiek op basis van wettelijke motortesten

Als er meetdata van een officiële test beschikbaar is, inclusief het AdBlue-verbruik, kan deze data gebruikt worden om zelf inschattingen te maken van de coëfficiënten Q_a, Q_u, en Q_b. Als alleen het gemiddelde over de hele test beschikbaar is dan kan daaruit Q_b bepaald worden:

$$Q_a = -460 \text{ g/liters-AdBlue}$$

$$Q_b = (\text{NO}_x[\text{g/test}] - Q_a * \text{liters-AdBlue}) / \text{liters-diesel}$$

De coëfficiënt Q_u staat dan op nul.

In het geval dat per motorlastpunt de resultaten bekend zijn, kan de afwijking bij stationair draaien gebruikt worden om de grammen per uur te bepalen. Door alleen het stationaire motorlastpunt te nemen en de coëfficiënten Q_a en Q_b te bepalen op basis van de gehele test, kan het aandeel van de extra emissies bij stationair draaien bepaald worden, en aan Q_u toegevoegd worden.

7 Conclusies

7.1 Verwachte ontwikkelingen

Met aandacht voor de AUB methode, monitoringsdata, en ervaringen van gebruikers zal er meer aan het licht komen over de SCR efficiëntie in normaal gebruik, mogelijke storingen, defecten, en manipulatie van de systemen. Het is belangrijk dat de registratie en administratie dat niet omzeilt door vaste waarden in te vullen, ongeacht de gegevens uit de praktijk. De goede werking van SCR en het goede onderhoud is een essentieel onderdeel van lagere milieubelasting. Met deze aanpak krijgt dat de aandacht die het verdient en de handvesten voor controle.

Verder zullen er mogelijk een aantal machines bestaan met specifieke technologie, bijvoorbeeld Stage V machines die nog sterk van EGR (Exhaust Gas Recirculation) gebruik maken om NO_x te reduceren, die nog slecht door deze AUB methodiek afgedekt worden. In de loop van de tijd, ook door aanvullende metingen, kan het zijn dat er onderscheid gemaakt moet worden in twee verschillende Stage-IV/Stage-V (categorie D) datasets. De aanpak op basis van wettelijke motortesten biedt daarvoor al een mogelijkheid.

7.2 Validatie en controle mogelijkheden

Brandstof en AdBlue wordt ingekocht en afgerekend. Het zijn onderdeel van de kosten van het werk, en deze administratie zou op totalen in principe beschikbaar moeten zijn. Hiermee zouden de emissietotalen gecontroleerd kunnen worden. Als het machinepark homogeen is, bijvoorbeeld grotere Stage-IV/V machines, geven de geregistreerde gegevens gelijk een beeld van de emissies, omdat de specifieke inzet van individuele machines minder relevant zijn.

7.3 Caveats

De belangrijkste afhankelijkheid en daarmee de grootste onzekerheid is het AdBlue verbruik. Als er andere NO_x reductiemaatregelen zijn op een machine, zoals EGR (Exhaust Gas Recirculation) of brandstofinjectietiming, of gepulsde injectie, kan het AdBlue verbruik lager zijn voor dezelfde NO_x emissies. Een ander probleem met AdBlue verbruik kan lekkage van het AdBlue systeem of een NH₃ slip uit de uitlaat zijn.

8 Ondertekening

Den Haag, 10 december 2021



P.W.H.G. Coenen
Projectleider

TNO



Norbert E. Ligterink
Auteur