

Mobility & Built Environment

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

www.tno.nl

T +31 88 866 00 00

TNO-rapport**TNO 2023 R10553****Pilot project Emissie Monitoring en Periodieke Keuring (EMPK) van bouwmachines**

| | |
|-----------------|--|
| Datum | 17 maart 2023 |
| Auteur(s) | Pim van Mensch, Mitch Elstgeest, Mark Kranendonk, Pierre Paschinger |
| Exemplaarnummer | 2023-STL-RAP-100348823 |
| Aantal pagina's | 107 (incl. bijlagen) |
| Aantal bijlagen | 2 |
| Opdrachtgever | Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat Postbus 20901 2500 EX DEN HAAG |
| Projectnaam | lenW Demoproject EMK mob. werktuigen |
| Projectnummer | 060.47383 |

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.

© 2023 TNO

Samenvatting

Vanwege de huidige stikstofproblematiek, maar ook vanwege de klimaat- (Klimaatakkoord) en gezondheidsdoelstellingen (Schone Lucht Akkoord) is een snelle reductie van emissies door bouwmachines gewenst. Zonder controle en handhaving zal er echter een verschil zijn, of ontstaan, tussen van tevoren ingeschatte en daadwerkelijk optredende emissies. Hogere emissies kunnen o.a. optreden als andere bouwmachines worden ingezet dan van tevoren aangegeven of als meer draaiuren worden gemaakt. Als er bij inzet van schone dieselmachines geen controle is op de werking van de emissiereductie-technologie (die bij moderne machines steeds complexer, onderhoudsgevoeliger en belangrijker wordt), is er een kans dat deze technologie defect is of zelfs wordt uitgeschakeld of verwijderd.

Voor controle van de inzet en emissies van mobiele bouwwerktuigen is door het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat in concept een aanpak ontwikkeld op basis van Emissie Monitoring en Periodieke keuring (EMPK). Bij deze aanpak, wordt de inzet van bouwwerktuigen gecontroleerd door de (GPS-)positie, de draaitijden en waar mogelijk de motorbelasting van bouwmachines online te monitoren. Bij dieselwerktuigen met geavanceerde emissiereductie-technologie worden de emissies gemonitord en periodiek gecontroleerd. Ook de inzet van elektrische werktuigen wordt gemonitord.

Het Ministerie heeft TNO gevraagd een pilot project Emissie Monitoring en Periodieke Keuring (EMPK) uit te voeren, met de onderstaande doelstellingen:

1. Het via een pilot, ervaringen opdoen rondom de noodzakelijke voorwaarden, praktische complexiteiten en levensvatbaarheid rondom Emissie Monitoring en Periodieke Keuring van mobiele machines. Ten behoeve van de pilot zijn zowel kortdurende metingen als langdurige monitoring uitgevoerd aan 29 machines in verschillende categorieën. Deze metingen zijn ook gebruikt om aan doelstelling 2 te voldoen.
2. Het nader bepalen van de inzet (draaiuren en motorbelasting) en bijbehorende emissies van mobiele machines, als vervolg op het eerder door TNO uitgevoerde verkennend onderzoek naar emissies van mobiele machines, met als doel de nationale emissietotalen¹ en verschillen tussen groepen machines te onderbouwen.

Conclusies EMPK-aanpak voor controle van de inzet en emissies

NO_x-monitoring geeft uitgebreid beeld van de praktijkemissies

De meetdata uit dit project laten zien dat de emissieprestaties per machine ver uiteenlopen, en dat de praktijkemissies vaak afwijken van de verwachte niveaus op basis van de emissielimieten. Dit komt deels omdat de inzet van de machine in de praktijk anders is dan bij de wettelijke testen getoetst. Bij moderne machines met een SCR-katalysator kunnen hogere NO_x-emissies bijvoorbeeld het gevolg zijn van langdurig stationair draaien. Vanwege stationair draaien daalt de temperatuur van de SCR-katalysator, en is hierdoor niet meer effectief.

¹ <https://www.emissieregistratie.nl/over-emissieregistratie/rapportages-en-publicaties>

Bij regelmatig stationair draaien kan een substantieel deel van de totale NO_x-uitstoot onder deze condities worden gevormd. NO_x-monitoringsdata geven een nauwkeurige inschatting van de geproduceerde NO_x-emissies. NO_x-monitoring kan bijvoorbeeld inzicht geven in het optreden van extra NO_x-uitstoot tijdens stationair draaien (of lage motorlast) en kan ertoe bijdragen om deze bedrijfscondities te voorkomen door de motor af te schakelen.

Registratie als eerste stap

Een belangrijke eerste stap richting een EMPK methodiek zou zijn: registratie van alle bouwmachines. Dit maakt het mogelijk om afspraken te maken (en te kunnen controleren) over typen en emissieklassen van bouwmachines die op een bouwproject gaan worden ingezet en om (emissie) inspecties in de praktijk uit te voeren.

Technische uitvoerbaarheid van monitoring van de inzet

Zoals hierboven beschreven, bevat de beoogde inzetmonitoring de volgende elementen; locatie, draaiuren en (waar mogelijk) de motorbelasting. De monitoring van de locatie en draaiuren is mogelijk door de installatie van een data acquisitie dongle die direct op de voeding van de machine geplaatst kan worden, dit vraagt een installatietijd van ca. 1 uur. Bij diverse machines worden dergelijke gegevens al online gemonitord door middel van een telematica systeem. Om de motorbelasting te monitoren is verbinding met het On-Board-Diagnostics (OBD)-systeem van de machine benodigd. Bij de meeste moderne machines is informatie rondom de motorbelasting en/of het brandstofverbruik (dat gebruikt kan worden als inschatting van de motorbelasting) wel beschikbaar op de OBD. Er is, echter, geen standaardisatie van de OBD-signalen, waardoor de mogelijkheden en de installatietijd per machine kunnen verschillen als ook motorbelasting wordt meegenomen.

Technische uitvoerbaarheid continue NO_x monitoring

Als voor continue NO_x-monitoring gebruik wordt gemaakt van data op de OBD van de bouwmaschine, dan is maatwerk bijna onvermijdelijk. Dit komt enerzijds door de grote verscheidenheid aan machines en anderzijds door het gebrek aan standaardisatie van (NO_x-)signalen op de OBD van deze machines. Zolang standaardisatie ontbreekt, is een meer robuuste aanpak om een eigen NO_x-sensor in de uitlaat van de machine te monteren. Deze dient dan verbonden te worden met een eigen dongle, die de sensordata uitleest en verstuurt naar een database.

Los van de vraag of wel/geen eigen NO_x-sensor wordt toegepast voor data inwinning, vragen post-processing van deze data, het beheer van een emissiedatabase en ontsluiting van de data een flinke investering qua kennis, menskracht en organisatie. De belangrijkste elementen – zoals ervaren tijdens het project bij de gemonitorde machines- zijn onderstaand samenvattend toegelicht.

Inwinnen van NO_x-data:

- Bij de meeste bouwmachines is geen OBD NO_x-signaal beschikbaar, dit geldt ook voor moderne Stage V machines met een af-fabriek SCR katalysator die daarmee wel beschikken over een eigen NO_x-sensor;
- Bij machines die wel een NO_x-sensor hebben, maar geen NO_x-signaal op de OBD beschikbaar maken, is dit NO_x-signaal vaak wel 'direct' uit te lezen, dat wil zeggen buiten de OBD om, maar dit vraagt per machine wel flink wat uitzoekwerk en goede interpretatie van dit sensorsignaal;

- Bij bouwmachines die wel beschikken over een OBD NO_x-signaal is dit signaal niet altijd bruikbaar. Bovendien kan het na de start van de motor tot 25 minuten duren voordat het signaal beschikbaar komt.

Bij machines die af-fabriek zijn voorzien van een SCR katalysator (en dus beschikken over een NO_x-sensor) lijkt het voor continue NO_x-monitoring een meer robuuste aanpak om in de uitlaat een extra NO_x-sensor te plaatsen. Via een dongle kan de data dan worden verstuurd naar een emissiedatabase. Zo ontstaat een machineonafhankelijke toepassing, waarbij voor het NO_x-signaal niet hoeft te worden aangehaakt op de OBD. Hiermee kan worden gecontroleerd of de SCR-katalysator naar behoren functioneert, en kan – op basis van NO_x/CO₂ concentraties - een redelijke indicatie worden gegeven van de emissieniveaus. Signalen over draaiuren, motorbelasting en brandstofverbruik, die goed van pas komen bij berekeningen over inzet en emissies, zijn meestal wel beschikbaar op de OBD van deze moderne machines, ook al zijn ze niet gestandaardiseerd. Door wel verbinding te maken met de OBD kunnen de emissieniveaus nauwkeuriger worden bepaald, maar het maakt de installatietijd wat langer. Het plaatsen van de dongle, de NO_x-sensor, en het verkennen en verbinding maken met de OBD, kost momenteel in totaal ca. één werkdag installatietijd.

Bij machines die niet zijn voorzien van een SCR katalysator is in de voorziene EMPK aanpak geen continue NO_x-monitoring benodigd. Dergelijke machines hebben vaak ook minder of geen gegevens beschikbaar op de OBD, wat de opties voor data-inwinning beperkt en/of de installatietijd verder verlengt.

Emissieberekeningen

Naast de inbouw van apparatuur is post-processing van data, per machinetype, noodzakelijk indien de NO_x-uitstoot in grammen per uur, per liter brandstof of per kWh geleverde arbeid moet worden bepaald.

In de meeste gevallen is het wel mogelijk om – met gebruik van OBD-signalen - tot een emissieberekening te komen, met name bij de moderne Stage IV en V machines. Opgemerkt wordt wel dat, door gebrek aan standaardisatie, niet altijd dezelfde OBD-data beschikbaar is en dat de datakwaliteit meestal niet bekend is. Omdat deze berekeningen per machine(type) kunnen verschillen moet ook worden nagedacht over de vraag waar deze berekeningen in de software-keten van meetsysteem t/m EMPK website uitgevoerd en beheerd gaan worden.

Een meer eenvoudige aanpak voor EMPK-controle van de emissies bij machines met een SCR katalysator is, om op basis van het NO_x-signaal, alleen vast te stellen of de SCR-katalysator goed functioneert en niet defect of gemanipuleerd is. In dat geval wordt er dus afgezien van gedetailleerde emissieberekening waardoor geen nauwkeurige emissieniveaus kunnen worden bepaald.

Zonder de beschikbaarheid van een NO_x-sensor kan, met behulp van de registratie van de draaiuren, het brandstofverbruik en het AdBlue-verbruik de totale emissie per machine ingeschat worden.

Emissiedatabase en website

Het beheer van een emissiedatabase en website is technisch goed mogelijk. Vanwege het feit dat de data concurrentiegevoelig kunnen zijn, vragen databeveiliging (door de keten heen) en gebruik van een goed beveiligde website aandacht. Ook zal een autoriteit gekozen moeten worden voor het beheer hiervan.

Onafhankelijk van de hoeveelheid parameters die op een machine worden gemonitord, vragen het opzetten van een database, het onderhoud en de beveiliging ervan en de ontsluiting van data de nodige aandacht.

Praktische uitvoerbaarheid

Bepaling emissieklasse

Een uitdaging is om de fasenorm van een machine vast te stellen. Het vaststellen van de fasenorm vereist momenteel een uitgebreide inspectie van de machine. Een mogelijke manier is om de verantwoordelijkheid voor het aanleveren van de benodigde informatie bij de eigenaar en/of gebruiker van het mobiele werktuig te leggen. Onderdeel van de EMPK-aanpak kan zijn om deze gegevens door daarvoor erkende onderhoudsbedrijven (EMPK-bedrijven) te laten registreren in een centraal systeem.

Wisseling van machines op de bouwplaats en het werken met onderaannemers

Vaak werken bouwbedrijven met onderaannemers, het is daarom niet altijd bekend welke machines er wanneer op de bouwplaats zijn. Het werken met onderaannemers maakt het ook lastiger om de metingen te organiseren. Bij opschaling van EMPK zou dit opgelost kunnen worden door op een bouwlocatie één contactpersoon te hebben die ervoor verantwoordelijk is dat alle werktuigen die op een bouwlocatie worden ingezet zijn ingeboekt in de EMPK-registratie.

Periodieke controle

Beoogd wordt om als onderdeel van de EMPK-aanpak periodieke emissiecontroles op de bouwplaats uit te voeren. Dit onderzoek heeft laten zien dat door uitvoering van kortdurende emissiemetingen, schone, middelmatige en vervuilende machines van elkaar kunnen worden onderscheiden. Voor machines met een SCR-katalysator dient deze, echter, wel op bedrijfstemperatuur te zijn. Hierdoor is voor de controle extra tijd nodig, en dient er de mogelijkheid te zijn om de motor te belasten.

De meetresultaten kunnen beoordeeld worden op basis van de NO_x/CO_2 verhouding. De rekenmethodiek is zeer eenvoudig doordat alleen de NO_x concentraties gedeeld worden door de CO_2 concentraties en er geen OBD signalen nodig zijn. Vanwege de eenvoud, en de onafhankelijkheid van OBD-signalen is deze eenheid in potentie een interessante optie voor de toepassing bij de EMPK methodiek.

Om de aanwezigheid en werking van een roetfilter te beoordelen kan de deeltjesaantallentest toegepast worden bij stationair toerental. Deze test maakt vanaf 1 januari 2023 al verplicht onderdeel uit van de APK voor dieselauto's met roetfilter. De uitgevoerde metingen lieten duidelijk zien of er wel of geen werkend roetfilter aanwezig was. De extra meting met een deeltjesteller is alleen zinvol voor machines met een roetfilter, met hierbij speciale aandacht voor Stage IV en IIIB machines, die zowel met als zonder roetfilter voorkomen, en mogelijk in sommige gevallen met een half-open roetfilter.

Ook de resultaten van een periodieke controle zouden vastgelegd kunnen worden in een centraal EMPK registratiesysteem (database en website).

Verankering in wet- en regelgeving

Controle en handhaving vragen een juridisch raamwerk en autoriteiten. Het huidige raamwerk van vergunningen en MVI is een beoordeling vooraf, en daarom beperkt geschikt voor controle van de inzet en emissies van bouwmachines gedurende de uitvoeringsfase. Aanbevolen wordt om voor controle en handhaving van emissies van bouwmachines (juridisch) passende regelgeving op te zetten en een verantwoordelijke autoriteit/partijen aan te wijzen.

Inzichten in praktijkemissies

In totaal zijn tijdens het project aan 29 bouwmachines praktijkemissiemetingen verricht. Dit betroffen kortstondige metingen en langdurige NO_x-monitoring. Het project heeft hiermee inzicht opgeleverd in inzet- en praktijkemissieniveaus van uiteenlopende bouwmachines qua emissieklassen en typen (zoals graafmachines, trilplaten, wielladers, hei-installaties, pompen, walsen, generatoren) en (aanvullend) van meerdere motoren van twee waterbouwschepen.

De meeste machines hebben meer dan 150 uur aan emissiedata verzameld. Dit is weken tot maanden aan monitoring, wat een robuust beeld geeft van de emissies onder allerlei verschillende omstandigheden. Het verkregen inzicht en de ingewonnen data dragen bij aan de onderbouwing van de nationale emissiefactoren, relevant voor berekeningen aan de praktijkuitstoot van stikstof.

Opvallend in de meetresultaten was de relatief lage gemiddelde motorbelasting bij meerdere machinetypen, uiteenlopend van 9 tot 40%. De emissieprestaties bij lage motorbelasting zijn vaak minder goed dan bij hogere motorbelasting. Met name bij de machines met een SCR-katalysator ontstaan verschillen, tot wel meer dan een factor 2, al verschilde dit effect wel per machine. De emissieprestaties van de Stage V machines met SCR-katalysator waren in het algemeen vrij goed. De Stage V machines met een motorvermogen van boven de 56 kW, ingezet op een relatief hoge motorbelasting, hebben daarmee veruit de laagste NO_x emissies. Zowel in gram per kWh, per liter diesel, en zelfs in gram per uur. Wel deed een Stage V graafmachine op wielen het minder goed dan de graafmachine, met dezelfde motor, op rupsen, met een factor 3 tot 6 verschil.

Summary

Because of the current nitrogen deposition problem, but also because of climate (Klimaatakkoord: Climate Agreement) and health objectives (Schone Lucht Akkoord: Clean Air Agreement), a rapid reduction of emissions from mobile machinery is desirable. However, without control mechanisms and enforcement, there will be, or arise, a difference between pre-estimated and actual emissions. Higher emissions may occur, for instance, if the used mobile machinery deviates from the promised type of machinery, or if (for example) more running hours are performed than originally planned. Even when low polluting diesel machines are used, without monitoring of the operation of the emission reduction technology, there is a chance that this technology is malfunctioning, switched off or removed.

For monitoring of the deployment and emissions of mobile machinery equipment, an concept approach based on Emission Monitoring and Periodic Inspection (EMPK) has been developed by the Ministry of Infrastructure and Water Management. In this approach, the deployment of mobile machinery is checked by monitoring online the (GPS) position, running hours and where possible the engine load of mobile machinery. For diesel engines with advanced emission reduction technology, emissions are monitored and checked periodically. The deployment of electric machinery is monitored as well.

The Ministry asked TNO to conduct a pilot project Emission Monitoring and Periodic Inspection (EMPK), with the following objectives:

1. Gain experiences with the necessary conditions, practical complexities and viability with regard to Emission Monitoring and Periodic Inspection of mobile machinery via a pilot. Both short-term measurements and long-term monitoring were carried out on 29 different machines. These measurements were also used to meet objective 2.
2. To gain knowledge about the deployment (running hours and engine load) and associated emissions of mobile machinery, as a follow-up to the exploratory study on mobile machine emissions conducted earlier by TNO, with the aim of substantiating national emission totals and differences between machine types.

Conclusions EMPK approach for monitoring usage and emissions

The measurement data from this project shows that emission performance varies widely from machine to machine, and that real-life emissions often deviate from expected levels based on emission limits. Among others, this is due to different engine loads in real world circumstances. For example, in modern machines with SCR catalysts, higher NO_x emissions may occur due to prolonged idling. Because of idling, the temperature of the SCR catalyst drops, making it ineffective. With prolonged idling, a substantial proportion of total NO_x emissions can be formed under these conditions.

NO_x monitoring data provide an accurate estimate of NO_x emissions. For example, NO_x monitoring can provide insight into additional NO_x emissions during idling (or low engine load) and help prevent these operating conditions by shutting down the engine.

Registration as a first step

An important first step towards an EMPK methodology would be registration of all mobile machinery in the Netherlands. This would make it possible to make agreements (and to control) on machinery types to be deployed on a construction project and to carry out (emission) inspections in practice.

Technical feasibility of deployment monitoring

As described above, the intended deployment monitoring includes the following elements; location, running hours and (where possible) engine load. Monitoring location and running hours is possible by installing a data acquisition dongle that can be placed directly on the machine's power supply. An installation time of about 1 hour is needed. On several machines, such data is already monitored online through a telematics (ICT) system. To monitor engine load, a connection to the On-Board-Diagnostics (OBD) system of machine is required. In most modern machines, information with regard to engine load and/or fuel consumption (which can be used as a proxy for engine load) is available on the OBD. However, there is no standardisation of OBD signals. Therefore, the capabilities and installation time may differ from machine to machine if engine load is also included.

Technical feasibility continuous NO_x monitoring

Customisation is unavoidable when continuous NO_x monitoring uses OBD-data of the machine. This is partly due to the wide variety of machinery and partly due to the lack of standardisation of OBD-signals. As long as standardisation is lacking, a more robust approach is to install an external NO_x sensor in the exhaust and connect it to a data acquisition dongle that processes the sensor data and sends it to a database.

Regardless of whether or not an external NO_x sensor is used for data acquisition, post-processing of this data, management of an emissions database and disclosure of the data require a substantial investment in terms of knowledge, manpower and organisation. The most important elements - as experienced during the project at the monitored machines- are summarised below.

Acquisition of NO_x data:

- In most mobile machinery, an OBD NO_x signal is not available, this also applies to modern Stage V machines with an SCR catalyst, which thus do have their own NO_x sensor;
- For machines that do have a NO_x sensor, but no NO_x signal available on the OBD, this NO_x signal can often be read 'directly', i.e., outside the OBD (via CAN-bus), but this requires a lot of research and proper interpretation of this signal per machine;
- For mobile machinery that do have an OBD NO_x signal, this signal is not always usable. Moreover, it can take up to 25 minutes after starting the engine before the signal becomes available.

For machines fitted with an SCR catalyst at the factory (and thus equipped with an NO_x sensor), a more robust approach for continuous NO_x monitoring seems to be to install an additional NO_x sensor in the exhaust. Via a dongle, the data can then be sent to an emissions database, creating a machine-independent application where the NO_x signal does not need to be connected with the OBD. This can be used to check whether the SCR catalyst is functioning properly and - based on NO_x/CO₂ concentrations - give a rough indication of emission levels.

Signals on running hours, engine load and fuel consumption, which are useful for calculations on deployment and emissions, are usually available on the OBD of these modern machines, even if they are not standardised. Connecting to the OBD does allow emission levels to be determined more accurately, but it makes installation time a bit longer. Installing the dongle, the NO_x sensor, and exploring and connecting to the OBD, currently takes a total of about 1 working day of installation time.

For machines that are not fitted with SCR catalysts, continuous NO_x monitoring is not required in the envisaged EMPK approach. Such machines often have less or no data available on the OBD, which limits data acquisition options and/or further extends installation time.

Emission calculations

Besides the installation of equipment, post-processing of data, per machine type, is necessary if NO_x emissions are to be determined in grams per hour, per litre of fuel or per kWh of work delivered.

In most cases, however, it is possible - using OBD signals - to calculate emissions, especially for modern Stage IV and V machines. However, it should be noted that, due to a lack of standardisation, the same OBD data are not always available and the data quality is usually not known. Because these calculations may differ per machine (type), consideration should also be given to where in the software chain, from the measurement system to EMPK website, these calculations will be performed and managed.

A more straightforward approach for EMPK monitoring of emissions for machines with SCR catalysts is to determine, based on the NO_x signal alone, whether the SCR catalyst is functioning properly and is not faulty or manipulated. In that case, detailed emission calculation is thus waived, preventing the determination of accurate emission levels.

Without the availability of a NO_x sensor, records of running hours, fuel consumption and AdBlue consumption can be used to estimate total emissions per machine.

Emission database and website

Managing an emissions database and website is technically feasible. Due to the fact that the data can be competition-sensitive, data security (throughout the chain) and use of a well-secured website require attention. Moreover, an authority needs to be chosen to manage it.

Independent of the number of parameters monitored on a machine, setting up a database, maintaining it, securing it and unlocking data, requires attention.

Practical feasibility

Determining emission class

It is a challenge to determine the emission standard of a machine (i.e. Stage class). Determining the emission class currently requires an extensive inspection of the machine. One possible way is to place the responsibility for providing the necessary information on the machine owner and/or user. Part of the EMPK approach could be to have this data recorded in a central system by maintenance companies approved for this purpose.

Change of machinery on site and working with subcontractors

Construction companies often work with subcontractors, hence it is not always known which machines are on site and when. Working with subcontractors also makes it more difficult to organise measurements. When scaling up EMPK, this could be solved by having one contact person on a construction site who is responsible for ensuring that all machinery used on a construction site are registered in the EMPK records.

Periodic monitoring

As part of the EMPK approach, the aim is to carry out periodic emission checks on the construction site. This research has shown that by carrying out short emission measurements, low polluting, moderate polluting and heavy polluting machines can be distinguished. However, for machines with SCR catalysts, these need to be at operating temperature. This requires additional time for the check, and the possibility of to apply engine load.

The measurement results can be assessed based on NO_x/CO₂ concentrations. The calculation methodology is very simple, as only the NO_x concentrations are divided by the CO₂ concentrations, no OBD signals are needed. Because of its simplicity, and independence from OBD signals, this unit is potentially an interesting option for application with the EMPK methodology.

To assess the presence and functioning of a particulate filter, the particle number test can be applied at idling speed. This test is already a mandatory part of the 'Periodic Technical Inspection' (PTI) from 1 January 2023 for diesel cars with a particulate filter. The measurements carried out clearly showed whether a working particulate filter was present or not. The additional measurement with a particle counter only makes sense for machines with a particulate filter, with special attention to Stage IV and IIIB machines, which occur both with and without a particulate filter, and possibly in some cases with a half-open particulate filter. The results of a periodic inspection could also be recorded in a central EMPK registration system (database and website).

Anchoring in laws and regulations

Control and enforcement require a legal framework and authorities. The current framework of permits is an ex-ante assessment, and therefore of limited suitability for control of mobile machinery during the implementation phase. It is recommended that for control and enforcement of emissions from mobile machinery, appropriate (legal) regulations should be set up and a responsible authority/parties designated

Insights into practical emissions

A total of 29 construction machines were subjected to field emission measurements during the project. These included short-term measurements and long-term NO_x monitoring. The project provided insights into the use and emission levels in real-world circumstances of diverse mobile machinery (such as excavators, wheel loaders, pile-driving equipment, pumps, rollers, generators) and of several vessels.

Most of the machines collected more than 150 hours of emission data. This is weeks to months of monitoring, giving a robust picture of emissions across a wide range of different conditions.

The insight and data obtained contribute to underpinning national emission factors, relevant for calculations real-world NO_x emissions.

Remarkable in the measurement results was the relatively low engine load across several machine types, ranging from 9 to 40%. Emission performance at low engine loads tends to be worse than at higher engine loads. Especially for the machines with an SCR catalyst, differences arise, up to more than a factor of 2, although this effect varied from machine to machine. The emission performance of Stage V machines with SCR catalyst was generally quite good. The Stage V machines with engine power above 56 kW, operated at a relatively high engine load, thereby have by far the lowest NO_x emissions. However, a Stage V excavator on wheels did not perform as well as the excavator, with the same engine, on tracks, with a factor of 3 to 6 difference.

Inhoudsopgave

| | | |
|----------|--|-----------|
| | Samenvatting | 2 |
| | Summary | 7 |
| 1 | Inleiding | 14 |
| 1.1 | Huidige situatie | 14 |
| 1.2 | Belang van toezicht en handhaving..... | 16 |
| 1.3 | Emissie Monitoring en Periodieke Keuring (EMPK)..... | 16 |
| 1.4 | Doelstelling onderzoek | 16 |
| 1.5 | Definitie mobiele werktuigen..... | 17 |
| 1.6 | Leeswijzer..... | 18 |
| 2 | Achtergrond EMPK methodiek | 19 |
| 2.1 | Emissiewetgeving mobiele machines..... | 20 |
| 2.2 | Classificering mobiele machines volgens emissieprestaties in relatie tot de wijze van controle | 21 |
| 3 | Methodologie | 24 |
| 3.1 | Contact met bouwbedrijven en machineleveranciers..... | 24 |
| 3.2 | Meetmethodieken | 24 |
| 3.3 | Dataverwerking..... | 27 |
| 3.4 | Demo-website..... | 30 |
| 4 | EMPK resultaten mobiele werktuigen | 31 |
| 4.1 | Overzicht gemeten mobiele werktuigen | 31 |
| 4.2 | Praktijkervaringen organisatie metingen | 32 |
| 4.3 | Meet- en monitoringsresultaten | 35 |
| 4.4 | Omschrijving en illustratie website | 52 |
| 5 | EMPK resultaten werkschepen | 54 |
| 5.1 | Overzicht gemeten vaartuigen..... | 54 |
| 5.2 | Resultaten langdurige monitoring..... | 55 |
| 5.3 | Emissieresultaten van kortdurende metingen | 57 |
| 6 | Input voor Nederlandse emissiefactoren | 60 |
| 6.1 | Inzetprofielen | 60 |
| 6.2 | NO _x -emissies in gram per uur per motorbelasting | 61 |
| 7 | Discussie | 62 |
| 7.1 | Verankering in wet- en regelgeving | 62 |
| 7.2 | Governance | 62 |
| 7.3 | Meer eenvoudige opties kunnen overweging zijn voor de korte termijn | 62 |
| 8 | Conclusies en aanbevelingen | 64 |
| 8.1 | Conclusies EMPK-aanpak voor controle van de inzet en emissies | 64 |
| 8.2 | Inzichten in praktijkemissies | 67 |
| 9 | Verwijzingen | 68 |

| | | |
|-----------|----------------------------|-----------|
| 10 | Ondertekening | 70 |
|-----------|----------------------------|-----------|

Bijlage(n)

A Gemeten machines

B Rekenmethodieken

C Overzicht monitoringsresultaten per machine

D Overzicht per machine kortstondige metingen

1 Inleiding

1.1 Huidige situatie

Bouwprojecten zijn activiteiten waarbij o.a. stikstofemissies kunnen ontstaan. Stikstofemissies ontstaan door mobiele werktuigen (zoals graafmachines) en andere voertuigen met een verbrandingsmotor (zoals vrachtwagens en bestelwagens), met name in vorm van stikstofoxiden (NO_x). In dit rapport ligt de focus op de mobiele werktuigen.

De bron 'mobiele werktuigen' omvat een breed scala aan typen machines en inzet. Deze categorie beslaat bijvoorbeeld grote graafmachines, walsen, laadschoppen en stroomaggregaten, maar bijvoorbeeld ook klein materieel zoals trilplaten. De inzetprofielen van dergelijke machines kunnen divers zijn, ook de levensduur kan erg verschillen. De emissiewetgeving voor mobiele werktuigen is gebaseerd op verschillende motorcategorieën (op basis van motorvermogen). Hierdoor is er per emissieklasse (fasenormen) een grote range in emissieprestaties, dit geldt ook voor de meest recente emissieklasse (Stage V). Bovendien kunnen praktijkemissies sterk afwijken van emissies volgens de wettelijke norm. Dit is met name het geval wanneer in de praktijk de inzetprofielen sterk afwijken van de testcyclus uit de emissiewetgeving (bijvoorbeeld veel stationair draaien).

Voor mobiele werktuigen is er op dit moment geen periodieke milieucontrole. Eventuele defecten of manipulatie van emissiecontrolesystemen worden hierdoor niet gedetecteerd. Ook worden eisen aan de emissies, in verband met vergunningen, op bouwplaatsen nauwelijks gecontroleerd.

De kennis van de samenstelling en de omvang van het machinepark, de daadwerkelijke emissies van de machines, en de haalbare verbeteringen zijn beperkt. Verbetering in de inzichten van inzet en bijbehorende emissies van mobiele werktuigen geeft ruimte voor effectiever beleid en is daarom van essentieel belang voor stikstofreductie in de bouwsector.²

De huidige beperkte inzichten komen o.a. door de onderstaande aspecten:

- Er is geen publiek beschikbare registratie van het beschikbare materieel in het park (vanaf 2021 is er wel een registratieplicht voor (land)bouwvoertuigen die met beperkte snelheid op de openbare weg rijden);
- Er is slechts beperkte informatie over de praktijkinzet van de verschillende machines;
- Praktijk-emissies worden nauwelijks tot niet gecontroleerd;
- Er is geen periodieke keuring waarbij emissies en/of de aanwezigheid van emissiecontrolesystemen gecontroleerd worden, noch zijn er eisen dat deze systemen in normaal gebruik blijven functioneren.

Voor 2020 heeft Nederland 9,9 kton NO_x emissies van mobiele werktuigen in de bouwsector gerapporteerd.³

² Eindrapport data onderzoek mobiele machines in Nederland, TNO rapport 2021 R11086.

³ www.emissieregistratie.nl

Er is mogelijk een onderschatting van de emissies van bouwmachines.⁴

De verwachte NO_x emissies van mobiele machines in de bouw ligt waarschijnlijk in de orde van 12 kton. Door de relatief snelle verschoning van het wegverkeer, neemt het aandeel van de mobiele werktuigen in de emissies toe (al blijft het wegverkeer dominant).

Onderzoek naar de vlootsamenstelling en praktijkemissies van mobiele werktuigen is belangrijk om de uitstoot van mobiele werktuigen goed in kaart te krijgen. Dit is relevant voor de landelijke emissietotalen, maar ook als basis voor de berekeningen rondom stikstofdepositie en luchtkwaliteit.

Vervallen bouwvrijstelling

Vanwege de uitstoot van stikstof is de bouw een sector die veel te maken heeft met het verkrijgen van vergunningen. Activiteiten die leiden tot stikstofdepositie in een Europees beschermd natuurgebied (Natura 2000-gebied) hebben volgens de Wet natuurbescherming (artikel 2.7) een vergunning nodig (Wnb, 2015).

Voor elk bouwproject is een toets nodig of de activiteit vergunningsplichtig is volgens de Wet natuurbescherming. Per juli 2021 was de wijzigingswet 'Wet natuurbescherming en Omgevingswet (stikstofreductie en natuurverbetering)' in werking getreden (Wsn, 2021). De Wsn bevat o.a. een gedeeltelijke vrijstelling voor de natuurvergunningsplicht (voor wat betreft stikstof) voor activiteiten in de bouwsector (Ministerie van LNV, 2021). Deze vrijstelling werd ook wel 'de bouwvrijstelling' genoemd. De Raad van State heeft echter recentelijk beoordeeld dat de bouwvrijstelling niet toegepast mag worden⁵. Dat betekent dat er voor de bouwfase van bouwprojecten (en ook voor de gebruiksfase) wederom stikstofberekeningen gemaakt moeten worden.

Nationale doelstellingen

Vanwege de huidige stikstofproblematiek, maar ook vanwege de klimaat- (Klimaatakkoord) en gezondheidsdoelstellingen (Schone Lucht Akkoord) is een snelle reductie van emissies door bouwmachines gewenst. In de Routekaart SEB wordt, door de rijksoverheid in een samenwerking van overheden, bedrijven en kennisinstellingen, vastgelegd hoe de transitie naar schoon en emissieloos bouwen tot 2030 vorm krijgt. Daartoe wordt een tijdspad opgesteld voor het reduceren van emissies inclusief maatregelen en acties om de reductie te realiseren. Daaraan zijn doelstellingen op het gebied van CO₂ en luchtverontreinigende stoffen (stikstof en fijnstof) gekoppeld. De Routekaart SEB is op het moment van schrijven echter nog niet definitief vastgesteld. Afspraken over de uitvoering van deze routekaart, zoals het toepassen van striktere emissie-eisen bij aanbestedingen, worden vastgelegd in het Convenant Schoon en Emissieloos Bouwen. Om te beoordelen of maatregelen het effect hebben zoals verwacht, is inspectie, toezicht, controle en handhaving benodigd. In de concept Routekaart SEB is het onderwerp toezicht en handhaving geadresseerd.

Ook in het 'Schone Lucht Akkoord' (SLA) heeft handhaving van emissies door mobiele werktuigen een plek gekregen.

⁴ Eindrapport data onderzoek mobiele machines in Nederland, TNO rapport 2021 R11086.

⁵ <https://www.rijksoverheid.nl/actueel/nieuws/2022/11/02/raad-van-state-bouwvrijstelling-mag-niet-gebruikt-worden>

Één van de acties uit het SLA is dat mogelijkheden worden verkend om de emissie-eisen aan mobiele machines in de praktijk te handhaven en dat, indien nodig, een keuringsystematiek wordt ontwikkeld voor toezicht en controle op de naleving van aanbestedingseisen voor schonere mobiele werktuigen. De controle van praktijkemissies is een belangrijk onderdeel van de aanpak om de uitstoot van huidige mobiele machines te verminderen.

1.2 Belang van toezicht en handhaving

Zonder controle en handhaving zal er een verschil zijn, of ontstaan, tussen de geplande en de daadwerkelijke emissiereducties. Als er bijvoorbeeld geen controle is op de inzet van machines, dan wordt er mogelijk een oudere, viezere machine ingezet dan afgesproken. En als er geen controle is op de werking van de emissiereductie-technologie (die bij moderne machines steeds complexer en belangrijker wordt) van de machine, is er een kans dat deze technologie wordt uitgeschakeld of verwijderd. Hiermee ontstaat ook concurrentievervalsing, omdat schonere machines en voertuigen, en goed onderhoud van emissiecontrole-technologie, nu eenmaal duurder zijn. Voor een gelijk speelveld, en het waarborgen van de geplande emissiereducties is toezicht en handhaving noodzakelijk. In een eerder TNO onderzoek (Ligterink et al., 2021) wordt ook geconcludeerd dat het stellen van emissie-eisen aan mobiele machines naar verwachting pas echt effect heeft als ook wordt gecontroleerd of aan de eisen wordt voldaan. Controle en handhaving kan echter niet zonder registratie en boekhouding van de inzet.

1.3 Emissie Monitoring en Periodieke Keuring (EMPK)

Het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) heeft in januari 2021 in de notitie 'Emissie Monitoring en Periodieke Keuring' (EMPK) een mogelijk aanpak voor controle en handhaving van de emissies van mobiele werktuigen geschetst. De bedoeling is dat met deze controle kan worden getoetst of aan de eisen wordt voldaan die gesteld zijn vanuit opdrachtgevers en/of milieuvergunningen. De voorziene controle bestaat uit continue monitoring van de NO_x-emissies en een periodieke controle waarbij fijnstof (deeltjesaantallen) en de NO_x-uitstoot worden gemeten.

1.4 Doelstelling onderzoek

Het Ministerie heeft TNO gevraagd een pilot project Emissie Monitoring en Periodieke Keuring (EMPK) uit te voeren. In het pilot project worden bij machines op bouwplaatsen de inzet en (bij op diesel werkende machines) de emissies bepaald om het concept te demonstreren. Ingewonnen gegevens komen voor deelnemende partijen beschikbaar via een beveiligde website.

De doelstelling van dit project is tweeledig:

1. Het via een pilot ervaringen opdoen rondom de noodzakelijke voorwaarden en praktische complexiteiten rondom Emissie Monitoring en Periodieke Keuring van mobiele machines. Hierbij zijn de eerste ervaringen met het EMPK concept opgedaan om de levensvatbaarheid van deze aanpak, of eventuele aanpassingen daarop, in kaart te brengen.

Het gaat hierbij om:

- Registratie van machines op de bouwplaats.
- Monitoring van inzet en emissies.
- Demonstratie online NO_x-monitoring.
- Beschikbaar stellen van de data door uitvoerders aan toezichthouders via een beveiligde database.
- Kortdurende emissiemetingen als mogelijke invulling van een keuring.

Niet alleen de praktische technische mogelijkheden en eventuele aandachtspunten zijn belangrijk, maar ook het met partijen gezamenlijk verder verkennen en demonsteren van deze techniek zodat er zicht komt op de technische randvoorwaarden, acceptatie en verdere aanpak voor eventuele invoering. Ten behoeve van de pilot zijn zowel kortdurende metingen als langdurige monitoring uitgevoerd aan een groot aantal machines van verschillende categorieën. Deze metingen zijn ook gebruikt om aan doelstelling 2 te voldoen.

2. Het verder bepalen van de inzet (draaiuren en motorbelasting) en bijbehorende emissies van mobiele machines, als vervolg op het eerder door TNO uitgevoerde verkennend onderzoek naar emissies van mobiele machines, met als doel de nationale emissiegetallen⁶ en verschillen tussen groepen machines te onderbouwen. Dit is gedaan middels praktijkmetingen (zoals ook nodig zijn voor doelstelling 1), zodat breder inzicht in de daadwerkelijke emissies ontstaat (inclusief de kleinere en oudere machines). Emissiegetallen worden in Nederland gebruikt bij berekeningen aan luchtkwaliteit en stikstofdepositie.

De focus in dit onderzoek zijn stikstofoxiden (NO_x), daarnaast zijn CO₂ en fijnstof gemeten.

1.5 Definitie mobiele werktuigen

In eerder onderzoek naar mobiele werktuigen⁷ is een definitie voor mobiele werktuigen opgesteld die ook in dit rapport wordt aangehouden:

- Gemotoriseerde machines met eigen aandrijving door middel van een:
 - Verbrandingsmotor
 - CI-motor: compressieontstekingsmotoren (diesel)
 - SI-motor: vonkontstekingsmotoren (benzine, LPG, aardgas)
 - Elektrische motor in combinatie met waterstof en brandstofcel.
 - Elektrische motor in combinatie met accu of voedingskabel, maar alleen wanneer vergelijkbare machinetypes ook regelmatig met een verbrandingsmotor zijn uitgerust (bijv. geen elektrische boormachines, maar wel elektrische graafmachines).
- Machines te gebruiken op het land.
- Machines die mobiel inzetbaar zijn, dat wil zeggen: draagbaar, verrijdbaar of anderzijds regelmatig op verschillende plaatsen ingezet.

⁶ <https://www.emissieregistratie.nl/over-emissieregistratie/rapportages-en-publicaties>

⁷ Eindrapport data onderzoek mobiele machines in Nederland, S.N.C. Dellaert et. al., TNO, 2021

- Machines die niet (hoofdzakelijk) bedoeld zijn voor transport van mensen of goederen over de openbare weg.
- Machines zonder kenteken óf machines/voertuigen op kenteken die het grootste deel van hun werk uitvoeren buiten de openbare weg of bij lage snelheid.

Drijvend materieel (bijv. maaiboten en baggerschepen) is niet meegenomen in deze definitie. Deze vaartuigen vallen onder de binnenvaartwetgeving. In dit project zijn echter ook de emissies bepaald van twee werkschepen, deze zijn gerapporteerd in Hoofdstuk 5.

1.6 Leeswijzer

Na de samenvatting en de inleiding, volgt in Hoofdstuk 2 een uitleg over de EMPK-methodiek. In hoofdstuk 3 wordt vervolgens de van het uitgevoerde onderzoek beschreven. Daarna volgen in hoofdstuk 4 en 5 de onderzoeksresultaten voor respectievelijk de mobiele werktuigen en de werkschepen. De onderzoeksresultaten dienen ook als input voor de Nederlandse emissiefactoren, dit wordt beschreven in hoofdstuk 6. Tot slot volgen in resp. hoofdstuk 7 en 8 de discussie en de conclusies en aanbevelingen.

2 Achtergrond EMPK methodiek

Emissie Monitoring en Periodieke Keuring (EMPK) is bedoeld als mogelijke aanpak voor controle van de emissies van mobiele machines. De bedoeling is dat met deze controle kan worden getoetst of aan de eisen wordt voldaan die gesteld zijn vanuit opdrachtgevers en/of milieuvergunningen. EMPK kan bovendien NO_x- (en fijnstof)-reductie bewerkstelligen door het signaleren van foutief werkende nabehandelingssystemen. De voorziene controle bestaat uit continue monitoring van de NO_x-emissies en een periodieke controle waarbij fijnstof (deeltjesaantallen) en de NO_x-uitstoot worden gemeten.

Onder NO_x-monitoring wordt verstaan het continu meten van de NO_x-concentratie in de uitlaatgassen van een dieselmotor, via een NO_x-sensor. De NO_x-sensor kan reeds aanwezig zijn in het bestaande uitlaatsysteem (wanneer er een SCR-katalysator⁸ aanwezig is, is er ook een NO_x-sensor aanwezig), maar kan ook geplaatst worden. In de meeste gevallen is een data-acquisitiesysteem nodig die de NO_x-data verzameld. Ook ontsluiting van de data vormt een onderdeel van monitoring.

Het idee is verder om bij periodieke controle van machines met een SCR-katalysator ook een NO_x-validatiemeting te doen om de werking van het NO_x-monitoring systeem te controleren. Deze meting moet snel uitgevoerd kunnen worden en geen dure apparatuur vereisen.

Anders dan bij de APK (Algemene Periodieke Keuring) voor wegverkeer wordt er niet aan gedacht om de EMPK wettelijk te verplichten, gezien het gebrek aan registratie en het ontbreken van een wettelijke basis in de Europese APK-richtlijn. Bovendien zijn er geen wettelijke permanente eisen voor de emissies tijdens gebruik van mobiele machines. Via de inkoop, opdrachtverlening, of de vergunning wordt de inzet van schone machines afgedwongen en vanuit die basis gecontroleerd.

Gedacht wordt aan twee niveaus van controles:

- Niveau 1: Controle van welke machines (aantal en emissieklasse) worden ingezet, inclusief de draaiuren en mogelijk het brandstofverbruik), met als doel:
 - Controle of de machines worden ingezet die afgesproken zijn, inclusief het aantal draaiuren dat afgesproken is. Met behulp van het brandstofverbruik kunnen de emissieniveaus nauwkeuriger berekend worden. Idealiter zou ook het AdBlue verbruik meegenomen moeten worden, net als bij de AERIUS berekening.⁹
 - Hiermee bepalen of de meest vervuilende machines niet onevenredig veel worden ingezet en voorkomen dat 'viezere' of meer machines worden ingezet dan afgesproken.
- Niveau 2: Controle van welke machines worden ingezet (draaiuren en mogelijk motorbelasting) en het meten van de emissieniveaus (online monitoring en periodieke keuring), met als doel:

⁸ Selective catalytic reduction, nabehandelingssysteem voor stikstofreductie

⁹ TNO 2021 R12305 AUB (AdBlue verbruik, Uren, en Brandstofverbruik): een robuuste schatting van NO_x en NH₃ uitstoot van mobiele werktuigen

- Zelfde als niveau 1, maar inclusief controle op NO_x emissies (en werking van de SCR-katalysator) en controle of het roetfilter effectief werkt, en niet defect is of gemanipuleerd.

Het controleniveau is afhankelijk van de emissie-eisen die gemeenten en provincies gaan stellen bij openbare aanbestedingen en vergunningverlening. Bij minder strenge emissie-eisen is ook een minder strenge controle nodig.

Toezicht op emissies van mobiele machines zou als onderdeel van EMPK georganiseerd kunnen worden via een centrale database. Door gemeenten, provincies, machine-eigenaren en -gebruikers etc. toegang te geven kunnen zij ingewonnen informatie van de machines, draaiuren, locaties en projecten waaraan emissie-eisen zijn gesteld, inzien.

2.1 Emissiewetgeving mobiele machines

De emissienormen voor niet voor de weg bestemde mobiele machines (Non-Road Mobile Machinery) zijn volgens Europese wetgeving opgedeeld in 6 fasenormen of 'Stages': Stage I, II, III A, III B, IV and V. Globaal valt de wetgeving voor Stage I t/m Stage IV onder de Richtlijn 97/68/EG (en alle opvolgende aanvullende documenten) die op 16 december 1997 is geïntroduceerd en van kracht was tot 31 december 2016. Stage V-wetgeving is beschreven in Verordening (EU) 2016/1628 (en alle opvolgende aanvullende documenten) en is momenteel van kracht.

Elke fasenorm is opgedeeld in verschillende subcategorieën of vermogensklassen. In de onderstaande Tabel 1 staan de emissielimieten voor NO_x en fijnstof van de verschillende fasenormen en vermogensklassen samengevat. De doorgetrokken lijnen geven de grote stappen in de eisen voor NO_x en fijnstof aan. Een SCR katalysator is nodig bij 0.4 g/kWh NO_x-uitstoot en een roetfilter is noodzakelijk als er 0.015/PN (eis voor fijnstof in emissiewetgeving) staat.

Voor machines met een motorvermogen onder de 56 kW en boven de 560 kW zijn er geen dieselmotoren beschikbaar met een lage NO_x-uitstoot (omdat de emissielimiet niet streng is en er daardoor geen SCR-katalysator wordt toegepast), tenzij er een retrofit-SCR-katalysator wordt gemonteerd. Bij moderne motoren met een SCR-katalysator is er een risico op verhoogde NO_x-emissies bij een lage motorbelasting.

De Stage IV en Stage V eisen voor NO_x (limiet 0,4 g/kWh) voor machines met vermogens tussen de 56 en 560 kW zijn een factor tien tot twintig lager dan eerdere eisen en eisen aan andere machinecategorieën. Dat betekent dat een moderne graafmachine vanaf bouwjaar 2014 veelal een lagere NO_x emissie heeft dan een pomp van 15 kW op hetzelfde bouwterrein. Het is daarom belangrijk de aandacht te richten op de grote emissiebronnen in plaats van op de grote machines, die wellicht wel meer in het oog springen. Een kleine Stage-V minigraver stoot door de minder strenge emissie-eisen voor deze categorie ongeveer net zoveel NO_x uit als een zware Stage IV of Stage V bouwmaschine (TNO R10221, 2021). Daarbij is het wel belangrijk dat Stage IV en V machines goed worden ingezet, bijvoorbeeld door het reduceren van onnodig stationair draaien (lage motorbelasting betekent: risico op verhoogde NO_x-emissies).

Tabel 1: Wettelijke limieten voor de verschillende Stages en vermogensklassen.

| Vermogen [kW] | <19 | 19-37 | 37-56 | 56-75 | 75-130 | 130-560 | >560 |
|--------------------|-----|----------|----------|----------|----------|----------|-------|
| PM [g/kWh] | | | | | | | |
| V (2019) | 0.4 | 0.015/PN | 0.015/PN | 0.015/PN | 0.015/PN | 0.015/PN | 0.045 |
| IV (2014) | - | - | - | 0.025 | 0.025 | 0.025 | - |
| IIIB (2011) | - | - | 0.025 | 0.025 | 0.025 | 0.025 | - |
| IIIA (2006) | - | 0.6 | 0.4 | 0.4 | 0.3 | 0.2 | - |
| II (2002) | - | 0.8 | 0.4 | 0.4 | 0.3 | 0.2 | - |
| I (1999) | - | - | 0.85 | 0.85 | 0.7 | 0.54 | - |
| NOx [g/kWh] | | | | | | | |
| V (2019) | 7.5 | 4.7 | 4.7 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 3.5 |
| IV (2014) | - | - | - | 0.4 | 0.4 | 0.4 | - |
| IIIB (2011) | - | - | 4.7 | 3.3 | 3.3 | 2.0 | - |
| IIIA (2006) | - | 7.5 | 4.7 | 4.7 | 4.0 | 4.0 | - |
| II (2002) | - | 8.0 | 7.0 | 7.0 | 6.0 | 6.0 | - |
| I (1999) | - | - | 9.2 | 9.2 | 9.2 | 9.2 | - |

Het komt soms voor dat een machine in Nederland een typeplaatje heeft waarop een zogenaamde 'Tier' emissieklasse staat vermeld. Dat zijn de emissieklassen voor mobiele werktuigen volgens Amerikaanse wetgeving, Tier 1 tot en met Tier 4. Meestal staat naast de Amerikaanse fasenorm in veel gevallen ook het Europese typegoedkeuringsnummer op het typeplaatje van de motor. Daarnaast brengen de grotere Amerikaanse fabrikanten, zoals Cummins en Caterpillar hun motoren ook direct in Europa in de markt, waardoor een Europees typegoedkeuringsnummer evenwel verplicht is.

De Amerikaanse Tier normen kunnen globaal op de volgende manier vertaald worden naar de Europese fasenormen:

- Tier 1 staat gelijk aan Stage I;
- Tier 2 staat gelijk aan Stage II;
- Tier 3 staat gelijk aan Stage III A;
- Tier 4 Interim staat gelijk aan Stage III B;
- Tier 4 Final staat gelijk aan Stage IV.

Een Amerikaanse tegenhanger voor de Europese Stage V en de veel strengere eis op deeltjesuitstoot is er op dit moment nog niet.








2.2 Classificering mobiele machines volgens emissieprestaties in relatie tot de wijze van controle

Op basis van Tabel 1 zijn er voor de aanbestedingseisen verschillende klassen gemaakt. Hiermee kan 'vies', van 'gematigd', van 'schoon', en van uitstootvrij worden onderscheiden. Daarin wordt naast de NO_x uitstoot ook rekening gehouden met de fijnstofuitstoot. Afhankelijk van de classificatie is een andere manier van emissiecontrole benodigd. Deze worden in de volgende paragraaf toegelicht.

Tabel 2: Verschillende emissieniveaus, op basis emissieclassen en vermogen.

| | | | | | |
|------------|--------------|----------|----------|-----------|----------|
| Elektrisch | uitstootvrij | | | | |
| Stage V | gematigd | | | schoon | gematigd |
| Stage IV | gematigd | | | | |
| Stage IIIB | gematigd | | | | |
| Stage IIIA | gematigd | | | | |
| Stage II | vies | | | | |
| Stage I | vies | | | | |
| Vermogen | <19 kW | 19-37 kW | 37-56 kW | 56-560 kW | >560 kW |

Het Ministerie van IenW heeft vanuit deze indeling de categorisering voorgesteld zoals te zien in de onderstaande figuren.

|  | Emissieklasse: | Technologie: |
|---|--------------------------|---|
|  | Zero emissie | Batterij elektrisch + H2 brandstofcel |
|  | Diesel lage emissies | Diesel met roetfilter en effectieve SCR-katalysator |
|  | Diesel met roetfilter | Diesel met NOx-reductie en roetfilter |
|  | Diesel zonder roetfilter | Diesel > 37 kW: gematigde fijnstof uitstoot Diesel 19-37 kW: uitgezonderd meest vuile Diesel < 19 kW: geen eis (dus allemaal) |
|  | Vuile diesel | Diesel > 37 kW zonder roetfilter met hoge fijnstof uitstoot |
|  | Meest vuile diesel | Diesel > 19 kW: meest vuile |

Figuur 1: Mogelijk emissieniveau indeling van mobiele werktuigen met kleuraanduiding zoals voorgesteld vanuit het Ministerie.

Deze niveaus zijn vertaald naar emissienormen (Stage-klasse) afhankelijk van het motorvermogen, dat overzicht is weergegeven in de volgende Figuur 2:

| Vermogen | < 19 kW | 19-37 kW | 37-56 kW | 56-75 kW | 75-130 kW | 130-560 kW | >560 kW |
|-----------------------|---------|----------|----------|----------|-----------|------------|---------|
| BE + FC H2 | | | | | | | |
| Stage V | V | V | V | V | V | V | V |
| Stage IV met DPF | - | IIIA | IIIB | IV | IV | IV | - |
| Stage IV zonder DPF | - | IIIA | IIIB | IV | IV | IV | - |
| Stage IIIB met DPF | - | IIIA | IIIB | IIIB | IIIB | IIIB | - |
| Stage IIIB zonder DPF | - | IIIA | IIIB | IIIB | IIIB | IIIB | - |
| Stage IIIA | - | IIIA | IIIA | IIIA | IIIA | IIIA | - |
| Stage II | - | II | II | II | II | II | - |
| Stage I | - | - | I | I | I | I | - |
| - | - | - | - | - | - | - | - |

Figuur 2: Mogelijke indeling emissieclassen op motorvermogen.

2.2.1 MVI-niveaus en wijze van emissiecontrole

In een eerder memorandum van TNO (TNO STL-MEM-100341925, 2021) worden drie verschillende emissieniveaus voorgesteld om als milieueisen op te nemen in publieke tenders,

- Level 1 (vanaf groen): uitsluiting van verouderde en vervuillende machines.
- Level 2 (vanaf blauw): uitsluiting van machines zonder roetfilter (maximaal 10^6 \#/cm^3).
- Level 3 (vanaf paars): uitsluiting van machines zonder roetfilter en zonder SCR.

Vanuit het Ministerie van IenW zijn mede op basis van de hierboven beschreven emissieniveaus, drie MVI-niveaus voorgesteld (basis, significant en ambitieus), zie Tabel 3. Hierbij is ook de mogelijke wijze van de EMPK-controle opgenomen, zoals aan het begin van dit hoofdstuk kort genoemd als controleniveau 1 en 2. Bij minder strenge emissie-eisen is ook een minder strenge controle nodig. Bij het basisniveau, de machines met gematigde fijnstof en NO_x-uitstoot (groen), is registratie van de draaiuren en het brandstofverbruik voldoende. Bij het significante niveau (vanaf blauw) kunnen de emissies buitenproportioneel toenemen bij een defect of manipulatie van het emissiecontrole systeem. Daarom is door het Ministerie van IenW voorgesteld om bij het significante niveau online monitoring en een periodieke keuring toe te passen. Voor het ambitieuze niveau is voor de schone diesels (paars) hetzelfde voorzien als bij het significante niveau. Voor uitstootvrije machines (wit) is de controle van draaiuren en energiegebruik voldoende.

In dit onderzoek is niet volledig vastgehouden aan het schema van Tabel 3. Om de mogelijkheden te verkennen wat het monitoren van emissies behelst voor uiteenlopende machinetypen, en om de emissieprestaties van deze machines beter in kaart te brengen, zijn ook meerdere machines van het MVI 'basisniveau' continu gemonitord.

Tabel 3: Verschillende controleniveaus, afhankelijk van het emissieniveau.

| MVI-niveau: | Toegelaten werktuigen: | EMPK-controleniveau: |
|-----------------------|---|--|
| 1. Basis | Gematigde fijnstof en NO _x uitstoot | Tracker met registratie draaiuren en verbruik |
| 2. Significant | Diesel met roetfilter en/of diesel met SCR katalysator | Niveau 1 + online monitoring bij SCR katalysator + periodieke emissiekeuring |
| 3. Ambitieuus | Nul-emissie en lage emissie (met roetfilter en SCR katalysator) | Niveau 1: Nulemissie Niveau 2: Lage emissie diesel |

3 Methodologie

In het pilot-programma was het doel om voor een groot aantal mobiele werktuigen de EMPK-methodiek te toetsen, en NO_x-emissies te meten als input voor praktijkemissiefactoren van mobiele werktuigen. Om metingen mogelijk te maken is contact gezocht met verschillende bouwbedrijven en machineleveranciers. Metingen zijn vervolgens ingepland en uitgevoerd. Ingewonnen data is verwerkt en een deel van de verkregen meetresultaten is opgenomen in de daarvoor ontwikkelde EMPK-demo website. Dit hoofdstuk beschrijft de doorlopen stappen.

3.1 Contact met bouwbedrijven en machineleveranciers

Gedurende het project zijn contacten gelegd met meerdere bouwbedrijven en machineleveranciers met de vraag of zij wilden meewerken aan het pilot project. Vervolgens zijn afspraken gemaakt voor bezoeken aan bouwplaatsen of locaties waar machines beschikbaar waren voor een kortdurende emissiemeting en/of voor het inbouwen van een NO_x-sensor met datalogger voor langdurige emissie-monitoring. Ten behoeve van de metingen is de beschikbare detailinformatie van de machines opgevraagd (zoals motorvermogen, bouwjaar, diagnose-aansluiting). Een groot deel van de metingen is op bouwplaatsen uitgevoerd, daarnaast zijn ook enkele machines door TNO gehuurd omdat hieraan anders geen emissiemetingen konden worden gedaan binnen de duur van het project.

Voor de metingen kwamen allerlei soorten machinetypen met een verbrandingsmotor, die aanwezig zijn in de markt, voor het project in aanmerking. Niet alleen mobiele werktuigen zoals graafmachines en laadschoppen, maar ook stationaire machines zoals generatorsets, pompen, kranen en andere machines (drilling rigs, asfalteermachines, etc.), met uiteenlopende emissie- en vermogensklassen. Hoofdstuk 4.1 geeft een overzicht van de machines die onderdeel waren van het pilot project.

3.2 Meetmethodieken

Bij de praktijkemissiemetingen is gebruik gemaakt van langdurige monitoring en kortstondige metingen. Bij machines waarbij langdurige monitoring is ingezet zijn (minimaal) de inzet, en vaak ook de emissies en het brandstofverbruik 'online' gemonitord. Bij machines waarvan langdurige monitoring niet mogelijk of noodzakelijk was (binnen de kaders van dit project) zijn kortdurende fijnstof- en NO_x-metingen gedaan om data te verzamelen over de optredende emissies. De gebruikte techniek voor langdurige monitoring en kortstondige metingen worden in deze paragraaf verder toegelicht.

3.2.1 *Langdurige monitoring*

TNO past al geruime tijd monitoring toe van NO_x-emissies, met name bij personenauto's en vrachtwagens, maar ook voor andere emissiebronnen zoals mobiele werktuigen, schepen en spoomaterieel. Bij mobiele werktuigen zijn er echter diverse aspecten die langdurige monitoring complexer maken dan bij het wegverkeer. Voor monitoring moet een set parameters van de machines continu uitgelezen worden.

Het gaat daarbij om parameters zoals toerental, motorlast, brandstofverbruik, (inlaat) luchtmassa, GPS-positie en uitlaatparameters (NO_x-sensorsignaal, uitlaattemperatuur, etc.). Bij mobiele machines is echter veel minder sprake van standaardisatie van real-time machinedata op een digitale databus van de machine dan bij het wegverkeer. Hierdoor zijn niet altijd dezelfde signalen aanwezig, kunnen de eenheden per machinetype afwijken en is de kwaliteit van signalen niet altijd bekend. Bij oudere of kleinere machines is zelfs vaak geen data beschikbaar.

Sommige machines hebben zelf al een vorm van monitoring. Voor die machines is onderzocht of van deze gegevens gebruik kan worden gemaakt voor de EMPK methodiek. Verder beschikken sommige machines (met een retrofit uitlaatgasnabehandelingsinstallatie) al over een eigen online NO_x-monitoring systeem waarbij NO_x-data en andere gegevens, mogelijk via een fabrikant/importeur, beschikbaar kunnen komen.

Bij langdurige monitoring zijn in dit project twee verschillende typen meetsystemen van TNO toegepast:

1. Het Smart Emissions Measurement System (SEMS).
2. Een geavanceerde tracker: 'Living Car ILab dongle' (LCL).

3.2.1.1 *Smart emissions measurement system (SEMS)*

Om het emissiegedrag en brandstofverbruik van voertuigen, machines en vaartuigen in de praktijk goed in beeld te brengen moet onder een groot aantal in de praktijk voorkomende situaties worden getest. TNO ontwikkelde daarvoor het Smart Emissions Measurement System (SEMS). SEMS is een relatief eenvoudig in te bouwen en zeer compact sensor-based systeem dat uitlaatemissies meet en gedetailleerd opslaat. Omdat SEMS compact is en geen interactie vereist met de gebruiker van de machine, kan de machine tijdens monitoring normaal worden gebruikt. Dit maakt meten gedurende langere tijd mogelijk; zo kunnen grote hoeveelheden praktijkdata worden verzameld.

NO_x/O₂- en NH₃ sensoren worden bij gebruik van SEMS in de uitlaat gemonteerd om de concentratieniveaus te meten. Daarnaast wordt het systeem verbonden met de 'CANbus' om machinedata te verkrijgen, o.a. om de gemeten concentraties (ppm) te vertalen naar massa (grammen), zie paragraaf 3.3. Indien al een NO_x sensor in de machine zelf aanwezig is, bestaat de mogelijkheid om deze te gebruiken voor de meting. Het nadeel hiervan is dat deze sensor niet door TNO zelf gekalibreerd is, waardoor onzekerheid bestaat over de nauwkeurigheid van de meetresultaten. SEMS is verder voorzien van een geïntegreerde GPS sensor, en GSM 4G connectiviteit. Ten behoeve van de installatie is vooraf bezichtiging van de machine benodigd, evenals een kleine aanpassing van de uitlaat. De installatietijd is ca. vier tot acht uur.

Het meten gaat vervolgens geheel autonoom zonder dat het voor de machinist merkbaar is. Het systeem stuurt de ingewonnen gegevens meerdere keren per dag naar een database van TNO. Het instrument blijft één tot enkele maanden in de machine zitten waarna het weer in een paar uur wordt gedemonteerd.

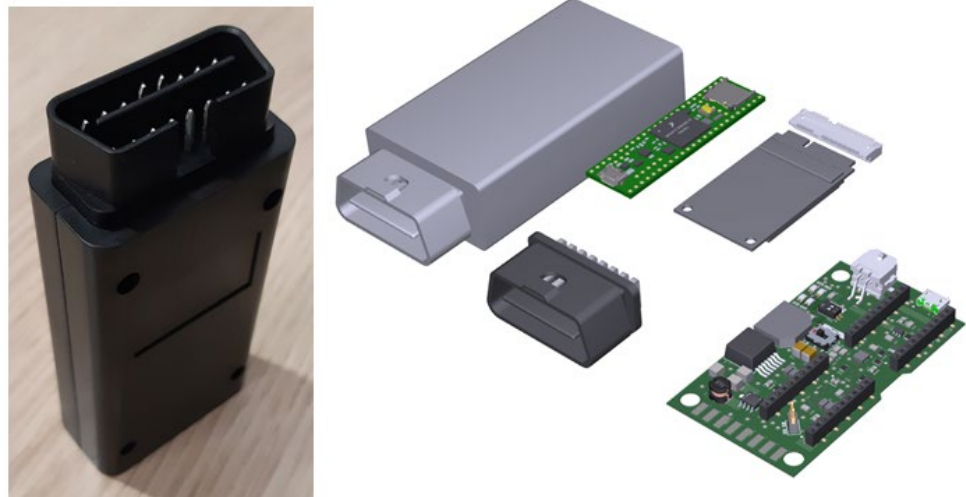
Onderstaand figuur geeft een voorbeeld van een geïnstalleerde SEMS met sensor in de uitlaat.



Figuur 3: Voorbeeld van een geïnstalleerde SEMS met sensor in de uitlaat.

3.2.1.2 Geavanceerde tracker: LCL dongle

De LCL dongle is door TNO ontworpen om langdurig te monitoren maar dan zonder een lange installatietijd en tegen lagere kosten. De LCL heeft dezelfde functionaliteiten als SEMS, maar dan zonder mogelijkheid om aparte sensoren te installeren. Dit betekent dat de LCL afhankelijk is van de beschikbare machinedata. Emissiegegevens zijn meestal niet beschikbaar via de machinedata. De LCL optie is het meest geschikt voor nieuwere motoren en vraagt momenteel nog ca. één tot vier uur installatietijd. Bij meer gestandaardiseerde voertuigen is de LCL dongle bedoeld als 'plug and play' unit. Onderstaand figuur geeft een voorbeeld van de LCL dongle.



Figuur 4: Voorbeeld van de LCL dongle.

3.2.2 Kortstondige metingen

Bij kortstondige metingen is geen of nauwelijks installatietijd benodigd. Er wordt direct in de uitlaatpijp van de machine gemeten waardoor geen aanpassingen nodig zijn aan de machine. Kortstondige metingen worden zowel voor NO_x als voor fijnstof (deeltjesaantallen) gedaan.

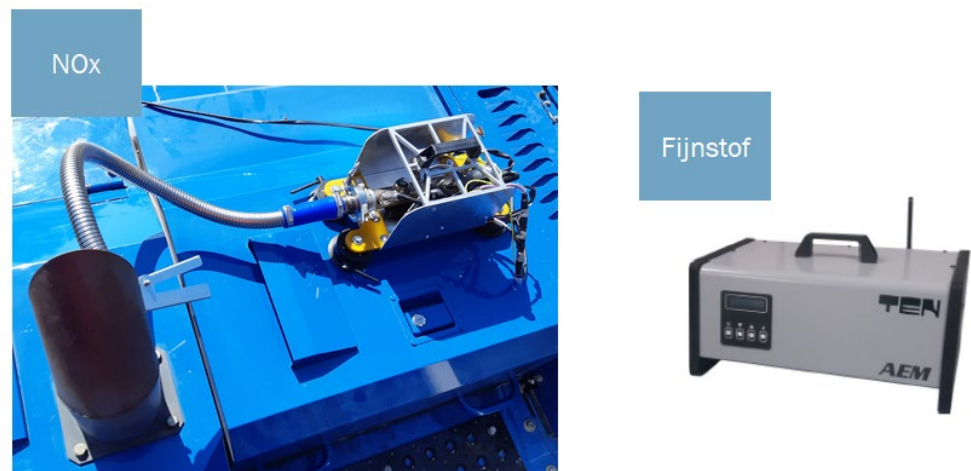
3.2.2.1 Kortstondige metingen voor NO_x

Voor de kortstondige NO_x metingen heeft TNO een draagbaar emissiemeetsysteem ontwikkeld, ook wel de BOEMkit genoemd, zie figuur 5. Bij de BOEMkit worden dezelfde sensoren toegepast als bij SEMS (NO_x/O₂, NH₃ en GPS). Naast de sensoren voor emissiemetingen en locatiebepaling is ook een separate toerentalmeter opgenomen. Het systeem heeft een eigen stroomvoorziening en een verbinding met de machine voor het uitlezen van motorparameters is niet vereist (maar kan wel nuttig zijn).

De BOEMkit kan naast de machine worden gezet, maar kan ook met zuignappen vastgezet worden. In het laatste geval kan de machine (meestal) in operatie blijven. Mocht dit niet mogelijk of nodig zijn dan wordt in stilstaande conditie gemeten. Daarbij wordt bij voorkeur wel gemeten bij verschillende motorlasten en met warme en koude motor. De tijdsduur van metingen kan variëren van 10 minuten tot een werkdag.

3.2.2.2 Kortstondige metingen voor fijnstof

De toegepaste fijnstofmeting is vergelijkbaar met de nieuwe roetfiltertest (zoals die in januari 2023 is ingevoerd voor dieselauto's). Hierbij wordt een meetinstrument voor het tellen van deeltjesaantallen gebruikt. Deze test is met name bedoeld om de effectiviteit van het roetfilter te bepalen en wordt uitgevoerd bij stationair toerental. Figuur 5 toont eveneens de deeltjesteller apparatuur. Naast de getoonde meetunit is deze ook voorzien van een meetprobe die voor het doen van de meting in de uitlaat wordt aangebracht.



Figuur 5: Links de BOEMkit, geïnstalleerd op een machine, rechts de meetunit van de gebruikte deeltjesteller.

3.3 Dataverwerking

In deze paragraaf is beschreven hoe vanuit de ingewonnen data de emissies van een machine berekend worden. Verwerking van data is, per machinetype, noodzakelijk om tot voor de EMPK methodiek toepasbare emissiedata te komen. Gemeten NO_x concentraties moeten worden omgerekend naar grootheden zoals grammen NO_x per uur, per kWh of per liter diesel. Dit is nodig om de totale NO_x uitstoot per machine en/of op een bouwplaats te kunnen kwantificeren.

Omdat in de praktijk bij machines niet altijd alle daarvoor vereiste meetsignalen beschikbaar waren, en beschikbare signalen ook variëren per machine (vanwege gebrek aan standaardisatie), zijn meerdere rekenmethodieken ontwikkeld en met elkaar vergeleken. Om deze reden is veel aandacht besteed aan de processing van emissiedata. Ook voor de ontwikkeling van emissiefactoren is het relevant om diverse rekenmethodieken met elkaar te vergelijken.

3.3.1 *Pre-processing*

Voor de data-analyse zijn de met de sensoren ingewonnen gegevens, en de machinedata (via het on-board diagnostic systeem (OBD)), in meerdere pre-processing stappen verwerkt.

Dit gaat om de onderstaande vier stappen, deze worden vervolgens beknopt toegelicht:

1. Verwijderen van gegevens die zijn gelogd voordat SEMS operationeel is;
2. Aanvullen van ontbrekende data;
3. Toepassen van kalibratiedata op sensorgegevens;
4. Synchronisatie van SEMS en OBD.

In de eerste stap zijn de gegevens die een niet operationele status van één of meerdere sensoren vertoonden verwijderd. Zo moeten bijvoorbeeld de sensoren voldoende zijn opgewarmd (dit gebeurt middels een verwarmingselement) voordat gemeten kan worden. SEMS is bijvoorbeeld ook niet operationeel als het dauwpunt in het uitlaatsysteem nog niet is bereikt of als de voedingsspanning te laag is.

De gelogde gegevens bevatten soms 'gaten', momenten waarop tijdelijk data ontbreekt. Als een gat minder dan drie seconden tijd omvat, wordt de laatste valide waarde gebruikt. Bij een groter gat wordt dat deel van de data in bepaalde analyses in het geheel weggelaten.

Data ingewonnen met sensoren van TNO (SEMS en BOEMkit) worden tevens gecorrigeerd met informatie verkregen vanuit kalibratie van deze sensoren. Daarnaast worden negatieve meetwaarden van concentraties op nul gezet.

De synchronisatie van bestanden wordt gedaan volgens (Europese Commissie, 2017c) op basis van de hoogste correlatiecoëfficiënt tussen motorbrandstofdebiet (OBD) en CO₂-concentratie (SEMS, gebaseerd op gemeten O₂-concentratie).

3.3.2 *Bepaling van het uitlaatgas-massadebiet*

Tijdens de metingen is geen instrument gebruikt die het uitlaatgas-massadebiet direct meet. Deze parameter is echter wel benodigd om gemeten concentraties (in ppm) naar massa-emissies (in grammen) te kunnen vertalen. Het uitlaatgas-massadebiet is daarom berekend op basis van de gelogde OBD gegevens en de gemeten zuurstofconcentratie in het uitlaatgas. In dit project zijn hiervoor drie methodes gebruikt, deze worden hieronder worden beschreven.

De methodes (met kleine verschillen) zijn ook te vinden in hoofdstuk 10 van aanhangsel 4/bijlage IIIA van Verordening (EU) 2017/1151 van de Commissie (Europese Commissie, 2017a). De drie methodes verschillen van elkaar afhankelijk van welke signalen beschikbaar zijn via OBD.

Alle drie methodes gebruiken de som van het massadebiet van lucht en brandstof en concluderen dat de som gelijk is aan de uitlaatgas-massadebiet:

$$\dot{m}_{\text{exh}}(t) = \dot{m}_{\text{air}}(t) + \dot{m}_{\text{fuel}}(t).$$

De drie mogelijk methodieken zijn:

1. Luchtmassadebiet en brandstof-volumedebiet;
2. Speed-Density (SD) methode;
3. Liquid Fuel Economy methode.

De SD-methode, op basis van het slagvolume van de motor, kan niet worden gebruikt als de mobiele machine over uitlaatgasrecirculatie (EGR) beschikt omdat in dat geval de aandelen van verse lucht en van gerecirculeerd uitlaatgas aan het massadebiet bij de cilinderinlaat niet berekend kan worden. Als gevolg daarvan zou het uitlaatgas-massadebiet worden overschat.

Een nadere toelichting van deze drie methodieken ter bepaling van het uitlaatgas-massadebiet is terug te vinden in Bijlage B van dit rapport.

3.3.3 *Berekening van de momentane en specifieke massa-emissies*

Na de pre-processing van de OBD- en sensordata, en de berekening van het uitlaatgas-massadebiet, kunnen de momentane massa-emissies (g/s) worden bepaald. De (arbeids-)specifieke massa-emissies (g/kWh) kunnen alleen worden berekend als informatie over motortoerental en motorkoppel beschikbaar is via de OBD. De exacte berekening is beschreven in Bijlage B. Op basis van deze berekening kunnen bijvoorbeeld de totale NO_x-emissies per uur, per dag, of per project bepaald worden. Ook kunnen hiermee gemiddelde NO_x-emissies per uur, per kWh of per liter brandstof bepaald worden. Indien de motorbelasting bepaald kan worden, zijn de resultaten ook berekend in zogenaamde 'bins' per 5% motorbelasting. Hiermee kunnen de resultaten vergeleken worden bij lage en hoge motorlast, en kan eventueel een grove vergelijking met de wettelijke limietwaarden worden gemaakt.

3.3.4 *'NO_x over CO₂': berekening die onafhankelijk is van OBD-signalen*

Zoals eerder genoemd is er geen standaardisatie van de OBD-signalen, en zijn de benodigde signalen niet altijd beschikbaar. De kwaliteit van de signalen is hierdoor niet altijd bekend. Daarnaast worden bij de kortstondige metingen meestal geen OBD-signalen gelogd. Om deze redenen wordt de meetdata ook geanalyseerd volgens een methodiek die onafhankelijk is van OBD-signalen. Bij deze methodiek worden de gemeten NO_x concentraties gedeeld door de CO₂-concentraties (berekend op basis van de gemeten zuurstofconcentraties (O₂)). De CO₂-concentratie neemt toe wanneer de motorbelasting toeneemt, hiermee kan beoordeeld worden in welke mate de NO_x-emissies toe- of afnemen bij een hoge of lage motorlast. Ook kan een grove inschatting gemaakt worden van de specifieke massa-emissies door de verwachte grammen CO₂ theoretisch te benaderen op basis van het motorrendement bij verschillende motorbelastingen.

3.3.5 *Vergelijking met de vereisten voor 'In-Service-Monitoring' volgens EU-richtlijnen*

Voor een deel van de Stage V machines is de zogenaamde 'In-Service-Monitoring' (ISM) vereist. Dit betekent dat mobiele werktuigen die worden ingezet in de markt, in de praktijk getest moeten worden.

In tegenstelling tot de wetgeving voor personen- en bedrijfsvoertuigen zijn er in de Europese Unie geen eisen aan de On-Board Diagnostic systemen (OBD) van niet voor de weg bestemde mobiele machines (vgl. verordening over Stage V (Europees Parlement en de Raad, 2016a)). De In-Service Monitoring (ISM) procedure zoals uiteengezet in (Europese Commissie, 2017c) maakt wel gebruik van gegevens die worden verkregen via de elektronische regeleenheid (ECU) van een machine. Er moet worden aangetoond dat ECU gegevens aan bepaalde eisen voldoen (vgl. (Europese Commissie, 2017b) en (Europese Commissie, 2017c)). Motoren waarbij het niet mogelijk is de vereiste ECU gegevens te verzamelen en te valideren worden als ongeschikt beschouwd voor emissie monitoring tijdens het gebruik. Volgens de nieuwe Gedelegeerde Verordening (EU) 2022/2387 van de Commissie (Europese Commissie, 2022a) is "het ontbreken van een ECU of interface, ontbrekende of ongeldige signalen of een niet-conform koppelsignaal van de ECU" (Europese Commissie, 2022a, p. L316/5) echter geen reden om het aantal te testen motoren te reduceren.

Ook de in dit project gebruikte rekenmethodieken zijn gebaseerd op gegevens die via de communicatie-interface van de ECU van een machine worden verzameld. Omdat het uitlaatgas-massadebiet niet wordt gemeten, is een controle van de gegevensconsistentie volgens aanhangsel 3 en aanhangsel 6 van de bijlage van Gedelegeerde Verordening (EU) 2017/655 van de Commissie (Europese Commissie, 2017c) niet mogelijk. Als gevolg ervan kan de kwaliteit van OBD signalen niet gewaarborgd worden. Dat kan – naast de nauwkeurigheid van de gebruikte sensoren – invloed hebben op berekende waarden. De invloed van de onzekerheid in verband met OBD signalen is beperkt voor alle drie methoden. Dat betekent hier dat relatieve afwijkingen niet versterkt worden. De meetonzekerheid van de gebruikte O₂ sensor heeft bij lage motorlast (O₂ concentraties > 18 %) een grote invloed op de meet-onzekerheid van de LFE methode. Omdat de O₂ concentraties meestal lager zijn, en het brandstof-massadebiet met de motorlast correleert, is de invloed op de totale uitstoot naar verwachting beperkt.

3.4 Demo-website

De verwerkte monitoringresultaten (NO_x, draaiuren en brandstofverbruik) zijn beschikbaar gemaakt op een beveiligde website en maken de inzet en het niveau van de uitstoot van de werktuigen samenvattend inzichtelijk. De website is alleen toegankelijk via een inlogcode. Toegang is verschaft aan de machine eigenaar/gebruiker, zij hebben alleen toegang tot monitoringsresultaten van hun eigen machines. In de toekomst zouden, na toestemming van de machine eigenaar/gebruiker, mogelijk ook betrokken toezichthouders of opdrachtgevers van een bouwproject toegang tot dergelijke data kunnen krijgen. Doel hiervan is om met deze partijen gezamenlijk te onderzoeken welke wijze van presentatie van gegevens praktisch het beste zou kunnen voldoen als input voor een mogelijk vervolg op dit pilot project. Een illustratie van de ontwikkelde website met bijbehorende emissieresultaten is opgenomen in hoofdstuk 4.

4 EMPK resultaten mobiele werktuigen

Dit hoofdstuk beschrijft de EMPK resultaten van de tijdens het pilot project gemeten mobiele werktuigen (resultaten van metingen aan twee werkschepen worden beschreven in het volgende hoofdstuk). Eerst wordt een overzicht gegeven van de gemeten mobiele werktuigen. Daarna volgen de opgebouwde praktijkervaringen rondom de organisatie van de metingen, dit is relevante informatie in het kader van EMPK opschalingsmogelijkheden. Daarna volgen de emissieresultaten, zowel die van de langdurige monitoring als die van de kortstondige metingen. Tot slot wordt de ontwikkelde demo-website toegelicht.

4.1 Overzicht gemeten mobiele werktuigen

In totaal zijn aan 29 bouwmaschinen praktijkemissiemetingen verricht. Dit betroffen de kortstondige metingen met de BOEMkit en deeltjesaantallenmeter, en/of de langdurige monitoring van (NO_x-) emissies en inzet met SEMS of de LCL (zie hoofdstuk 3.2 voor een toelichting van de meetmethodieken). De onderstaande Tabel 4 geeft een overzicht van de gemeten machines en de toegepaste meetmethodiek. In Bijlage A zijn de machines in meer detail toegelicht.

Tabel 4: Overzicht gemeten mobiele werktuigen

| EMPK ID | Type_vermogen_Stage | SEMS | LCL | BOEM-kit | Deeltjes-aantallen | EMPK-kleur & MVI-level*** |
|------------------------|---------------------------------------|------|-----|----------|--------------------|---------------------------|
| ABI_TM1822_NGWDNRE7 | Heimachine_563_V | x | | | | 1 |
| ABI_TM2025_NGWDPRES | Heimachine_570_not regulated* | x | | | | - |
| BOM_174AP-NWBDNRE4 | Wals_55,4_V | x | | | | 2 |
| BR196701_NSTDNRE6 | Genset_249_V | | | x | | 3 |
| CAT_M318F_NGMDS3BM | Graafmachine_129,4_IIIB | | | x | | 2 |
| DYN_SD2500_NWBDNRE5 | Asfalteermachine_129_V | x | | | (x)** | 3 |
| FPT_NEF67T_NSTDS3AI | Genset_115_IIIA | | | x | | - |
| HIT_FH220L_NGWDPRES | Voorboorinstallatie_114_not regulated | | | x | | - |
| HIT_ZX140W_NGMDST4R | Graafmachine_105_IV | | x | | | 3 |
| HIT_ZX85US_NGMDNRE4 | Graafmachine_42,4_V | x | | | | 2 |
| IMP_ORIENT_07_NSTDNRE2 | Genset_5,5_V | | | x | | 1 |
| IMP_ORIENT_08_NSTDNRE2 | Genset_5,5_V | | | x | | 1 |
| TOW_SUPER_NSTDPRES | Lichtmast_8_not regulated | | | x | x | 1 |
| KUB_KX41-3_NGMDPRES | Graafmachine_11,8_not regulated | | | x | | 1 |
| MUL_RB-9_NSTDST2G | Betonmixer_71,7_II | | | x | | - |
| SEN_6100_NGWDPRES | Kraan_222_not regulated | | x | x | | - |
| TAK_TB2150_NGMDNRE5 | Graafmachine_85_V | x | | | x | 3 |
| TAK_TB2902_NGMDNRE4 | Graafmachine_51,6_V | x | | | | 2 |
| TAK_TB295W_NGMDNRE5 | Graafmachine_85_V | x | | | x | 3 |

| | | | | | | |
|-----------------------|-------------------------------------|--|---|---|-------|---|
| VÖG_SUPER_NWBDS4Q | Asfalteermachine_142_IV | | | x | | 3 |
| VOL_A30G_NDPDNRE6 | Dumper_265_V | | x | x | (x)** | 3 |
| VOL_L120H_NLSDNRE6 | Laadschop_203_V | | x | x | x | 3 |
| WAN_DPU655_NHHDNRE2 | Trilplaat_9,6_V | | | x | | 1 |
| WIT_JD060C_NSTDS3AJ | Genset_48_IIIA | | | x | x | - |
| WOL_THW752_NGWDPRES | Funderingsmachine_560_not regulated | | | x | | - |
| ATL_XAS188_NSTDNRE5 | Mobiele compressor_104_V | | | x | x | 3 |
| DYN_SD2500_NWBDS3BM | Asfalteermachine_129_IIIB | | | x | | 2 |
| JLG_660SJ_NKRDTIER4 | Hoogwerker_36,4_Tier 4 | | | x | x | 1 |
| MER_ROTOTO40_NVHDNRE5 | Verreiker_125_V | | x | | | 3 |

* 'not regulated' betekent dat er voor deze vermogensklasse tijdens het productiejaar van de motor geen emissielimiet gold.

** Meting wordt nog uitgevoerd bij de uitbouw van de meetapparatuur

*** Zie Hoofdstuk 2, paragraaf 2.2 voor toelichting kleurcode en MVI-niveau.

4.2 Praktijkervaringen organisatie metingen

Het opschalen van het aantal te monitoren of te meten bouwmaschinen verliep minder soepel dan verwacht. Dit had meerdere redenen welke in deze paragraaf worden toegelicht. In het kader van eventuele opschaling van de EMPK-methodiek zijn de opgedane praktijkervaringen relevant omdat bij grootschalige invoering sommige hiervan vragen om een oplossing

4.2.1 *Werving van deelnemende partijen en machines*

Voor uitvoering van het pilotproject zijn veel contacten gelegd met importeurs, verhuurders en aannemers. Hoewel meerdere marktpartijen hun medewerking toezegden, vroeg het maken van vervolgafspraken vaak veel meer tijd dan verwacht. De vervolgafspraken waren nodig om een toelichting te geven op het project en om de potentiële deelnemende machines te kunnen bezichtigen. Daarna konden de metingen voorbereid worden (in het geval van monitoring) om vervolgens over te gaan tot installatie van de meetapparatuur. Bij de inbouw van meetapparatuur kunnen de machines voor een dag(deel) niet ingezet worden. Dit past niet altijd even makkelijk in de planning van de bouwbedrijven. Ook de kortstondige metingen vragen wat tijd van de machinist. De medewerking was meestal vrij goed. Echter, bij opschaling van de EMPK-methodiek kan de benodigde tijd en bereidheid voor deelname wel tot langere doorlooptijden zorgen. Het is dan belangrijk dat vanuit het bouwbedrijf een persoon aanwezig is die de planning van de machines overziet en kan helpen met het beschikbaar stellen van de machines ten behoeve van de metingen.

Enkele bedrijven wilden graag eerst een samenwerkingscontract. Besprekingen daarover vroegen extra doorlooptijd (uiteindelijk is er één samenwerkingsovereenkomst tot stand gekomen). Enkele aannemers en verhuurders gaven geen toestemming voor het doen van metingen.

4.2.2 *Wisseling van machines op de bouwplaats en het werken met onderaannemers*

Tijdens afspraken op bouwplaatsen bleek de situatie qua aanwezige machinetypen soms anders dan vooraf bekend. Hierdoor waren kortstondige metingen of installaties van monitoringsystemen niet altijd mogelijk.

Vaak werken bouwbedrijven met onderaannemers, het is daarom niet altijd bekend bij de hoofdaannemer welke machines er wanneer op de bouwplaats zijn. Het werken met onderaannemers maakt het ook lastiger om de metingen te organiseren. De metingen dienen immers met elke partij te worden afgestemd. Bij opschaling van EMPK zou dit opgelost kunnen worden door aan de zijde van de hoofdaannemer één contactpersoon te hebben die verantwoordelijk is.

4.2.3 *Gebrek aan registratie en machinegegevens*

Er is geen publiek beschikbare registratie van het beschikbare materieel. Vanaf 2021 is er wel een registratieplicht voor (land)bouwoertuigen die op de openbare weg rijden. Bij deze registratie ontbreekt echter ook detaildata zoals het motorvermogen en de emissieklasse. Ook voor en met de bouwbedrijven is het regelmatig wat werk om deze gegevens beschikbaar te krijgen, met name omdat veel met onderaannemers wordt gewerkt.

Bij opschaling van de EMPK-methodiek, waarbij een controle nodig is op de ingezette machines en bijbehorende emissieklasse is dit een uitdaging. De grootste uitdaging is om onafhankelijk de fasenorm van een machine vast te stellen. De meest directe methode waarmee de fasenorm van een mobiel werktuig vastgesteld kan worden is door middel van het aflezen van het typeplaatje van de motor van de machine. In Europese wetgeving is vastgelegd dat op motoren in niet voor de weg bestemde mobiele machines en land- en bosbouwtrekkers het typegoedkeuringsnummer of typegoedkeuringsmerk vermeld moet staan. Uit dit nummer of van dit merk is de fasenorm en subcategorie van de fasenorm direct af te leiden. Een praktisch aspect is wel de afleesbaarheid van het typeplaatje. Ondanks dat het typeplaatje goed afleesbaar moet zijn, komt het in de praktijk geregeld voor dat het typeplaatje op de motor slecht of helemaal niet af te lezen is. Bijvoorbeeld bij nieuwe machines met krappe motorruimtes, of bij oude machines waarbij het plaatje onleesbaar geworden is, onvolledig is, of zelfs ontbreekt. Een mogelijke oplossing zou kunnen zijn deze gegevens door onderhoudsbedrijven te laten registreren.

In het geval dat het motorplaatje niet zichtbaar is, kan als alternatief het typeplaatje van de machine (machineplaatje) geraadpleegd te worden. Het typeplaatje bevat minder details omtrent de motorspecificaties dan het motorplaatje. In Richtlijn 2006/42/EG is vermeld aan welke eisen het voorgeschreven opschrift op een machine moet voldoen. Onder andere het bouwjaar van de machine moet vermeld staan op dit typeplaatje. Dit geldt niet voor het motorvermogen. In de praktijk staan dit soort gegevens wel geregeld vermeld. De robuustheid van de indirecte methode voor het bepalen van de fasenorm van een mobiel werktuig is significant minder dan van de directe methode. In geval van het ontbreken van een motorplaatje en/of gedetailleerde informatie over de typegoedkeuring van de motor van het mobiele werktuig zijn er forse onzekerheden bij het bepalen van de emissieklasse, bijvoorbeeld omdat er sprake kan zijn van overgangsregelingen of vrijstellingen.

4.2.4 *Gebrek aan standaardisatie*

Binnen het brede palet aan bouwmachines is – zoals eerder genoemd - nog nauwelijks sprake van standaardisatie van beschikbare data op de OBD van deze machines. In die gevallen is per machine uitzoekwerk nodig, zowel voor metingen met SEMS als voor die met de LCL-dongle. Bij machines zonder OBD zijn de mogelijkheden voor data inwinning beperkt tenzij de machines van een volledig emissiemeetsysteem worden voorzien. Dat is echter niet altijd een optie omdat de machines door de inbouwtijd dan een langere periode niet inzetbaar zijn voor het bouwproces en een dergelijke inbouw ook aanpassingen vereist aan het uitlaatsysteem van de machine.

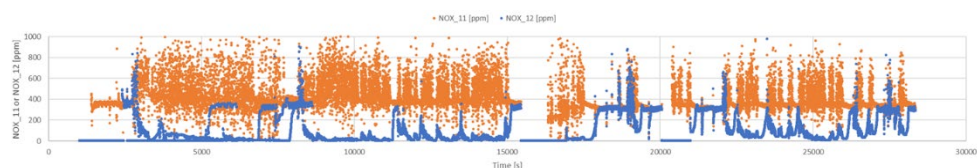
Het concept van een LCL-dongle is een 'plug and play' data-registratie. Vanwege het gebrek aan standaardisatie is 'plug and play' bij mobiele machines nog niet mogelijk. Dit geldt in het bijzonder voor de NO_x-emissies (zie volgende paragraaf), maar ook signalen zoals draaiuren en brandstofverbruik vragen in de praktijk nog wat uitzoekwerk, al kunnen die laatste twee vaak snel op de OBD worden gevonden.

4.2.5 *Beschikbaarheid NO_x-signaal op de OBD*

Enkele gemeten machines beschikten over een NO_x-signaal op hun OBD connector. Dit waren moderne Stage V machines met een SCR-katalysator. Het signaal was echter niet bij alle Stage IV en V machines direct vindbaar. Alleen een sensor die is geplaatst achter de SCR katalysator geeft nuttige informatie over de NO_x-emissie uit de uitlaat. Signalen van NO_x-sensoren die op andere plaatsen zijn gemonteerd zijn ongeschikt voor monitoring van uitgaande NO_x-emissies. Op basis van de naamgeving van de signalen kan niet altijd eenduidig worden vastgesteld van welke sensor data beschikbaar is.

In totaal zijn tijdens de pilot vijf machines uitgerust met de LCL-dongle. Bij drie van de vijf machines was geen NO_x-signaal beschikbaar op de OBD connector, bij die machines is alleen de inzet gemonitord. Bij de andere twee machines waren twee NO_x-signalen aanwezig op de OBD (zonder aanduiding van de sensorlocatie). Bij één van de machines bleek 25% van de data onbruikbaar (bij draaiende motor), het NO_x signaal gaf dan alleen een default waarde weer. Bij de andere machine is maximaal 20% van de data een default waarde, al is het bij die betreffende machine soms lastiger om de default waarde van een valide waarde te onderscheiden.

Figuur 6 geeft van een machine de twee NO_x signalen weer. Het lijkt erop dat in dit geval 'NO_x_11' het signaal is van voor de SCR-katalysator en 'NO_x_12' het signaal na de SCR-katalysator. De NO_x_12 geeft echter ook vaak NO_x-concentraties van "0", deze waarde komt voor tijdens de meting bij warme motor (waar het mogelijk ook een default waarde is), maar komt ook voor als default-waarde wanneer de sensor nog niet opgewarmd is. Nadere analyse is nodig om de default-waarde te scheiden van de 0 ppm meetwaarde.



Figuur 6: Voorbeeld LCL-dongle data met twee OBD-NO_x-signalen van (fabriek-af) sensoren geplaatst voor (upstream) en na de katalysator (downstream).

Verder is gebleken dat deze sensorsignalen pas beschikbaar komen na een opstarttijd van 900 tot 1500 seconden, dit heeft te maken met de lange opwarmtijd van de NO_x-sensoren.

Beide machines hebben beperkte mogelijkheden om de gemeten concentraties naar massa-emissies te vertalen. Beide machines geven geen zuurstof- of lambda-signaal op de OBD, die nodig zijn om de CO₂ waarden te berekenen. De eerste machine geeft wel een uitlaatgasdebiet weer. De kalibratiestatus van de sensoren is echter onbekend. De beschikbaarheid van NO_x-signalen op de OBD is een nuttige ontwikkeling, verbeteringen zijn nog wel nodig om deze signalen bruikbaar te maken voor emissie monitoring.

Daarnaast is ook telematica data ontvangen van enkele tientallen machines, hierbij worden gegevens zoals het brandstofverbruik en het AdBlue-verbruik per uur geregistreerd en online weergegeven. Het NO_x-signaal was voor deze machines echter niet beschikbaar. Detailinformatie omtrent het brandstof- en AdBlue-verbruik is (in combinatie met machinespecificaties) echter wel goede informatie om de emissieniveaus in te schatten.

4.3 Meet- en monitoringsresultaten

In deze paragraaf worden de emissiemeetresultaten van het pilotprogramma toegelicht. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen de meetresultaten van de langdurige monitoring en die van de kortstondige metingen.

4.3.1 Emissieresultaten vanuit SEMS monitoringsdata

4.3.1.1 Overzicht totale emissies en inzet

De onderstaande Tabel 5 geeft de SEMS NO_x-emissietotalen over de gehele meetperiode weer. Bij de meeste machines is meer dan 150 uur aan emissiedata verzameld over weken tot maanden aan monitoring, wat een robuust beeld geeft van de emissies onder allerlei verschillende omstandigheden.

De NO_x en CO₂ emissies van de heimachines springen er in eerste instantie uit, dit zijn grote machines die ook veel uren zijn gemonitord. Verderop worden de resultaten per machine nog wat verder toegelicht. Door te kijken naar emissietotalen, kan goed worden beoordeeld wat de totale uitstoot van een project is. Dit zou bijvoorbeeld kunnen worden vergeleken met de vergunde stikstofruimte of het afgesproken emissieplafond. De emissietotalen lenen zich minder goed om de emissieprestaties van individuele machine te beoordelen omdat meer uren inzet automatisch tot meer emissies leiden.

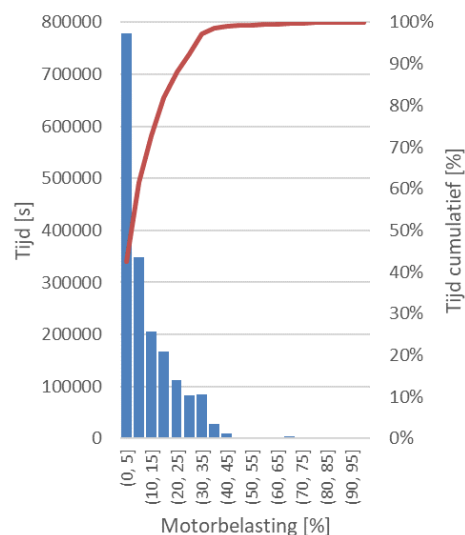
Tabel 5: SEMS NO_x-emissietotalen over de gehele meetperiode, inclusief de draaiuren en de gemiddelde motorbelasting.

| EMPK ID | EMPK- kleur & MVI- level* | Type_vermogen_Stage | Inzet | NO _x | CO ₂ | NH ₃ | Motor- last |
|---------------------|------------------------------------|---------------------------------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|
| | | | [uur] | [kg] | [kg] | [g] | [%] |
| ABI_TM1822_NGWDNRE7 | 1 | Heimachine_563_V | 509 | 254 | 23.329 | 300 | 11 |
| BOM_174AP-NWBDNRE4 | 2 | Wals_55,4_V | 558 | 30 | 5.730 | 456 | 20 |
| DYN_SD2500_NWBDNRE5 | 3 | Asfalteermachine_129_V | 274 | 2,9 | 7.729 | 156 | 36 |
| TAK_TB295W_NGMDNRE5 | 3 | Graafmachine_85_V | 190 | 3,6 | 3.179 | 15 | 23 |
| TAK_TB2150_NGMDNRE5 | 3 | Graafmachine_85_V | 50 | 0,4 | 1.306 | 32 | 40 |
| ABI_TM2025_NGWDPRES | - | Heimachine_570_not regulated | 538 | 262 | 22.321 | 640 | 9 |
| HIT_ZX85US_NGMDNRE4 | 2 | Graafmachine_42,4_V | 74 | 4,2 | 907 | 8,3 | 39 |
| TAK_TB2902_NGMDNRE4 | 2 | Graafmachine_51,6_V | 155 | 11 | 1.851 | 24 | 30 |

* Zie Hoofdstuk 2, paragraaf 2.2 voor toelichting kleurcode en MVI-niveau.

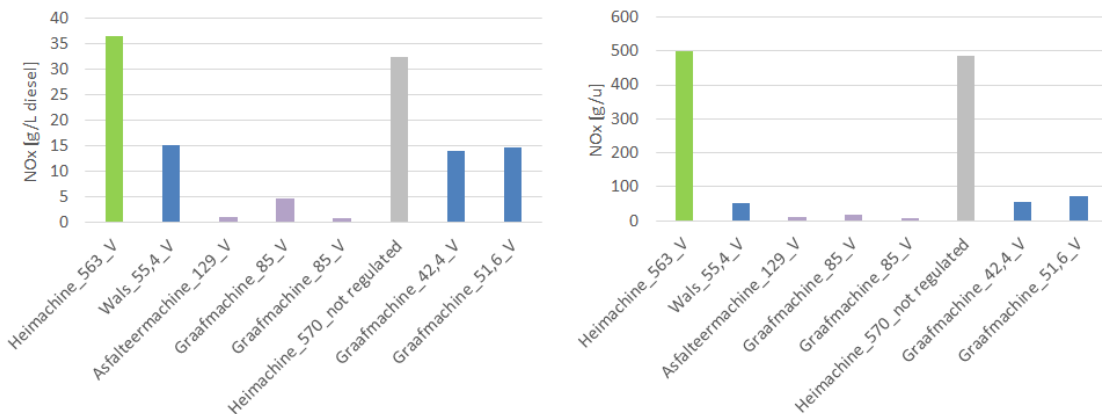
4.3.1.2 Overzicht NO_x emissies in grammen per uur en per liter brandstof

Om de emissieprestaties van individuele machines te beoordelen is het nuttiger om bijvoorbeeld te kijken naar het aantal grammen NO_x per uur of per liter brandstof. De maat die in de typegoedkeuring wordt gebruikt, is NO_x in grammen per kWh (een maat voor de geleverde motorarbeid). De NO_x in g/kWh kan echter sterk beïnvloed worden door stationair draaien omdat er dan geen of nauwelijks motorlast is. De 'kWh' is dan heel laag in verhouding tot de grammen NO_x, wat leidt tot een hele hoge g/kWh waarde. Zoals te zien in Tabel 5 komt een lage gemiddelde motorbelasting regelmatig voor. Onderstaand Figuur 7 laat in meer detail een voorbeeld zien van een machine met een inzetprofiel waarin een groot aandeel lage motorbelasting optrad.



Figuur 7: Voorbeeld van een inzetprofiel met een groot aandeel lage motorbelasting (machine ABI_TM1822_NGWDNRE7 | Heimachine_563_V).

Bij weergave van de emissieprestatie in grammen NO_x per uur, of per liter brandstof vindt het probleem met betrekking tot de kWh eenheid niet plaats. Bij grammen per uur is het wel lastiger om emissies van grotere en kleinere machines met elkaar te vergelijken omdat grote machines meer brandstof verbruiken. Met de eenheid in gram per liter kunnen grote en kleine machines wel onderling vergeleken worden. De verschillende eenheden worden in onderstaande Figuur 8 geïllustreerd. Uit Figuur 8 blijkt duidelijk dat de heimachines de hoogste emissie hebben, zowel in gram NO_x per uur, als in gram NO_x per liter brandstof. In de volgende alinea wordt dit nader toegelicht. Verder laat Figuur 8 zien dat er een groot verschil is in NO_x-emissieprestaties tussen de Stage V machines met een motorvermogen onder de 56 kW en boven de 56 kW (tot 560 kW). In de eenheid gram NO_x per liter brandstof is dit duidelijker zichtbaar dan in gram NO_x per uur. De machines met een motorvermogen tussen de 56 en 560 kW presteren het beste qua NO_x-emissieprestaties, in de volgende paragraaf worden de resultaten per machine in meer detail toegelicht.



Figuur 8: SEMS NO_x-emissieresultaten in grammen per liter diesel (links) en in grammen per uur (rechts).

4.3.1.3 Detail overzicht NO_x-emissies per machine

Tabel 6 geeft een overzicht van zowel de gemiddelde NO_x-emissie weer, alsook de gemiddelde waarde boven de 20% motorbelasting, in diverse eenheden. De resultaten variëren sterk per machine. Dit laat het belang zien van praktijkemissies en het langdurig meten en monitoren in combinatie met juiste dataprocesing. De onderstaande alinea's lichten de resultaten per machine toe.

Heimachines

Opvallend is bijvoorbeeld dat in de emissietotalen (bovenstaande Tabel 5), de Stage V heimachine nauwelijks afwijkt van de oudere heimachine. Tabel 5 laat zien dat de heimachines worden ingezet op een gemiddelde motorbelasting van 10%. In Figuur 9 is de tijd en NO_x emissie (in gram NO_x per liter brandstof) per motorbelasting weergegeven van de twee heimachines. Daaruit blijkt dat de heimachines voor het grootste deel van de tijd worden ingezet op een motorbelasting van minder dan 20%. De emissieprestaties onder de 20% motorbelasting zijn voor beide machines relatief hoog (de Stage V presteert wel iets beter), dit terwijl bij de hogere motorbelastingen (die meer voorkomen in de typekeuringstest) de Stage V machine duidelijk lagere emissieniveaus laat zien.

Zoals te zien in Figuur 9 dalen bij de Stage V heimachine de emissieniveaus vanaf 15% motorbelasting, met een optimum tussen de 50 en 80% motorbelasting. In de praktijk is de betreffende machine tijdens de monitoringsperiode echter niet ingezet op dergelijke motorbelastingen. Hierdoor zijn de emissieniveaus boven de 20% motorbelasting nog steeds relatief hoog ten opzichte van de andere Stage V machines. Het verschil met de andere Stage V machines (met een motorvermogen boven de 56 kW) komt echter ook door een milde emissielimiet. Zoals beschreven in paragraaf 2.1, hebben Stage V machines met een motorvermogen van boven de 560 kW, of onder de 56 kW en onder de 19 kW, een fors minder strenge emissielimiet (respectievelijk 3,5 g/kWh, 4,7 g/kWh¹⁰ en 7,5 g/kWh⁷) kennen dan Stage IV en V machines met een motorvermogen tussen de 56 en 560 kW (0,4 g/kWh). De Stage V heimachine komt met deze praktijkinzet (met zeer lage motorbelasting) ruim boven de emissielimiet van 3,5 g/kWh uit. Uit de data-analyse blijkt dat de machine boven de 40% motorbelasting wel onder de emissielimiet uitkomt.



Figuur 9: Tijdsverdeling en NOx emissies in gram per liter brandstof per motorbelasting van de Stage V heimachine "ABI_TM1822_NGWDNRE7" (links) en de oudere heimachine "ABI_TM2025_NGWDPRES" (rechts).

Stage V machines met een motorvermogen tussen de 56 en 560 kW

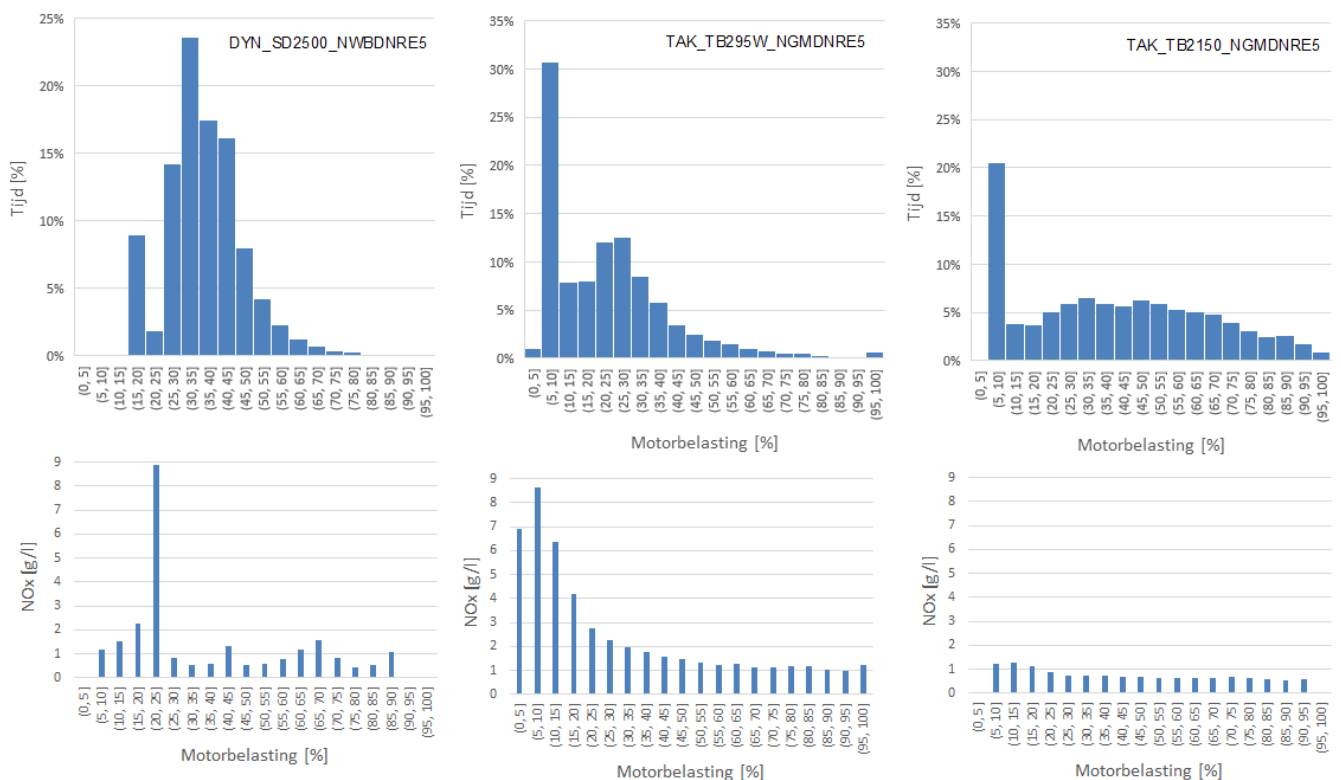
De Stage V asfalteermachines en de Stage V graafmachines met 85 kW springen eruit vanwege hun lage NO_x-emissies, ruim onder de emissielimiet. Opvallend is dat de Stage V graafmachine op wielen (TAK_TB295W_NGMDNRE5) het minder goed dan de graafmachine, met dezelfde motor, op rupsen (TAK_TB2150_NGMDNRE5), met een factor 3 tot 6 verschil. De graafmachine op wielen komt daarmee boven de wettelijke emissielimiet uit.

¹⁰ Inclusief HC-emissies

Een groot verschil tussen de twee machines is de inzet. Zoals in de Tabel 5 te zien is, heeft de graafmachine op wielen een gemiddelde motorbelasting van 23%, waarbij de graafmachine op rupsen een gemiddelde motorbelasting van 40% heeft. In Figuur 10 is de tijd en NO_x emissie (in gram NO_x per liter brandstof) per motorbelasting weergegeven van de asfalteermachine en de twee graafmachines. Daaruit blijkt dat de graafmachine op wielen veelal op een lage motorbelasting wordt ingezet, en nauwelijks boven de 50% motorbelasting komt, in tegenstelling tot de graafmachine op rupsen. Daarnaast heeft de graafmachine op rupsen over het gehele belasting profiel lagere NO_x-emissies. Dit verschil is het grootste bij de lage motorbelastingen. Bij de graafmachine op wielen is er daarom in Tabel 6 een relatief groot verschil in de gemiddelde emissieprestaties, en de emissieprestaties boven de 20% motorbelasting.

Uit de data-analyse blijkt dat de graafmachine op wielen onder de emissielimiet komt vanaf 50% motorbelasting. De graafmachine op rupsen komt vanaf 20% motorbelasting al onder de limietwaarde van 0,4 g/kWh.

Figuur 10 laat voor beide machine een piek zien bij lage motorbelasting, vermoedelijk is dit stationair, of verhoogd stationair draaien.



Figuur 10: Tijdsverdeling en NO_x emissies in gram per liter brandstof per motorbelasting van de asfalteermachine "DYN_SD2500_NWBDNRE5" (links), de graafmachine op wielen "TAK_TB295W_NGMDNRE5" (midden) en de graafmachine op rupsen "TAK_TB2150_NGMDNRE5" (rechts).

De asfalteermachine – met zeer lage NO_x-emissies - wordt net als de graafmachine op rupsen op een relatief hoog gemiddeld motorvermogen ingezet (36%).

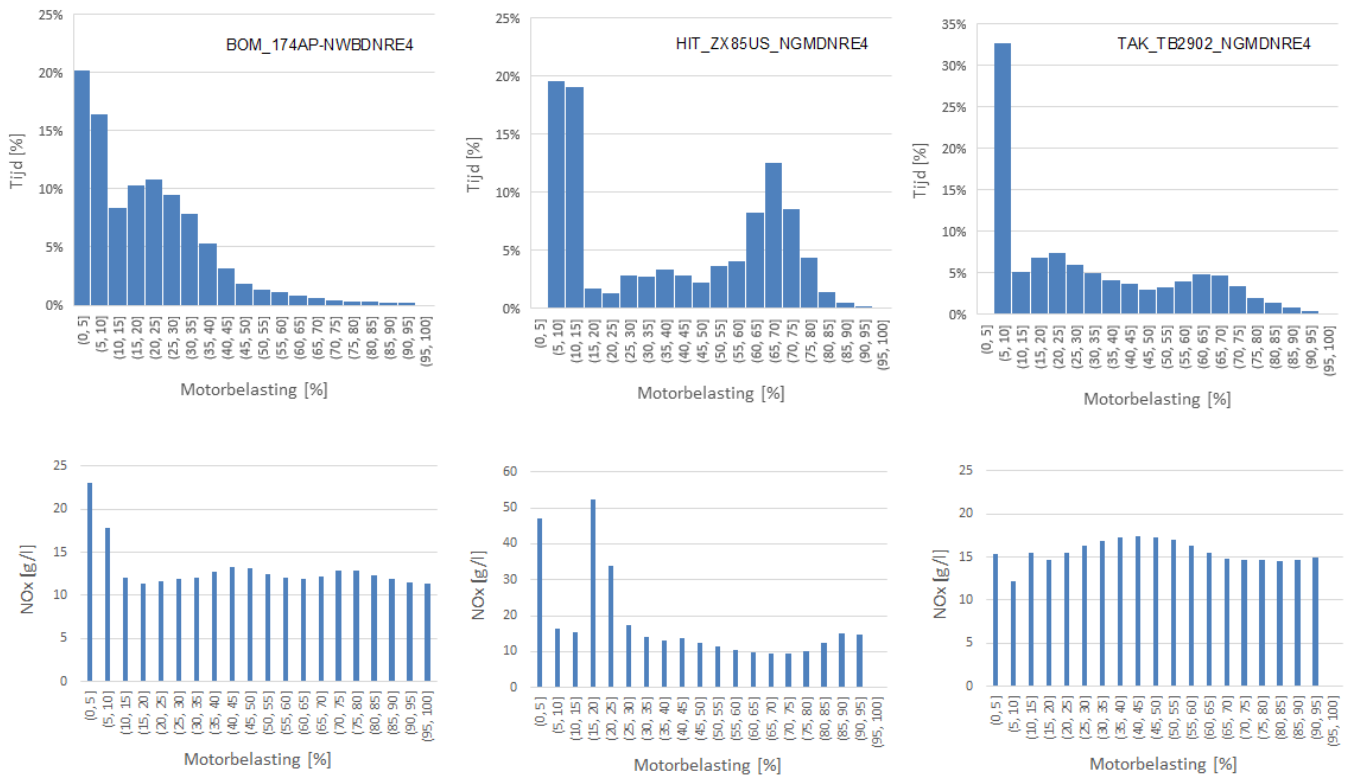
Rondom de 20% motorbelasting is een piek zichtbaar in de NO_x-emissies (maar het aandeel in tijd is daar klein), nadere analyse is nodig om te onderzoeken waar dit vandaan komt, waarschijnlijk hangt het samen met dynamische motorbelasting.

De Stage V machines met een motorvermogen van boven de 56 kW, ingezet op een relatief hoge motorbelasting, hebben daarmee veruit de laagste NO_x emissies. Zowel in gram per kWh, per liter diesel als in gram per uur. De Stage V asfalteer- en graafmachines hebben een grotere motor dan bijvoorbeeld de graafmachines met 42 en 52 kW, de NO_x-emissies zijn – met name vanwege de strengere NO_x-emissielimiet in de hogere vermogensklassen - echter factoren lager.

Stage V machines met een motorvermogen tot 56 kW

De machines onder de 56 kW zitten qua emissieprestaties rond of onder de limietwaarde. De graafmachine met 42 kW presteert beter dan de graafmachine met 52 kW. De gemiddelde motorbelasting van de graafmachine met 42 kW is met 39% ook hoger dan de 30% motorbelasting bij de graafmachine met 52 kW. Beide machines laten een piek zien qua tijd op lage motorbelasting (vermoedelijk stationair draaien), zie Figuur 11. De machine met 42 kW laat echter ook veel inzet zien tussen de 60 en 80% motorbelasting, hier zijn de NO_x-emissies in gram per kWh en in gram per liter brandstof het laagst. Daarentegen zijn er ook inzetgebieden, rond de 25% motorbelasting, waar de emissies relatief hoog zijn, de oorzaak daarvan is niet nader onderzocht in deze studie.

De wals – met een motorvermogen van 55 kW – geeft van de groep machines met een motorvermogen onder de 56 kW de hoogste gemiddelde NO_x-emissies. Deze machine wordt laag belast met een gemiddelde motorbelasting van 20%. De NO_x emissies in gram per kWh en gram per liter brandstof nemen sterk af boven de 10% motorlast. Echter wordt de machine voor een derde van de tijd ingezet op een motorlast tot 10%. Hierdoor is in Tabel 6 het verschil in de gemiddelde emissies, en de emissies boven de 20% motorlast relatief groot.



Figuur 11: Tijdsverdeling en NO_x emissies in gram per liter brandstof per motorbelasting van de wals “BOM_174AP-NWBDNRE4” (links), de graafmachine met 42 kW “HIT_ZX85US_NGMDNRE4” (midden) en de graafmachine met 52 kW “TAK_TB2902_NGMDNRE4” (rechts).

4.3.1.4 NO_x/CO₂ resultaten

Tabel 6 geeft ook de NO_x/CO₂ resultaten. Zoals eerder beschreven is nog een vertaalslag nodig naar massa-emissies. Een grove inschatting van de grammen NO_x per kWh - op basis van de NO_x/CO₂ ratio - kan gemaakt worden door het motorrendement theoretisch te benaderen (al dan niet bij verschillende motorbelastingen). Als voorbeeld: stel dat het motorrendement 740 gCO₂/kWh is bij een gemiddelde inzet van 30% motorbelasting, en de NO_x/CO₂ verhouding 60 is. Dan kan de g/kWh ingeschat worden door: $60/10 \cdot 740/1000 = 4,4$ g/kWh.

Daarnaast is de NO_x/CO₂ verhouding in ppm/% op basis van de molaire massa ook om te rekenen naar gram NO_x per kg CO₂, en naar gram NO_x per liter diesel. De omrekening naar gram NO_x per kg CO₂ kan gedaan worden door de ppm/% verhouding met 0,105 (0,1*46/44) te vermenigvuldigen. De omrekening naar gram per liter diesel kan gedaan worden door de ppm/% verhouding met 0,277 (0,1*2,65*46/44) te vermenigvuldigen.

Desalniettemin zijn ook in de ppm/% eenheid nuttige conclusies te trekken. De rekenmethodiek is zeer eenvoudig doordat alleen de NO_x concentraties gedeeld worden door de CO₂ concentraties en er geen OBD signalen nodig zijn. Het laat echter duidelijk het onderscheid in emissieniveaus zien, onafhankelijk van de motorgroote. Vanwege de eenvoud, en de onafhankelijkheid van OBD-signalen is deze eenheid in potentie een interessante optie voor de toepassing bij de EMPK methodiek.

Tabel 6: SEMS NO_x-emissieresultaten in grammen per kWh, per uur, per liter diesel en NO_x/CO₂. De limietwaarde (NO_x in gram per kWh) volgens de Europese wetgeving is ook weergegeven. De emissietest waarbij deze limietwaarde geldt, wijkt af van de inzet in de praktijk.

| EMPK ID | Type_vermogen_Stage | NO _x [g/kWh] | | | NO _x [g/u] | | NO _x [g/l] | | NO _x /CO ₂ [ppm/%] | |
|---------------------|------------------------------|-------------------------|------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|--|-----------------|
| | | Limiet-waarde | Gemid-deld | >20% motor-last | Gemid-deld | >20% motor-last | Gemid-deld | >20% motor-last | Gemid-deld | >20% motor-last |
| ABI_TM1822_NGWDNRE7 | Heimachine_563_V | 3,5 | 8,0 | 4,8 | 499 | 806 | 36 | 22 | 126 | 74 |
| BOM_174AP-NWBDNRE4 | Wals_55,4_V | 4,7** | 4,8 | 3,9 | 53 | 74 | 15 | 12 | 59 | 44 |
| DYN_SD2500_NWBDNRE5 | Asfalteermachine_129_V | 0,4 | 0,2 | 0,2 | 11 | 10 | 1,1 | 0,9 | 4 | 3 |
| TAK_TB295W_NGMDNRE5 | Graafmachine_85_V | 0,4 | 1,0 | 0,6 | 19 | 18 | 4,6 | 2,0 | 18 | 8 |
| TAK_TB2150_NGMDNRE5 | Graafmachine_85_V | 0,4 | 0,2 | 0,2 | 7,0 | 8,2 | 0,8 | 0,7 | 3 | 3 |
| ABI_TM2025_NGWDPRES | Heimachine_570_not regulated | - | 9,7* | 8,1* | 486 | 1098 | 32 | 28 | 120 | 105 |
| HIT_ZX85US_NGMDNRE4 | Graafmachine_42,4_V | 4,7** | 3,4* | 3,1* | 56 | 76 | 14 | 13 | 52 | 47 |
| TAK_TB2902_NGMDNRE4 | Graafmachine_51,6_V | 4,7** | 4,6* | 4,4* | 71 | 101 | 15 | 16 | 55 | 59 |

* kWh is ingeschat op basis van het brandstofverbruik

** De emissielimiet voor deze categorie geldt voor NO_x + HC.

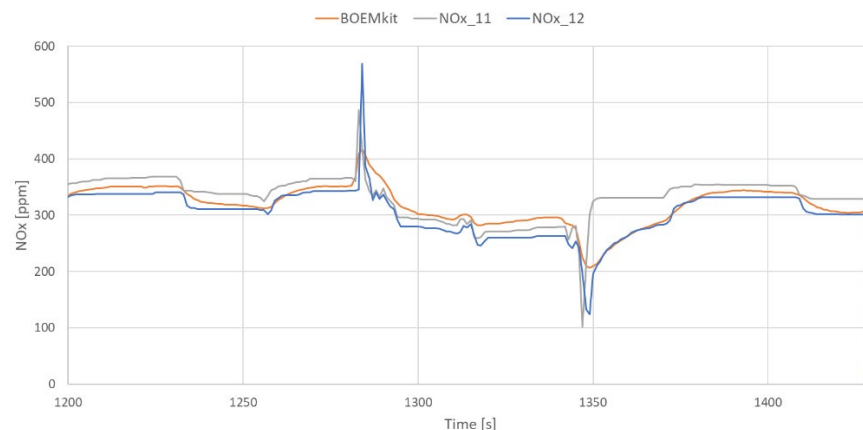
De detailemissieresultaten per machine zijn terug te vinden in Bijlage C. Daar zijn per machine de motorspecificaties, de totale NO_x- en CO₂-emissies, de NO_x emissies als functie van de motorbelasting, en het inzetprofiel terug te vinden. In Hoofdstuk 6 wordt de impact van de metingen op de Nederlandse emissiefactoren toegelicht, daar worden de NO_x-emissies en de bijbehorende motorbelastingen ook nader toegelicht.

4.3.2 Emissieresultaten vanuit LCL monitoringsdata

4.3.2.1 Vergelijkende metingen

Zoals beschreven in de paragraaf 4.2.5 hadden slechts twee van de vijf machines waarin een LCL-dongle geïnstalleerd was een NO_x-signaal op de OBD. Voor de Stage V Laadschop met een 203 kW motor zijn tijdens de LCL-installatie de OBD-NO_x-concentraties vergeleken met de NO_x-concentraties zoals gemeten met de BOEMkit meetapparatuur. Deze meting is eenvoudig en relatief snel uit te voeren al duurt het wel 900 tot 1500 seconden na start van de machine voordat beide OBD-NO_x signalen beschikbaar zijn. Figuur 12 geeft de vergelijkende metingen weer. Naar verwachting is het "NO_{x_11}" signaal afkomstig van de voor de SCR-katalysator (upstream) en het "NO_{x_12}" signaal van na de katalysator (downstream). De motor was aan het begin van de meting nog koud en is tijdens de meting nauwelijks belast.

Hierdoor had de SCR katalysator nog niet de bedrijfstemperatuur bereikt, wat ook niet het doel van de meting was. Het doel van de meting was primair om de OBD-NO_x concentraties met de BOEMkit-concentraties te vergelijken. Conclusie is dat de OBD-NO_x concentraties grotendeels vergelijkbaar zijn met elkaar en ook met de gemeten BOEMkit concentraties. Tijdens de pieken (optoeren) en dalen (aftoeren) geeft de BOEMKit een wat vlakker lijn. De dip in de met de BOEMkit gemeten concentratie rond 1450 s geeft het einde van de meting aan.



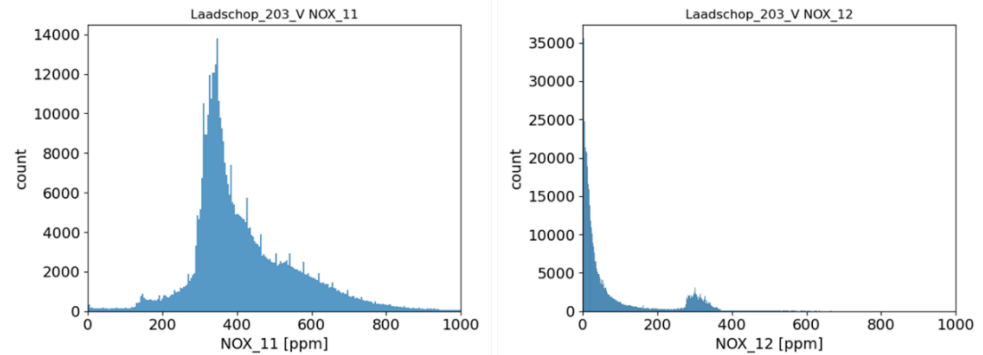
Figuur 12: Vergelijking NO_x-concentraties gemeten met de BOEMkit en via OBD-NO_x signalen.

4.3.2.2 *Emissieresultaten vanuit monitoringsdata*

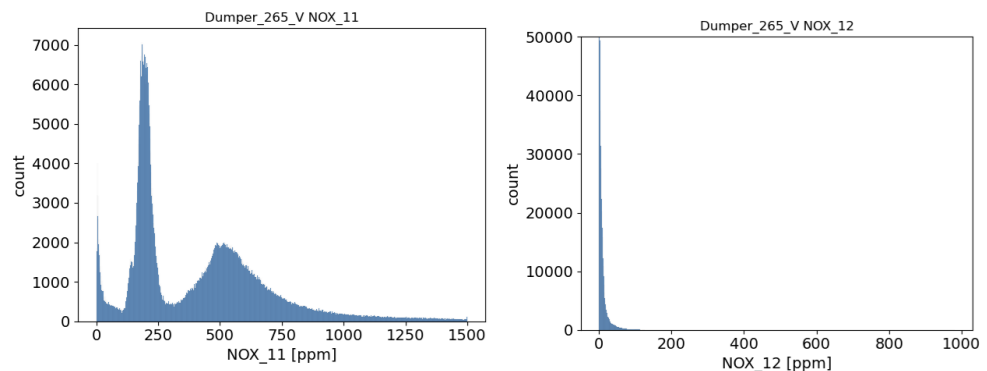
Naast de vergelijkende metingen zijn de machines ook langdurig gemonitord. Zoals beschreven in de paragraaf 4.2.5 hadden de machines geen zuurstofsignaal beschikbaar om de CO₂-concentraties te berekenen. Daarom zijn in eerste instantie de NO_x-concentraties geanalyseerd. Tijdens de monitoringsperiode hebben de NO_x-sensoren van de Laadschop in totaal 960 uur aan data gegenereerd. De gemiddelde NO_x-concentraties over de gehele periode waren voor NO_{x_11} en NO_{x_12} respectievelijk 370 en 64 ppm. Figuur 13 geeft beide NO_x-signalen in meer detail weer. De linker figuur (NO_{x_11} (upstream)) geeft duidelijk hogere NO_x-concentraties dan de rechter figuur (NO_{x_12} (downstream)), het verschil is de NO_x reductie door de SCR-katalysator. Bij NO_{x_11} ligt de piek van de data in de buurt van de gemiddelde waarde van 370 ppm. Bij NO_{x_12} ligt de gemiddelde waarde van 64 ppm tussen de twee pieken in. De tweede 'piek' bevat data met waarden boven de 300 ppm, waarschijnlijk is dat data waarbij de SCR-katalysator nog niet op bedrijfstemperatuur is. De eerste piek geeft NO_x-concentraties die grotendeels onder de 50 ppm zijn. Dergelijke waarden zijn te verwachten bij een goedwerkende SCR-katalysator. De NO_{x_12} sensor geeft echter ook vaak NO_x-concentraties van "0" aan (187 uur), zoals beschreven in 4.2.5. is nadere analyse nodig om te bepalen tot in welke mate dit default-waarden van de sensor zijn. Indien de waarde "0" wordt verwijderd uit de data, is gaat de gemiddelde NO_x-concentratie van 64 naar 79 ppm.

Figuur 14 geeft dezelfde figuren weer voor de Stage V Dumper met 265 kW. Voor deze machine is 370 uur aan data beschikbaar, hiervan is 93 uur niet bruikbaar vanwege default-waarden. De Dumper laat fors lagere OBD NO_x (NO_{x12}) waarden zien dan de Laadschop (downstream). Het gemiddelde is 6 ppm. Ook voor deze machine komt de waarde van 0 ppm veel voor, indien deze verwijderd wordt, gaat de gemiddelde waarde naar 9 ppm.

Omdat de NO_x-sensoren vaak pas na 15 tot 25 minuten actief zijn, zullen de gemiddelde concentraties van NO_{x_12} in de praktijk hoger zijn (omdat de SCR-katalysator in die periode mogelijk nog niet op bedrijfstemperatuur is).



Figuur 13: NO_x-concentraties van NO_{x_11} (upstream)(links) en NO_{x_12} (post cat)(downstream) van de Laadschop, volgens fabriek-af aanwezige NO_x-sensoren (OBD-NO_x).



Figuur 14: NO_x-concentraties van NO_{x_11} (upstream)(links) en NO_{x_12} (post cat)(downstream) van de Dumper, volgens fabriek-af aanwezige NO_x-sensoren (OBD-NO_x).

Bij gebrek aan gegevens om de motorbelasting of CO₂-concentraties direct af te leiden, kan het brandstofverbruik signaal toegepast worden om de mate van motorlast te bepalen. Het brandstofverbruik kan naar motorvermogen worden omgerekend door een aanname te doen over het motorrendement. Grofweg kan gesteld worden dat 1 liter dieselverbruik gelijk staat aan 3 tot 4 kWh (bij lage motorlast zal de arbeid in kWh minder zijn). Dat betekent dat bij een motorvermogen van 203 kW een maximum brandstofverbruik van ca. 50 liter per uur verwacht kan worden. Figuur 15 laat de inzet (links) en NO_x-concentraties (rechts) als functie van het brandstofverbruik zien voor de Laadschop. Figuur 15 laat zien dat het maximale brandstofverbruik tijdens de meetperiode rond de 50 liter per uur ligt. Dat is echter maar een klein deel van de tijd, het grootste gedeelte van de inzet vindt plaats op lagere motorbelasting. Het gemiddelde brandstofverbruik over de gehele monitoringsperiode is 15,7 liter per uur. Dan komt voor deze machine grofweg neer op een gemiddelde motorbelasting van ca. 30%.

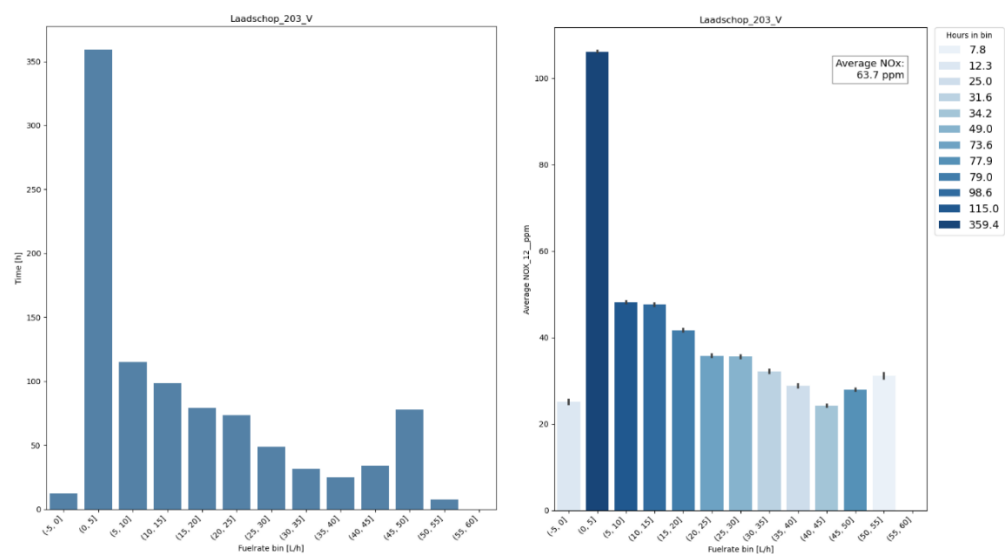
Figuur 15 laat de hoogste NO_x-concentraties (rechterfiguur) zien bij het brandstofverbruik tot 5 liter per uur, hier vindt ook het grootste deel van de inzet plaats.

Dit betreft voor een groot deel stationair draaien en inzet op lage motorlast. Bij een hoger brandstofverbruik gaan de NO_x-concentraties omlaag (de SCR is daar doorgaans op bedrijfstemperatuur).

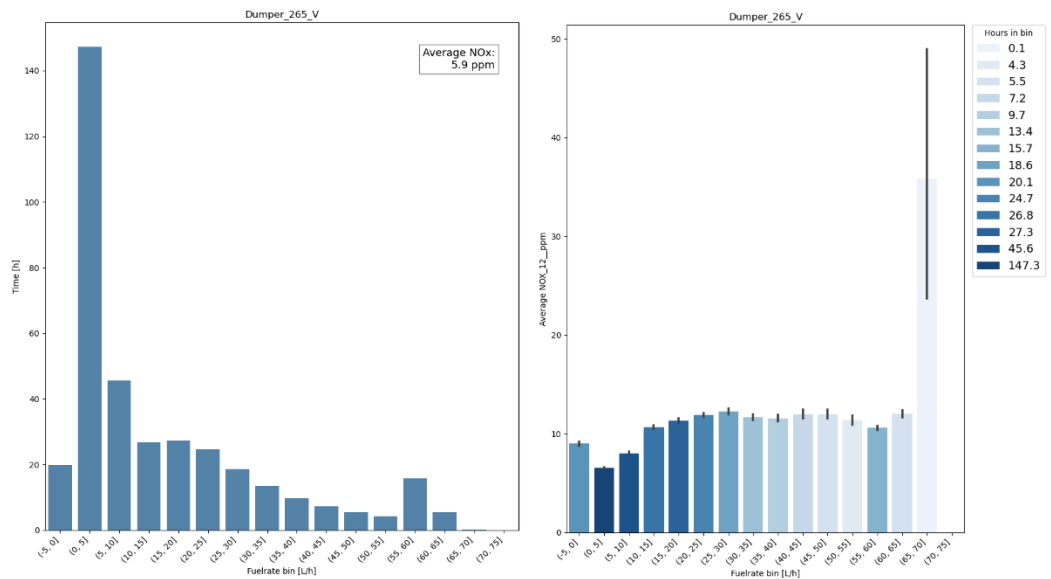
Afgaande op meetdata van andere machines ligt het CO₂ percentage tussen de 5 en 7% bij een motorlast van 25 tot 30%. Uitgaande van een gemiddelde NO_x-concentratie van 65 ppm en een CO₂-concentratie van 6%, is de NO_x/CO₂ verhouding ca. 11 ppm/%. Deze waarde ligt in de buurt van de gemeten Stage V machines met SCR-katalysator zoals gemeten met SEMS (zie Tabel 6). Uitgaande van een vast motorrendement is daarmee een grove inschatting dat de gemiddelde NO_x emissies ca. 0,8 g/kWh zijn.

Figuur 16 laat de inzet (links) en NO_x-concentraties (rechts) als functie van het brandstofverbruik zien voor de Dumper. Net als bij de Laadschop vindt bij de Dumper het grootste gedeelte van de inzet plaats op lagere motorbelasting. Het gemiddelde brandstofverbruik over de gehele monitoringsperiode is 14,6 liter per uur. Dan komt voor deze machine grofweg neer op een gemiddelde motorbelasting van ca. 20%. De NO_x-concentraties bij de lage last zijn bij de Dumper lager dan bij hogere motorbelasting. Ondanks de lagere motorbelasting ten opzichte van de Laadschop, zijn de gemiddelde NO_x-concentraties bij de Dumper lager. Sommige motoren kunnen een luchtoverschot hebben van een factor tien bij lage last. Daardoor kunnen de concentratiewaarden sterk verschillen zonder grote verschillen in absolute uitstoot. Vanwege deze afwijkende profielen wordt een validatie met externe NO_x-sensoren aanbevolen.

Door de data op deze manier te beoordelen kunnen de emissieprestaties over de gehele vermogensrange worden beoordeeld. De monitoringsdata laat bovendien duidelijk zien dat de SCR-katalysator werkt, en bijvoorbeeld niet gemanipuleerd is. Vanwege het ontbreken van een grote hoeveelheid sensor-data, en het ontbreken van een zuurstofsignaal, kan het emissieprofiel met deze monitoring niet volledig in kaart worden gebracht. Bijvoorbeeld emissieprestaties bij koude start ontbreken. Totale emissies kunnen daardoor ook niet goed berekend worden.



Figuur 15: Inzet (uren) per brandstofbin (links) en NO_x-concentraties (OBD-NO_x) per brandstof-bin van NO_x_12 (post cat) (rechts).



Figuur 16: Inzet (uren) per brandstofbin (links) en NO_x-concentraties (OBD-NO_x) per brandstof-bin van NO_{x_12} (post cat) (rechts).

4.3.3 Inzetmonitoring vanuit LCL monitoringsdata

Naast de monitoring van emissies bevat de beoogde EMPK-methodiek ook inzetmonitoring. Dit bestaat o.a. uit de monitoring draaiuren en (waar mogelijk) de motorbelasting en het brandstofverbruik. Deze data is in deze studie verzameld met behulp van SEMS en de LCL dongle. De totale draaiuren, totale brandstofverbruiken en motorbelastingen zijn weergegeven in paragraaf 4.3.1. In deze paragraaf worden de LCL-inzetmonitoringsdata verder toegelicht.

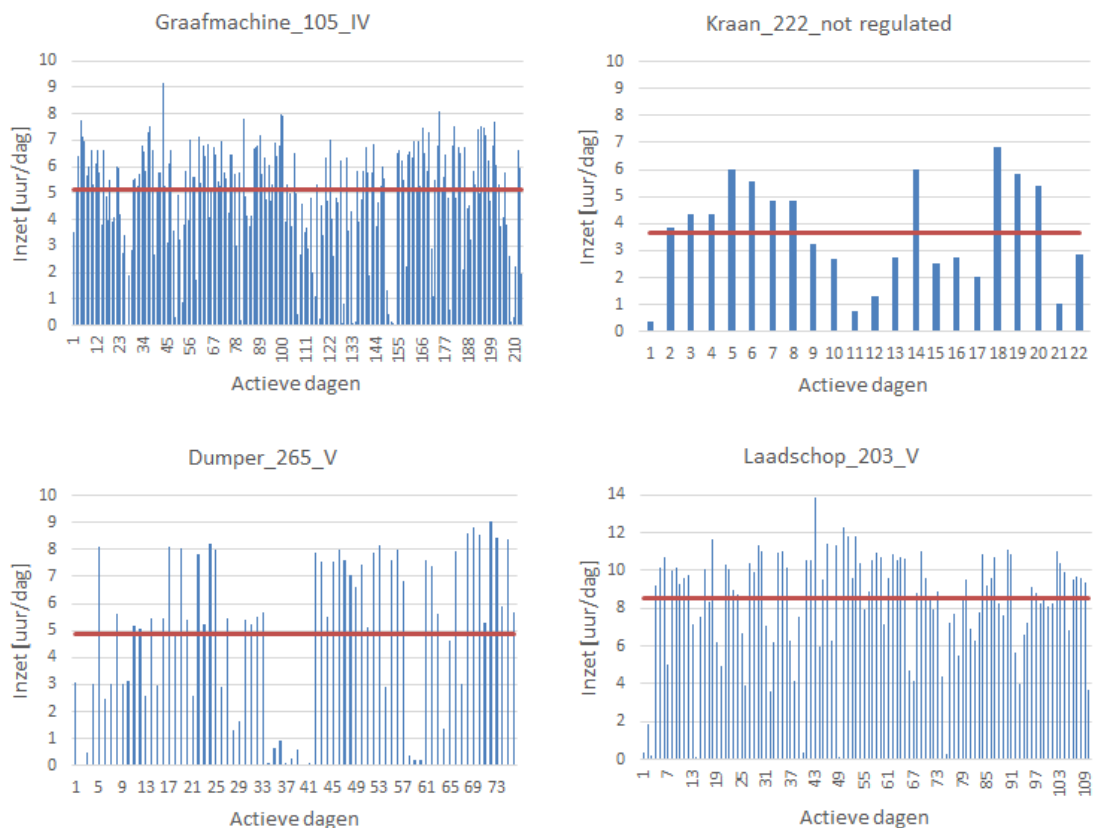
Tabel 7 geeft de machines weer die zijn gemonitord middels de LCL-dongle. De tabel bevat de totale draaiuren, ingezette dagen, de gemonitorde periode en het totale brandstofverbruik. Bij de meeste machines zijn zowel de draaiuren als het brandstofverbruik gemonitord. De kraan met 222 kW had geen OBD-aansluiting, daarom zijn voor deze machine alleen de draaiuren gemonitord door de LCL-dongle aan te sluiten op de (geschakelde) voeding van de machine. De graafmachine had wel een OBD-aansluiting, binnen de beschikbare tijd was het echter niet mogelijk om het brandstofsysteem te verkrijgen, deze machine beperkt zich daarom ook tot urenmonitoring.

Tabel 7: Overzicht inzetmonitoring mobiele werktuigen met de LCL-dongle.

| EMPK ID | Type_vermogen_Stage | Draaiuren tijdens monitoring | Actieve inzet [dagen] | Totale meetperiode [dagen] | Brandstofverbruik [liter] |
|---------------------|-------------------------|------------------------------|-----------------------|----------------------------|---------------------------|
| HIT_ZX140W_NGMDST4R | Graafmachine_105_IV | 1088 | 213 | 323 | Niet beschikbaar |
| SEN_6100_NGWDPRES | Kraan_222_not regulated | 80 | 23 | 76 | Niet beschikbaar |
| VOL_A30G_NDPDNRE6 | Dumper_265_V | 372 | 76 | 195 | 5.439 |
| VOL_L120H_NLSDNRE6 | Laadschop_203_V | 964 | 110 | 188 | 15.075 |
| MER_ROT040_NVHDNRE5 | Verreiker_125_V | 238 | - | 57 | 1.024 |

4.3.3.1 Inzet: uren per dag

Figuur 17 geeft van vier machines de uren inzet per dag weer tijdens actieve dagen, de rode lijn is het gemiddelde aantal uur per dag over de gehele periode. Van de Verreiker _125_V is vanwege een technische storing aan de apparatuur geen goede urenmonitoring beschikbaar over actieve dagen. De meeste machines worden 4 á 5 uur per dag ingezet (gemiddelde over actieve dagen). De machines die waren gemonitord met SEMS waren vergelijkbaar qua inzet per dag (gemiddeld 4 tot 5 uur). Figuur 17 laat zien dat er veel spreiding is over de dagen. Het figuur laat ook zien dat de Laadschop_203_V een gemiddelde inzet heeft van ruim 8 uur per dag. Maar ook bij deze machine is er veel spreiding over de dagen, van 4 uur per dag, tot een uitschieter naar 14 uur per dag. De Dumper_265_V zit meestal tussen de 3 en 8 uur per dag. Er zijn ook dagen bij met minder dan een uur inzet, het is niet bekend of de machine die dagen daadwerkelijk op de bouwplaats aan het werk is (zou bijvoorbeeld ook onderhoud kunnen zijn, of verplaatst van de machine). Als die betreffende dagen uit het gemiddelde worden gehaald, is de gemiddelde inzet zes uur per dag.



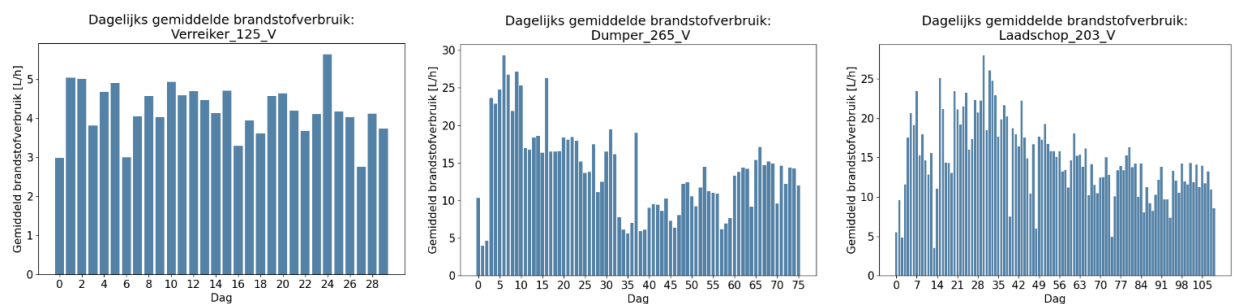
Figuur 17: Uren inzet tijdens actieve dagen. De rode lijn is het gemiddelde aantal uur per dag over de gehele periode van actieve dagen.

4.3.3.2 Inzet: brandstofverbruik en motorbelasting

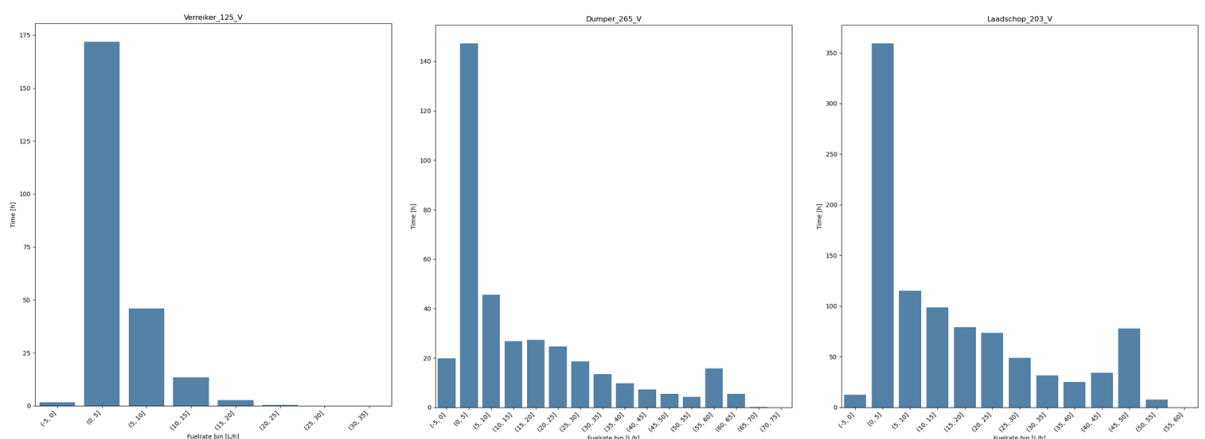
Figuur 18 geeft het gemiddelde brandstofverbruik per dag van de Verreiker, Dumper en Laadschop, de drie machines waarbij brandstofverbruik gemonitord kon worden. Het gemiddelde brandstofverbruik is respectievelijk 4,3, 14,6 en 15,7 liter per uur. Samen met de uren per dag, kan hiermee ook het totale brandstofverbruik per dag berekend worden. De variatie in het gemiddelde brandstofverbruik verschilt per gemonitorde machine, maar is het algemeen groot.

Met name de dumper laat grote verschillen zien. De dagen met het laagste brandstofverbruik zijn mogelijk niet representatief voor de inzet, omdat op deze dagen de inzet minder dan een uur is (waarvan niet zeker is of dit bouwwerkzaamheden zijn, zie ook vorige paragraaf). Maar ook zonder deze laagste waarden kan er ruim een factor twee in gemiddeld brandstofverbruik voorkomen, dit geldt ook voor de Laadschop_203_V.

Op basis van het gemiddelde brandstofverbruik per machine, in combinatie met het maximale motorvermogen kan een grove inschatting gemaakt worden van de gemiddelde motorbelasting (ervan uitgaande dat 1 liter dieselverbruik gelijk staat aan 3 tot 4 kWh, zie vorige paragraaf). De Verreiker komt daarmee op een gemiddelde motorbelasting van ca. 13%, de Dumper op 20% en de Laadschop op ca. 30%. Figuur 19 laat de uren per brandstofverbruik zien, het brandstofverbruik is een goede maat voor de motorbelasting. Hierin valt op dat alle machines veel worden ingezet bij een verbruik tot 5 liter per uur. Alle drie de machines laten daarmee veel inzet zien op een lage motorbelasting, inclusief stationair draaien. Met name voor machines met een SCR is inzet op een te lage motorbelasting ongunstig voor de NO_x-emissies.



Figuur 18: Gemiddeld brandstofverbruik tijdens actieve dagen.



Figuur 19: Inzet (uren) per brandstof-bin.

De inzetmonitoring is goed mogelijk met behulp van de LCL-dongle, al is het brandstofverbruik niet bij elke machine direct toegankelijk. De inzetmonitoring laat duidelijk zien dat er sterke verschillen zijn per dag, zowel qua uren als qua brandstofverbruik.

De monitoring laat daarnaast ook zien dat de machines in het algemeen veel op een lage motorbelasting worden ingezet, waarbij stationair draaien ook veel voorkomt.

4.3.4 Kortdurende metingen NO_x

Naast de monitoringsdata zijn bij een 20-tal machines kortdurende metingen uitgevoerd met de BOEMkit. Deze varieerden per meting van ca. 5 minuten tot aan meerdere uren, zie onderstaande Tabel 8 voor de tijdsduur van de meting per machine. De meettijd varieerde vanwege het doel van de meting en de mogelijkheden ter plaatse met de machine. Aan de 'Dumper_265_V' en 'Laadschop_203_V' zijn hele korte metingen uitgevoerd, deze waren bedoeld ter validatie van de OBD-NO_x-sensoren (zie vorige paragraaf). Er was met deze machines ter plaatse ook geen mogelijkheid voor een uitgebreider testprogramma. De resultaten van deze kortdurende meting zijn daarom niet opgenomen in deze paragraaf. Daarentegen was bijvoorbeeld de 'Genset_48_IIIA' gehuurd ten behoeve van het meetprogramma. Hierdoor was er genoeg tijd voor het uitvoeren van uitgebreidere metingen. In sommige gevallen was de te meten machine in gebruik, waardoor er slechts kort gemeten kon worden.

Tabel 8: Tijdsduur kortstondige NO_x-emissiemetingen.

| EMPK ID | Type_vermogen_Stage | EMPK-kleur & MVI-level* | Tijd gemeten [minuten] |
|------------------------|---|-------------------------|------------------------|
| BR196701_NSTDNRE6 | Genset_249_V | 3 | 70 |
| ATL_XAS188_NSTDNRE5 | Mobiele compressor_104_V | 3 | 68 |
| VÖG_SUPER_NWBST4Q | Asfalteermachine_142_IV | 3 | 12 ** |
| MER_ROT040_NVHDNRE5 | Verreiker_125_V | 3 | 4 ** |
| CAT_M318F_NGMD53BM | Graafmachine_129,4_IIIB | 2 | 26 |
| DYN_SD2500_NWBDS3BM | Asfalteermachine_129_IIIB | 2 | 19 |
| IMP_ORIENT_07_NSTDNRE2 | Genset_5,5_V | 1 | 14 |
| IMP_ORIENT_08_NSTDNRE2 | Genset_5,5_V | 1 | 13 |
| WAN_DPU655_NHHDNRE2 | Trilplaat_9,6_V | 1 | 14 |
| JLG_660SJ_NKRDTIER4 | Hoogwerker_36,4_Tier 4 | 1 | 79 |
| FPT_NEF67T_NSTDS3AI | Genset_115_IIIA | 1 | 9 |
| WIT_JD060C_NSTDS3AJ | Genset_48_IIIA | 1 | 265 |
| HIT_FH220L_NGWDPRES | Voorboorinstallatie_114_not regulated ¹¹ | - | 12 |
| TOW_SUPER_NSTDPRES | Lichtmast_8_not regulated | - | 64 |
| KUB_KX41-3_NGMDPRES | Graafmachine_11,8_not regulated | - | 5 |
| MUL_RB-9_NSTDST2G | Betonmixer_71,7_II | - | 36 |
| SEN_6100_NGWDPRES | Kraan_222_not regulated | - | 5 |
| WOL_THW752_NGWDPRES | Funderingsmachine_560_not regulated | - | 33 |

* Zie Hoofdstuk 2, paragraaf 2.2 voor toelichting kleurcode en MVI-niveau.

** Tijdens de metingen was er geen mogelijkheid om de machine hoog te belasten voor een langere tijd, de SCR-katalysator is bij deze machines daarom niet op temperatuur gekomen.

¹¹ 'Not regulated' betekent dat er voor deze vermogensklasse tijdens het productiejaar van de motor geen emissielimiet gold.

De kortstondige metingen zijn uitgevoerd met de zogenaamde BOEMKit apparatuur, zie paragraaf 3.2.2.1 voor toelichting op deze meetapparatuur. Tijdens de metingen is geen connectie met de OBD-signalen van de machines gemaakt. Om de emissieprestaties te beoordelen is de NO_x/CO_2 (ppm/%) verhouding bepaald. Figuur 20 geeft de NO_x/CO_2 verhouding weer voor de gemeten machines. De NO_x/CO_2 verhouding wordt op de y-as weergegeven, en het CO_2 percentage wordt op de x-as weergegeven. Het CO_2 percentage dient hierbij als maat voor de motorbelasting. In het algemeen geldt dat een hogere motorbelasting een hoger CO_2 percentage geeft. Op deze manier kunnen de emissieprestaties beoordeeld worden over de vermogensrange. Bij de vergelijking tussen verschillende motoren heeft EGR (uitlaatgasrecirculatie) echter wel invloed op de positie op de x-as, omdat deze zorgen voor andere CO_2 percentages, bij dezelfde motorbelasting en motorsnelheid, voor de NO_x/CO_2 verhouding (y-as), is dit geen probleem.

Emissieprestaties Stage IV en V machines >56 kW; "paars"

Figuur 20 toont duidelijk dat de 'Genset_249_V' en de 'Mobiele compressor_104_V' de laagste NO_x/CO_2 waarden laten zien. In de meeste gevallen zijn de gemiddelde waarden ruim onder de 25 ppm/% (25 ppm/% komt bij 30% motorbelasting neer op ca. 1,8 g/kWh). De metingen bevatten ook data waarbij de SCR-katalysator nog niet op bedrijfstemperatuur was, dit haalt de gemiddelde waarde soms wat omhoog.

De asfalteermachine en de verreiker laten gemiddelde waarden zien tussen de 40 en 100 ppm/%. Dit is waarschijnlijk veroorzaakt door de korte meting in combinatie met een lage motorbelasting waarbij de gewenste bedrijfstemperatuur van de SCR-katalysator niet werd bereikt.

Emissieprestaties Stage IIIA en V machines <37 kW; "groen"

De trilplaat en de genset_5,5 zijn Stage V machines met een motorvermogen onder de 19 kW waarvoor de NO_x -emissielimieten niet streng zijn. De gemiddelde gemeten emissieniveaus zitten tussen de 50 en 75 ppm/%, wat bij een lage motorlast (10-15%) grofweg neerkomt op een NO_x -emissieniveau van tussen de 4 en 7 g/kWh.

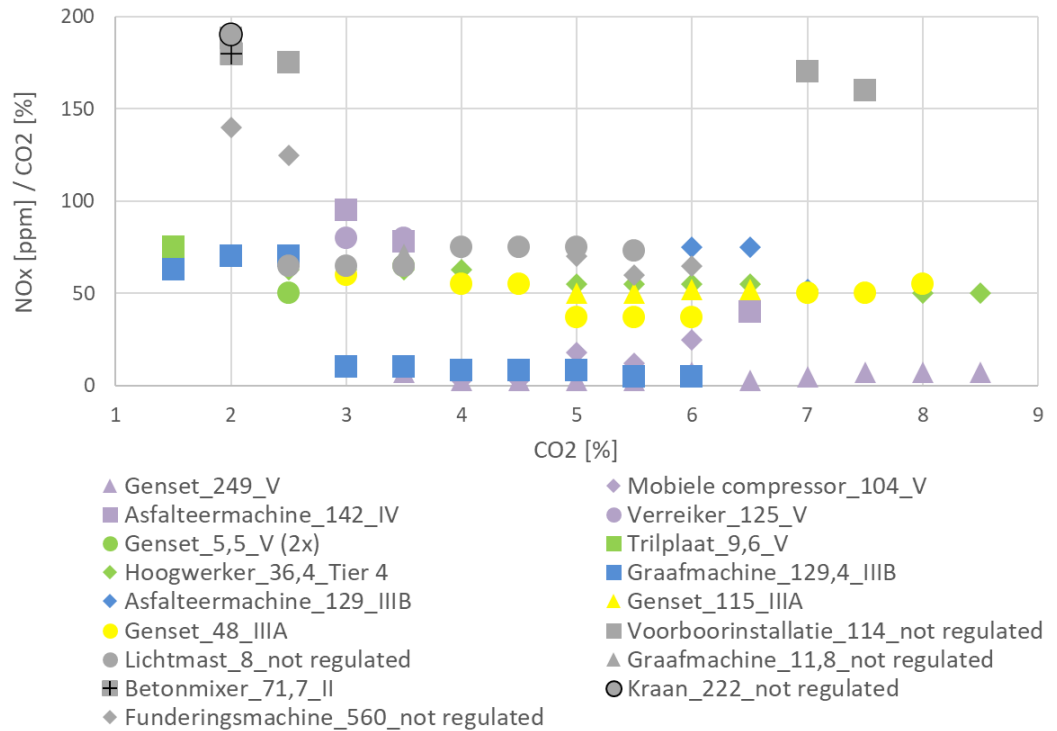
Emissieprestaties Stage IIIA en IIIB machines >37 kW; "blauw en geel"

Figuur 20 laat voor de Stage IIIA machines, en de Stage IIIB asfalteermachines gemiddelde waarden zien van tussen de 40 en 75 ppm/%, vergelijkbaar met de kleinere Stage V machines. Bij een motorbelasting van 30% komt dit neer op een emissieniveau van grofweg 3 tot 5,5 g/kWh. Opvallend is dat de Stage IIIB graafmachine bij hogere motorlast fors lagere emissies laat zien dan bij lagere motorlast en ook in vergelijking met de andere Stage IIIB machine met hetzelfde motorvermogen. De NO_x -emissielimieten voor Stage IIIB machines boven de 130 kW zijn strenger (2 g/kWh) dan voor onder de 130 kW (3,3 g/kWh). De graafmachine heeft echter wel een SCR-katalysator, die ook goed lijkt te werken na opwarming bij een hogere motorlast.

Emissieprestaties Stage II en lager

Figuur 20 laat in het algemeen de hoogste gemiddelde waarden zien voor de Stage II en lagere machines. De variatie is echter groot van, met gemiddelde waarden van 60 ppm/% tot aan bijna 200 ppm/%.

Door de meetresultaten te beoordelen op basis van de gemiddelde NO_x/CO_2 waarden, als functie van het CO_2 percentage, lijkt het goed mogelijk om schone, middelmatige en vervuilde machines van elkaar te onderscheiden. Voor machines met een SCR-katalysator moet deze dan wel op bedrijfstemperatuur zijn. Om de SCR-katalysator op bedrijfstemperatuur te laten komen is voldoende tijd nodig, en de mogelijkheid om de motor van de machine voldoende te belasten.



Figuur 20: Gemiddelde emissieresultaten kortdurende metingen. De kleuren geven reflecteren de EMPK-categorie, zie paragraaf 2.2. voor toelichting. De NO_x -emissies zijn weergegeven in $\text{NO}_x[\text{ppm}]/\text{CO}_2[\%]$. Tijdens de metingen was er geen mogelijkheid om de 'paarse' asfalteermachine (Stage IV) en verreiker (Stage V) hoog te belasten voor een langere tijd, de SCR-katalysator is bij deze machines daarom niet op temperatuur gekomen.

4.3.5 Kortdurende metingen deeltjesaantallen

Voor diverse machines zijn deeltjesaantallen metingen uitgevoerd. De test is uitgevoerd op de manier zoals die per januari 2023 is ingevoerd voor dieselauto's door te meten bij stationair toerental. Deze test is met name bedoeld om de effectiviteit van het roetfilter te bepalen. In de ingevoerde APK roetfiltertest dient het deeltjesaantal onder de 1.000.000 te blijven. Personenauto's met een goedwerkend roetfilter laten normaliter waarden zien voor de deeltjesaantallen van ruimschoots onder de 250.000.

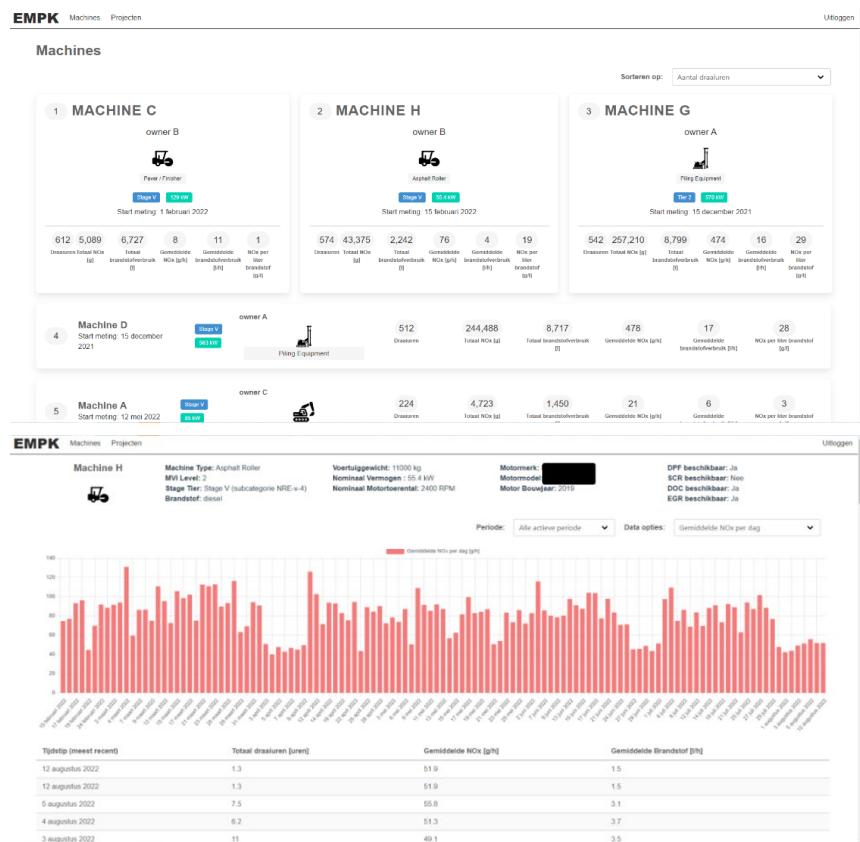
De onderstaande Tabel 9 geeft de resultaten van deeltjesaantallen metingen aan mobiele werktuigen. De deeltjesaantallen staan weergegeven in aantal per cm^3 ($\#/ \text{cm}^3$). Diverse metingen zijn uitgevoerd aan machines zonder roetfilter. De meetapparatuur schiet dan vrijwel direct naar een waarde van boven de 5 miljoen deeltjes, dat is buiten het meetbereik van de apparatuur. Voor de machines met roetfilter zijn er vrij grote verschillen bij koude en warme motor. De waarden blijven allemaal onder de afkeurlimiet voor personenauto's, maar er is wel veel variatie.

Tabel 9: Deeltjesaantallen test bij stationair toerental in $\#/cm^3$.

| Machine ID | Gemiddelde deeltjesaantallen [$\#/cm^3$] bij stationair toerental | |
|------------------------|---|--------------|
| | Koude motor | Warme motor |
| ATL_XAS188_01_NSTDNRE5 | 423.400 | 9.000 |
| MER_ROTO40_01_NVHDNRE5 | Out of range | - |
| TAK_TB2150_02_NGMDNRE5 | - | 9.000 |
| TAK_TB295W_04_NGMDNRE5 | 104.220 | - |
| TOW_SUPER_05_NSTDS3AX | Out of range | Out of range |
| VOL_L120H_01_NLSDNRE6 | | 4.700 |
| WIT_JD060C_04_NSTDS3AJ | Out of range | Out of range |
| JLG_660SJ__NKRD TIER4 | Out of range | Out of range |

4.4 Omschrijving en illustratie website

De demo website is ontwikkeld om data te presenteren welke relevant is in het kader van het EMPK concept. Bedrijven die meedoen aan de pilot hebben via een login procedure toegang tot de website. Positieve feedback is ontvangen, maar tegelijkertijd is er ook interesse voor nog meer detaildata, zoals de NO_x emissies als functie van de motorbelasting.

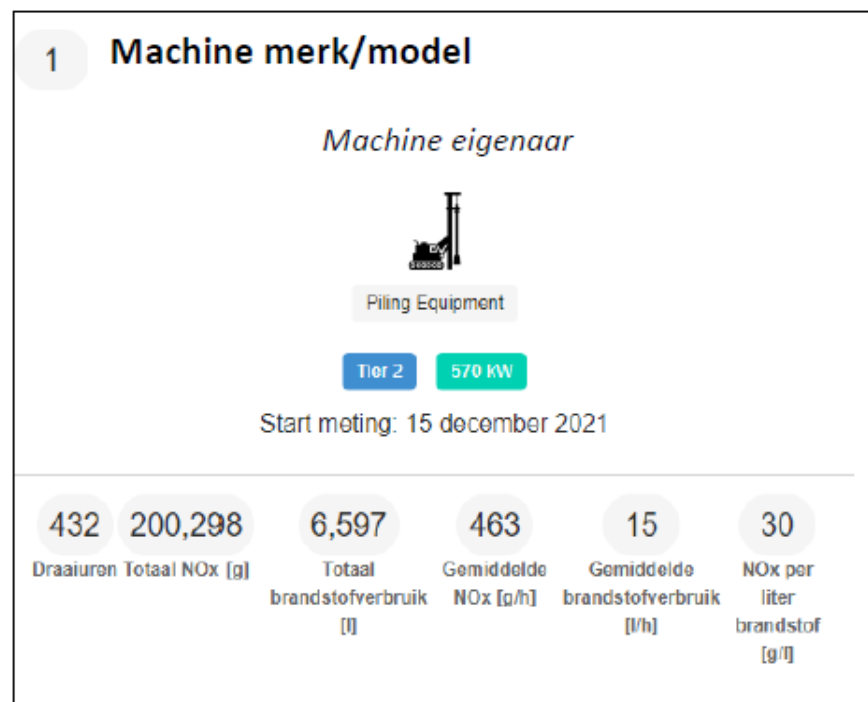


Figuur 21: Twee EMPK website screen shots. In de eerste weergave staat een overzicht van de verschillende machines en bijhorende specificaties en emissies. De tweede weergave is een detailweergave van een geselecteerde machine waarbij voor elke dag de draaiuren, het gemiddelde brandstofverbruik en de gemiddelde emissies zichtbaar zijn

Zoals in Figuur 21 te zien is, toont de EMPK website een overzicht van machines waaraan metingen zijn-, of nog worden verricht met een emissie-monitorings-systeem (SEMS). De gebruiker kan de machines sorteren op o.a. het aantal draaiuren, totale NO_x uitstoot en het gemiddelde brandstofverbruik.

Bij Figuur 22 is ingezoomd op een machine uit de overzichtspagina. De volgende parameters worden hier weergegeven:

- **Tier 2** geeft aan wat de emissieklasse van de machine is.
- **570 kW** geeft aan wat het motorvermogen van de machine is.
- **Draaiuren**: dit betreft het aantal uur verzamelde meetdata vanaf het moment dat het emissiemeetsysteem geïnstalleerd is.
- **Totaal NO_x [g]**: het totaal aantal gram NO_x dat gedurende de metingen is uitgestoten.
- **Totaal brandstofverbruik [l]***: het totaal aantal liter brandstof dat gedurende de metingen is verbruikt.
- **Gemiddelde NO_x [g/h]**: het totaal aantal gram NO_x gedeeld door het totaal aantal draaiuren gedurende de meetperiode.
- **Gemiddelde brandstofverbruik [l/h]**: het totaal aantal liter brandstof gedeeld door het totaal aantal draaiuren gedurende de meetperiode.
- **NO_x per liter brandstof [g/l]**: het totaal aantal gram NO_x gedeeld door het totaal aantal draaiuren gedurende de metingen. Dit getal maakt het mogelijk om de uitstoot te vergelijken met andere machines, ongeacht het motorvermogen.



Figuur 22: Ingezoomde voorbeeldweergave van de geaggregeerde meetdata van een machine op de EMPK demowebsite.

5 EMPK resultaten werkschepen

In het EMPK-project zijn ook twee vaartuigen meegenomen die bouwwerkzaamheden verrichten. Deze vaartuigen vallen onder de binnenvaartwetgeving, maar zijn wel gerelateerd aan de bouwsector. De schepen beschikken over meerdere motoren. Zo zijn er bijvoorbeeld motoren aan boord voor de voortstuwing en voor de bediening van kranen of pompen maar ook als onderdeel van generatorsets.

5.1 Overzicht gemeten vaartuigen

Tabel 10 geeft een overzicht van de motoren die onderdeel zijn van het EMPK-project. Op twee DAF motoren (schip 1) is een LCL-dongle geïnstalleerd, dit zijn Euro VI motoren die ook in het wegverkeer worden toegepast. De dongle is gekoppeld aan het OBD-systeem en aan de reeds aanwezige NO_x-sensoren. Daarbij zijn ook kortdurende metingen uitgevoerd op de MX11BB. De DAF MX11SB heeft vanwege een technisch mankement aan de apparatuur helaas geen data verzameld in het project. De motor, en de inzet, is echter identiek aan de MX11BB die wel data verzameld heeft.

Op het andere schip (Schip B) zijn vier motoren met een retrofit SCR katalysator en roetfilter uitgerust. Dit schip had al een eigen data-acquisitiesysteem waarmee de NO_x- en zuurstofconcentraties van de geïnstalleerde sensoren geregistreerd worden. Op deze motoren zijn ook – naast de langdurige monitoring - kortstondige NO_x- en deeltjesmetingen uitgevoerd. Tot slot zijn er kortstondige metingen uitgevoerd aan een generator aan boord van Schip B.

Meer details over de schepen zijn te vinden in Bijlage A.

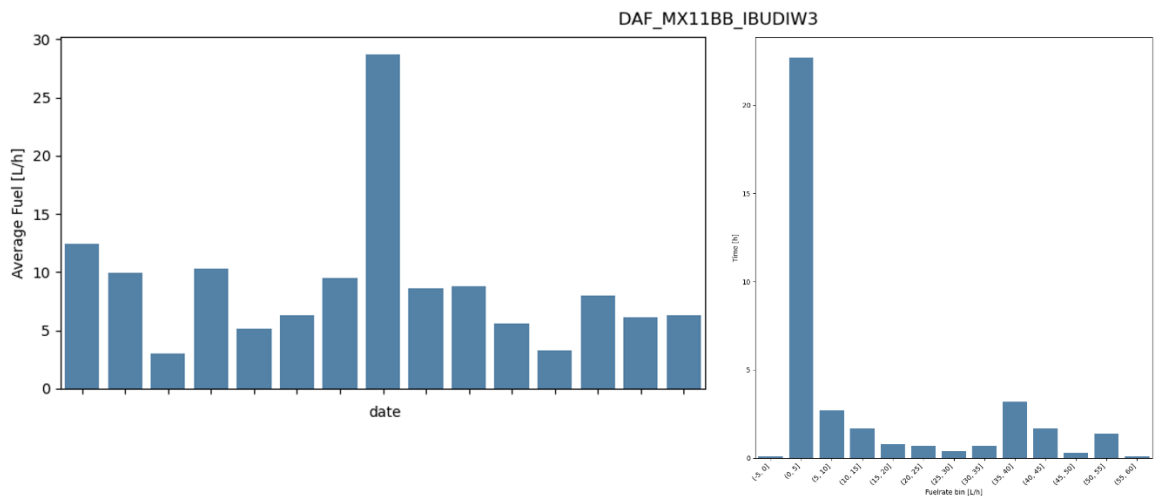
Tabel 10: Overzicht motor ID's van de gemeten motoren op vaartuigen, ingezette meetmethoden en de tijdsduur van de monitoring / meting.

| Schip | EMPK ID | Doel motor | LCL dongle | Eigen dongle van het schip | BOEMkit | Deeltjes-aantallen |
|---------|------------------------------|--------------|------------|----------------------------|------------|--------------------|
| Schip A | DAF_MX11BB_IBUDIW3_1 | Voortstuwing | X (36u) | | X (38 min) | |
| | DAF_MX11SB_IBUDIW3_2 | | X (-) | | | |
| Schip B | 1. CAT_C32ACE_retrofitSCRDPF | Voortstuwing | | X (1u) | X (57 min) | X |
| | 2. DAF_242WSA_retrofitSCRDPF | Boegschroef | | X (113u) | X (2 min) | |
| | 3. DOO_4V222T_retrofitSCRDPF | Pomp | | X (103u) | X (13 min) | X |
| | 4. DOO_4V158T_retrofitSCRDPF | Pomp | | X (92u) | X (30 min) | X |
| | 5. JCB_444TG80_NSTDST2F | Genset | | | X (4 min) | |

5.2 Resultaten langdurige monitoring

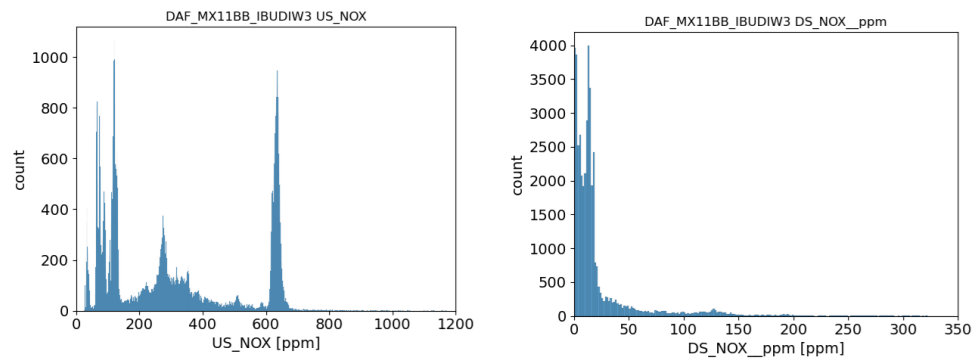
5.2.1 *Schip A*

Omdat bij Schip A een externe dongle is ingebouwd, zijn zowel de emissies als de inzet gemonitord. Het schip is een werkschip, ingezet voor bouwwerkzaamheden. Hierbij zijn de voortstuwingsmotoren gemonitord. Tijdens de monitoringsperiode van 15 actieve dagen was er één dag met 8 uur aan inzet van de voortstuwingsmotoren. De andere dagen hadden vaak een inzet van rond de 2 uur. Die 8 uur aan inzet was nodig omdat er die dag naar een andere locatie gevaren werd, de inzet voor zo'n dag wijkt sterk af van een reguliere werkdag. Er is dan niet alleen een piek qua inzet aan uren, maar ook in het brandstofverbruik. Dit geldt voor zowel het totale brandstofverbruik op die dag, als voor het gemiddelde brandstofverbruik per uur, dit is te zien in het linker figuur in Figuur 23. Het rechterfiguur in Figuur 23 toont daarnaast de uren per 'brandstof bin'. Hierin is zichtbaar dat de voortstuwingsmotor een groot deel van de tijd op een lage motorbelasting wordt ingezet. Het hogere brandstofverbruik komt met name door het varen naar een andere locatie.



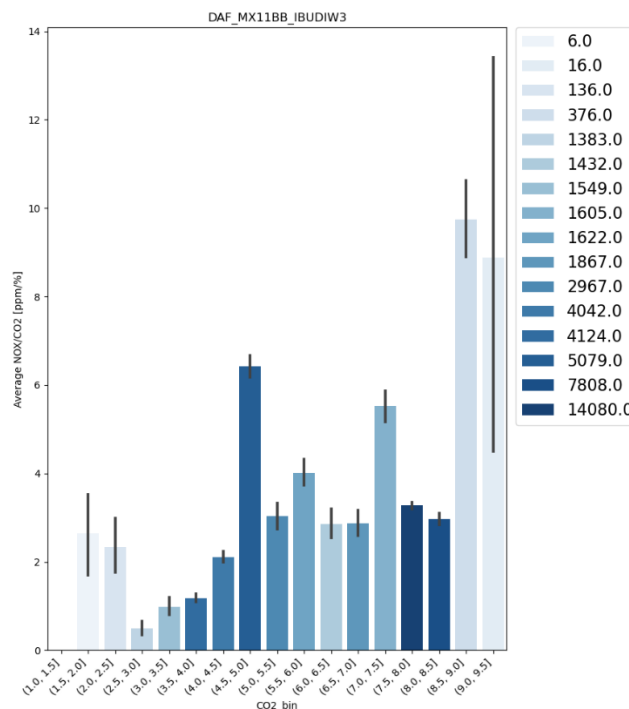
Figuur 23: Gemiddeld brandstofverbruik per dag (links) en uren per brandstofbin (rechts).

De dongle is ook gekoppeld aan de reeds aanwezige NO_x-sensoren, die fabriek-af aanwezig zijn bij deze motoren. Dit gaat om een NO_x-sensor voor de SCR en na de SCR (upstream en downstream). Deze NO_x-sensoren zijn niet door TNO gekalibreerd. In totaal is de voortstuwingsmotor 37 uur gemonitord. De upstream NO_x-sensor heeft 26 uur aan geldige NO_x data gegenereerd, de downstream NO_x-sensor 12 uur. De overige tijd wordt een standaardwaarde weergegeven. Dit heeft te maken met de opwarmtijd van de sensoren. Figuur 24 geeft een histogram van beide NO_x-signalen weer. Het figuur laat een duidelijk verschil zien tussen upstream en downstream. De gemiddelde NO_x-concentraties voor upstream en downstream zijn respectievelijk 313 en 23 ppm. Echter mist een grote hoeveelheid data (1/3 bij upstream en 2/3 bij downstream), vanwege de opwarmtijd van de sensoren ontbreken bijvoorbeeld de prestaties bij een koude start (waar de emissies hoog zijn).



Figuur 24: NO_x-concentraties van NO_x upstream (links) en NO_x downstream (rechts) volgens fabriek-af aanwezige NO_x-sensoren.

Figuur 25 geeft NO_x/CO₂ verhouding (downstream) per brandstof-bin, inclusief aantal seconden per bin. De NO_x/CO₂ verhouding in ppm/% - op basis van motoreigen NO_x sensoren – is met waarden tussen de 3 en 6 ppm/% zeer laag. Een dergelijke verhouding geeft waarden die onder of rond de emissielimiet van 0,4 g/kWh uitkomen. Vanwege het ontbreken van een grote hoeveelheid data (1/3 bij upstream en 2/3 bij downstream) kan het emissieprofiel met deze monitoring niet volledig in kaart worden gebracht. Bijvoorbeeld emissieprestaties bij koude start ontbreken. Totale emissies kunnen daardoor ook niet goed berekend worden. Wel kan op basis van deze data beoordeeld worden of de SCR wel of niet functioneert.



Figuur 25: NO_x/CO₂ verhouding (downstream) per brandstof-bin, inclusief aantal seconden per bin.

5.2.2 Schip B

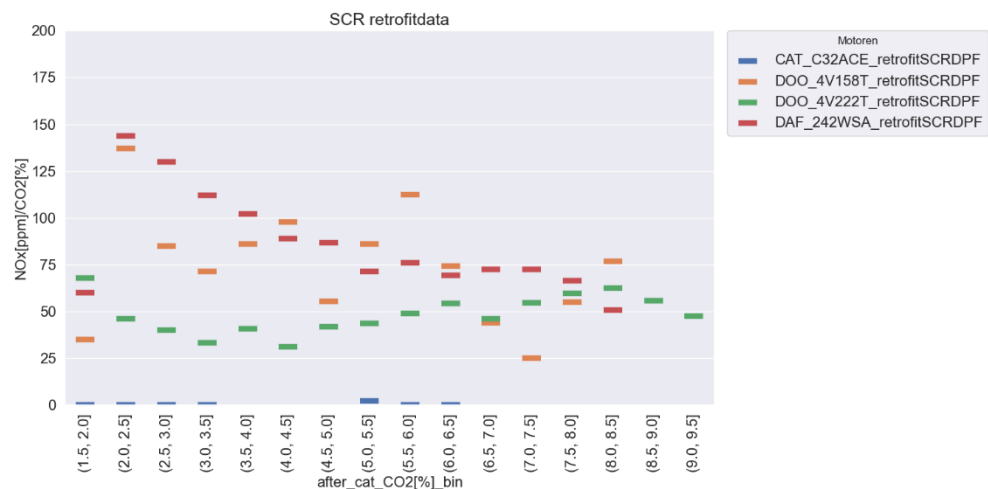
Figuur 26 geeft monitoringsdata van de vier motoren met SCR-katalysator en roetfilter met een eigen data-acquisitiesysteem. De emissieprestaties zijn – net als voor de mobiele werktuigen – weergegeven in NO_x/CO_2 [ppm/%] als functie van de CO_2 -concentraties.

De CATC32, geeft het grootste deel van de tijd een default waarde van “0”, dit komt doordat deze motor het grootste deel van de tijd uit heeft gestaan.

De DOO_4V222T geeft de laagste emissieniveaus, gemiddeld tussen de 30 en 60 ppm/%, dit is grofweg 2 tot 4 g/kWh aan NO_x -emissies. Dit terwijl de NO_x -concentraties uit de motor (upstream) het hoogste zijn van alle motoren (oplopend tot 1200 ppm). De NO_x -conversie door de SCR-katalysator ligt gemiddeld tussen de 60 en 80%.

De DAF_242 en de DOO_4V158T geven in het algemeen substantieel hogere NO_x/CO_2 niveaus weer, tussen de 50 en 150 ppm/%. Dit terwijl bij de DAF_242 de NO_x -concentraties uit de motor (upstream) het laagste is van alle motoren (oplopend tot 700 ppm). De NO_x -conversie voor de DAF_242 motor is niet vaak hoger dan 20%, voor de DOO_4V222T ligt dit tussen de 20 en 60%.

Uitgebreidere data-analyse is nodig om te beoordelen waarom de NO_x -conversies beperkt zijn. De data laat wel zien dat automatisch verzamelde monitoringsdata aandacht behoeft in de analysefase.



Figuur 26: Monitoringsdata van de vier motoren met SCR-katalysator en roetfilter met eigen data acquisitiesysteem, De NO_x -emissies zijn weergegeven in NO_x [ppm]/ CO_2 [%], de streepjes geven de gemiddelde waarden weer.

5.3 Emissieresultaten van kortdurende metingen

5.3.1 Kortdurende metingen NO_x

De kortdurende metingen zijn uitgevoerd met de zogenaamde BOEMKit apparatuur, zie paragraaf 3.2.2.1 voor toelichting op deze meetapparatuur. Tijdens de metingen is geen connectie met de OBD-signalen van de machines gemaakt.

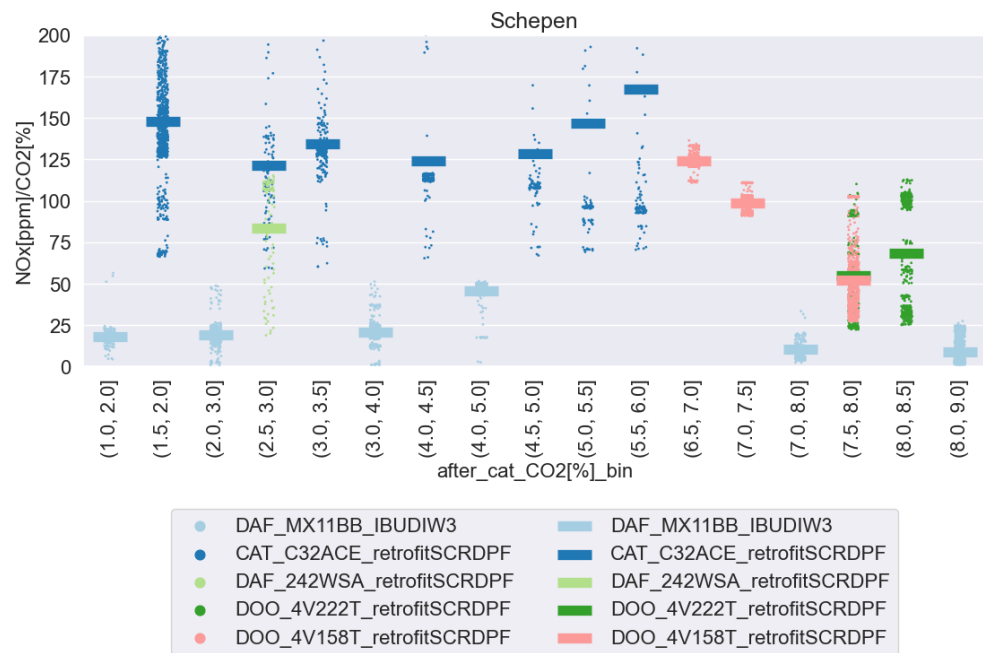
Om de emissieprestaties te beoordelen is de NO_x/CO_2 (ppm/%) verhouding bepaald. Figuur 27 geeft de gemiddelde NO_x -emissieresultaten van de kortdurende metingen van de werkschepen weer, waarbij de streepjes geven de gemiddelde waarde weergeven. Tijdens de metingen was er niet voor elke motor voldoende tijd en mogelijkheid om uitgebreide metingen uit te voeren. Hierdoor zijn de SCR-katalysatoren van de werkschepen meestal slechts gedeeltelijk – en soms helemaal niet – op bedrijfstemperatuur geweest. Bij de gemiddelde resultaten in Figuur 27 zijn soms lage emissies (bij SCR op bedrijfstemperatuur) en hoge emissies (SCR niet op temperatuur) gecombineerd, daarom geven de markers de range weer. De verschillen worden hieronder per motor in meer detail toegelicht.

De DAF MX11BB en de CAT_C32 zijn het meest uitgebreid gemeten, meer dan een half uur. De metingen aan de DAF MX11BB laten duidelijk de laagste emissies zien (net als tijdens de monitoring, zie vorige paragraaf), net als bij de schone Stage V mobiele werktuigen blijven de emissies meestal onder 25 ppm/%, bij de hogere motorbelastingen gingen de emissies naar 10 ppm/%. Onder de 10 ppm/% zullen de emissies onder de 1 g/kWh uitkomen. De SCR is echter niet de gehele meting op bedrijfstemperatuur geweest, bij de hoogst gemeten uitlaattemperatuur was de NO_x/CO_2 verhouding ruim onder de 5 ppm/%, zoals ook te zien aan de markers in het figuur. De hoogste temperatuur werd bereikt bij inzet op een constante hoge motorbelasting. Tijdens deze constante hoge motorbelasting steeg de temperatuur van de SCR, na ca. 15 minuten varen waren de NO_x concentraties gedaald van 250 ppm naar ca. 10 ppm.

De CAT_C32 op het niveau zit van de meer vervuilende mobiele werktuigen. De SCR is tijdens de meting niet op bedrijfstemperatuur gekomen. Tijdens de monitoring geeft deze motor het grootste deel van de tijd uitgestaan. De DAF242 is slechts enkele minuten gemeten, waarbij de motorbelasting laag was, hierbij is de SCR waarschijnlijk ook niet op bedrijfstemperatuur geweest.

De DOO_4V222T is ca. 13 minuten gemeten, met name op een constante relatief hoge motorbelasting (zoals te zien aan het hoge CO_2 -percentage van ca. 8%). Aan het begin van de meting was de SCR nog niet (volledig) op bedrijfstemperatuur. Aan het begin van de meting waren de NO_x -concentraties rond de 900 ppm, aan het einde van de metingen waren deze gedaald tot 200 ppm. Bij een CO_2 concentratie van 8% en een NO_x concentratie van 200 ppm is de NO_x/CO_2 verhouding 25 ppm/%, zoals ook zichtbaar in de markers in het onderstaande figuur. De DOO_4V158T is langer gemeten dan de hiervoor beschreven 4V222T. Bij deze metingen is echter een vergelijkbare trend waarneembaar. Aan het begin van de meting waren de NO_x -concentraties ca. 900 ppm, aan het einde van de meting waren deze gedaald naar 200 ppm, al was daar wel meer tijd voor nodig dan bij de 4V222T. Aan het einde van de meting was er nog steeds een dalende trend zichtbaar. Tijdens de monitoring presteerde de DOO_4V222T wat beter dan de DOO_4V158T.

De JCB_444TG80 is de enige motor zonder SCR. Deze is niet opgenomen in onderstaand figuur vanwege de combinatie van een korte meettijd en wel variatie in motorbelasting. De NO_x/CO_2 verhouding voor deze motor was wel relatief constant rond de 75 ppm/%. Bij een toenemende motorbelasting zijn toenemende NO_x -concentraties waarneembaar, en vice versa.



Figuur 27: Emissieresultaten kortdurende metingen werkschepen, de streepjes geven de gemiddelde waarde weer. De NO_x-emissies zijn weergegeven in NO_x [ppm]/CO₂[%], de streepjes geven de gemiddelde waarden weer, de markers geven de range weer. De SCR- katalysator van de werkschepen zijn tijdens de kortdurende metingen meestal slechts gedeeltelijk – en soms helemaal niet – op bedrijfstemperatuur geweest (hiervoor was tijdens de metingen niet voldoende tijd en/of mogelijkheid).

In het vorige hoofdstuk was geconcludeerd dat het met behulp van kortdurende meetresultaten goed mogelijk is om schone, middelmatige en vervuilende machines van elkaar te onderscheiden. Met de kanttekening dat voldoende tijd en mogelijkheden benodigd dienen te zijn om machines met een SCR-katalysator op bedrijfstemperatuur te laten komen. De analyse van de werkschepen bevestigt dit beeld.

5.3.2 Kortdurende metingen deeltjesaantallen

Voor diverse schepen zijn deeltjesaantallen metingen uitgevoerd. Net als bij de mobiele werktuigen is de test waar mogelijk uitgevoerd bij stationair toerental. Bij twee motoren was dat echter niet mogelijk omdat het schip in bedrijf was. Hierbij zijn de metingen uitgevoerd onder motorlast.

De gemeten waarde bij stationair toerental blijft onder de afkeurlimiet voor personenauto's, maar is met ruim 370.000 deeltjes wel relatief hoog. De schepen die alleen met motorbelasting konden worden gemeten bleven wel binnen het meetbereik van de apparatuur (wat machines zonder roetfilter bij stationair toerental niet lukt), maar komen wel boven de 1 miljoen deeltjes uit (1,6 tot 2,3 miljoen).

6 Input voor Nederlandse emissiefactoren

Het meetprogramma dient ook om een breder inzicht in de praktijkemissies te krijgen van mobiele machines die in Nederland worden ingezet. Verkregen inzicht en data dragen tevens bij aan de onderbouwing van de TNO emissiefactoren. Dit zijn getallen die in Nederland worden gebruikt bij berekeningen aan luchtkwaliteit en stikstofdepositie.

De meeste machines hebben meer dan 150 uur aan emissie- en inzetdata verzameld. Dit is weken tot maanden aan monitoring, wat een robuust beeld geeft van de inzet en emissies in de praktijk. In dit hoofdstuk wordt input geleverd op het vlak van inzetprofielen en emissieprestaties van mobiele werktuigen.

6.1 Inzetprofielen

De onderstaande Tabel 11 en Figuur 28 geven de verdeling van de draaiuren per motorbelasting. Zie hoofdstuk 4.1. en Bijlage A voor een toelichting op de machinetypen.

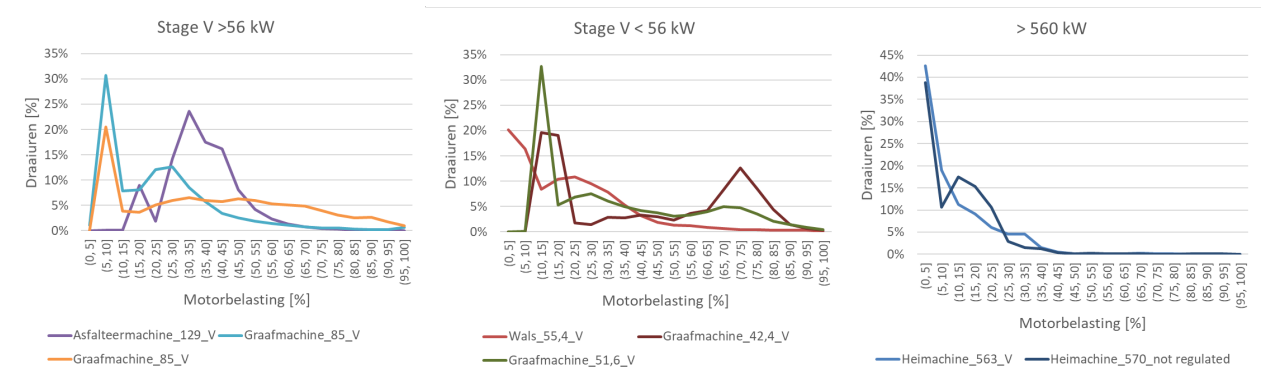
Opvallend is dat de meeste machines veel worden ingezet bij een lage motorbelasting. Dit is relevant voor de impact op de NO_x-emissies, met name voor motoren met een SCR-katalysator die daardoor niet altijd de gewenste bedrijfstemperatuur kunnen bereiken. Met name de heimachines hebben een lage motorbelasting, gemiddeld 11 en 9%. Opvallend zijn ook de Stage V graafmachines met 85 kW. De eerste graafmachine rijdt op wielen, de tweede op rupsen. De rupsgraafmachine heeft vaker een hogere motorbelasting dan de machine op wielen. De gemiddelde motorbelasting van de rupsgraafmachine is dan ook fors hoger (40% ten opzichte van 23%).

Tabel 11: Motorbelastingsprofielen voor de gemeten machines met SEMS.

| Motor-belasting | Heimachine_563_V | Wals_55,4_V | Asfalteer machine_129_V | Graafmachine_85_V | Graafmachine_85_V | Heimachine_570_not regulated* | Graafmachine_42,4_V* | Graafmachine_51,6_V* |
|-----------------|------------------|-------------|-------------------------|-------------------|-------------------|-------------------------------|----------------------|----------------------|
| (0, 5] | 43% | 20% | 0% | 1% | 0% | 39% | 0% | 0% |
| (5, 10] | 19% | 16% | 0% | 31% | 21% | 11% | 0% | 0% |
| (10, 15] | 11% | 8% | 0% | 8% | 4% | 17% | 20% | 33% |
| (15, 20] | 9% | 10% | 9% | 8% | 4% | 15% | 19% | 5% |
| (20, 25] | 6% | 11% | 2% | 12% | 5% | 11% | 2% | 7% |
| (25, 30] | 4% | 9% | 14% | 13% | 6% | 3% | 1% | 8% |
| (30, 35] | 5% | 8% | 24% | 8% | 7% | 2% | 3% | 6% |
| (35, 40] | 2% | 5% | 17% | 6% | 6% | 1% | 3% | 5% |
| (40, 45] | 0% | 3% | 16% | 3% | 6% | 0% | 3% | 4% |
| (45, 50] | 0% | 2% | 8% | 3% | 6% | 0% | 3% | 4% |
| (50, 55] | 0% | 1% | 4% | 2% | 6% | 0% | 2% | 3% |
| (55, 60] | 0% | 1% | 2% | 1% | 5% | 0% | 4% | 3% |
| (60, 65] | 0% | 1% | 1% | 1% | 5% | 0% | 4% | 4% |
| (65, 70] | 0% | 1% | 1% | 1% | 5% | 0% | 8% | 5% |
| (70, 75] | 0% | 0% | 0% | 1% | 4% | 0% | 13% | 5% |

| | | | | | | | | |
|------------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|------------|
| (75, 80] | 0% | 0% | 0% | 1% | 3% | 0% | 9% | 3% |
| (80, 85] | 0% | 0% | 0% | 0% | 2% | 0% | 4% | 2% |
| (85, 90] | 0% | 0% | 0% | 0% | 3% | 0% | 1% | 1% |
| (90, 95] | 0% | 0% | 0% | 0% | 2% | 0% | 1% | 1% |
| (95, 100] | 0% | 0% | 0% | 1% | 1% | 0% | 0% | 0% |
| Gemiddeld | 11% | 20% | 36% | 23% | 40% | 9% | 41% | 32% |

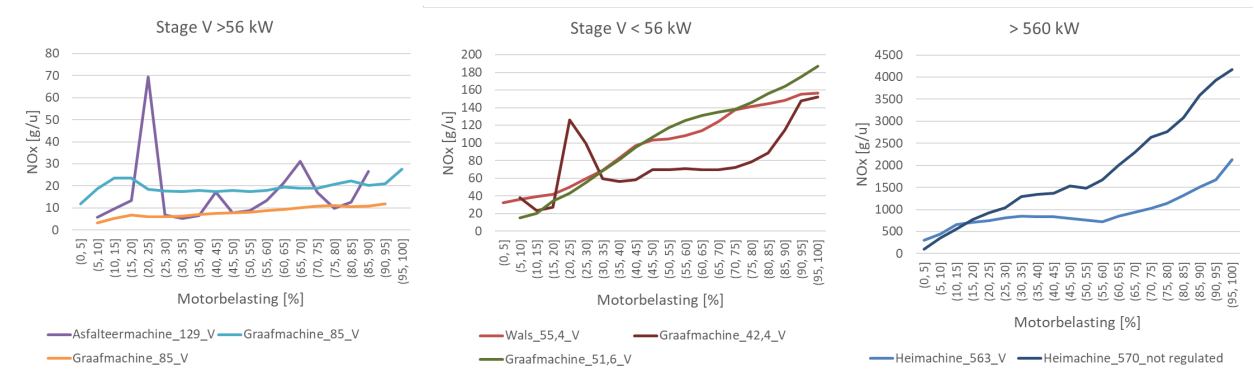
* Motorbelasting ingeschat op basis van het brandstofverbruik



Figuur 28: Motorbelastingsprofielen voor de gemeten machines met SEMS per emissieklasse en type machine.

6.2 NO_x-emissies in gram per uur per motorbelasting

Figuur 29 geeft de NO_x-emissies in gram per uur per motorbelasting. De Stage V machines met een motorvermogen van meer dan 56 kW geven relatief constante emissiewaarden, onafhankelijk van de motorbelasting. De asfalteermachine geeft wel een opvallende piek tussen de 20 en 25% motorbelasting, de oorzaak hiervan wordt nader onderzocht. De Stage V machines met een motorvermogen van minder dan 56 kW geven hogere emissieniveaus dan de grotere Stage V machines (van boven de 56 kW), de emissies stijgen ook naarmate de motorbelasting toeneemt. De machines met een motorvermogen van boven de 560 kW geven veruit de hoogste emissies. De Stage V variant stoot name bij hogere motorvermogens wel substantieel minder NO_x emissies uit dan de 'non-regulated' variant. In de emissietotalen van deze machines is dit echter nauwelijks terug te zien, omdat de machines met name een lage motorbelasting hebben.



Figuur 29: NO_x-emissies in gram per uur per motorbelasting

7 Discussie

7.1 Verankering in wet- en regelgeving

Eenmaal aangeschaft, toegelaten, of vergund, zijn er beperkte mogelijkheden om machines met hoge emissies te verbieden of te beperken.

Het handelingsperspectief is daarom beperkt en moet mogelijk uitgebreid worden. Dat vraagt een spectrum aan hulpmiddelen, zoals (openbare) registratie van bouwmachines, vergelijkbaar met de RDW kentekenregistratie, monitoring van bouwmachines in gebruik en een goede boekhouding van de inzet van machines (bijvoorbeeld draaiuren, kilometers, brandstofverbruik en AdBlue verbruik). Daarnaast is de controle van schone bouwmachines in het veld (emissiemeting), en een testmethodiek voor handhaving van gestelde milieueisen per machine (t.b.v. vergunning en/of aanbestedingseisen of ter controle van defecten of manipulatie van emissiecontrole systemen) nodig.

Vergunningen en MVI worden vaak gezien als de drijfveer achter de inzet van schone machines, en verschoning. Maar het kan ook reallocatie in de hand werken, waarbij vieze machines structureel ingezet worden buiten deze onderhavige projecten, mogelijk zelfs buiten beeld. Controle en handhaving vragen een juridisch raamwerk en autoriteiten. Het huidige raamwerk van vergunningen en MVI is een beoordeling vooraf, en daarom beperkt geschikt voor de uitvoeringsfase.

7.2 Governance

Een open punt is hoe de governance structuur bij de eventuele invoering van de EMPK-methodiek opgezet gaat worden. Afspraken over wie er gaat rapporteren, beheer van de database en de verantwoordelijke autoriteit voor inspectie en handhaving zijn nog niet belegd.

7.3 Meer eenvoudige opties kunnen overweging zijn voor de korte termijn

Een eenvoudiger uitvoeringsvorm van EMPK voor de korte termijn zou kunnen zijn om te starten met een controle op het materieel dat is ingezet. Het gaat hierbij met name om de controle van het aantal machines, de emissieklasse (evt. afgeleid van bouwjaar) en het type aandrijving (verbrandingsmotor of uitstootvrij). Uiteraard kan ook deze optie niet zonder registratie. De in te zetten machines moeten worden geregistreerd, en dit dient op de bouwplaats gecontroleerd te kunnen worden. Deze optie zou ook via een soort monitoring kunnen. Eenvoudiger vormen van monitoring waarbij bijvoorbeeld alleen locatie en inzet van machines worden gemonitord zijn wellicht sneller en goedkoper in te voeren, maar ook in dat geval zal opzet van een database, onderhoud, beveiliging en ontsluiting van data de nodige aandacht vragen.

De controle op materieel inzet kan op de korte termijn ook gedetailleerder plaatsvinden door het registreren van de draaiuren, brandstofverbruik en AdBlue-verbruik. Dit kan via verschillende methoden. Bijvoorbeeld via beschikbare gegevens (zoals brandstof- en AdBlue facturen), of via telematica data (als deze beschikbaar is), of alsnog middels een soort versimpelde dongle die in de machine wordt aangebracht.

Hiermee kan de daadwerkelijke inzet van iedere machine worden bepaald. Daarmee wordt voorkomen dat schone machines wel aanwezig zijn maar dat in de praktijk het gros van het werk door de vuilere werktuigen wordt verricht. Bovendien zorgen de brandstof- en AdBlue-verbruikgegevens ervoor dat de emissieberekening beter gemaakt kan worden. Deze gegevens dienen ook als input voor AERIUS berekeningen.

Deze opties voor de korte termijn kunnen later uitgebreid worden met meer uitvoerige monitoring van emissies. Parallel kunnen mogelijkheden onderzocht worden voor de periodieke controle van emissies.

Het risico bestaat echter wel dat, als een eenvoudigere systematiek eenmaal is opgetuigd, er geen draagvlak meer is voor invoering van emissie-monitoring en een periodieke keuring.

8 Conclusies en aanbevelingen

In dit hoofdstuk worden de conclusies en aanbevelingen rondom de EMPK-methodiek en de inzichten rondom praktijkemissies van bouwmachines beschreven.

8.1 Conclusies EMPK-aanpak voor controle van de inzet en emissies

NO_x-monitoring geeft uitgebreid beeld van de praktijkemissies

De meetdata uit dit project laten zien dat de emissieprestaties per machine ver uiteenlopen, en dat de praktijkemissies vaak afwijken van de verwachte niveaus. Dit komt bijvoorbeeld omdat de inzet van de machine in de praktijk anders is dan vooraf aangenomen. Bij moderne machines met een SCR-katalysator kunnen hogere NO_x-emissies bijvoorbeeld het gevolg zijn van langdurig stationair draaien. Vanwege stationair draaien daalt de temperatuur van de SCR-katalysator, en is hierdoor niet meer effectief. Bij regelmatig stationair draaien kan een substantieel deel van de totale NO_x-uitstoot onder deze condities worden gevormd.

NO_x-monitoringsdata geven de meest nauwkeurige inschatting van de geproduceerde NO_x-emissies. NO_x-monitoring kan bijvoorbeeld inzicht geven in het optreden van extra NO_x-uitstoot tijdens stationair draaien (of lage motorlast) en kan ertoe bijdragen om deze bedrijfscondities te voorkomen door de motor af te schakelen.

Registratie als eerste stap

Een belangrijke eerste stap richting een EMPK methodiek zou zijn: registratie van alle bouwmachines. Dit maakt het mogelijk om afspraken te maken over typen en emissieklassen van bouwmachines die op een bouwproject gaan worden ingezet en om (emissie) inspecties in de praktijk uit te voeren.

Technische uitvoerbaarheid van monitoring van de inzet

Zoals hierboven beschreven, bevat de beoogde inzetmonitoring de volgende elementen; locatie, draaiuren en (waar mogelijk) de motorbelasting. De monitoring van de locatie en draaiuren is mogelijk door de installatie van een dongle die direct op de voeding van de machine geplaatst kan worden, dit vraagt een installatietijd van ca. 1 uur. Bij diverse machines worden dergelijke gegevens al online gemonitord door middel van een telematica systeem. Om de motorbelasting te monitoren is verbinding met het On-Board-Diagnostics (OBD)-systeem van machine benodigd. Bij de meeste moderne machines is informatie rondom de motorbelasting en/of het brandstofverbruik (dat gebruikt kan worden als inschatting van de motorbelasting) wel beschikbaar op de OBD. Er is echter geen standaardisatie van de OBD-signalen, waardoor de mogelijkheden en de installatietijd per machine kunnen verschillen als ook motorbelasting wordt meegenomen.

Technische uitvoerbaarheid continue NO_x monitoring

Als voor continue NO_x-monitoring gebruik wordt gemaakt van data op de OBD van de bouwmaschine, dan is maatwerk onvermijdelijk. Dit komt enerzijds door de grote verscheidenheid aan machines en anderzijds door het gebrek aan standaardisatie van (NO_x-)signalen op de OBD van deze machines.

Zolang standaardisatie ontbreekt is een meer robuuste aanpak om een eigen NO_x-sensor in de uitlaat van de machine te monteren en deze te verbinden met een eigen dongle die de sensordata uitleest en verstuurt naar een database.

Los van de vraag of wel/geen eigen NO_x-sensor wordt toegepast voor data inwinning, vragen post-processing van deze data, het beheer van een emissiedatabase en ontsluiting van de data een flinke investering qua kennis, menskracht en organisatie. De belangrijkste elementen – zoals ervaren tijdens het project bij de gemonitorde machines- zijn onderstaand samenvattend toegelicht.

Inwinnen van NO_x-data:

- Bij de meeste bouwmachines is geen OBD NO_x-signaal beschikbaar, dit geldt ook voor moderne Stage V machines met een af-fabriek SCR katalysator die daarmee wel beschikken over een eigen NO_x-sensor;
- Bij machines die wel een NO_x-sensor hebben, maar geen NO_x-signaal op de OBD beschikbaar maken, is dit NO_x-signaal vaak wel 'direct' uit te lezen, dat wil zeggen buiten de OBD om, maar dit vraagt per machine wel flink wat zoekwerk en goede interpretatie van dit signaal;
- Bij bouwmachines die wel beschikken over een OBD NO_x-signaal is dit signaal niet altijd bruikbaar. Bovendien kan het na de start van de motor tot 25 minuten duren voordat het signaal beschikbaar komt.

Bij machines die af-fabriek zijn voorzien van een SCR katalysator (en dus beschikken over een NO_x-sensor) lijkt het voor continue NO_x-monitoring een meer robuuste aanpak om in de uitlaat een extra NO_x-sensor te plaatsen. Via een dongle kan de data dan worden verstuurd naar een emissiedatabase. Zo ontstaat een machineonafhankelijke toepassing waarbij voor het NO_x-signaal niet hoeft te worden aangehaakt op de OBD. Hiermee kan worden gecontroleerd of de SCR-katalysator naar behoren functioneert, en kan – op basis van NO_x/CO₂ concentraties - een grove indicatie worden gegeven van de emissieniveaus. Signalen over draaiuren, motorbelasting en brandstofverbruik, die goed van pas komen bij berekeningen over inzet en emissies, zijn meestal wel beschikbaar op de OBD van deze moderne machines, ook al zijn ze niet gestandaardiseerd. Door wel verbinding te maken met de OBD kunnen de emissieniveaus nauwkeuriger worden bepaald, maar het maakt de installatietijd wat langer. Het plaatsen van de dongle, de NO_x-sensor, en het verkennen en verbinding maken met de OBD, kost momenteel in totaal ca. 1 werkdag installatietijd.

Bij machines die niet zijn voorzien van een SCR katalysator is in de voorziene EMPK aanpak geen continue NO_x-monitoring benodigd. Dergelijke machines hebben vaak ook minder of geen gegevens beschikbaar op de OBD, wat de opties voor data-inwinning beperkt en/of de installatietijd verder verlengt.

Emissieberekeningen

Naast de inbouw van apparatuur is post-processing van data, per machinetype, noodzakelijk indien de NO_x-uitstoot in grammen per uur, per liter brandstof of per kWh geleverde arbeid moet worden bepaald.

In de meeste gevallen is het wel mogelijk om – met gebruik van OBD-signalen - tot een emissieberekening te komen, met name bij de moderne Stage IV en V machines. Opgemerkt wordt wel dat, door gebrek aan standaardisatie, niet altijd dezelfde OBD-data beschikbaar zijn en dat de datakwaliteit meestal niet bekend is.

Omdat deze berekeningen per machine(type) kunnen verschillen moet ook worden nagedacht over de vraag waar deze berekeningen in de software-keten van meetsysteem t/m EMPK website uitgevoerd en beheerd gaan worden.

Een meer eenvoudige aanpak voor EMPK-controle van de emissies bij machines met een SCR katalysator is om op basis van het NO_x-signaal alleen vast te stellen of de SCR-katalysator goed functioneert en niet defect of gemanipuleerd is. In dat geval wordt er dus afgezien van gedetailleerde emissieberekening waardoor geen nauwkeurige emissieniveaus kunnen worden bepaald.

Zonder de beschikbaarheid van een NO_x-sensor kan met behulp van de registratie van de draaiuren, het brandstofverbruik en het AdBlue-verbruik de totale emissies per machine ingeschat worden.

Emissiedatabase en website

Het beheer van een emissiedatabase en website is technisch goed mogelijk. Vanwege het feit dat de data concurrentiegevoelig kan zijn, vragen databeveiliging (door de keten heen) en gebruik van een goed beveiligde website aandacht. Ook zal een autoriteit gekozen moeten worden voor het beheer hiervan.

Onafhankelijk van de hoeveelheid parameters die op een machine worden gemonitord, vragen het opzetten van een database, het onderhoud ervan, de beveiliging ervan en de ontsluiting van data de nodige aandacht.

Praktische uitvoerbaarheid

Bepaling emissieklasse

Een uitdaging is om de fasenorm van een machine vast te stellen. Het vaststellen van de fasenorm vereist momenteel een uitgebreide inspectie van de machine. Een mogelijke manier is om de verantwoordelijkheid voor het aanleveren van de benodigde informatie bij de eigenaar en/of gebruiker van het mobiele werktuig te leggen. Onderdeel van de EMPK-aanpak kan zijn om deze gegevens door daarvoor erkende onderhoudsbedrijven (EMPK-bedrijven) te laten registreren in een centraal systeem.

Wisseling van machines op de bouwplaats en het werken met onderaannemers

Vaak werken bouwbedrijven met onderaannemers, het is daarom niet altijd bekend welke machines er wanneer op de bouwplaats zijn. Het werken met onderaannemers maakt het ook lastiger om de metingen te organiseren. Bij opschaling van EMPK zou dit opgelost kunnen worden door op een bouwlocatie één contactpersoon te hebben die ervoor verantwoordelijk is dat alle werktuigen die op een bouwlocatie worden ingezet zijn ingeboekt in de EMPK-registratie.

Periodieke controle

Beoogd wordt om als onderdeel van de EMPK-aanpak periodieke emissiecontroles op de bouwplaats uit te voeren. Door uitvoering van kortdurende emissiemetingen kunnen schone, middelmatige en vervuilende machines van elkaar worden onderscheiden. Voor machines met een SCR-katalysator dient deze echter wel op bedrijfstemperatuur te zijn. Hierdoor is voor de controle extra tijd nodig, en de mogelijkheid om de motor te belasten.

De meetresultaten kunnen beoordeeld worden op basis van NO_x/CO₂ concentraties. De rekenmethodiek is zeer eenvoudig doordat alleen de NO_x concentraties gedeeld worden door de CO₂ concentraties en er geen OBD signalen nodig zijn. Vanwege de eenvoud, en de onafhankelijkheid van OBD-signalen is deze eenheid in potentie een interessante optie voor de toepassing bij de EMPK methodiek.

Om de aanwezigheid en werking van een roetfilter te beoordelen kan de deeltjesaantallentest toegepast worden bij stationair toerental. Deze test maakt vanaf 1 januari 2023 al verplicht onderdeel uit van de APK voor dieselauto's met roetfilter. De uitgevoerde metingen lieten duidelijk zien of er wel of geen werkend roetfilter aanwezig is. De extra meting met een deeltjesteller is alleen zinvol voor machines met een roetfilter, met hierbij speciale aandacht voor Stage IV en IIIB machines, die zowel met als zonder roetfilter voorkomen, en mogelijk in sommige gevallen met een half-open roetfilter. Ook de resultaten van een periodieke controle zouden vastgelegd kunnen worden in een centraal EMPK registratiesysteem (database en website).

Verankering in wet- en regelgeving

Controle en handhaving vragen een juridisch raamwerk en autoriteiten. Het huidige raamwerk van vergunningen en MVI is een beoordeling vooraf, en daarom beperkt geschikt voor controle van de inzet en emissies van bouwmachines gedurende de uitvoeringsfase. Aanbevolen wordt om voor controle en handhaving van emissies van bouwmachines (juridisch) passende regelgeving op te zetten en een verantwoordelijke autoriteit/partijen aan te wijzen

8.2 Inzichten in praktijkemissies

In totaal zijn tijdens het project aan 29 bouwmachines praktijkemissiemetingen verricht. Dit betroffen kortstondige metingen en langdurige NO_x-monitoring. Het project heeft hiermee inzicht opgeleverd in inzet- en praktijkemissieniveaus van uiteenlopende bouwmachines qua emissieclassen en typen (zoals graafmachines, trilplaten, wielladers, hei-installaties, pompen, walsen, generatoren) en (aanvullend) van meerdere motoren van twee waterbouwschepen. De meeste machines hebben meer dan 150 uur aan emissiedata verzameld. Dit is weken tot maanden aan monitoring, wat een robuust beeld geeft van de emissies onder allerlei verschillende omstandigheden. Het verkregen inzicht en de ingewonnen data dragen bij aan de onderbouwing van de nationale emissiefactoren, relevant voor berekeningen aan de praktijkuitstoot van stikstof.

Opvallend in de meetresultaten was de relatief lage gemiddelde motorbelasting bij meerdere machinetypen, uiteenlopend van 9 tot 40%. De emissieprestaties bij lage motorbelasting zijn vaak minder goed dan bij hogere motorbelasting. Met name bij de machines met een SCR-katalysator ontstaan verschillen, tot wel meer dan een factor 2, al verschilde dit effect wel per machine. De emissieprestaties van de Stage V machines met SCR-katalysator waren in het algemeen vrij goed. De Stage V machines met een motorvermogen van boven de 56 kW, ingezet op een relatief hoge motorbelasting, hebben daarmee veruit de laagste NO_x emissies. Zowel in gram per kWh, per liter diesel, en zelfs in gram per uur. Wel deed een Stage V graafmachine op wielen het minder goed dan de graafmachine, met dezelfde motor, op rupsen, met een factor 3 tot 6 verschil.

9 Verwijzingen

- Europees Parlement en de Raad. (2016a). Verordening (EU) 2016/1628 van het Europees Parlement en de Raad van 14 september 2016 inzake voorschriften met betrekking tot emissiegrenswaarden voor verontreinigende gassen en deeltjes en typegoedkeuring [...].
- Europese Commissie. (2017a). Verordening (EU) 2017/1151 van de Commissie van 1 juni 2017 tot aanvulling van Verordening (EG) nr. 715/2007 van het Europees Parlement en de Raad betreffende de typegoedkeuring van motorvoertuigen [...].
- Europese Commissie. (2017b). Gedelegeerde Verordening (EU) 2017/654 van de Commissie van 19 december 2016 tot aanvulling van Verordening (EU) 2016/1628 van het Europees Parlement en de Raad wat betreft de technische en algemene voorschriften betreffende de emissiegrenswaarden [...].
- Europese Commissie. (2017c). Gedelegeerde Verordening (EU) 2017/655 van de Commissie van 19 december 2016 tot aanvulling van Verordening (EU) 2016/1628 van het Europees Parlement en de Raad wat betreft de monitoring van de uitstoot van verontreinigende gassen [...].
- Europese Commissie. (2022a). Gedelegeerde Verordening (EU) 2022/2387 van de Commissie van 30 augustus 2022 tot wijziging van Gedelegeerde Verordening (EU) 2017/655 wat betreft de aanpassing van de bepalingen inzake de monitoring van de uitstoot van verontreinigende gassen [...].
- Ministerie van LNV. (2021, juni 18). *Stikstofwet gaat in per 1 juli 2021*. Opgehaald van Aanpak Stikstof: <https://www.aanpakstikstof.nl/actueel/nieuws/2021/06/18/stikstofwet-gaat-in-per-1-juli-2021>
- Ministerie van LNV. (2022a, mei 7). *Gedeeltelijke vrijstelling*. Opgehaald van Aanpak Stikstof: <https://www.aanpakstikstof.nl/themas/bouw>
- Ministerie van LNV. (2022b, mei 7). *Subsidieregeling Schoon en Emissieloos Bouwmaterieel (SSEB)*. Opgehaald van Aanpak Stikstof: <https://www.aanpakstikstof.nl/maatregelen/bouw/subsidieregeling-schoon-en-emissieloos-bouwmaterieel>
- SEB. (2022, mei 7). *Routekaart Schoon en Emissieloos Bouwen*. Opgehaald van opwegnaarseb: <https://www.opwegnaarseb.nl/>
- TNO R10221. (2021). *Real-world emissions of non-road mobile machinery*.
- TNO STL-MEM-100341925. (2021). *MaVe Action Emission Monitoring and Periodic Inspection of Mobile Machines*. Den Haag.
- van Mensch, P., Merriënboer, S., Tol, D., Rondaij, A., Harmsen, J., & Fransen, R. (2022). *Inventarisatie en categorisatie huidige en toekomstige aanbod mobiele werktuigen en bouwlogistieke voertuigen, spoorwerktuigen en vaartuigen die worden ingezet voor de waterbouw*. Den Haag: TNO. Opgehaald van <https://cdn.opwegnaarseb.nl/media/TNO%202022%20R11048%20Inventarisatie%20en%20categorisatie%20huidige%20en%20toekomstige%20aanbod%20duurzame%20mobiele%20werktuigen%20bouwlogistieke%20voertuigen%20spoorwerktuigen%20en%20vaartuigen.pdf>
- Wnb. (2015, december 16). Opgehaald van <https://wetten.overheid.nl/BWBR0037552/2017-01-01>

Wsn. (2021, maart 10). Wet stikstofreductie en natuurverbetering. Opgehaald van <https://wetten.overheid.nl/BWBR0044970/2021-07-01>

10 Ondertekening

Den Haag, 17 maart 2023

TNO

Peter van der Mark
Projectleider

Pim van Mensch
Auteur

A Gemeten machines

Gemeten mobiele werktuigen

| EMPK ID | Type | Merk | Model | Vermogen [kW] | Emissieklasse |
|------------------------|---------------------|-------------------|----------------|---------------|---------------|
| ABI_TM1822_NGWDNRE7 | Heimachine | ABI | TM18/22B | 563 | V (NRE-v-7) |
| ABI_TM2025_NGWDPRES | Heimachine | ABI | TM20/25 | 570 | not regulated |
| BOM_174AP-NWBDNRE4 | Wals | Bomag | 174AP-4AM | 55,4 | V (NRE-v-4) |
| BR196701_NSTDNRE6 | Genset | Bredenoord | BR19672 | 249 | V (NRE-c-6) |
| CAT_M318F_NGMD�3BM | Graafmachine | Caterpillar | M318F | 129,4 | IIIB (M) |
| DYN_SD2500_NWBDNRE5 | Asfalteermachine | Dynapac | SD2500C | 129 | V (NRE-v-5) |
| FPT_NEF67T_NSTDS3AI | Genset | FPT | NEF67 TM1F | 115 | IIIA (I) |
| HIT_FH220L_NGWDPRES | Voorboorinstallatie | Hitachi | FH 220 LCK4 | 114 | not regulated |
| HIT_ZX140W_NGMDST4R | Graafmachine | Hitachi | ZX140W-6 | 105 | IV (R) |
| HIT_ZX85US_NGMDNRE4 | Graafmachine | Hitachi | ZX85US-6 | 42,4 | V (NRE-v-4) |
| IMP_ORIENT_07_NSTDNRE2 | Genset | Impulse | Oriental III | 5,5 | V (NRE-v-2) |
| IMP_ORIENT_08_NSTDNRE2 | Genset | Impulse | Oriental III | 5,5 | V (NRE-v-2) |
| TOW_SUPER_NSTDPRES | Lichtmast | Tower Light | SuperLight VT1 | 8 | not regulated |
| KUB_KX41-3_NGMDPRES | Graafmachine | Kubota | KX41-3 | 11,8 | not regulated |
| MUL_RB-9_NSTDST2G | Betonmixer | Mulder | RB-9 | 71,7 | II (G) |
| SEN_6100_NGWDPRES | Kraan | Sennebogen | 6100 | 222 | not regulated |
| TAK_TB2150_NGMDNRE5 | Graafmachine | Takeuchi | TB 2150 R | 85 | V (NRE-v-5) |
| TAK_TB2902_NGMDNRE4 | Graafmachine | Takeuchi | TB290-2 | 51,6 | V (NRE-v-4) |
| TAK_TB295W_NGMDNRE5 | Graafmachine | Takeuchi | TB295W | 85 | V (NRE-v-5) |
| VÖG_SUPER_NWBDS4Q | Asfalteermachine | Joseph Vögele AG | SUPER 1900-3i | 142 | IV (Q) |
| VOL_A30G_NDPDNRE6 | Dumper | Volvo | A30G | 265 | V (NRE-v-6) |
| VOL_L120H_NLSDNRE6 | Laadschop | Volvo | L120H | 203 | V (NRE-v-6) |
| WAN_DPU655_NHHDNRE2 | Trilplaat | Wacker Neuson | DPU6555 | 9,6 | V (NRE-v-2) |
| WIT_JD060C_NSTDS3AJ | Genset | De Wit Silent 8FT | JD060C/LS | 48 | IIIA (J) |
| WOL_THW752_NGWDPRES | Funderingsmachine | Woltman | THW 7528 | 560 | not regulated |
| ATL_XAS188_NSTDNRE5 | Mobiele compressor | Atlas Copco | XAS 188-14 | 104 | V (NRE-c-5) |
| DYN_SD2500_NWBDS3BM | Asfalteermachine | Dynapac | SD2500C | 129 | IIIB (M) |
| JLG_660SJ_NKRDТIER4 | Hoogwerker | JLG | 660SJ | 36,4 | Tier 4 |
| MER_ROT040_NVHDNRE5 | Verreiker | Merlo | ROTO40.26MCSS | 125 | V (NRE-v-5) |

Gemeten werkschepen

| EMPK ID | Type | Merk | Model | Vermogen [kW] | Emissieklasse |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------------|----------------------|----------------------|
| DAF_MX11BB_IBUDIW3 | Werkschip | DAF | MX11 | 238,6 | IWP/IWA-v-3 |
| DAF_MX11SB_IBUDIW3 | Werkschip | DAF | MX11 | 238,6 | IWP/IWA-v-3 |
| CAT_C32ACE_retrofitSCRDPF | Werkschip | Caterpillar | C32 ACERT | 709 | retrofitSCRDPF |
| DAF_242WSA_retrofitSCRDPF | Werkschip | DAF | 242 WS AMV (1160) | 242 | retrofitSCRDPF |
| DOO_4V222T_retrofitSCRDPF | Werkschip | Doosan V12 | V4222 TIH | 588 | retrofitSCRDPF |
| DOO_4V158T_retrofitSCRDPF | Werkschip | Doosan V8 | 4V158 TIH | 390 | retrofitSCRDPF |
| JCB_444TG60_NSTDST2G | Werkschip | JCB | 444TG-60 | 48 | II (G) |
| JCB_444TG80_NSTDST2F | Werkschip | JCB | 444TG-80 | 74,2 | II (F) |

B Rekenmethodieken

B.1 Luchtmassadebiet en brandstof-volumedebiet

Als er OBD-gegevens beschikbaar zijn van zowel lucht-massadebiet als het brandstof-volumedebiet, moet er nog de brandstof-massadebiet worden bepaald met de dichtheid van diesel. De uitlaatgas-massadebiet is dan:

$$\dot{m}_{\text{exh,OBD}}(t) = \frac{\dot{m}_{\text{air}}}{3.6} + \frac{\dot{v}_{\text{fuel}} \cdot \rho_{\text{fuel}}}{3.6}$$

Waarin:

| | |
|-------------------------------|---|
| $\dot{m}_{\text{exh,OBD}}(t)$ | Uitlaatgas-massadebiet basierend op OBD gegevens [g/s]; |
| \dot{m}_{air} | Lucht-massadebiet [kg/h]; |
| \dot{v}_{fuel} | Brandstof-volumedebiet [L/h]; |
| ρ_{fuel} | Dichtheid van de brandstof is [kg/L] (0.838 kg/L). |

B.2 Speed-Density methode

Bij gebrek aan een (betrouwbaar) signaal voor de lucht-massadebiet, maar wel met informatie over druk en temperatuur bij de inlaat, is de volgende formule gebruikt:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{exh,SD}}(t) &= \frac{d \cdot n(t) \cdot \eta_{\text{vol}}(t)}{1000 \cdot f \cdot 60} \cdot \rho_{\text{air}} \cdot \frac{\text{MAP}(t) + p_{\text{ref}}}{p_{\text{ref}}} \cdot \frac{T_{\text{ref}}}{T_{\text{ref}} + \text{IAT}(t)} \cdot \left(1 + \frac{1}{\text{AFR}_{\text{st}} \cdot \lambda(t)}\right) \\ &\approx \frac{d \cdot n(t) \cdot \eta_{\text{vol}}(t)}{1000 \cdot f \cdot 60} \cdot \rho_{\text{air}} \cdot \frac{\text{MAP}(t) + p_{\text{ref}}}{p_{\text{ref}}} \cdot \frac{T_{\text{ref}}}{T_{\text{ref}} + \text{IAT}(t)} \\ &\quad \cdot \left(1 + \frac{1}{\text{AFR}_{\text{st}}} \cdot \frac{\hat{c}_{\text{O}_2} - c_{\text{O}_2}(t)}{\hat{c}_{\text{O}_2}}\right) \end{aligned}$$

Waarin (theoretisch):

| | |
|------------------------------|---|
| $\dot{m}_{\text{exh,SD}}(t)$ | Het uitlaatgas-massadebiet gebaseerd op de SD methode [g/s]; |
| d | Cilinderinhoud van de motor [cm ³]; |
| $n(t)$ | Motortoerental [rpm]; |
| $\eta_{\text{vol}}(t)$ | Vullingsgraad van de motor [%]; |
| f | Factor (1 voor tweetaktmotor, 2 voor viertaktmotor); |
| ρ_{air} | Dichtheid van de omgevingslucht onder standaard omstandigheden [kg/L]; |
| MAP(t) | Manifold Absolute Pressure (druk van het gas bij de cilinderinlaat) [kPa]; |
| p_{ref} | Referentiedruk [kPa]; |
| IAT(t) | Inlet Air Temperature (temperatuur van het gas bij de cilinderinlaat) [°C]; |
| T_{ref} | Referentie temperatuur [K]; |
| AFR _{st} | Stoichiometrische lucht-brandstofverhouding is (diesel is 14.6) [1.0]; |
| $\lambda(t)$ | Luchtvermaatfactor is [1.0]; |
| \hat{c}_{CO_2} | Concentratie van zuurstof in de omgevingslucht is [%]; |
| $c_{\text{O}_2}(t)$ | Gemeten concentratie van zuurstof in het uitlaatgas is [%]. |

B.3 Liquid Fuel Economy methode

Is er alleen informatie over de brandstof-volumedebiet via OBD verkrijgbaar dan is volgende formule gebruikt:

$$\begin{aligned}\dot{m}_{\text{exh,LFE}}(t) &= \frac{\dot{v}_{\text{fuel}}(t) \cdot \rho_{\text{fuel}}}{3.6} \cdot (1 + \text{AFR}_{\text{st}} \cdot \lambda(t)) \\ &\approx \frac{\dot{v}_{\text{fuel}}(t) \cdot \rho_{\text{fuel}}}{3.6} \cdot \left(1 + \text{AFR}_{\text{st}} \cdot \frac{\hat{c}_{\text{O}_2}}{\hat{c}_{\text{O}_2} - c_{\text{O}_2}(t)}\right)\end{aligned}$$

Waarin

| | |
|-------------------------------|---|
| $\dot{m}_{\text{exh,LFE}}(t)$ | Uitlaatgas-massadebiet basierend op de LFE methode [g/s]; |
| $\dot{v}_{\text{fuel}}(t)$ | Brandstof-volumedebiet [L/h]; |
| ρ_{fuel} | Dichtheid van de brandstof [kg/L]; |
| AFR_{st} | Stoichiometrische lucht-brandstofverhouding [1.0]; |
| $\lambda(t)$ | Luchtvermaatfactor [1.0]; |
| \hat{c}_{O_2} | Concentratie van zuurstof in de omgevingslucht [%]; |
| $c_{\text{O}_2}(t)$ | Gemeten concentratie van zuurstof in het uitlaatgas [%]. |

B.4 Berekening van de momentane massa-emissies

De momentane massa-emissies worden berekend uit het uitlaatgas-massadebiet, de gemeten concentraties, en de verhouding tussen de dichtheid van de uitlaatgascomponent *gas* en de totale dichtheid van het uitlaatgas:

$$\dot{m}_{\text{gas}}(t) = u_{\text{gas}} \cdot c_{\text{gas}}(t) \cdot \dot{m}_{\text{exh}}(t)$$

Waarin

| | |
|---------------------------|---|
| $\dot{m}_{\text{gas}}(t)$ | Massa-emissie van uitlaatgas component X is [g/s]; De verhouding tussen de dichtheid van de uitlaatgascomponent X en de totale dichtheid van het uitlaatgas (waarden volgens (Europese Commissie, 2017a)) [1.0]; |
| u_{gas} | Gemeten concentratie van component X in het uitlaatgas [ppm]; |
| $c_{\text{gas}}(t)$ | Uitlaatgas-massadebiet is [kg/s]; |
| $\dot{m}_{\text{exh}}(t)$ | de tijd van de meting [s]. |
| t | |

B.5 Berekening van de specifieke massa-emissies

De (arbeids-)specifieke massa-emissies kon alleen worden berekend als informatie over motortoerental en motorkoppel beschikbaar was via OBD. Met deze informatie werd het momentele motorvermogen met volgende formule berekend:

$$P_{\text{act}}(t) = \frac{n(t) \cdot \pi \cdot Q(t)}{30000}$$

Waarin

| | |
|---------------------|-------------------------------|
| $P_{\text{act}}(t)$ | Momentele motorvermogen [kW]; |
| $n(t)$ | Motortoerental [rpm]; |
| $T(t)$ | Motorkoppel [Nm]. |

De specifieke massa-emissies van uitlaatcomponenten zijn berekend met volgende formule:

$$m_{\text{gas,spec}} = \frac{\int_{t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}} \dot{m}_{\text{gas}}(t) \cdot dt}{\int_{t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}} P_{\text{act}}(t) \cdot dt} \cdot 3600$$

Waarin

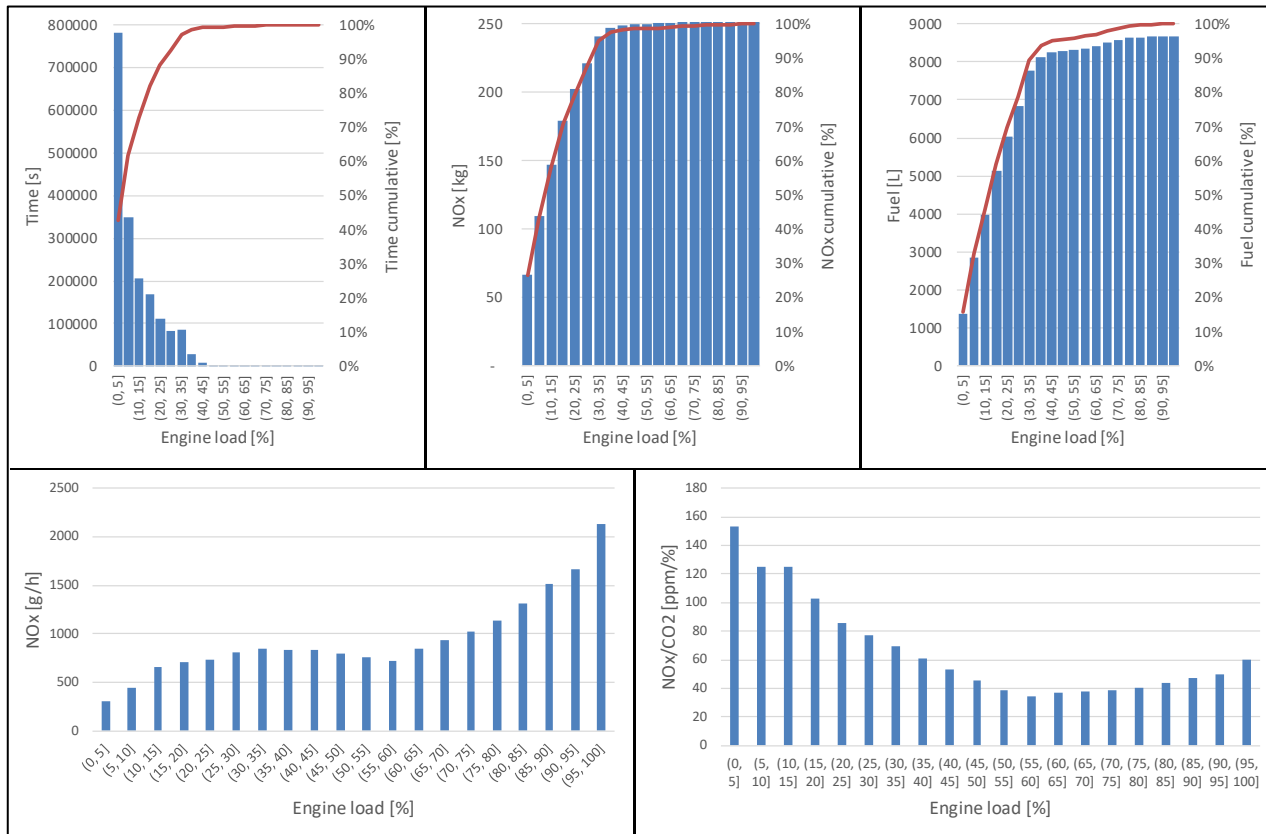
| | |
|---------------------------|---|
| $m_{\text{gas,spec}}$ | Specifieke massa emissie van de component <i>gas</i> [g/kWh]; |
| $\dot{m}_{\text{gas}}(t)$ | Massa-emissie van een gas [g/s]; |
| $P_{\text{act}}(t)$ | Momentele motorvermogen [kW]. |

C Overzicht monitoringsresultaten per machine

| | |
|--------------------------|--------------------------------|
| Datasheet | |
| NRMM Type | Piling Equipment |
| Versit Class | NGWDNRE7 |
| Engine Plate Information | |
| Make | Caterpillar |
| Model | C18 |
| Manufacturing year | 01-jul-20 |
| Power (rated) | 563 kW |
| Displacement | 18,1 L |
| Stage / Tier | Stage V (subcategorie NRE-v-7) |
| Exhaust Emissie Control | DFI, TC, EC, CAC, EGR, OC |

| | Totaal | |
|----------------|--------|-------------|
| Operation time | 509 | Hours |
| NOx | 254 | Kg |
| Fuel | 8.678 | Liters |
| Fuel | 17 | Liters/hour |
| CO2 | 23.329 | Kg |
| NH3 | 300 | Gram |

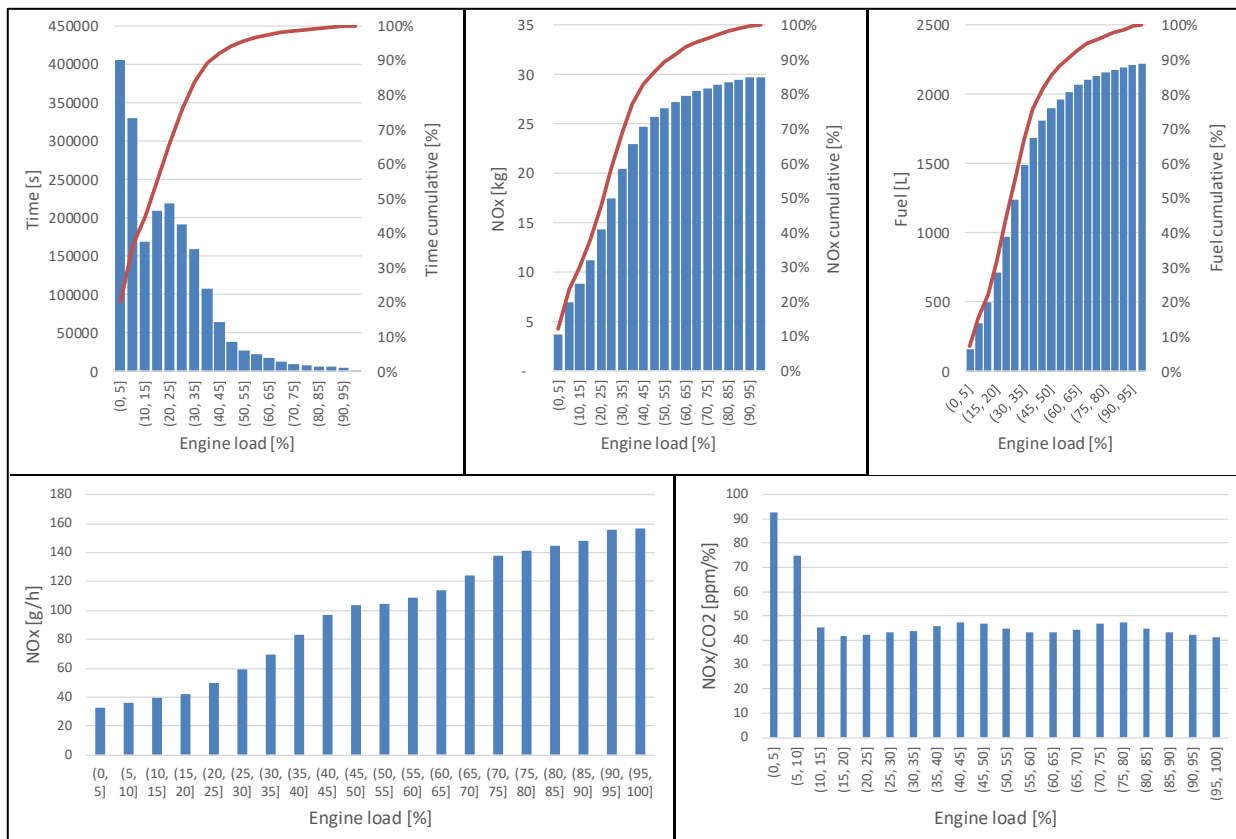
| Pollutant | g/kWh | | g/u | | g/l | |
|-----------|-------|----------|-----|----------|-----|----------|
| | avg | avg >20% | avg | avg >20% | avg | avg >20% |
| NOx | 8,0 | 4,8 | 499 | 806 | 36 | 22 |
| NH3 | 0,009 | 0,003 | - | - | - | - |



| | |
|---------------------------------|--------------------------------------|
| Datasheet | |
| NRMM Type | Asphalt Roller |
| Versit Class | NWBDNRE4 |
| Engine Plate Information | |
| Make | Bomag |
| Model | 174AP-4AM |
| Manufacturing year | 2019 |
| Power (rated) | 55 kW |
| Displacement | 3,3 L |
| Stage / Tier | Stage V (subcategorie NRE-v-4) |
| Exhaust Emissie Control | ECS, EM, DFI, TC, EGR, ECM, PTOX, OC |

| | Totaal | |
|----------------|--------|-------------|
| Operation time | 558 | Hours |
| NOx | 30 | Kg |
| Fuel | 2.223 | Liters |
| Fuel | 4 | Liters/hour |
| CO2 | 5.730 | Kg |
| NH3 | 456 | Gram |

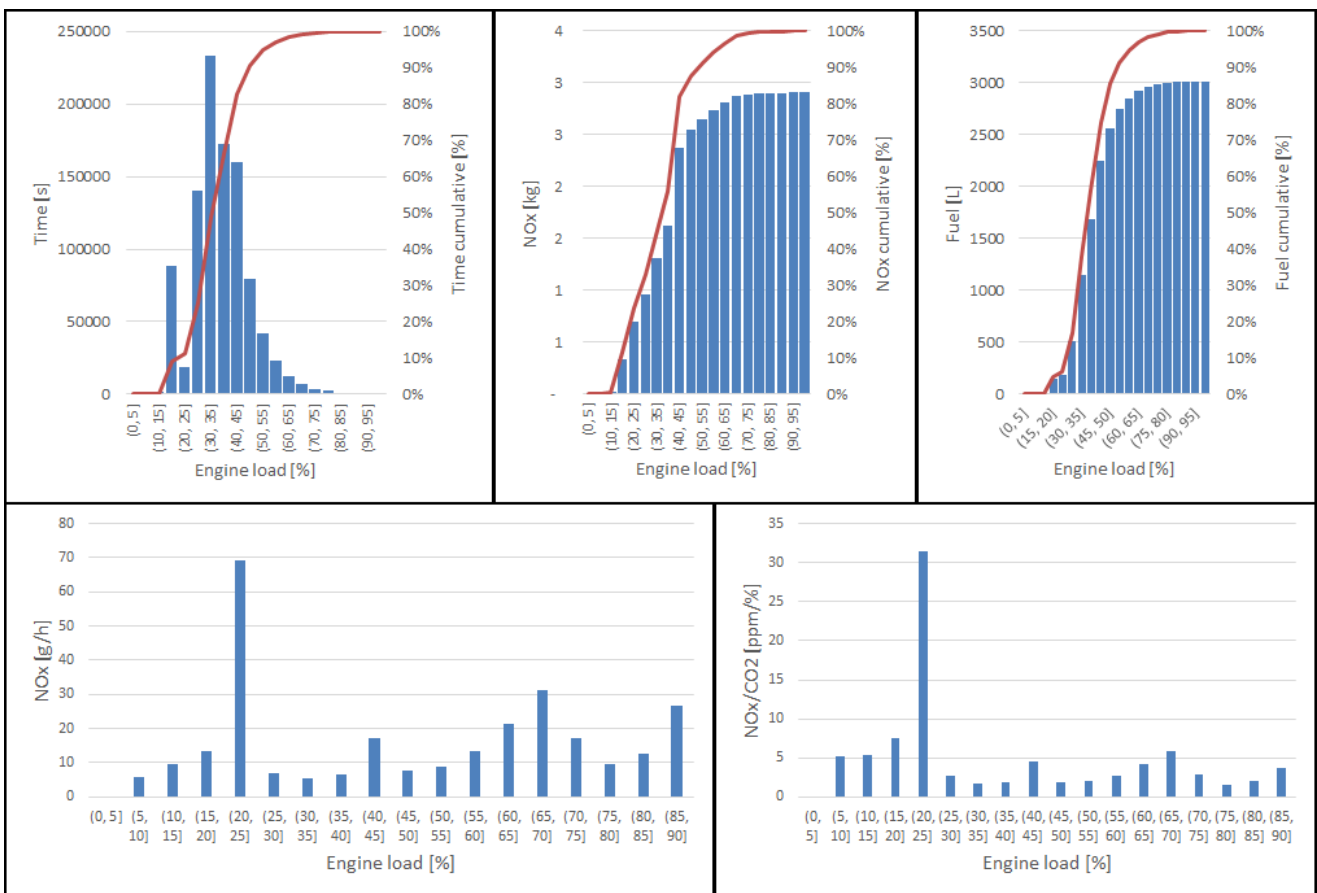
| Pollutant | g/kWh | | g/u | | g/l | |
|-----------|-------|----------|-----|----------|-----|----------|
| | avg | avg >20% | avg | avg >20% | avg | avg >20% |
| NOx | 4,8 | 3,9 | 53 | 74 | 15 | 12 |
| NH3 | 0,074 | 0,061 | - | - | - | - |



| Datasheet | |
|--------------------------|------------------------------|
| NRMM Type | Paver / Finisher |
| Versit Class | NWBDNRE5 |
| Engine Plate Information | |
| Make | Dynapac |
| Model | SD2500C |
| Manufacturing year | - |
| Power (rated) | 129 kW |
| Displacement | 6,7 L |
| Stage / Tier | Stage V subcategorie NRE-v-5 |
| Exhaust Emissie Control | |

| | Totaal | |
|----------------|--------|-------------|
| Operation time | 274 | Hours |
| NOx | 3 | Kg |
| Fuel | 3.007 | Liters |
| Fuel | 11 | Liters/hour |
| CO2 | 7.729 | Kg |
| NH3 | 156 | Gram |

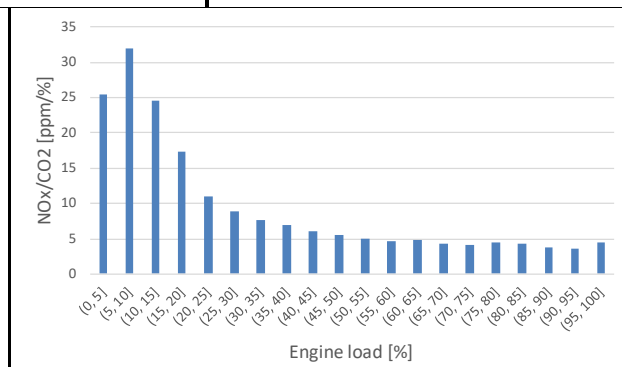
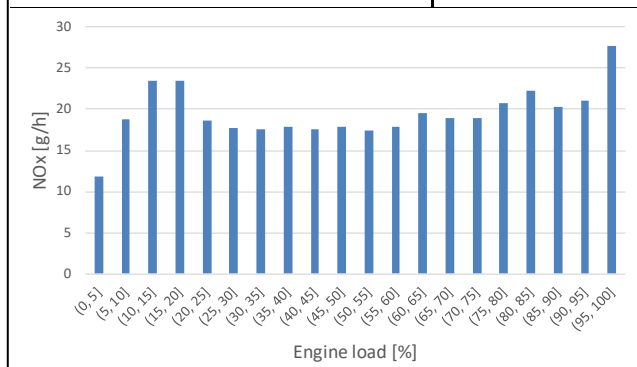
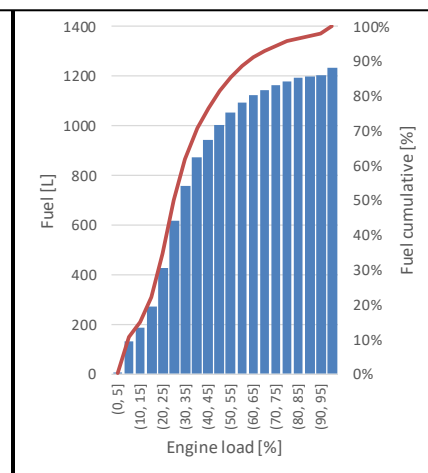
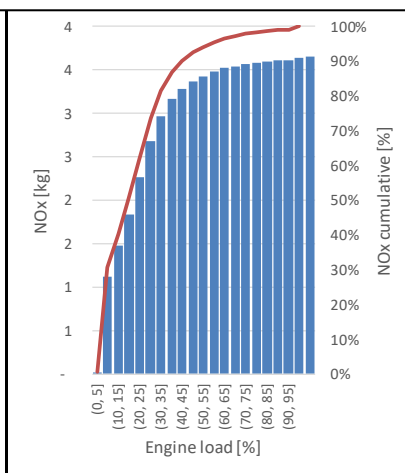
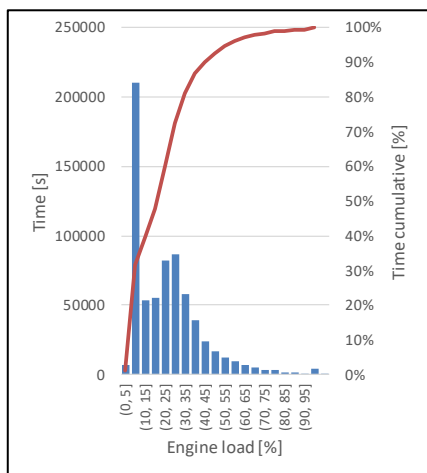
| Pollutant | g/kWh | | g/u | | g/l | |
|-----------|-------|----------|-----|----------|-----|----------|
| | avg | avg >20% | avg | avg >20% | avg | avg >20% |
| NOx | 0,2 | 0,2 | 11 | 10 | 1 | 1 |
| NH3 | 0,012 | 0,012 | - | - | - | - |



| | |
|--------------------------|---------------------------------------|
| Datasheet | |
| NRMM Type | Hydraulic Excavator |
| Versit Class | NGMDNRE5 |
| Engine Plate Information | |
| Make | Takeuchi |
| Model | TB295W |
| Manufacturing year | 2021 |
| Power (rated) | 85 kW |
| Displacement | 3,6 L |
| Stage / Tier | Stage V subcategorie NRE-v-5 |
| Exhaust Emissie Control | DDI, TC, CAC ECM, EGR, DOC, CTOX, SCR |

| | Totaal | |
|----------------|--------|-------------|
| Operation time | 190 | Hours |
| NOx | 4 | Kg |
| Fuel | 1.233 | Liters |
| Fuel | 6,5 | Liters/hour |
| CO2 | 3.179 | Kg |
| NH3 | 15 | Gram |

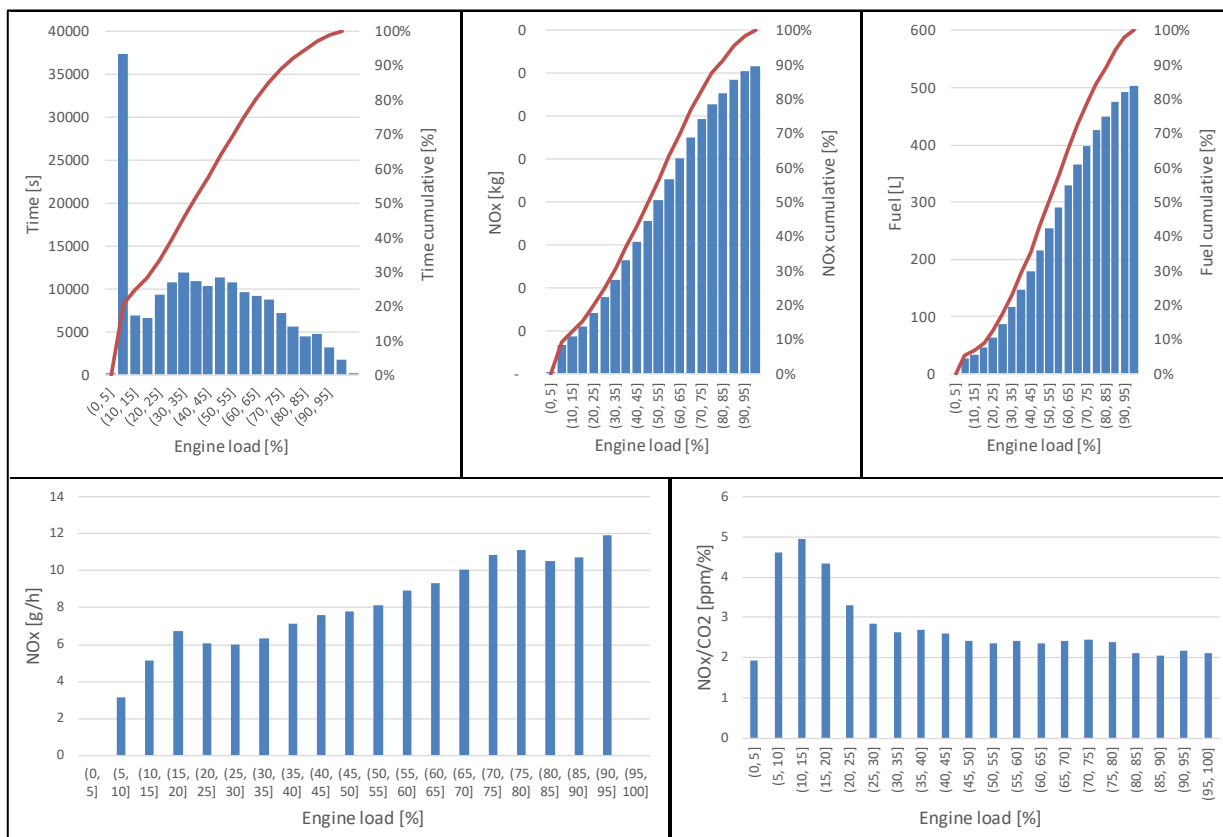
| Pollutant | g/kWh | | g/u | | g/l | |
|-----------|-------|----------|-----|----------|-----|----------|
| | avg | avg >20% | avg | avg >20% | avg | avg >20% |
| NOx | 1,0 | 0,6 | 19 | 18 | 5 | 2 |
| NH3 | 0,004 | 0,004 | - | - | - | - |



| Datasheet | |
|--------------------------|---------------------|
| NRMM Type | Hydraulic Excavator |
| Versit Class | NGMDNRE5 |
| Engine Plate Information | |
| Make | Takeuchi |
| Model | TB2150R |
| Manufacturing year | 2021 |
| Power (rated) | 85 kW |
| Displacement | 3,6 L |
| Stage / Tier | V (NRE-v-5) |
| Exhaust Emissie Control | DOC, SCR, DPF |

| | Totaal | |
|----------------|--------|-------------|
| Operation time | 50 | Hours |
| NOx | 0,4 | Kg |
| Fuel | 503 | Liters |
| Fuel | 10 | Liters/hour |
| CO2 | 1.306 | Kg |
| NH3 | 32 | Gram |

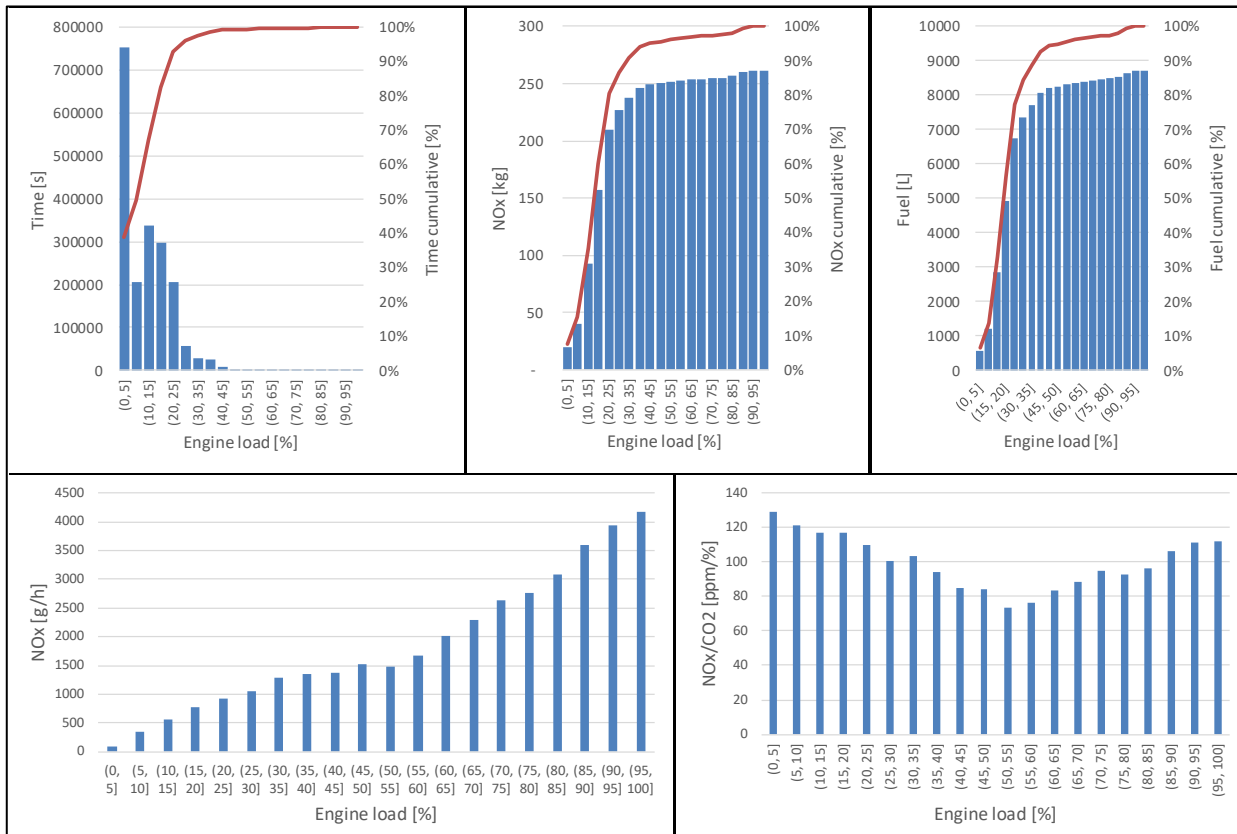
| Pollutant | g/kWh | | g/u | | g/l | |
|-----------|-------|----------|-----|----------|-----|----------|
| | avg | avg >20% | avg | avg >20% | avg | avg >20% |
| NOx | 0,2 | 0,2 | 7 | 8 | 1 | 1 |
| NH3 | 0,018 | 0,019 | - | - | - | - |



| | |
|--------------------------|------------------------------|
| Datasheet | |
| NRMM Type | Piling Equipment |
| Versit Class | NGWDST2X |
| Engine Plate Information | |
| Make | Caterpillar |
| Model | C18 |
| Manufacturing year | 2008 |
| Power (rated) | 570 kW |
| Displacement | 18,1 L |
| Stage / Tier | Tier 2 (Stage not regulated) |
| Exhaust Emissie Control | EM, DI, TC, ECM, CAC |

| | Totaal | |
|----------------|--------|-------------|
| Operation time | 538 | Hours |
| NOx | 262 | Kg |
| Fuel | 8.704 | Liters |
| Fuel | 16 | Liters/hour |
| CO2 | 22.321 | Kg |
| NH3 | 640 | Gram |

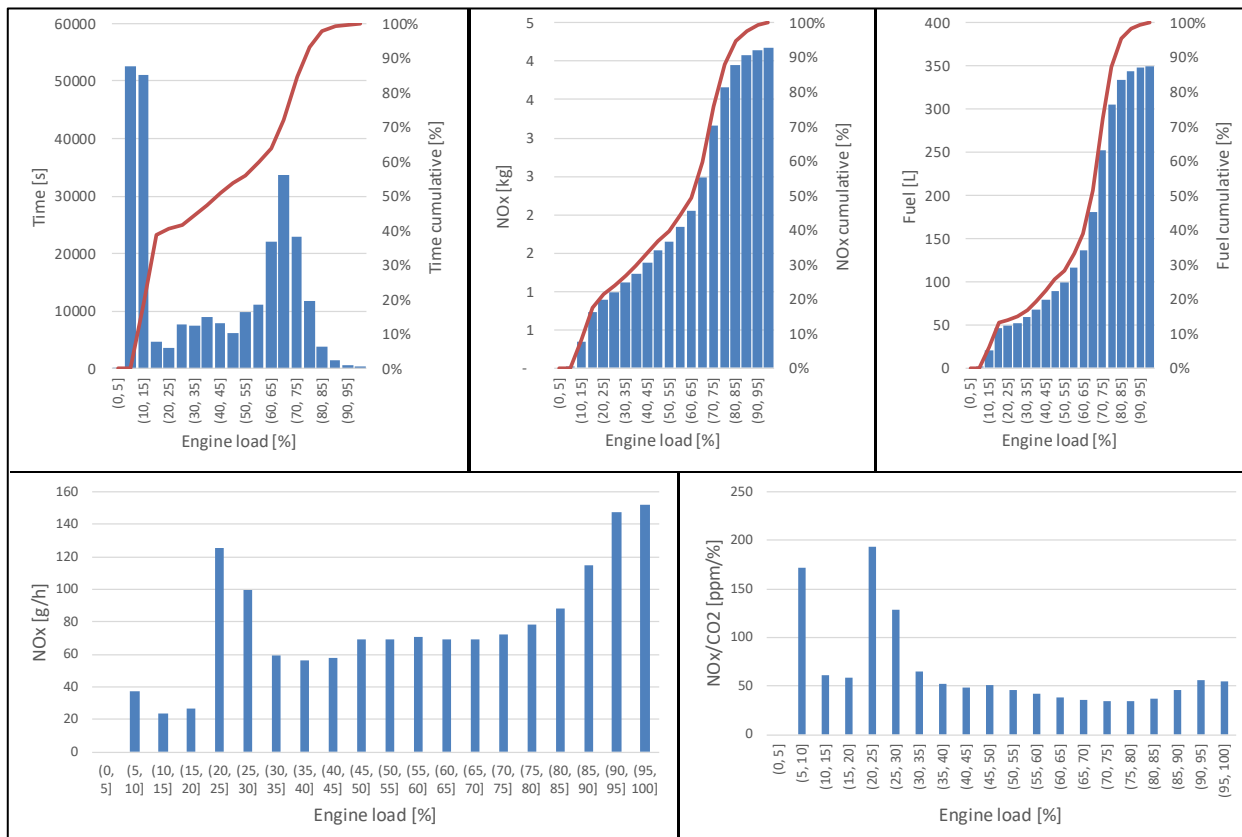
| Pollutant | g/kWh | | g/u | | g/l | |
|-----------|-------|----------|-----|----------|-----|----------|
| | avg | avg >20% | avg | avg >20% | avg | avg >20% |
| NOx | 9,7 | 8,1 | 486 | 1.098 | 32 | 28 |
| NH3 | 0,024 | 0,022 | - | - | - | - |



| Datasheet | |
|--------------------------|------------------------------|
| NRMM Type | Hydraulic Excavator |
| Versit Class | NGMDNRE4 |
| Engine Plate Information | |
| Make | Hitachi |
| Model | ZX85US-6 |
| Manufacturing year | 2019 |
| Power (rated) | 42.2 kW |
| Displacement | 3,318 L |
| Stage / Tier | Stage V subcategorïe NRE-v-4 |
| Exhaust Emissie Control | ECU, EM, EGR, DFI, PTOX, OC |

| | Totaal | |
|----------------|--------|-------------|
| Operation time | 74 | Hours |
| NOx | 4 | Kg |
| Fuel | 350 | Liters |
| Fuel | 5 | Liters/hour |
| CO2 | 907 | Kg |
| NH3 | 8 | Gram |

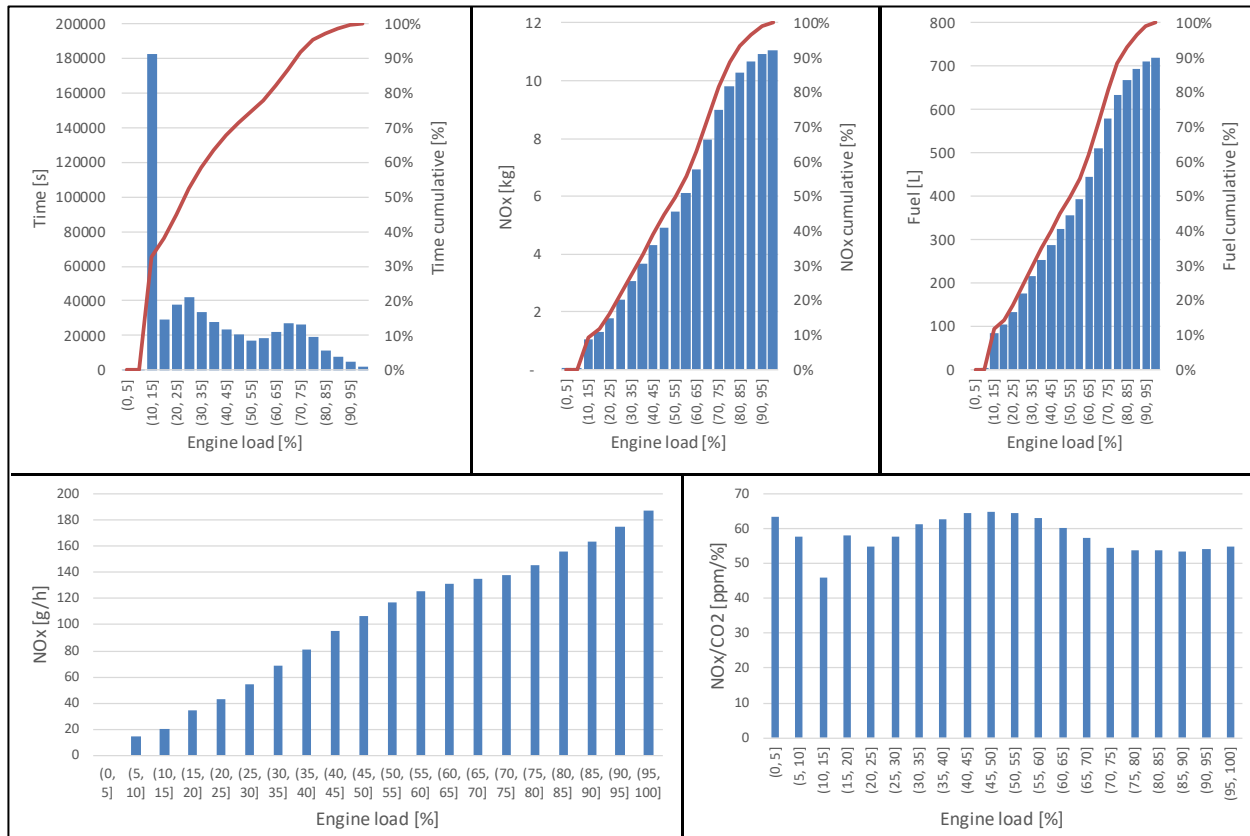
| Pollutant | g/kWh | | g/u | | g/l | |
|-----------|-------|----------|-----|----------|-----|----------|
| | avg | avg >20% | avg | avg >20% | avg | avg >20% |
| NOx | 3,4 | 3,1 | 56 | 76 | 14 | 13 |
| NH3 | 0,007 | 0,006 | - | - | - | - |



| | |
|--------------------------|---------------------------------|
| Datasheet | |
| NRMM Type | Hydraulic Excavator |
| Versit Class | NGMDNRE4 |
| Engine Plate Information | |
| Make | Takeuchi |
| Model | TB290-2 |
| Manufacturing year | 2021 |
| Power (rated) | 51.6 kW |
| Displacement | 3.320 L |
| Stage / Tier | V (NRE-v-4) |
| Exhaust Emissie Control | ECU, EM, EGR, DFI, TC, PTOX, OC |

| | Totaal | |
|----------------|--------|-------------|
| Operation time | 155 | Hours |
| NOx | 11 | Kg |
| Fuel | 719 | Liters |
| Fuel | 4,6 | Liters/hour |
| CO2 | 1.851 | Kg |
| NH3 | 24 | Gram |

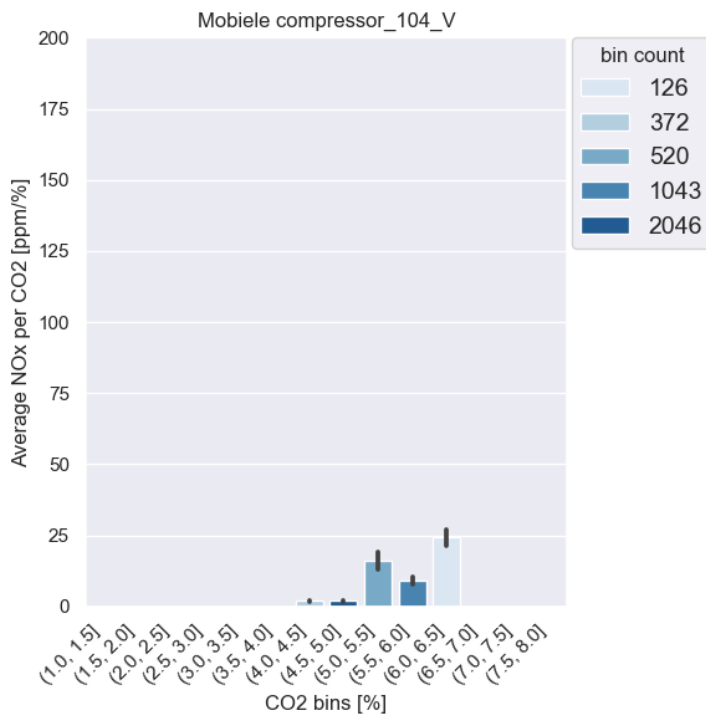
| Pollutant | g/kWh | | g/u | | g/l | |
|-----------|-------|----------|-----|----------|-----|----------|
| | avg | avg >20% | avg | avg >20% | avg | avg >20% |
| NOx | 4,6 | 4,4 | 71 | 101 | 15 | 16 |
| NH3 | 0,010 | 0,010 | - | - | - | - |



D Overzicht per machine kortstondige metingen

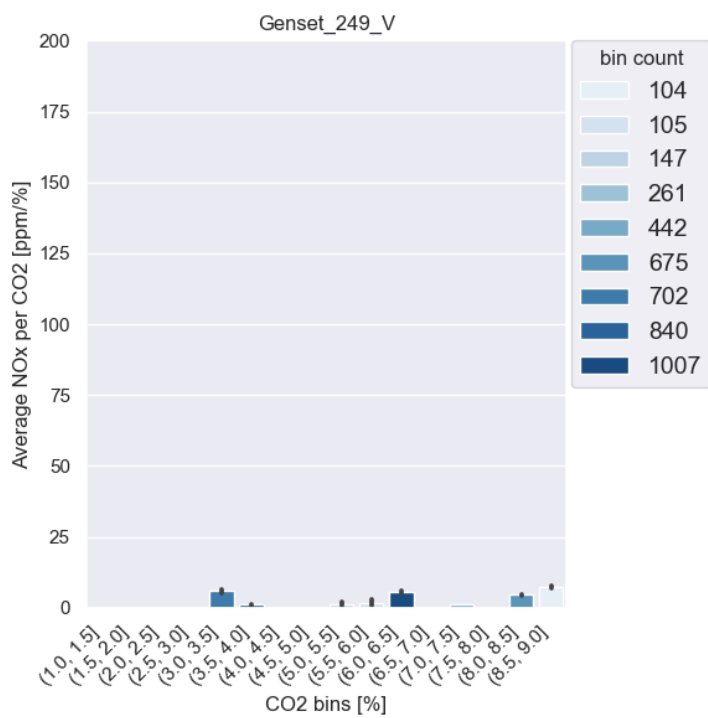
| | |
|--------------------------|----------------------|
| Datasheet | |
| NRMM Type | Aircompressor |
| Versit Class | NSTDNRE5 |
| Engine Plate Information | |
| Make | Atlas Copco Airpower |
| Model | XAS 188-14 PACE S5 |
| Manufacturing year | 2022 |
| Power (rated) | 104 kW |
| Displacement | 4,5L |
| Stage / Tier | V (NRE-c-5) |
| Exhaust Emissie Control | EGR, SCR, DPF |

| | | |
|----------------|--------|-------|
| | Totaal | |
| Operation time | 1,14 | Hours |



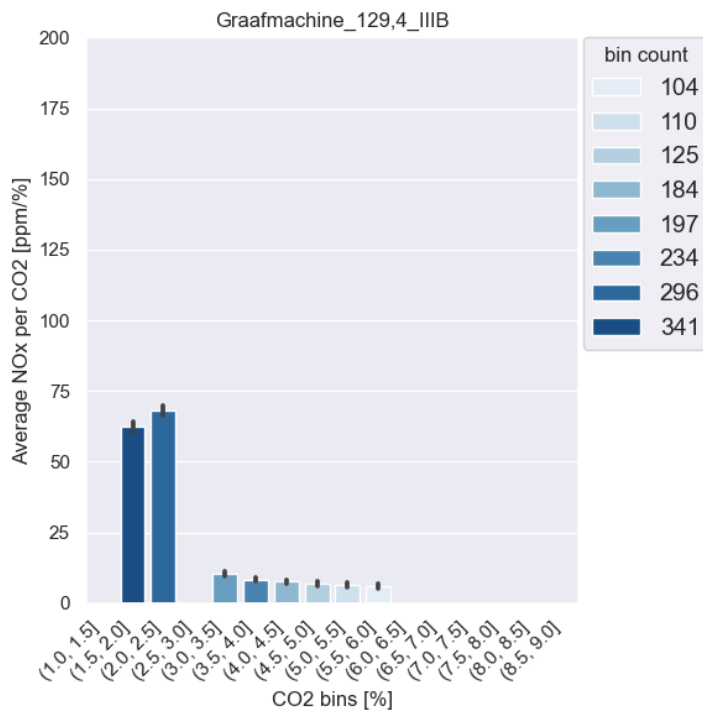
| | |
|--------------------------|-------------|
| Datasheet | |
| NRMM Type | Genset |
| Versit Class | NSTDNRE6 |
| Engine Plate Information | |
| Make | Volvo Penta |
| Model | TAD882GE |
| Manufacturing year | 2021 |
| Power (rated) | 249 kW |
| Displacement | 7,7 L |
| Stage / Tier | V (NRE-c-6) |
| Exhaust Emissie Control | DPF, SCR |

| | | |
|----------------|--------|-------|
| | Totaal | |
| Operation time | 1,19 | Hours |



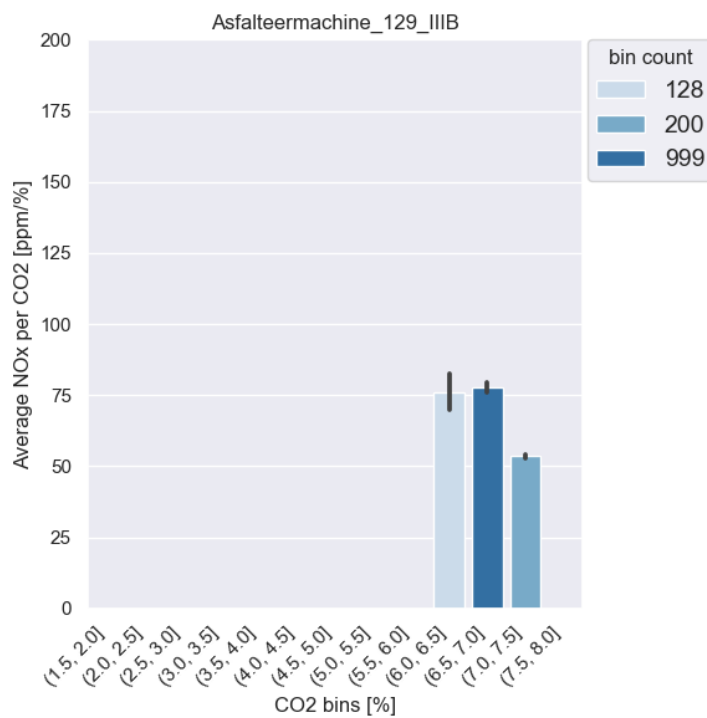
| | |
|--------------------------|---------------------|
| Datasheet | |
| NRMM Type | Hydraulic Excavator |
| Versit Class | NGMDS3BM |
| Engine Plate Information | |
| Make | Caterpillar |
| Model | M318F |
| Manufacturing year | 2015 |
| Power (rated) | 129,4 kW |
| Displacement | 7,0 L |
| Stage / Tier | IIIB |
| Exhaust Emissie Control | DOC, DPF, SCR, EGR |

| | | |
|----------------|--------|-------|
| | Totaal | |
| Operation time | 0,44 | Hours |



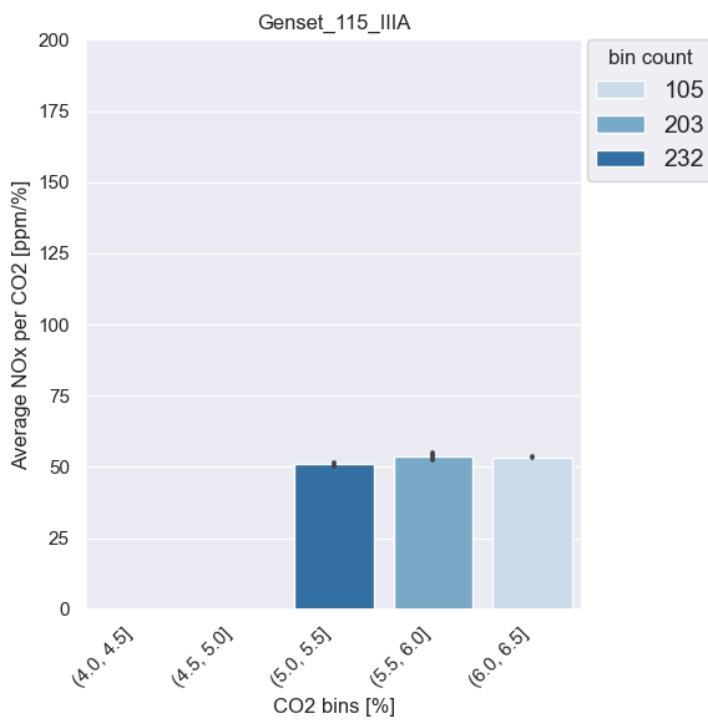
| Datasheet | |
|--------------------------|------------------|
| NRMM Type | Paver / Finisher |
| Versit Class | NWBDS3BM |
| Engine Plate Information | |
| Make | Dynapac |
| Model | SD2500C |
| Manufacturing year | 2013 |
| Power (rated) | 129 kW |
| Displacement | 6,7 |
| Stage / Tier | IIIB |
| Exhaust Emissie Control | - |

| | | |
|----------------|--------|-------|
| | Totaal | |
| Operation time | 0,37 | Hours |



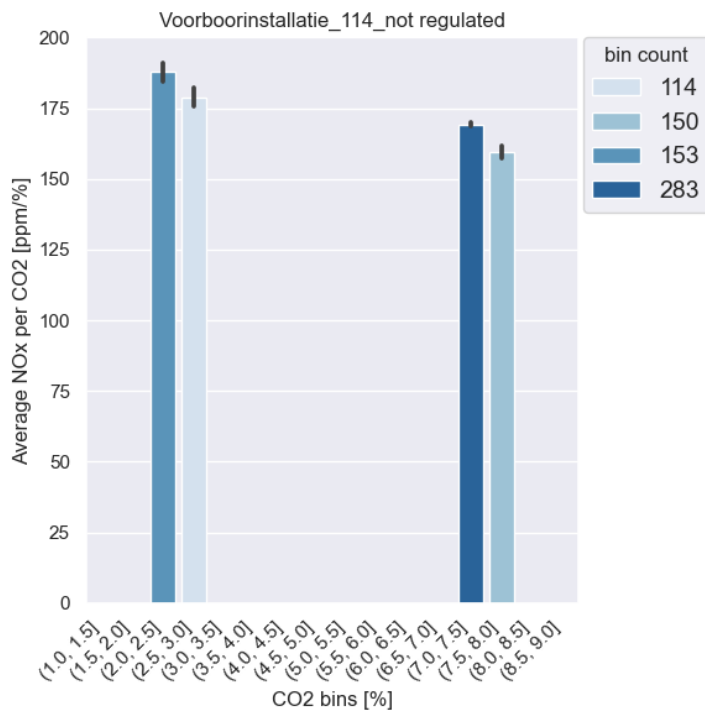
| Datasheet | |
|--------------------------|------------|
| NRMM Type | Genset |
| Versit Class | NSTDS3AI |
| Engine Plate Information | |
| Make | FPT |
| Model | NEF67 TM1F |
| Manufacturing year | 2017 |
| Power (rated) | 115 kW |
| Displacement | 6,7 L |
| Stage / Tier | IIIA |
| Exhaust Emissie Control | - |

| | Totaal | |
|----------------|--------|-------|
| Operation time | 0,15 | Hours |



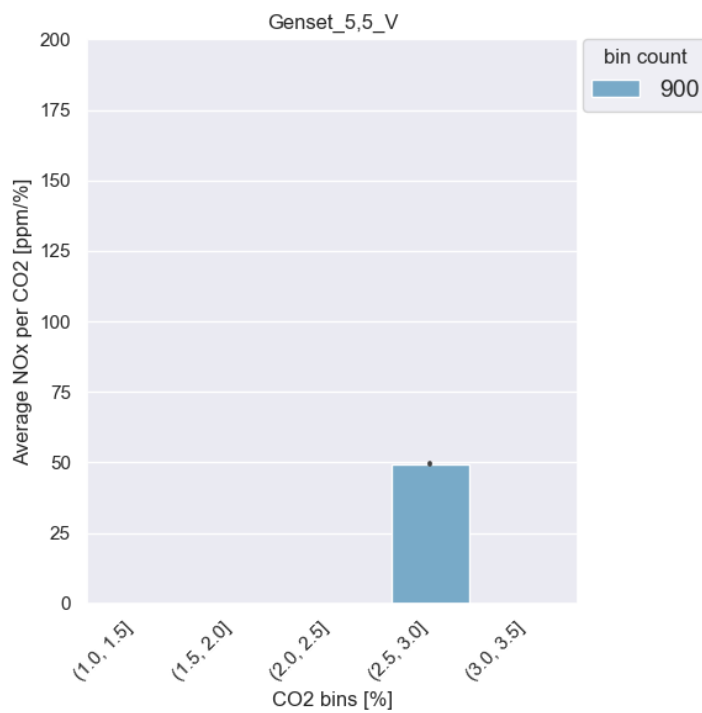
| | |
|---------------------------------|-----------------|
| Datasheet | |
| NRMM Type | Predrilling Rig |
| Versit Class | NGWDPRES |
| Engine Plate Information | |
| Make | Iveco |
| Model | Aifo 8361.25 |
| Manufacturing year | - |
| Power (rated) | 114 kW |
| Displacement | 8,1 L |
| Stage / Tier | Not regulated |
| Exhaust Emissie Control | - |

| | | |
|----------------|--------|-------|
| | Totaal | |
| Operation time | 0,19 | Hours |



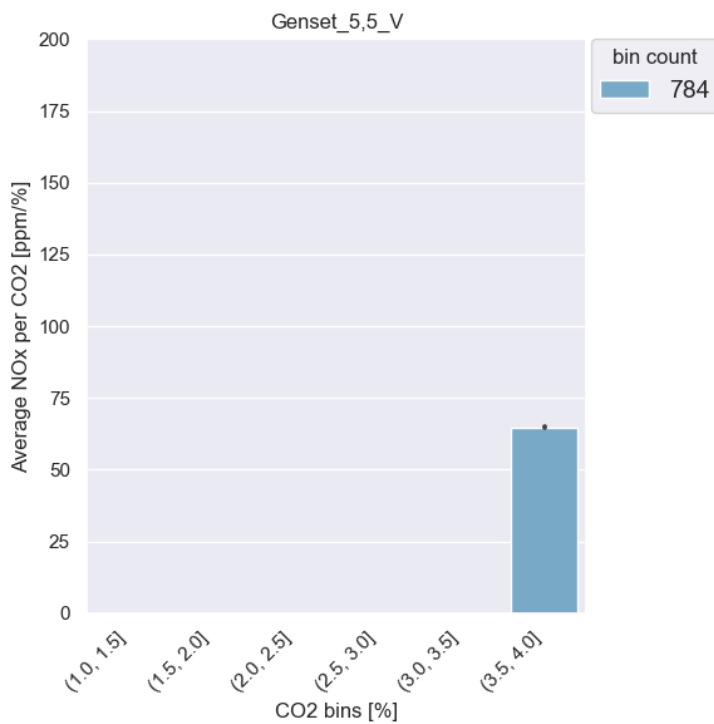
| Datasheet | |
|--------------------------|----------|
| NRMM Type | Genset |
| Versit Class | NSTDNRE2 |
| Engine Plate Information | |
| Make | Hatz |
| Model | 1D81Z |
| Manufacturing year | 2020 |
| Power (rated) | 5,5 kW |
| Displacement | 0,667 L |
| Stage / Tier | V |
| Exhaust Emissie Control | - |

| | Totaal | |
|----------------|--------|-------|
| Operation time | 0,25 | Hours |



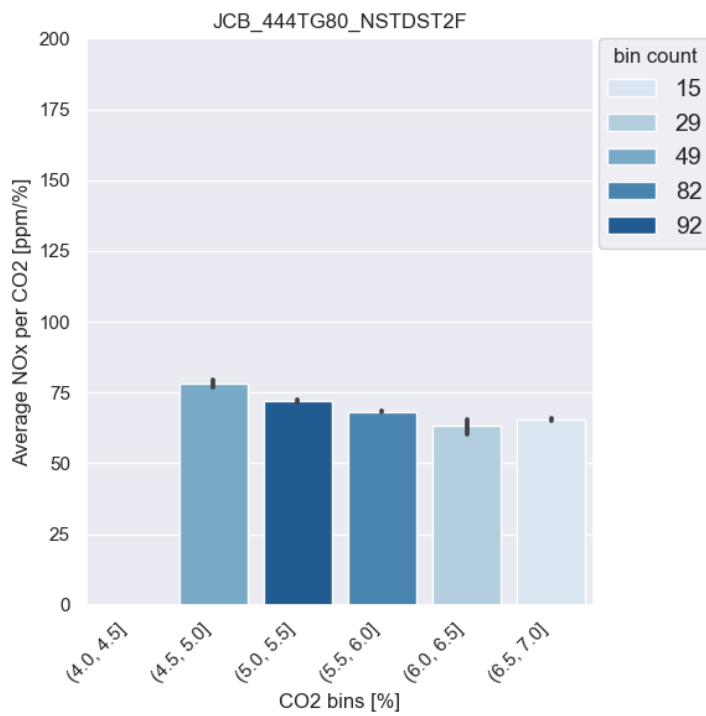
| | |
|---------------------------------|----------|
| Datasheet | |
| NRMM Type | Genset |
| Versit Class | NSTDNRE2 |
| Engine Plate Information | |
| Make | Hatz |
| Model | 1D81Z |
| Manufacturing year | 2020 |
| Power (rated) | 5,5 kW |
| Displacement | 0,667 L |
| Stage / Tier | V |
| Exhaust Emissie Control | - |

| | | |
|----------------|--------|-------|
| | Totaal | |
| Operation time | 0,22 | Hours |



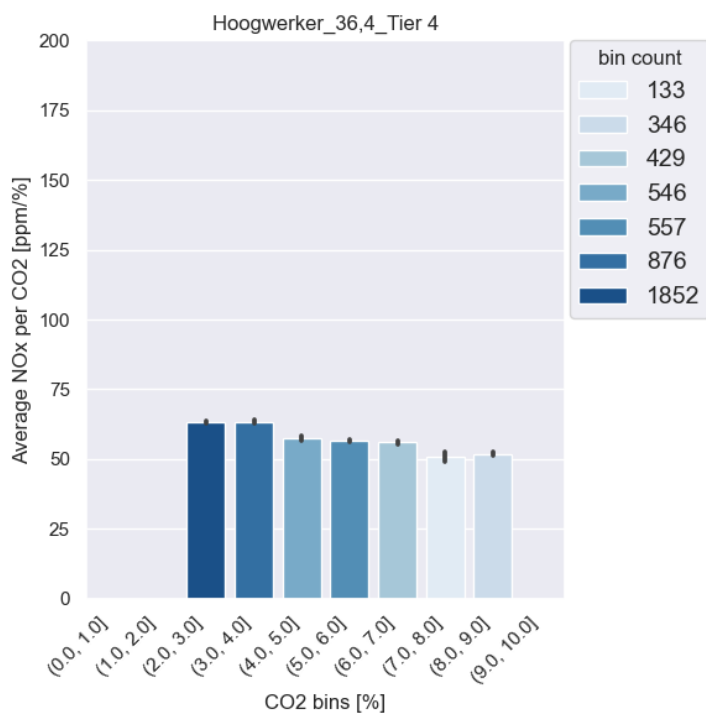
| | |
|--------------------------|-------------|
| Datasheet | |
| NRMM Type | Work Vessel |
| Versit Class | NSTDST2F |
| Engine Plate Information | |
| Make | JCB |
| Model | 444TG-80 |
| Manufacturing year | 2018 |
| Power (rated) | 74,2 kW |
| Displacement | |
| Stage / Tier | II |
| Exhaust Emissie Control | - |

| | | |
|----------------|--------|-------|
| | Totaal | |
| Operation time | 0,07 | Hours |



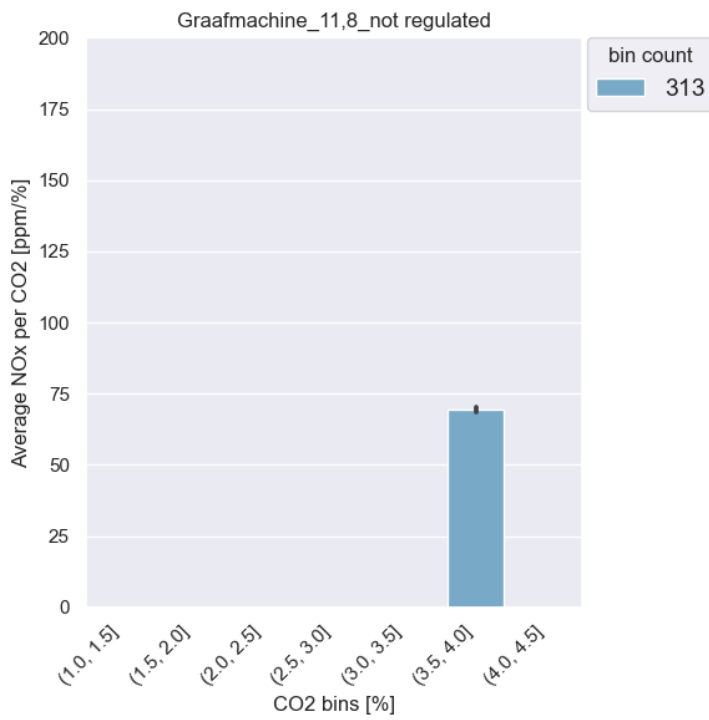
| Datasheet | |
|--------------------------|----------------------|
| NRMM Type | Telescopic Boom Lift |
| Versit Class | NKRDTIER4 |
| Engine Plate Information | |
| Make | JLG |
| Model | 660SJ |
| Manufacturing year | 2017 |
| Power (rated) | 36,4 kW |
| Displacement | 3,1 |
| Stage / Tier | Tier 4 |
| Exhaust Emissie Control | - |

| | Totaal | |
|----------------|--------|-------|
| Operation time | 1,32 | Hours |



| Datasheet | |
|--------------------------|---------------------|
| NRMM Type | Hydraulic Excavator |
| Versit Class | NGMDS3AX |
| Engine Plate Information | |
| Make | Kubota |
| Model | D902 |
| Manufacturing year | 2009 |
| Power (rated) | 11,8 |
| Displacement | |
| Stage / Tier | Not regulated |
| Exhaust Emissie Control | - |

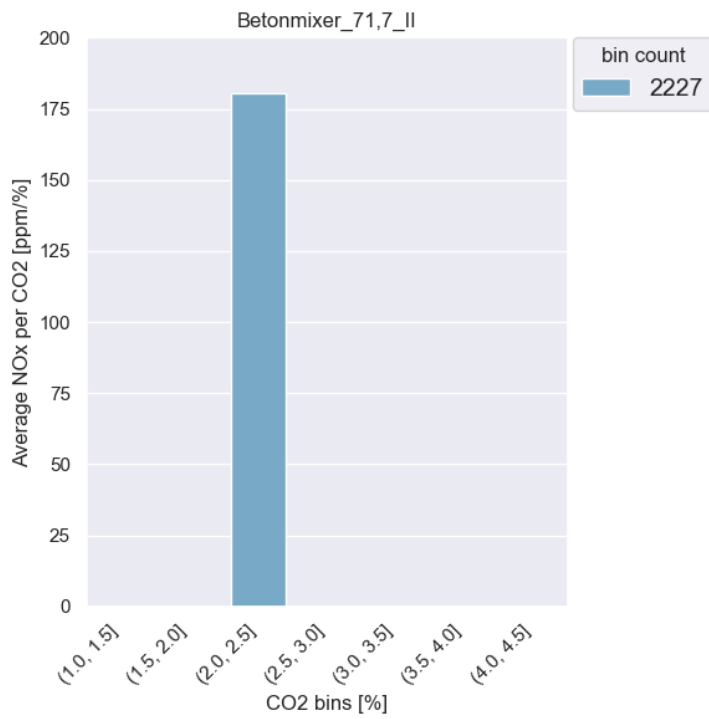
| | Totaal | |
|----------------|--------|-------|
| Operation time | 0,09 | Hours |



0

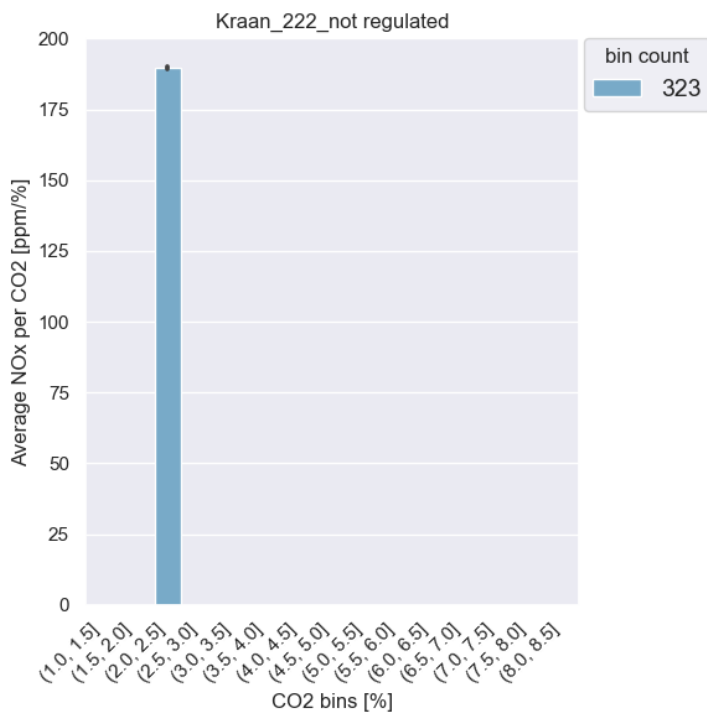
| Datasheet | |
|--------------------------|--------------|
| NRMM Type | Cement Mixer |
| Versit Class | NSTDST2G |
| Engine Plate Information | |
| Make | Deutz |
| Model | F6L914 |
| Manufacturing year | 2008 |
| Power (rated) | 71,7 kW |
| Displacement | - |
| Stage / Tier | II |
| Exhaust Emissie Control | - |

| | Totaal | |
|----------------|--------|-------|
| Operation time | 0,62 | Hours |



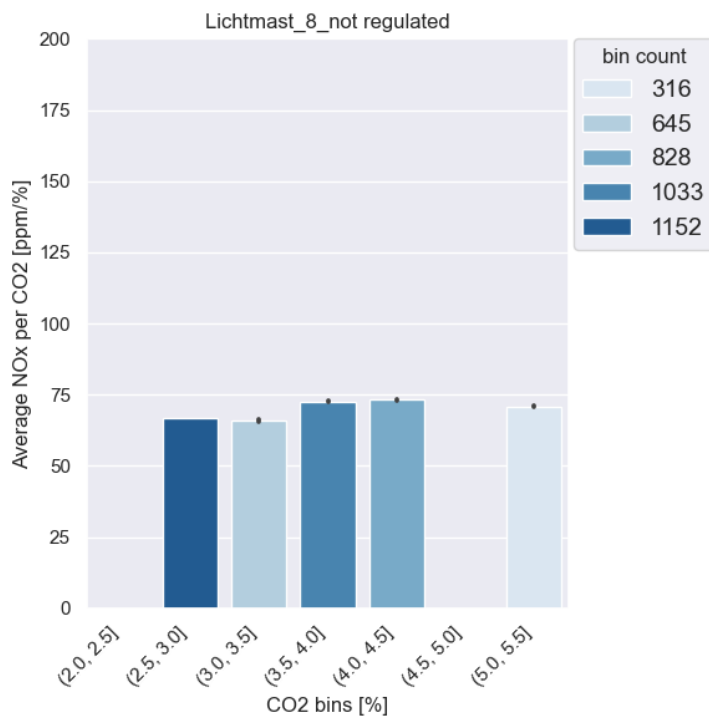
| | |
|--------------------------|---------------|
| Datasheet | |
| NRMM Type | Crane |
| Versit Class | NGWDPRES |
| Engine Plate Information | |
| Make | Sennebogen |
| Model | 6100 |
| Manufacturing year | 1998 |
| Power (rated) | 222 kW |
| Displacement | - |
| Stage / Tier | Not regulated |
| Exhaust Emissie Control | - |

| | | |
|----------------|--------|-------|
| | Totaal | |
| Operation time | 0,09 | Hours |



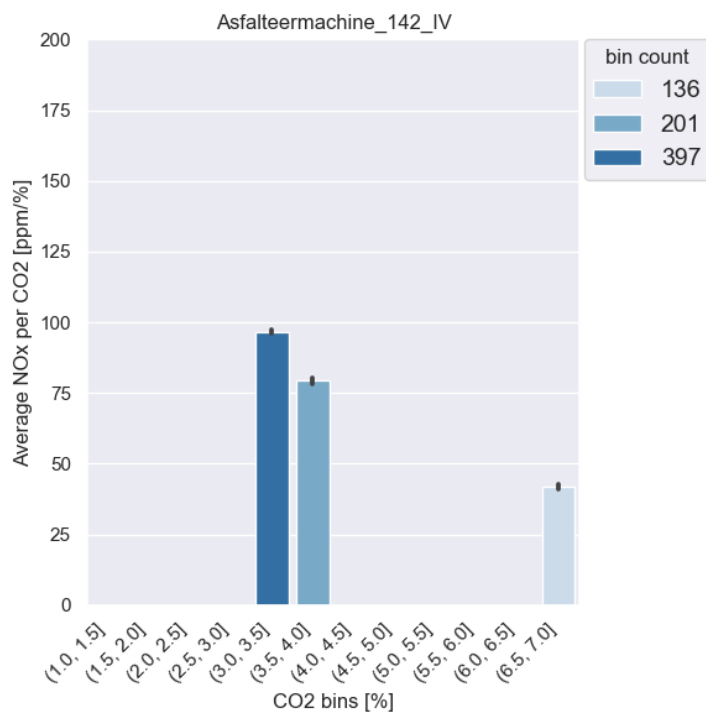
| Datasheet | |
|--------------------------|----------------|
| NRMM Type | Light pole |
| Versit Class | NSTDS3AX |
| Engine Plate Information | |
| Make | Tower Light |
| Model | Superlight VT1 |
| Manufacturing year | 2007 |
| Power (rated) | 8 kW |
| Displacement | - |
| Stage / Tier | Not regulated |
| Exhaust Emissie Control | - |

| | Totaal | |
|----------------|--------|-------|
| Operation time | 1,10 | Hours |



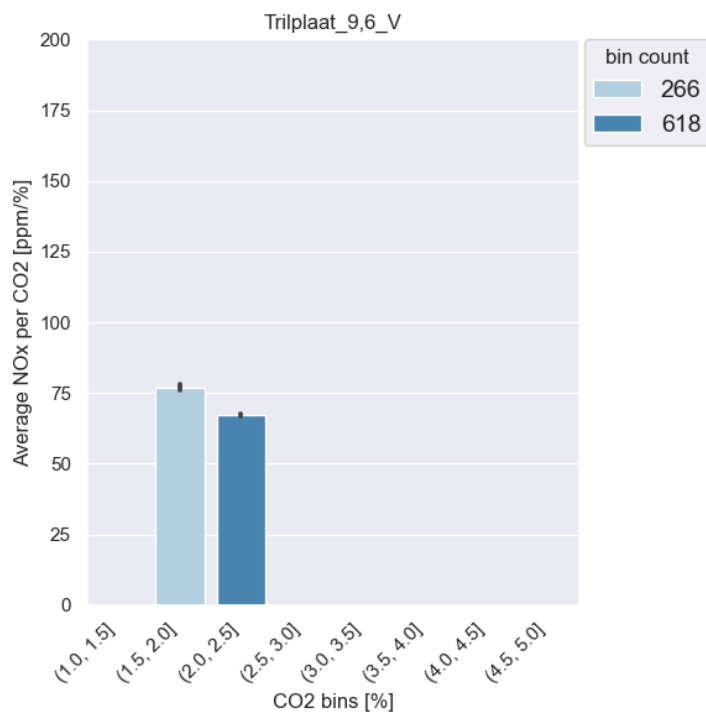
| | |
|---------------------------------|------------------|
| Datasheet | |
| NRMM Type | Paver / Finisher |
| Versit Class | NWBDST4Q |
| Engine Plate Information | |
| Make | Joseph Vögele AG |
| Model | SUPER 1900-3i |
| Manufacturing year | 2016 |
| Power (rated) | 142 kW |
| Displacement | - |
| Stage / Tier | IV |
| Exhaust Emissie Control | DOC, DPF, SCR |

| | | |
|----------------|--------|-------|
| | Totaal | |
| Operation time | 0,20 | Hours |



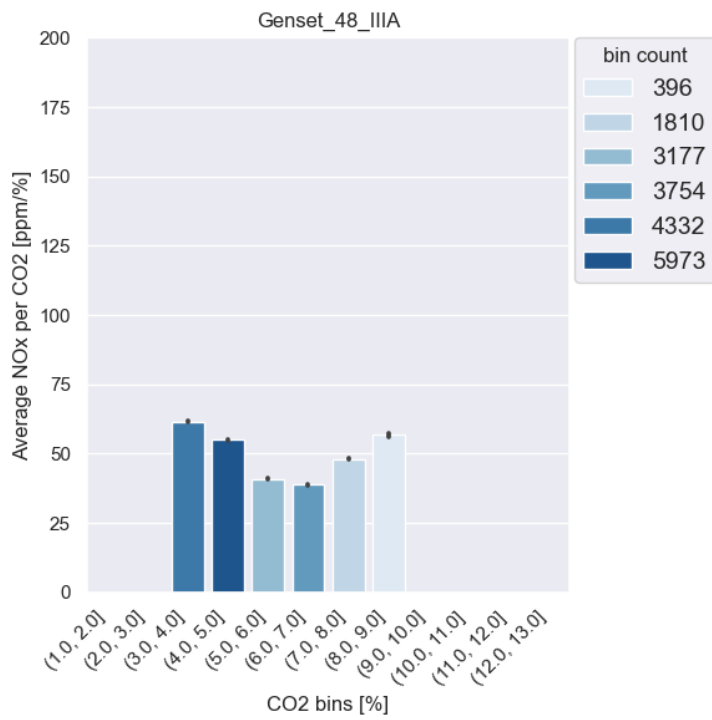
| | |
|---------------------------------|---------------------------|
| Datasheet | |
| NRMM Type | Vibrating Plate Compactor |
| Versit Class | NHHDNRE2 |
| Engine Plate Information | |
| Make | Hatz |
| Model | 1D81S |
| Manufacturing year | 2020 |
| Power (rated) | 9,6 |
| Displacement | |
| Stage / Tier | V |
| Exhaust Emissie Control | - |

| | | |
|----------------|--------|-------|
| | Totaal | |
| Operation time | 0,25 | Hours |



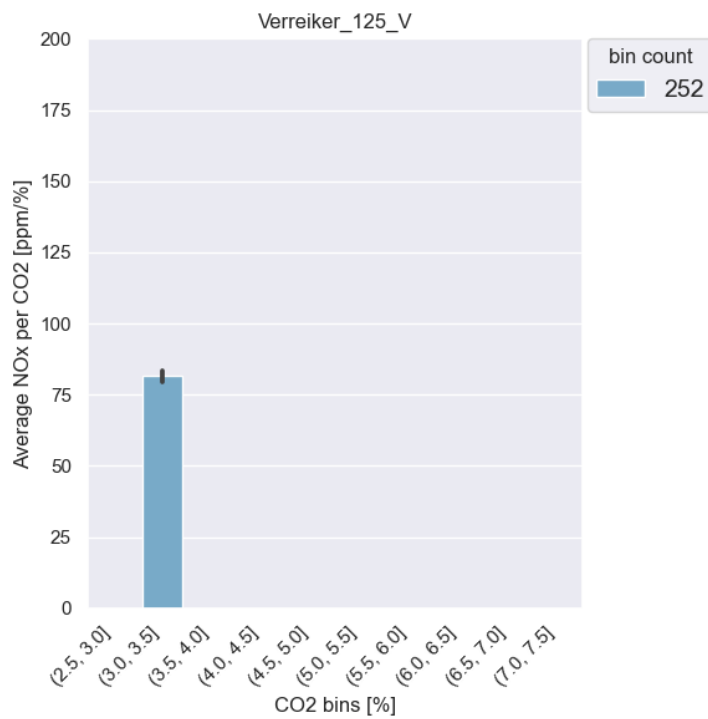
| Datasheet | |
|--------------------------|-------------------|
| NRMM Type | Genset |
| Versit Class | NSTDS3AJ |
| Engine Plate Information | |
| Make | De Wit Silent 8FT |
| Model | JD060C/LS] |
| Manufacturing year | 2017 |
| Power (rated) | 48 kW |
| Displacement | 4,5 |
| Stage / Tier | IIIA |
| Exhaust Emissie Control | - |

| | | |
|----------------|--------|-------|
| | Totaal | |
| Operation time | 5,4 | Hours |



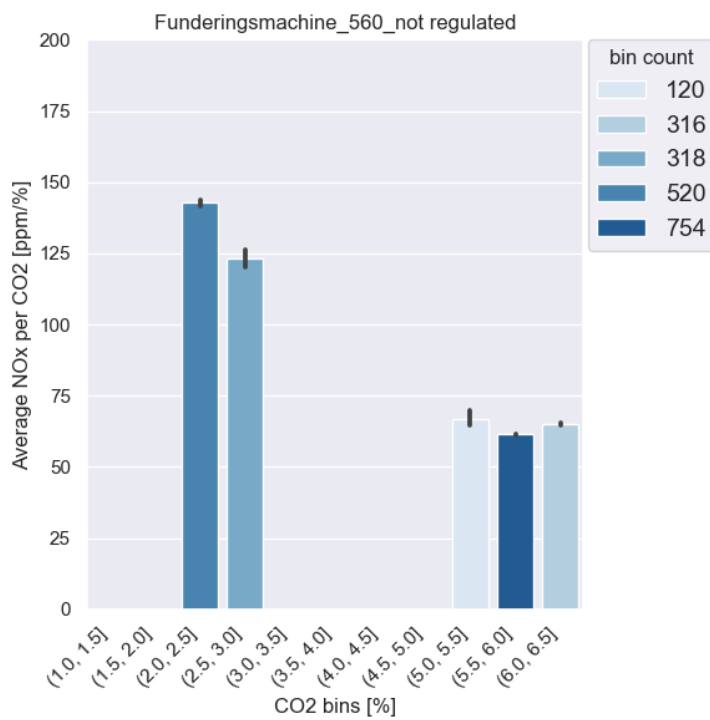
| Datasheet | |
|--------------------------|-------------|
| NRMM Type | Telehandler |
| Versit Class | NVHDNRE5 |
| Engine Plate Information | |
| Make | Merlo |
| Model | ROTO-40.26 |
| Manufacturing year | 2018 |
| Power (rated) | 125 kW |
| Displacement | 4,5 L |
| Stage / Tier | V |
| Exhaust Emissie Control | SCR |

| | | |
|----------------|--------|-------|
| | Totaal | |
| Operation time | 0,07 | Hours |



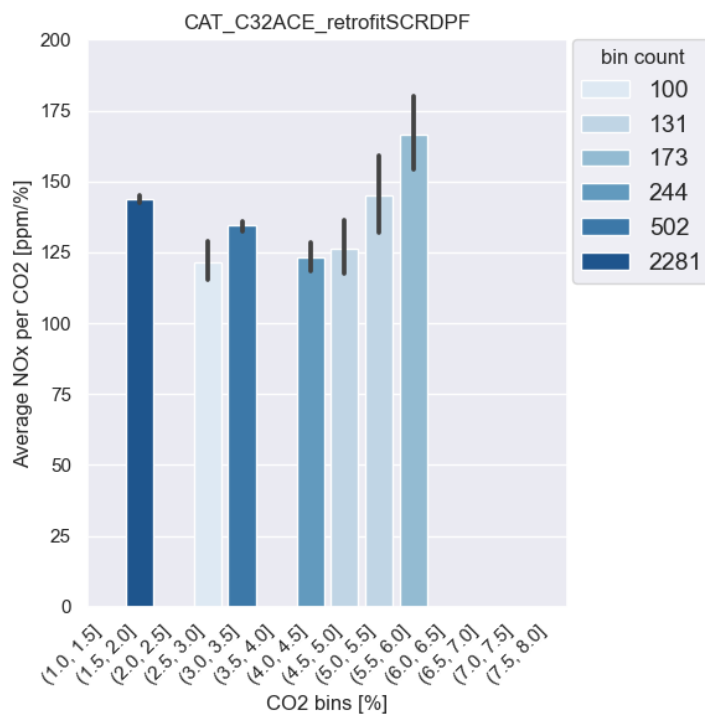
| Datasheet | |
|--------------------------|----------------------|
| NRMM Type | Pile drilling/driver |
| Versit Class | NGWDST2X |
| Engine Plate Information | |
| Make | Caterpillar |
| Model | C18 |
| Manufacturing year | - |
| Power (rated) | 560 kW |
| Displacement | 18,1 |
| Stage / Tier | II (not regulated) |
| Exhaust Emissie Control | - |

| | | |
|----------------|--------|-------|
| | Totaal | |
| Operation time | 0,56 | Hours |



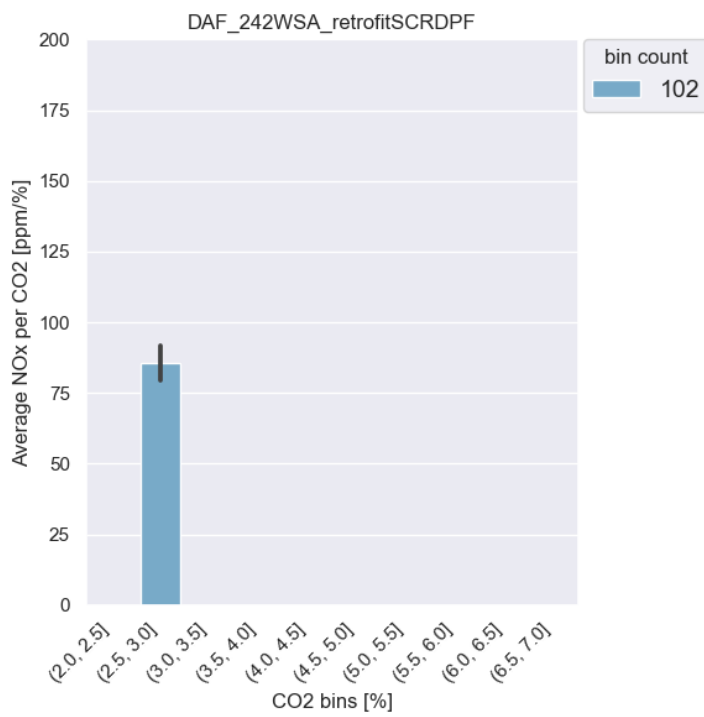
| Datasheet | |
|--------------------------|-----------------------------|
| NRMM Type | Work Vessel |
| Versit Class | retrofitSCRDPF |
| Engine Plate Information | |
| Make | Caterpillar |
| Model | C32 |
| Manufacturing year | 2013 |
| Power (rated) | 709 kW |
| Displacement | 32,1L |
| Stage / Tier | Reetrofit stage V |
| Exhaust Emissie Control | Reetrofit SCR, Retrofit DPF |

| | Totaal | |
|----------------|--------|-------|
| Operation time | 0,99 | Hours |



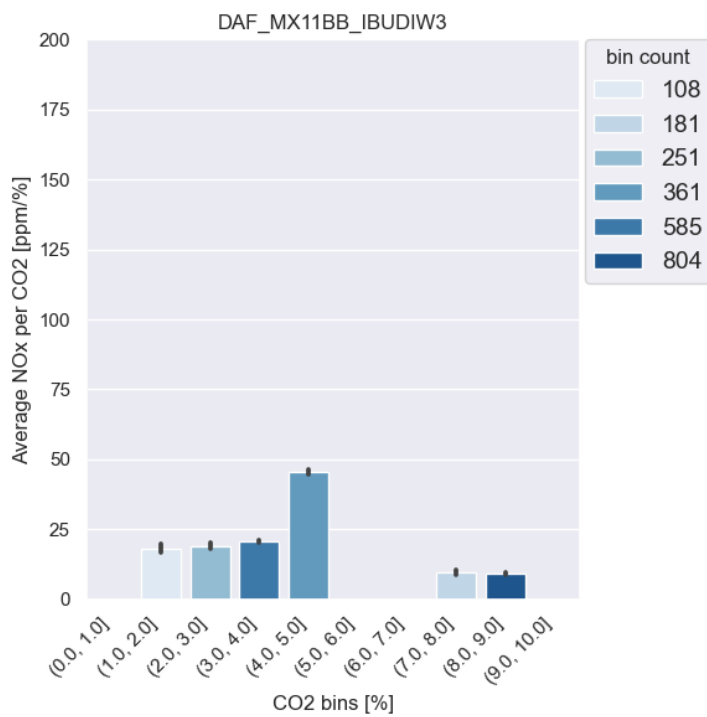
| Datasheet | |
|--------------------------|-------------------------------|
| NRMM Type | Work Vessel |
| Versit Class | retrofitSCRDPF |
| Engine Plate Information | |
| Make | DAF |
| Model | 242 WS AMV (1160) |
| Rebuild year | 2003 |
| Power (rated) | 242 kW |
| Displacement | 11,6 |
| Stage / Tier | Reetrofit stage V |
| Exhaust Emissie Control | Reetrofit SCR, Refetrofit DPF |

| | Totaal | |
|----------------|--------|-------|
| Operation time | 0,03 | Hours |



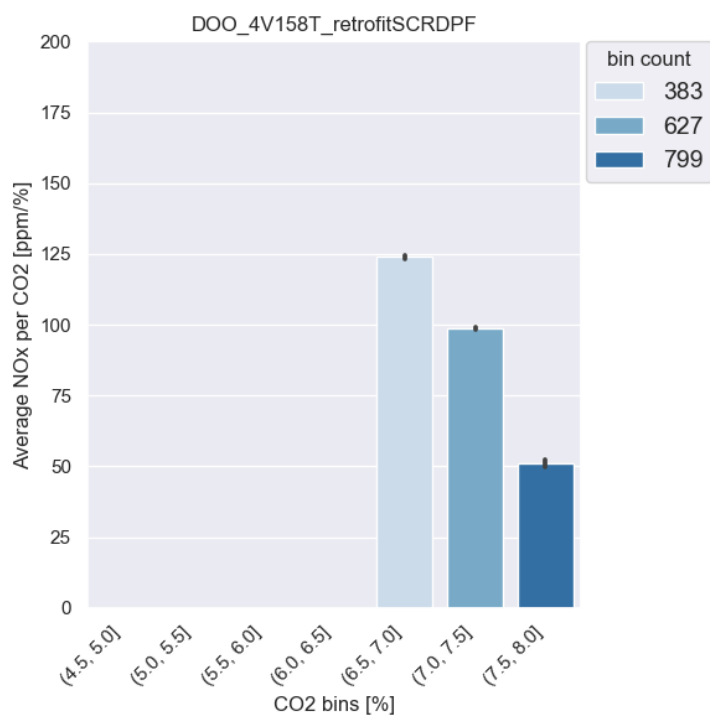
| | |
|---------------------------------|---------------|
| Datasheet | |
| NRMM Type | Work Vessel |
| Versit Class | IBUDIW3 |
| Engine Plate Information | |
| Make | DAF |
| Model | MX-11 |
| Manufacturing year | - |
| Power (rated) | 238,6 |
| Displacement | 10,8 L |
| Stage / Tier | Stage V |
| Exhaust Emissie Control | EGR, SCR, DPF |

| | | |
|----------------|--------|-------|
| | Totaal | |
| Operation time | 0,64 | Hours |



| Datasheet | |
|--------------------------|-----------------------------|
| NRMM Type | Work Vessel |
| Versit Class | retrofitSCRDPF |
| Engine Plate Information | |
| Make | Doosan V8 |
| Model | 4V158 TIH |
| Manufacturing year | 2008 |
| Power (rated) | 390 kW |
| Displacement | 14,6 |
| Stage / Tier | Reetrofit stage V |
| Exhaust Emissie Control | Reetrofit SCR, Retrofit DPF |

| | | |
|----------------|--------|-------|
| | Totaal | |
| Operation time | 0,50 | Hours |



| Datasheet | |
|--------------------------|----------------------------|
| NRMM Type | Work Vessel |
| Versit Class | retrofitSCRDPF |
| Engine Plate Information | |
| Make | Doosan |
| Model | V4222 TIH |
| Manufacturing year | 2016 |
| Power (rated) | 588 |
| Displacement | 21,9 |
| Stage / Tier | Reetrofit stage V |
| Exhaust Emissie Control | Retrofit SCR, Retrofit DPF |

| | Totaal | |
|----------------|--------|-------|
| Operation time | 0,22 | Hours |

