


# Opties voor monitoring van de NO<sub>x</sub>-emissies van mobiele werktuigen

TNO 2024 R11077 – 7 juni 2024

# Opties voor monitoring van de NO<sub>x</sub>-emissies van mobiele werktuigen

Auteurs	
Exemplaar nummer	2024-STL-RAP-100353649
Aantal pagina's	35 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	0
Opdrachtgever	Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
Projectnaam	EMPK 2024
Projectnummer	060.58698

**Alle rechten voorbehouden**

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

© 2024 TNO

# Samenvatting

In 2021 en 2022 is door TNO in opdracht van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat het pilot-project EmissieMonitoring en Periodieke Keuring (EMPK) uitgevoerd en in 2023 is daarover gepubliceerd<sup>1</sup>. Die rapportage beschrijft de eerste opgedane ervaringen rondom het concept van “Emissie Monitoring en Periodieke Keuring” (EMPK) voor bouwmachines. Daarbij lag de focus op technische uitvoerbaarheid van NO<sub>x</sub>-monitoring en bijbehorende (praktijk) emissieprestaties. In het rapport is geconcludeerd dat het voor een nauwkeurige NO<sub>x</sub>-monitoring nodig is om een externe (zelf geïnstalleerde) NO<sub>x</sub>-sensor in de uitlaat te plaatsen. Ook is in de rapportage aangegeven dat een meer eenvoudige vorm van emissieberekeningen mogelijk is door middel van monitoring van het AdBlue verbruik, draaiuren en het brandstofverbruik (afgekort tot AUB) .

In 2023 heeft TNO verder onderzoek gedaan naar mogelijkheden voor monitoring van de emissies van mobiele machines in de praktijk.

Het vervolgonderzoek heeft zich gericht op verschillende opties van (emissie)monitoring:

1. Monitoren van AUB-getallen en bijbehorende emissies;
2. Emissie-monitoring met een externe NO<sub>x</sub>-sensor, zonder CANbus data van de machine te gebruiken;
3. Emissie-monitoring met een externe NO<sub>x</sub>-sensor, met gebruik van CANbus data.

Het doel was om ervaringen op te doen met al deze mogelijkheden en te laten zien welke data analyses daarmee mogelijk zijn. Daarbij is zowel gebruik gemaakt van zelf uitgevoerde emissiemetingen aan bouwmachines als van telematica data. De belangrijkste conclusies zijn, per optie, als volgt samengevat:

## **1. Monitoren van AUB-getallen en bijbehorende emissies**

De AUB-methode is een rekenmodel van TNO voor het bepalen van de emissies per machine aan de hand van het aantal draaiuren, het brandstof- en het AdBlue-verbruik. De AUB-methode geeft – in afwezigheid van directe NO<sub>x</sub>-metingen – het meest nauwkeurige beeld van de geproduceerde NO<sub>x</sub>-emissies. De AUB-methode is daarmee een alternatief voor het direct monitoren van emissies. De AUB methode is laagdrempeliger toe te passen dan het monitoren van NO<sub>x</sub> emissies met behulp van een NO<sub>x</sub>-sensor in de uitlaat. Monitoren van de AUB-getallen is wel minder nauwkeurig dan meten in de uitlaat.

In deze studie zijn, via telematica data, AdBlue-, brandstof- en inzetgegevens beschikbaar gekomen van zes Liebherr machines. Een nauwkeurige registratie van de AUB-parameters in de telematica data, idealiter met een hoge tijdsresolutie, leidt tot betere monitoring van emissies. In deze studie was AUB-data per dag het hoogst beschikbare detailniveau. Binnen een dag treden er echter ook variaties op die het eindresultaat beïnvloeden. Deze zijn in de huidige data per dag niet zichtbaar. Indien de data per uur, of zelfs per seconde beschikbaar zou zijn, kan de NO<sub>x</sub>-berekening nog nauwkeuriger gemaakt worden.

<sup>1</sup> TNO 2023 R10553 - Pilot project Emissie Monitoring en Periodieke Keuring (EMPK) van bouwmachines

## **2. Emissie monitoring met een externe NO<sub>x</sub>-sensor, zonder gebruik van CANbus data**

Vanuit de data die een externe (door TNO in de uitlaat aangebrachte) NO<sub>x</sub>-sensor levert kan de NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> ratio worden berekend. Hiermee zijn nuttige conclusies te trekken over de emissieniveaus van een machine. De rekenmethodiek is zeer eenvoudig doordat alleen de NO<sub>x</sub>-concentraties gedeeld worden door de CO<sub>2</sub>-concentraties en er geen CANbus signalen nodig zijn. De NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> ratio laat duidelijk het onderscheid in emissieniveaus zien, de mate van functioneren van de SCR-katalysator en de emissies bij uiteenlopende motorbelastingen. Vanwege de eenvoud en het niet afhankelijk zijn van CANbus-signalen is deze ratio een interessante optie voor emissie monitoring.

**De werking van een SCR-katalysator kan goed beoordeeld worden door emissie monitoring met alleen een NO<sub>x</sub>-sensor.** Machines met functionerende SCR-katalysator zijn vanuit de NO<sub>x</sub>-concentraties op basis van de NO<sub>x</sub>-sensor data eenvoudig te herkennen. Bij een niet-functionerende SCR-katalysator blijven de NO<sub>x</sub>-concentraties veelal boven de 200 ppm, terwijl een goedwerkende SCR-katalysator concentraties van onder de 10 ppm laat zien, een factor 20 verschil.

**Op basis van de NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub>-ratio kan een benadering worden gemaakt van de tijd dat de SCR (niet) optimaal functioneert en de impact daarvan op de NO<sub>x</sub>-emissies.** Bij de gemonitorde machines werkte de SCR voor een relatief groot aandeel optimaal (tussen de 93 en 71% van de tijd). Bij een niet optimale werking is de NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub>-ratio echter 15 tot 140 keer hoger dan bij een optimale werking, zo bleek vanuit de uitgevoerde analyse. De tijd dat de SCR niet optimaal werkt is daarom het meest bepalend voor de totale emissies met een aandeel van 66 tot 92%. De combinatie van de inzet (zo min mogelijk lage motorlast) van de machine en het geïnstalleerde motorvermogen (niet hoger dan nodig) zijn zeer relevant voor de werking van de SCR-katalysator en daarmee de uiteindelijke NO<sub>x</sub>-emissies van een machine. Door de emissieprestaties via emissie monitoring goed te beoordelen kan gestuurd worden op een zo effectief mogelijk inzet van machines.

## **3. Emissie monitoring met een externe NO<sub>x</sub>-sensor, met gebruik van CANbus data**

**Gebruik van een externe (door TNO in de uitlaat aangebrachte) NO<sub>x</sub>-sensor met CANbus-connectie leidt tot inzicht in absolute emissies.** De belangrijkste reden om verbinding te maken met de CANbus is om signalen te registreren waarmee de gemeten concentraties (van NO<sub>x</sub> en CO<sub>2</sub>) vertaald kunnen worden naar absolute emissies, ofwel emissies in grammen (zoals grammen per uur). Met behulp van de berekende absolute emissieniveaus kan een overzicht worden gegeven van de totale emissies gedurende de monitoringsperiode.

Door per machine de inzet op een bepaald project goed bij te houden, kunnen de emissies per project nauwkeurig bepaald worden, de variatie van dag tot dag kan zeer groot zijn. Dit kan dan – indien gewenst – vergeleken worden met de inschatting vooraf, om op deze manier de volgende inschatting vooraf nauwkeuriger te maken. Daarnaast kan een overzicht van de totale emissies per machine voor vlooteigenaren helpen om te bepalen welke machines de grootste impact op de NO<sub>x</sub>- en CO<sub>2</sub>-emissies hebben, en welke daarmee het meest effectief zijn om maatregelen op te treffen.

**In algemene zin helpt emissie monitoring met detailinzichten, zoals emissies over de vermogensrange van een machine.** In het kader van emissie monitoring kan het beoordelen van emissieprestaties over de vermogensrange helpen om te bepalen of hoge emissies het gevolg zijn van inzet, of een probleem met de motor en/of het uitlaatgasbehandelingssysteem. De emissies kunnen bijvoorbeeld hoog zijn omdat de machine vaak op een lage motorbelasting ingezet wordt waardoor de SCR-katalysator niet op bedrijfstemperatuur komt.

Dit kan voor machine-eigenaren voor nuttige inzichten zorgen om te bepalen of een verandering van de inzet tot lagere emissies kan leiden. Emissies over de vermogensrange is globaal mogelijk met alleen een NO<sub>x</sub>-sensor, maar kan nauwkeuriger worden gedaan met CANbus data.

**Gebruik van een NO<sub>x</sub>-sensor en een CANbus-connectie is complex vanwege niet gestandaardiseerde CANbus signalen, wat tot extra installatietijd en dataverwerkingstijd leidt. Bovendien zijn de benodigde signalen niet altijd beschikbaar.** Naast het gebrek aan standaardisatie is ook de kwaliteit van de signalen niet altijd bekend. Door dit geheel is het per machine(type) echt maatwerk waarbij succes vooraf niet altijd vaststaat. Hierdoor is geconcludeerd dat een alternatief voor de bepaling van absolute emissieniveaus wenselijk is.

**Gebruik van een NO<sub>x</sub>-sensor in combinatie met een MAF-sensor lijkt een goed alternatief voor de CANbus-connectie.** Het meest nauwkeurige alternatief, bij gebruik van een NO<sub>x</sub>-sensor, om onafhankelijk te worden van de CANbus-signalen is - naar verwachting - door de luchtstroom door de inlaat zelf te meten. Dit is mogelijk met een zogenaamde Mass Air Flow (MAF) sensor. Deze optie kan zorgen voor een monitoringsysteem met gestandaardiseerde output. In 2024 zal hier verder onderzoek naar plaatsvinden. Enkele uitdagingen daarbij zijn de montage van de sensor en de beschikbaarheid van een MAF sensor voor luchtinlaten met grote diameters (die bij mobiele werktuigen vaak voorkomen).

# Inhoudsopgave

## Inhoud

Samenvatting .....	3
Inhoudsopgave .....	6
1 Inleiding .....	7
1.1 De mogelijke rol van emissie monitoring in stikstofberekeningen en als aanpak voor controle praktijkemissies .....	7
1.2 Vervolg op het pilotproject EmissieMonitoring en Periodieke Keuring .....	8
1.3 Type bouwplaatsen en scope .....	9
2 Berekenen van emissies op basis van inzet en AdBlue .....	11
2.1 AUB-methodiek .....	11
2.2 Resultaten telematica data alle machines .....	12
2.3 Resultaten telematica data per machine .....	13
2.4 Relatie tussen motorbelasting en AdBlue-verbruik .....	14
3 Real-time monitoring van emissies met een NO <sub>x</sub> -sensor .....	16
3.1 Toegepaste apparatuur .....	16
3.2 Real-time monitoring van de NO <sub>x</sub> -emissies .....	17
4 Kortstondige NO <sub>x</sub> -metingen .....	30
4.1 Toegepaste apparatuur .....	30
4.2 Criteria voor goed- of afkeur .....	31
4.3 Praktische toepasbaarheid .....	31
5 Conclusies en aanbevelingen .....	32
Ondertekening .....	35

# 1 Inleiding

## 1.1 De mogelijke rol van emissie monitoring in stikstofberekeningen en als aanpak voor controle praktijkemissies

Volgens de Wet Natuurbescherming, die voortvloeit uit de Habitatrichtlijn, is er een natuurvergunning nodig voor bouwprojecten als negatieve effecten van een project op een Natura 2000-gebied niet op voorhand kunnen worden uitgesloten. Na het vervallen van de bouwvrijstelling geldt dit ook voor de tijdelijke aanlegfase, die de natuur ook voor langere tijd kan beïnvloeden. Eén van de aspecten die van invloed kan zijn op de natuur is de stikstofdepositie. Bouwmaterieel (met verbrandingsmotor) dat wordt ingezet in bouwprojecten kan impact hebben op de stikstofdepositie. Voor het berekenen en monitoren van stikstofdepositie op Natura 2000-gebieden wordt binnen Nederland gebruik gemaakt van het instrument AERIUS<sup>2</sup>. Hiervoor worden de stikstofoxides (NO<sub>x</sub>) en ammoniak (NH<sub>3</sub>) van een project berekend op basis van het AdBlue<sup>3</sup> verbruik, draaiUren en het Brandstofverbruik, afgekort wordt dit ook wel de AUB methode genoemd<sup>4</sup>. In de praktijk blijkt het vaak lastig om deze AUB getallen goed in te schatten, zonder hulp van de machineoperator. Het goed registreren of monitoren van de draaiuren, het brandstofverbruik en het AdBlue-verbruik helpt bij het goed kunnen invoeren van de juiste gegevens. Een andere optie is om de NO<sub>x</sub>-uitstoot direct in te voeren, dit kan gedaan worden als er emissie-meetgegevens beschikbaar zijn. Emissie monitoring kan hier een belangrijke bijdrage aan leveren.

Vanwege de huidige stikstofproblematiek, maar ook vanwege de klimaat-(Klimaatakkoord) en gezondheidsdoelstellingen (Schone Lucht Akkoord) is een snelle reductie van emissies door bouw machines gewenst. Dit is vormgegeven in het programma 'routekaart Schoon en Emissieloos Bouwen' (SEB)<sup>5</sup>. De routekaart SEB bevat verschillende niveaus met emissie-eisen die binnen bouwprojecten toegepast kunnen worden, om onder andere de stikstofuitstoot te reduceren. Zonder controle op inzet en emissies is er geen waarborg of de vooraf ingeschatte emissies daadwerkelijk worden gerealiseerd. Met name bij dieselwerktuigen met geavanceerde emissiereductie-technologie is controle belangrijk. Dit komt omdat het niet functioneren van emissiereductie-technologieën zorgt voor emissies die factoren hoger zijn. In het geval van NO<sub>x</sub> kan dat zomaar 10 keer hoger zijn, in het geval van fijnstof wel 100 keer hoger. Vanuit SEB is een convenant opgesteld. Verschillende overheden en marktpartijen hebben met het convenant afspraken gemaakt om emissies te reduceren in de bouw. Het convenant bevat ook een artikel (Artikel 9) waarin controle op naleving bij het toepassen van emissie-eisen wordt beschreven. Emissie monitoring, of monitoring van AUB-getallen is een mogelijke manier om de controle op de naleving vorm te geven.

<sup>2</sup> <https://calculator.aerius.nl/>

<sup>3</sup> AdBlue is een ureum oplossing die nodig is om NO<sub>x</sub> te reduceren in de SCR-katalysator.

<sup>4</sup> TNO 2021 R12305 - AUB (AdBlue verbruik, Uren, en Brandstofverbruik): een robuuste schatting van NO<sub>x</sub> en NH<sub>3</sub> uitstoot van mobiele werktuigen

<sup>5</sup> <https://www.opwegnaarseb.nl/>



Verkregen inzichten vanuit emissie-monitoring dragen ook bij aan de onderbouwing van de nationale emissiefactoren, relevant voor berekeningen aan de praktijkuitstoot van stikstof.

## 1.2 Vervolg op het pilotproject EmissieMonitoring en Periodieke Keuring

In 2021 en 2022 heeft TNO in opdracht van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat het pilotproject EmissieMonitoring en Periodieke Keuring (EMPK) uitgevoerd en 2023 is de TNO rapportage “Pilot project Emissie Monitoring en Periodieke Keuring (EMPK) van bouwmachines”<sup>6</sup> gepubliceerd. Die rapportage beschrijft de eerste opgedane ervaringen rondom het concept van “Emissie Monitoring en Periodieke Keuring” (EMPK) voor bouwmachines. In die betreffende rapportage lag de focus op technische uitvoerbaarheid van NO<sub>x</sub>-monitoring en bijbehorende (praktijk) emissieprestaties. De rapportage beschrijft dat emissie-monitoring een robuust beeld geeft van de emissies onder allerlei verschillende omstandigheden. Opvallend was dat de mate van inzet (met name de motorbelasting) zeer bepalend is voor de emissieniveaus voor dezelfde machine. Dit geldt in het bijzonder voor moderne machines met SCR-katalysator (katalysator voor NO<sub>x</sub>-reductie). De SCR-katalysator zorgt voor het grootste deel van de NO<sub>x</sub>-reductie bij moderne bouwmachines. Bij een te lage uitlaatgastemperatuur (zoals bij een koude start, en lage motorbelasting) worden er geen of nauwelijks NO<sub>x</sub> emissies gereduceerd. De mate van inzet varieerde van machine tot machine, maar die variatie is er ook per machine van dag tot dag. Het is daarom belangrijk om niet alleen naar gemiddelden te kijken, maar ook in meer detail.

In het onderzoeksrapport uit 2023 is verder geconcludeerd dat het voor een nauwkeurige NO<sub>x</sub>-monitoring nodig is om een externe NO<sub>x</sub>-sensor in de uitlaat te plaatsen. Met behulp van deze NO<sub>x</sub>-sensor kunnen de concentraties NO<sub>x</sub> in de uitlaat bepaald worden, en tegelijkertijd ook de CO<sub>2</sub>-concentraties. In veel moderne machines is af-fabriek een NO<sub>x</sub>-sensor aanwezig, maar deze kan vaak niet worden uitgelezen, of het signaal is niet goed bruikbaar.

Met behulp van de externe NO<sub>x</sub>-sensor kunnen emissieniveaus op verschillende manieren bepaald worden. De meest eenvoudige manier is om de NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> verhouding te bepalen. Hiermee kan worden gecontroleerd of de SCR-katalysator naar behoren functioneert, en kan een redelijke indicatie worden gegeven van de emissieniveaus. Aanvullend kan gebruik worden gemaakt van CANbus signalen waarmee absolute emissieniveaus beter bepaald kunnen worden. Zo zijn signalen met betrekking tot draaiuren, motorbelasting en brandstofverbruik, die goed van pas komen bij berekeningen over inzet en emissies, meestal wel beschikbaar op de CANbus van deze moderne machines, ook al zijn ze niet gestandaardiseerd. Het toevoegen van de CANbus kost vanwege het gebrek aan standaardisatie vaak extra installatietijd.

Ook is in de 2023 rapportage aangegeven dat een meer eenvoudige vorm van emissieberekeningen mogelijk is door monitoring van het AdBlue verbruik, draaiuren en het brandstofverbruik. In 2023 heeft TNO verder onderzoek gedaan naar mogelijkheden voor monitoring van de emissies van mobiele machines in de praktijk.

<sup>6</sup> TNO 2023 R10553 - Pilot project Emissie Monitoring en Periodieke Keuring (EMPK) van bouwmachines

Het vervolgonderzoek heeft zich gericht op verschillende opties van (emissie)monitoring:

1. Monitoren van AUB-getallen en bijbehorende emissies;
2. Emissie-monitoring met een externe NO<sub>x</sub>-sensor, zonder gebruik van CANbus data;
3. Emissie-monitoring met een externe NO<sub>x</sub>-sensor, met gebruik van CANbus data.

Het doel was om ervaringen op te doen met alle mogelijkheden. Hierbij is onderzocht of de NO<sub>x</sub>-emissies goed bepaald konden worden en of de installatietijd zover als mogelijk ingekort kon worden. Bij optie 1 is zoveel mogelijk gebruik gemaakt van reeds aanwezige telematica systemen op machines. Bij optie 2 is een datalogger geplaatst en een NO<sub>x</sub>-sensor. Hierbij is gezocht naar een locatie op de machine waar de datalogger gemakkelijk geplaatst kon worden. Dat hoefde – vanwege het ontbreken van de CANbus aansluiting - niet per se in de cabine te zijn, wat zorgt voor minder bekabeling. Vanzelfsprekend is dan wel een waterdichte datalogger nodig en deze is daarvoor ontwikkeld.

In deze rapportage wordt een selectie van de emissieresultaten gepresenteerd, ter onderbouwing van de mogelijkheden met de emissie-monitoringsopties. De uitgevoerde emissie-monitoring dient ook als onderbouwing en aanvulling van de nationale emissiefactoren. Een volledig overzicht van de emissieresultaten wordt opgenomen in een aanvullende rapportage, waarin de resultaten in meer detail worden beschreven. Daarnaast wordt in dit rapport kort ingegaan op de mogelijkheden voor een kortstondige emissietest.

## 1.3 Type bouwplaatsen en scope

De emissie-monitoringsopties zijn bij uiteenlopende machinetyden op twee bouwplaatsen ingezet. De focus lag hierbij met name op moderne Stage IV en Stage V machines, en dan met name machines met een SCR-katalysator (katalysator voor NO<sub>x</sub>-reductie), dat zijn machines met een motorvermogen tussen de 56 en 560 kW. De machines met SCR-katalysator zijn relevant omdat deze qua emissiereductieniveau het meest gevoelig zijn voor het type inzet. Zoals eerder genoemd kan het niet functioneren van de SCR-katalysator zorgen voor emissies die factoren hoger zijn dan bij een goed functionerende SCR-katalysator. Daarnaast zijn gedurende het project enkele Stage V machines gemonitord buiten deze vermogenscategorie.

De meeste machines waaraan is gemeten zijn ingezet op een project voor wegwerkzaamheden op de snelweg. Het gaat om machines zoals een wals, asfaltspreidmachines en asfaltfrezers. Er worden door de aannemer over de gehele periode verschillende “asfaltsets” op hetzelfde project ingezet, deze sets worden tussendoor ook op andere projecten ingezet. Voor de emissie-monitoring is een selectie gemaakt van de meest frequent ingezette machines op de desbetreffende bouwplaats, dit gaat om zeven Stage V machines. Deze zijn over een periode van enkele maanden gemonitord. Machines die slechts kortstondig op de bouwplaats aanwezig waren zijn niet gemonitord.

Het andere project betrof het bouwrijp maken van een stuk grond voor bedrijfshallen. Hierbij zijn meerdere aannemers betrokken, de machines van één aannemer zijn gedurende het project geïnstrumenteerd. De betreffende aannemer had twee machines die daar continu werkzaam waren, een graafmachine op wielen en een graafmachine op rupsen, beide Stage IV. Deze machines voerden werkzaamheden uit zoals het ingraven van riolering, verplaatsen van materiaal en het plaatsen van putten.

Tot slot is er telematica-data uitgelezen van zes Stage IV en V machines met SCR-katalysator. Hierbij kwam voor vijf machines twee jaar aan data beschikbaar over brandstof- en Adblue verbruik en draaiuren, voor één machine was twee maanden aan data beschikbaar. Deze machines zijn niet op één specifiek bouwproject ingezet.

De scope van het onderzoek betreft mobiele werktuigen in de bouwsector, wegvoertuigen zijn hierbij niet meegenomen. Tijdens het project zijn wel (Euro VI) veegwagens gemonitord bij het project voor wegwerkzaamheden, deze worden gerapporteerd in de hiervoor genoemde aanvullende rapportage.

## 2 Berekenen van emissies op basis van inzet en AdBlue

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op het werken met telematica data voor het berekenen van emissies. Daarbij is gebruik gemaakt van telematica data van zes Stage IV en Stage V machines voorzien van een SCR katalysator. Hierbij zijn data over het brandstofverbruik, AdBlue-verbruik en draaiuren geëxporteerd voor een periode tot twee jaar. Belangrijk om te noemen is dat het gaat om zes machines van hetzelfde merk, de resultaten zijn daarom niet representatief voor de gehele vloot.

### 2.1 AUB-methodiek

Voor machines met een SCR-katalysator is het aandeel in de tijd waarbij de SCR op bedrijfstemperatuur is (en daarmee goed functioneert) grotendeels bepalend voor de  $\text{NO}_x$ -uitstoot. Voor een groot deel is dit afhankelijk van de inzet, met name de mate van motorbelasting is van belang, maar bijvoorbeeld ook de impact van een koude start. Een machine die 30 minuten wordt ingezet, heeft relatief meer last van een koude start dan een machine die 6 uur achter elkaar wordt ingezet (bij dezelfde motorlast). Wanneer emissies niet direct worden gemeten kan de mate van functioneren van de SCR-katalysator achterhaald worden door het AdBlue-verbruik, in combinatie met het brandstofverbruik en de draaiuren (AUB-methode). AdBlue is immers nodig om  $\text{NO}_x$  in de katalysator om te zetten. Elke liter AdBlue kan daarom gekoppeld worden aan een hoeveelheid gereduceerde  $\text{NO}_x$ , namelijk 460 gram  $\text{NO}_x$ -reductie per 1 liter AdBlue, zie voor meer detail het TNO rapport 2021 R12305.

De AUB-methode geeft – in afwezigheid van  $\text{NO}_x$ -metingen – het meest nauwkeurige beeld van de  $\text{NO}_x$ -emissies (en  $\text{NH}_3$ -emissies). Dat is de reden dat bij AERIUS berekeningen de  $\text{NO}_x$ -emissies van mobiele werktuigen worden ingeschat op basis van de AUB-methode. Het monitoren van de benodigde gegevens voor de AUB-methodiek is een alternatief voor emissie monitoring door middel van meten in de uitlaat. Het is laagdrempeliger toe te passen dan  $\text{NO}_x$  meten in de uitlaat, maar wel minder nauwkeurig dan meten in de uitlaat.

De AUB data kunnen op verschillende detailniveaus worden geregistreerd. De meest eenvoudige methode is door middel van een handmatige registratie door het bijhouden van getankte liters brandstof en bijgevoelde AdBlue. De draaiuren kunnen vaak op de machine worden uitgelezen.

Een hoger detailniveau kan bereikt worden door (een deel van) deze parameters uit te lezen via telematica-gegevens. Met telematica wordt in dit rapport bedoeld dat machine-gegevens vanaf afstand kunnen worden uitgelezen. Het brandstofverbruik is nagenoeg altijd beschikbaar in telematica-systemen, het AdBlue-verbruik is soms beschikbaar. In deze studie zijn AdBlue-gegevens beschikbaar gekomen van zes Liebherr machines. Het detailniveau waarop de data uitgelezen kan worden varieert. In deze studie was AUB-data per dag het hoogst beschikbare detailniveau.

Een hoger detailniveau kan bereikt worden door een datalogger op de machine te plaatsen die de AUB-parameters met een frequentie van 1 Hz uitleest.

## 2.2 Resultaten telematica data alle machines

De resultaten van de analyses van de telematica data van zes Liebherr machines worden in deze paragraaf toegelicht. De onderstaande Tabel 1 geeft het aantal dagen aan data, de gemiddelde draaiuren per dag en het gemiddelde brandstofverbruik. De eerste kolom in Tabel 1 geeft de machine-ID weer, die begint met een afkorting van het merk en type, waarna de door TNO gehanteerde emissiecode volgt, zie paragraaf 3.2 voor een toelichting op de emissiecode. Daarnaast is een inschatting van de motorbelasting weergegeven, deze is gebaseerd op het brandstofverbruik. Het AdBlue-verbruik is weergegeven als fractie van het brandstofverbruik, in de ruwe dat is deze beschikbaar als totale liters. Per dag zijn de NO<sub>x</sub>-emissies berekend op basis van het aantal draaiuren, het brandstofverbruik en het AdBlue verbruik, dit is gedaan volgens de methode zoals beschreven in TNO rapport 2021 R12305 (pagina 13). De NO<sub>x</sub>-emissies zijn daarna gesommeerd (kg en g/u) opgenomen in Tabel 1.

Voor de meeste machines was er twee jaar aan data beschikbaar, alleen voor de Stage V machine was dit beperkt tot een kleine twee maanden. Het gemiddelde aantal draaiuren per dag per machine varieerde tussen de 6 en 8 uur. De variatie in motorbelasting tussen de verschillende machines is relatief groot, namelijk tussen de 17 en 19%. De machines met een lage motorbelasting hebben gemiddeld een lagere AdBlue-fractie dan de machines met een hoge motorbelasting. De AUB\_methode gaat uit van een maximale AdBlue-fractie van 7%, daarna wordt geen extra reductie toegekend. Gemiddeld over de gehele periode wordt de fractie van 7% niet overschreden. De NO<sub>x</sub>-emissies zijn het laagst bij de Stage V machine, die ook het hoogste AdBlue-verbruik heeft. Opvallend is echter dat de machine "LIE\_916LIT\_10" een lagere NO<sub>x</sub>-uitstoot heeft dan de "LIE\_R926WL\_03", terwijl laatstgenoemde een hogere AdBlue-fractie heeft. Dergelijke inzichten worden alleen duidelijk wanneer de data in meer detail worden onderzocht, zie volgende paragraaf.

Tabel 1: Gemiddelde inzet, brandstofverbruik, AdBlue-verbruik op basis van telematicagegevens.

De NO<sub>x</sub>-uitstoot is per dag bepaald, en daarna opgeteld. Deze wijkt voor sommige machines af van een berekening op basis van totale uren, brandstof- en Adblueverbruik in deze tabel (vanwege een AdBlue fracties van >7% op sommige dagen).

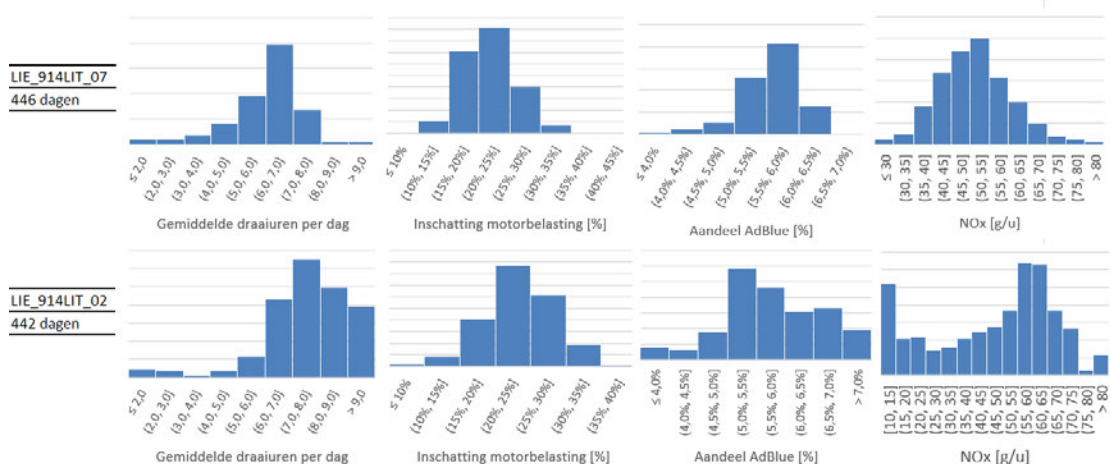
Machine ID	Type_vermogen-Stage	Dagen	Draai-uren	Brandstof-verbruik	Inschatting motorlast	Aandeel AdBlue	NO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>
		[dagen]	[uur/dag]	[L/u]	[%]	[%]	[kg]	[g/u]
LIE_914LIT_07_NGMDST4R	Graafmachine_105_IV	446	6,0	6,5	22%	5,6%	136	51
LIE_914LIT_02_NGMDST4R	Graafmachine_105_IV	442	7,6	7,0	23%	5,7%	153	46
LIE_916LIT_09_NGMDST4R	Graafmachine_115_IV	441	6,3	5,6	17%	5,7%	110	39
LIE_916LIT_10_NGMDST4R	Graafmachine_115_IV	441	6,0	6,7	20%	5,9%	93	35
LIE_R926WL_03_NGMDST4Q	Graafmachine_140_IV	434	6,6	12,7	31%	6,7%	106	37
LIE_R930LI_06_NGMDNRE6	Graafmachine_180_V	37	8,0	14,7	29%	6,9%	8,4	28
Totaal	(minimaal 1u per dag)	2209	6,6	7,8	23%	6,0%	606	-

## 2.3 Resultaten telematica data per machine

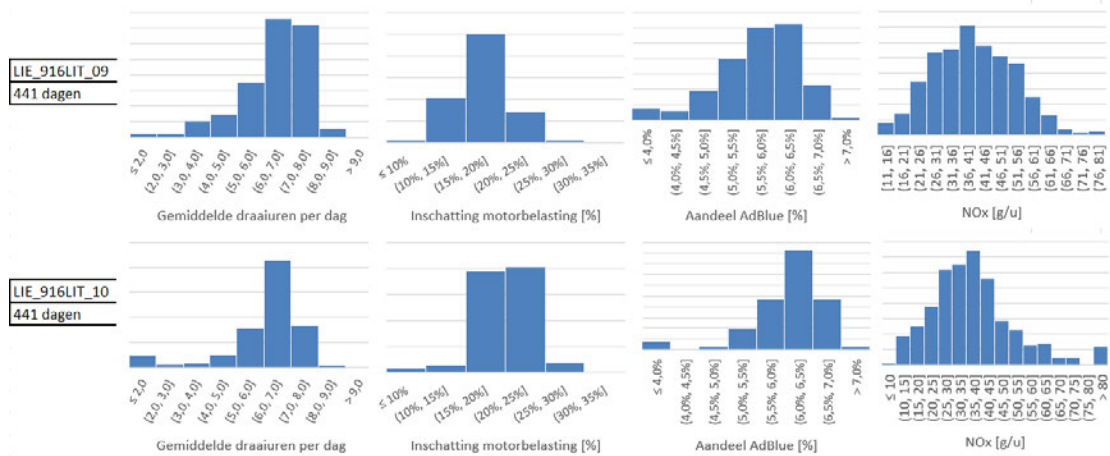
In onderstaand Figuur 1, Figuur 2 & Figuur 3 worden de verzamelde data per dag als histogrammen weergegeven. De figuren bevatten de draaiuren per dag, de ingeschatte motorbelasting, de AdBlue-fractie en de berekende NO<sub>x</sub>-emissies. De figuren laten zien dat de dag tot dag variatie in inzet, motorbelasting, AdBlue verbruik en daaruit volgende emissies zeer groot zijn. De NO<sub>x</sub>-emissies variëren tussen de 10 gram per uur tot meer dan 80 gram per uur, en kan daarmee dus flink afwijken van de hiervoor beschreven gemiddelden. Dit maakt duidelijk dat een nauwkeurige registratie van de AUB-parameters leidt tot betere monitoring van emissies. Binnen een dag treden er ook variaties op, deze zijn in deze data niet zichtbaar. Indien de data per uur, of zelfs per seconde beschikbaar zouden zijn, kunnen de NO<sub>x</sub>-emissies gedurende de dag inzichtelijk worden gemaakt. Hiermee kan nauwkeuriger worden bepaald wanneer emissies hoog zijn, en of deze vermeden kunnen worden.

In de vorige paragraaf werd geobserveerd dat de “LIE\_916LIT\_10” een lagere NO<sub>x</sub>-uitstoot heeft dan de “LIE\_R926WL\_03”, terwijl laatstgenoemde een hogere AdBlue-fractie heeft. In Figuur 2 en Figuur 3 is zichtbaar dat de LIE\_R926WL\_03 op dagniveau vaak boven de 7% AdBlue uitkomt. Zoals eerder genoemd wordt 7% AdBlue als maximale waarde in de AUB rekenmethodiek aangehouden (met een hoger AdBlue verbruik komen de berekende NO<sub>x</sub> emissies onder nul, en dat is niet mogelijk). De LIE\_R926WL\_03 heeft dus wel gemiddeld een hoog AdBlue verbruik, maar daar staat niet altijd een extra reductie tegenover. Indien de totale liters brandstof en AdBlue zouden worden toegepast over de gehele periode, zouden de NO<sub>x</sub>-emissies ruim 30% lager uitkomen in Tabel 1. Een andere reden is dat de LIE\_R926WL\_03 relatief veel dagen met juist een lage AdBlue-fractie heeft, wat tot hoge emissies leidt. De emissies zijn dus ofwel heel laag, of heel hoog. Bij de LIE\_916LIT\_10 komt de gemiddelde waarde uit Tabel 1 juist veel voor.

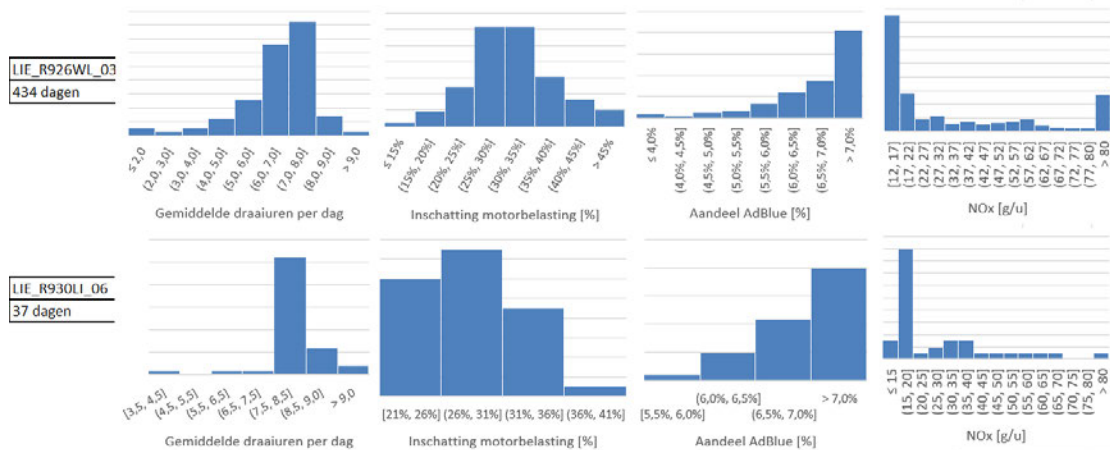
Figuur 1 laat de twee Stage IV machines met 105 kW motorvermogen zien, deze hebben een vergelijkbare trend als de twee hiervoor genoemde machines. De histogrammen laten zien dat de “LIE\_914LIT\_02” vaak lagere emissies heeft dan de “LIE\_914LIT\_07”, maar ook vaker juist hogere emissies laat zien. De gemiddelde waarde zoals in Tabel 1 genoemd komt niet vaak voor bij LIE\_914LIT\_02, dit in tegenstelling tot de LIE\_914LIT\_07.



Figuur 1: Histogrammen van draaiuren per dag, motorbelasting (%), AdBlue-fractie en de berekende NO<sub>x</sub>-emissies (g/u), van de Stage IV machines “LIE\_914LIT\_07” & “LIE\_914LIT\_02”.



Figuur 2: Histogrammen van draaiuren per dag, motorbelasting (%), AdBlue-fractie en de berekende NO<sub>x</sub>-emissies (g/u), van de Stage IV machines “LIE\_916LIT\_09” & “LIE\_916LIT\_10”.



Figuur 3: Histogrammen van draaiuren per dag, motorbelasting (%), AdBlue-fractie en de berekende NO<sub>x</sub>-emissies (g/u), van de Stage IV en V machines “LIE\_R926WL\_03” & “LIE\_R930LI\_06”.

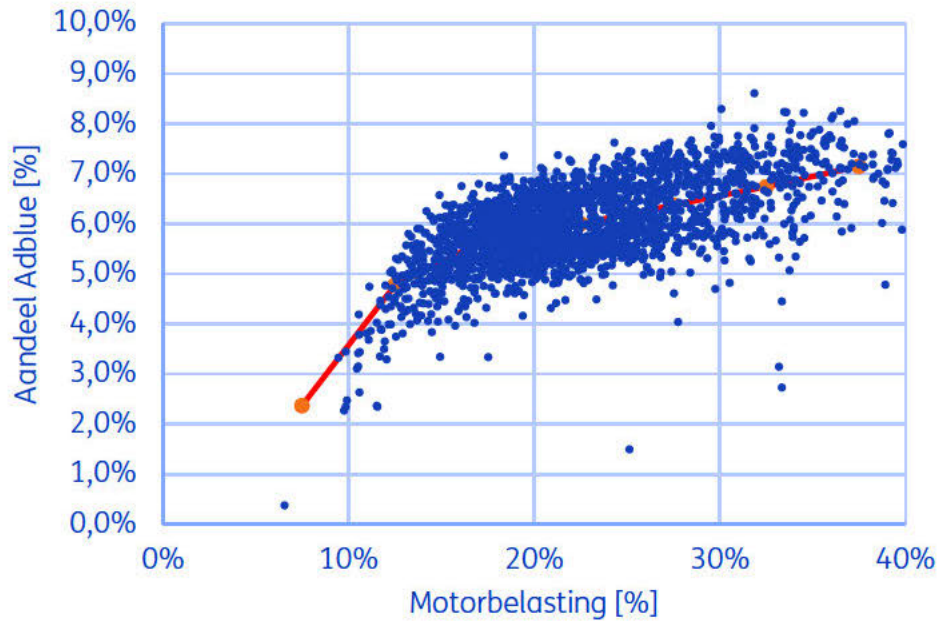
## 2.4 Relatie tussen motorbelasting en AdBlue-verbruik

Figuur 4 geeft de AdBlue-fractie als functie van de ingeschatte motorbelasting weer op basis van alle verzamelde telematica data. Zoals eerder genoemd is de data vanuit machines van één motorleverancier, en daarmee niet representatief voor de gehele vloot. Het is de verwachting dat deze data relatief hoge maximale AdBlue-fracties heeft.

Figuur 4 laat zien dat bij een toenemende motorbelasting de AdBlue-fractie toeneemt. Gemiddeld genomen wordt de 6% AdBlue bereikt bij ca. 22-25% motorbelasting, en de 7% AdBlue bij ca. 30-35% motorbelasting. Het verschil in NO<sub>x</sub>-emissies tussen 6 en 7% AdBlue is grofweg een factor 3 tot 4. Een verkeerd ingeschat AdBlue verbruik kan daardoor voor een flinke afwijking zorgen. De motorbelasting kan worden ingeschat op basis van het brandstofverbruik in liters per uur en het maximale motorvermogen van de machine.



Als bijvoorbeeld het brandstofverbruik 10 liter per uur is en het maximale motorvermogen 100 kW, dan kan de motorbelasting grofweg worden ingeschat door 10 liter per uur met een factor 4 te vermenigvuldigen en deze te delen door de 100 kW. In dit geval zou 10 liter per uur een motorbelasting van 40% betekenen. De factor 4 kan in de praktijk variëren, afhankelijk van het motorrendement, het is daarom indicatief. Deze berekening kan dienen als een check op de opgegeven AUB waarden, als er bijvoorbeeld 7% AdBlue is ingevuld, terwijl de geschatte motorbelasting 20% is, dan zijn de ingevulde gegevens waarschijnlijk onjuist.



Figuur 4: AdBlue-fractie als functie van de ingeschatte motorbelasting op basis van alle verzamelde telematica data.



## 3 Real-time monitoring van emissies met een NO<sub>x</sub>-sensor

Dit hoofdstuk beschrijft gebruikte apparatuur en resultaten van tijdens het project gemonitorde mobiele machines. Daarbij is gebruik gemaakt van een door TNO in de uitlaat aangebrachte NO<sub>x</sub>-sensor. Emissie-monitoring is daarbij uitgevoerd met of zonder een additionele aansluiting op de CANbus van de machine voor het uitlezen van emissie- en inzetgerelateerde machine parameters. Eerst wordt beschreven welke apparatuur is toegepast, daarna wordt een overzicht gegeven van de gemonitorde machines, vervolgens worden de emissie-monitoringsresultaten beschreven.

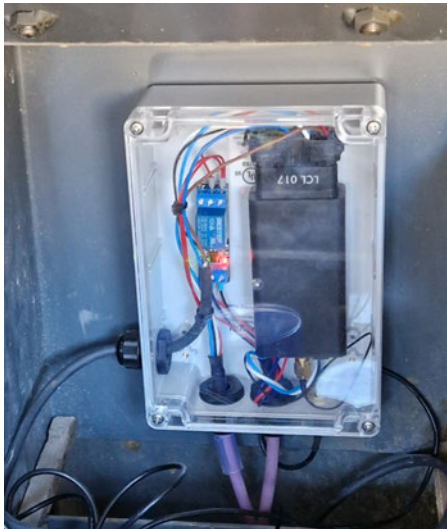
### 3.1 Toegepaste apparatuur

Voor real-time monitoring met een NO<sub>x</sub>-sensor zijn in dit project twee verschillende typen meetsystemen van TNO toegepast:

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

SEMS is een relatief eenvoudig in te bouwen en compact sensor-based systeem dat uitlaatemissies meet en gedetailleerd opslaat. Omdat SEMS compact is en geen interactie vereist met de gebruiker, kan de machine tijdens monitoring normaal worden gebruikt. Dit maakt meten gedurende langere tijd mogelijk; zo kunnen grote hoeveelheden praktijkdata worden verzameld. Een NO<sub>x</sub>/O<sub>2</sub> sensor (op basis van O<sub>2</sub> wordt CO<sub>2</sub> bepaald) wordt bij gebruik van SEMS in de uitlaat gemonteerd om de concentratieniveaus te meten met een logfrequentie van 1 Hz. 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 hiervoor rapport TNO 2023 R10553. 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.

De LCL dongle is een meer compacte variant van SEMS en door TNO ontworpen om langdurig te monitoren maar dan met een kortere installatietijd en tegen lagere kosten. De LCL heeft dezelfde functionaliteiten als SEMS, maar dan met minder mogelijkheden voor het aansluiten van aparte sensoren. In dit project is een waterdichte variant van de LCL-dongle gerealiseerd en aangesloten op de voeding van de machine en een externe (door TNO in de uitlaat gemonteerde) NO<sub>x</sub>-sensor, daarbij is geen connectie gemaakt met de CANbus. Het doel hiervan is om een snellere installatie te realiseren, verbinding maken met de CANbus kan de inbouw soms fors vertragen vanwege het trekken van kabels naar de cabine, maar ook doordat de benodigde signalen soms niet toegankelijk zijn. Helaas is er ook geen sprake van standaardisatie. Figuur 5 geeft een ingebouwde LCL-dongle weer.



Figuur 5: Ingebouwde waterdichte LCL-dongle.

Meer documentatie rondom SEMS en de LCL toegepast in bouwmachines is terug te vinden in de EMPK rapportage van 2023: TNO 2023 R10553. SEMS of LCL kunnen ook vervangen worden door een universeel on-board emissie monitoringsysteem.

De vereisten aan een dergelijk systeem zouden dan als volgt zijn:

- 1Hz log-frequentie
- Lokale opslag ten behoeve van bufferen van meetdata
- NO<sub>x</sub>/O<sub>2</sub>-sensor
- 250 kbit CAN-bus met SAE J1939 protocol ten behoeve van aansturen en uitlezen NO<sub>x</sub>- sensor
- Achter schakelcontact of door middel van software gestuurde relaismodule:
  - 16-36 VDC voedingsspanning ten behoeve van NO<sub>x</sub> sensor (max 20W)
- GPS module ten behoeve van plaatsbepaling en tijdsynchronisatie
- Battery saving mode om de startaccu te beschermen tegen diep-ontlading
- Detectiemethode voor het starten van de motor
- Optioneel: 4G/5G module ten behoeve van online uploaden van databestanden en/of controle van de juiste werking van de datalogger.

## 3.2 Real-time monitoring van de NO<sub>x</sub>-emissies

In deze paragraaf wordt een overzicht gegeven van de tijdens het project gemonitorde machines met een externe NO<sub>x</sub>-sensor. Daarna worden de emissie monitoringsresultaten van de mobiele werktuigen met NO<sub>x</sub>-sensor beschreven, eerst de resultaten zonder CANbus-aansluiting en daarna met CANbus-aansluiting.

Tabel 2 geeft een overzicht van de gemonitorde machines met NO<sub>x</sub>-sensor. De eerste kolom geeft de machine-ID weer, die begint met een afkorting van het merk en type, waarna de door TNO gehanteerde emissiecode volgt. De machines die beginnen met "NRE" zijn Stage V machines. Het cijfer na NRE geeft de vermogenscategorie aan, waarbij 4, 5, 6 en 7 respectievelijk staan voor 37-56 kW, 56-130 kW, 130 tot 560 kW en >560 kW. Er zijn ook machines met "ST4" in de naam, wat staat voor Stage IV.

Deze worden vervolgd met R of Q, die respectievelijk staan voor de vermogenscategorie 56 – 130 kW en 130 – 560 kW. De NRE4 en NRE7 machines zijn de enige machines zonder SCR-katalysator. De limietwaarde voor deze machines zijn substantieel minder streng. Waar de NO<sub>x</sub>-limietwaarde voor NRE5 en NRE6 0,4 gram NO<sub>x</sub>/kWh is, is dat voor NRE4 en NRE7 respectievelijk 4,7<sup>7</sup> en 3,5 g/kWh. De kolom daarna geeft het type machine aan, samen met het maximale motorvermogen en de Stage-klasse. Tot slot wordt de geïnstalleerde apparatuur en de totale monitoringstijd weergegeven.

Tabel 2: Overzicht gemonitorde machines met NO<sub>x</sub>-sensor.

Machine ID	Type_vermogen_stage	Apparatuur	Monitorings-data [uur]
DYN_CS1400_05_NWBDNRE4	Wals_55,4_V	NO <sub>x</sub> -sensor met CANbus	182
BOM_BF700C_04_NWBDNRE6	Asfaltspreidmachine_140_V	NO <sub>x</sub> -sensor met CANbus	147
DYN_SD2500_01_NWBDNRE6	Asfaltspreidmachine_157_V	NO <sub>x</sub> -sensor met CANbus	308
VOG_18003i_08_NWBDNRE5	Asfaltspreidmachine_129_V	NO <sub>x</sub> -sensor <u>zonder</u> CANbus	354
LIE_914LIT_02_NGMDST4R	Graafmachine_105_IV	NO <sub>x</sub> -sensor <u>zonder</u> CANbus	188
LIE_R926WL_03_NGMDST4Q	Graafmachine_140_IV	NO <sub>x</sub> -sensor met CANbus <sup>8</sup>	272
WIR_W250_1_02_NWBDNRE6	Asfaltfreesmachine_470_V	NO <sub>x</sub> -sensor met CANbus	152
WIR_W250_2_02_NWBDNRE6	Asfaltfreesmachine_283_V	NO <sub>x</sub> -sensor met CANbus	134
WIR_W210Fi_01_NWBDNRE7	Asfaltfreesmachine_563_V	NO <sub>x</sub> -sensor met CANbus	273

### 3.2.1 Monitoren met een NO<sub>x</sub> sensor zonder connectie met de CANbus

In totaal zijn er negen motoren van mobiele werktuigen gemonitord met een externe NO<sub>x</sub>-sensor. Bij zeven van die machines is ook verbinding gemaakt met de CANbus, in deze paragraaf wordt echter alleen ingegaan op de resultaten op basis van de NO<sub>x</sub>-sensor data. Zoals eerder beschreven meet de NO<sub>x</sub>-sensor zowel de NO<sub>x</sub>-concentraties als de O<sub>2</sub>-concentraties in het uitlaatgas. Op basis van de O<sub>2</sub>-concentraties wordt de CO<sub>2</sub>-concentratie in het uitlaatgas berekend.

<sup>7</sup> NO<sub>x</sub>+HC

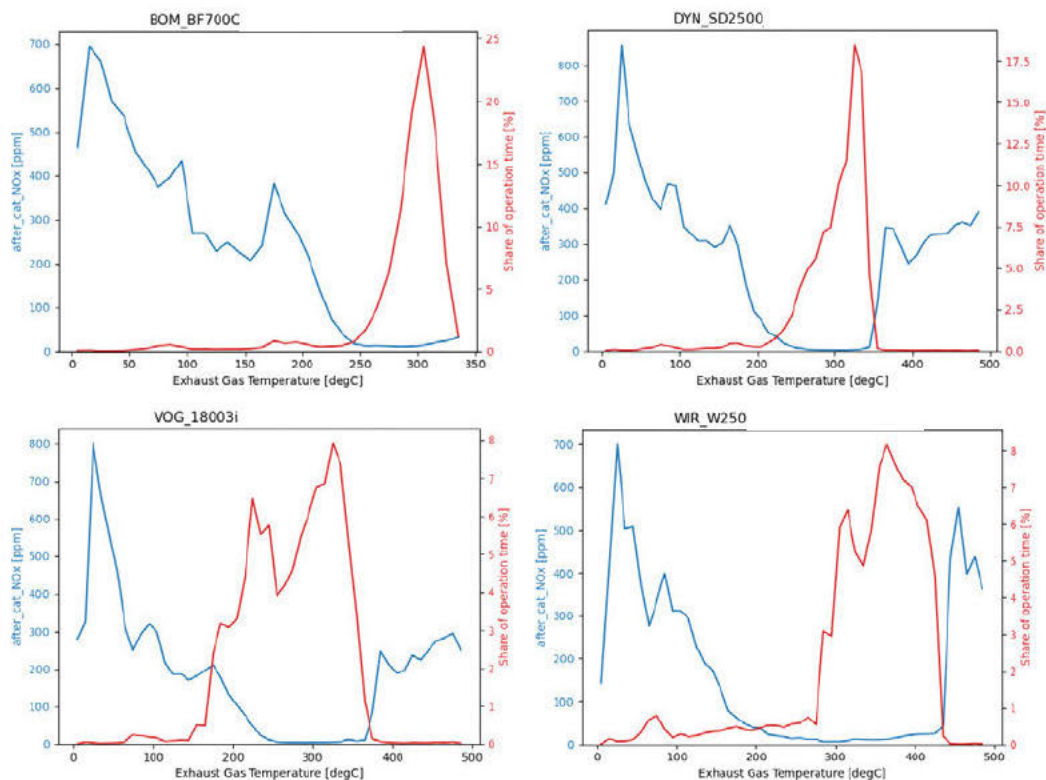
<sup>8</sup> Ondanks dat de meetapparatuur verbonden was met de CANbus, was er geen nuttige data voor emissie monitoring beschikbaar op de CANbus, Signalen zoals brandstofverbruik en toerental waren bijvoorbeeld niet beschikbaar.



### 3.2.1.1 Beoordeling van functioneren van de SCR-katalysator: NO<sub>x</sub>-concentraties als functie van uitlaatgastemperatuur

Voor machines met een SCR-katalysator kan op basis van de NO<sub>x</sub>-concentratie (ppm) duidelijk worden of de SCR wel of niet functioneert. Tijdens de emissie-monitoring is in dit onderzoek ook een temperatuursensor in de uitlaat geplaatst, dit helpt om de resultaten beter te begrijpen. De absolute temperatuur is per machine niet volledig te vergelijken omdat de temperatuursensor niet altijd op dezelfde plaats is gemonteerd. Hoe verder van de motor, hoe lager de temperatuur. Het blijft echter een goede indicatie van de uitlaatgastemperatuur.

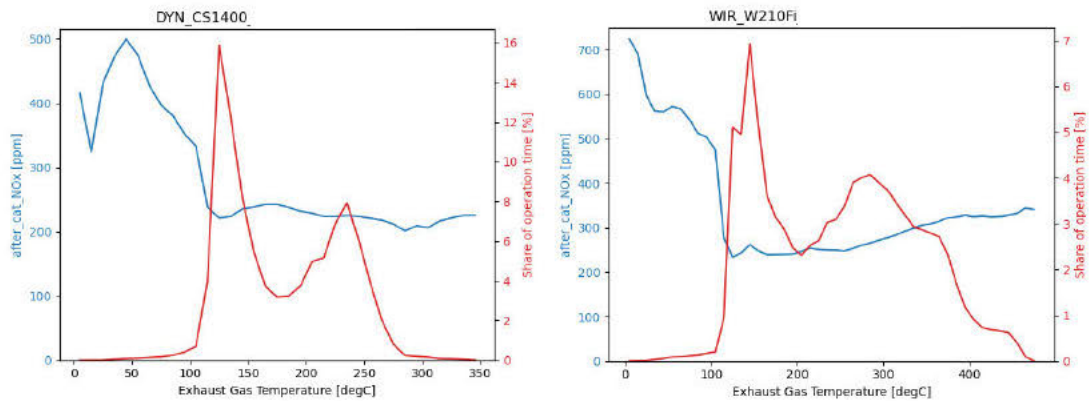
Figuur 6 geeft voor vier Stage V machines met een SCR-katalysator de NO<sub>x</sub>-concentratie (blauwe lijn) en tijdsaandeel (rode lijn) als functie van de uitlaatgastemperatuur weer. Vanaf 180 graden Celsius is een sterk dalende lijn in de NO<sub>x</sub>-concentratie waarneembaar. Rond de 250 graden Celsius is de NO<sub>x</sub>-concentratie gedaald naar waarden onder de 10 ppm, de SCR-katalysator werkt dan optimaal. Deze vier machines worden veel ingezet in het temperatuurgebied met lage NO<sub>x</sub>-concentraties. Boven de 350 graden Celsius stijgt de NO<sub>x</sub>-concentratie weer. Dat is hoogstwaarschijnlijk het gevolg van de incidentele roetfilterregeneraties, dat gebeurt bij hoge uitlaatgastemperaturen, waarbij de SCR ook NO<sub>x</sub> en NH<sub>3</sub> emissies geeft.



Figuur 6: NO<sub>x</sub>-concentratie (blauwe lijn) en tijdsaandeel (rode lijn) als functie van de uitlaatgastemperatuur voor vier Stage V machines met een SCR-katalysator.

Figuur 7 geeft voor de twee Stage V machines zonder SCR-katalysator de NO<sub>x</sub>-concentratie (blauwe lijn) en tijdsaandeel (rode lijn) als functie van de uitlaatgastemperatuur weer. Tot 100 graden Celsius is een sterk dalende lijn in de NO<sub>x</sub>-concentratie waarneembaar.

Rond de 100 graden Celsius is de variatie in NO<sub>x</sub>-concentratie beperkt, waardes onder 200 ppm komen nauwelijks voor.



Figuur 7: NO<sub>x</sub>-concentratie (blauwe lijn) en tijdsaandeel (rode lijn) als functie van de uitlaatgastemperatuur voor vier Stage V machines zonder een SCR-katalysator.

Machines met functionerende SCR-katalysator zijn vanuit de NO<sub>x</sub>-concentraties op basis van de externe NO<sub>x</sub>-sensor eenvoudig te herkennen. Bij een niet-functionerende SCR-katalysator blijven de NO<sub>x</sub>-concentraties veelal boven de 200 ppm, terwijl een goedwerkende SCR-katalysator concentraties van onder de 10 ppm laat zien. Het is hiervoor niet nodig om de uitlaatgastemperatuur te meten. Een histogram van de gemeten NO<sub>x</sub>-concentraties zal een indicatie kunnen geven welk aandeel van de tijd de SCR-katalysator goed gefunctioneerd heeft, bijvoorbeeld door te bepalen voor welk tijdsaandeel de concentraties onder de (groveweg) 40 ppm NO<sub>x</sub> blijven. Het is echter beter om een machine niet alleen op de NO<sub>x</sub>-concentraties te beoordelen, maar om ook de CO<sub>2</sub>-concentratie mee te nemen. Het CO<sub>2</sub> percentage geeft een indicatie van de motorbelasting.

### 3.2.1.2 NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> verhouding

In het algemeen geldt dat een hogere motorbelasting een hoger CO<sub>2</sub> percentage in het uitlaatgas geeft. Met behulp van de NO<sub>x</sub> (ppm)/CO<sub>2</sub>(%) verhouding in het uitlaatgas kunnen de emissieprestaties beter beoordeeld worden over de vermogensrange. Ook de werking van de SCR-katalysator kan hiermee beter beoordeeld worden en aanvullend kan er een indicatie van de absolute emissieniveaus worden gegeven.

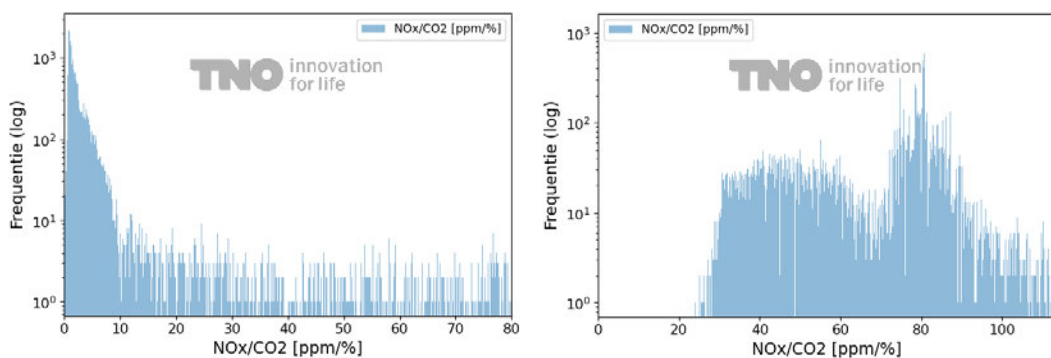
#### 3.2.1.2.1 Bepalen van de tijd dat de SCR aan of uit staat op basis van de NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> ratio

Op basis van de NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> verhouding kan het aandeel van de tijd waarin de SCR-katalysator goed functioneert redelijk goed benaderd worden. Als uitgangspunt in deze studie is aangenomen dat de SCR-katalysator goed functioneert wanneer de uitstoot onder de wettelijke emissielimiet van 0,4 gNO<sub>x</sub>/kWh blijft. Een grove inschatting van de grammen NO<sub>x</sub> per kWh - op basis van de NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> ratio - kan gemaakt worden door het motorrendement theoretisch te benaderen. Als voorbeeld: stel dat het motorrendement 740 gCO<sub>2</sub>/kWh is bij een gemiddelde inzet van 30% motorbelasting, en dat de NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> verhouding 6 ppm/% is. Dan kan de gemiddelde gNO<sub>x</sub>/kWh ingeschat worden op:  $6/10 \cdot 740/1000 = 0,44$  g/kWh. Bij een hoger motorrendement, bijvoorbeeld 670 gCO<sub>2</sub>/kWh, zou de ingeschatte gNO<sub>x</sub>/kWh op 0,40 uitkomen. Afhankelijk van het motorrendement zal de theoretische benadering van de emissielimiet (0,4 g/kWh) op een NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> verhouding tussen de 5 en 6 ppm/% uitkomen.



In dit onderzoek zijn alle waarden onder de 6 ppm/% aangenomen als ‘SCR aan’, en alle waarden boven de 6 ppm/% als ‘SCR uit’. In de praktijk is de scheiding niet zo zwart-wit, en zal de SCR ook nog (deels) functioneren bij waarden boven een  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$  ratio van 6 ppm/%, de waarden zullen dan wel veelal boven de emissielimiet liggen.

Figuur 8 geeft een histogram van de  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$  ratio weer van een machine met SCR-katalysator (links) en een machine zonder SCR-katalysator (rechts). Deze histogrammen bevestigen dat bij de machine met SCR-katalysator de  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$  ratio's van onder de 5 ppm/% veruit het meeste voorkomen (merk op dat de schaal logaritmisch is). Het histogram van de machine zonder SCR-katalysator begint pas boven de 20 ppm/%, dit impliceert dat wanneer de SCR volledig uit zou zijn, de  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$  verhouding fors hoger is dan de gehanteerde 6 ppm/%.



Figuur 8: Histogram  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$  ratio van machine met SCR-katalysator (links) en machine zonder SCR-katalysator (rechts), y-as is logaritmisch.

Tabel 3 laat voor de gemonitorde machines met een SCR zien gedurende welke percentage van de tijd hun SCR's 'aan' of 'uit' stonden. Hieruit blijkt dat de SCR's van de machines over een relatief groot deel van de tijd 'aan' stonden en goed werken. Echter, voor 7-29 % van de totale tijd staan de SCR's uit, met wel 15 tot 140 keer hogere emissies tot gevolg dan bij SCR 'aan'. Hierdoor is, bij elke gemonitorde machine de periode waarin de SCR 'uit' staat verantwoordelijk voor 66 tot 92% van de totale door die machine geproduceerde  $\text{NO}_x$  emissie. De hoogste percentages komen veelal voor bij machines met een hoog aandeel 'SCR uit'. De Dynapac 2500 is hierop een uitzondering, bij deze machine is het tijdsaandeel 'SCR uit' laag, maar de  $\text{NO}_x$  bijdrage bij 'SCR uit' alsnog zeer hoog. Dit is te verklaren door de zeer lage  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$  ratio bij 'SCR aan'. De aandelen SCR aan/uit kunnen daarom niet los gezien worden van de  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$  ratio's.

In Tabel 4 is te zien dat de machines met de grootste aandelen "SCR uit" (VOG\_1800i en WIR\_250\_1) de hoogste gemiddelde  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$  ratio's hebben, vice versa geldt dit ook. Tabel 4 maakt wel duidelijk dat alle gemonitorde machines met SCR-katalysator (Stage IV en Stage V machines met een motorvermogen tussen de 56 en 560 kW) fors lagere gemiddelde emissies hebben dan de machines zonder SCR. De minst presterende machine met SCR heeft een 6 keer lagere gemiddelde emissie dan de machines zonder SCR. Bij de best presterende machine met SCR loopt dit verschil op tot een factor 17.

Tabel 3: Inschatting van het tijdsaandeel SCR uit (>6 ppm/%) en van SCR aan (<6 ppm/%), inclusief bijbehorende gemiddelde NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub>-ratio's en inschatting van het aandeel van de NO<sub>x</sub>-uitstoot.

	BOM BF700		Dynapac 2500		VOG_1800i		WIR_250_1		WIR_250_2		LIE_R926W	
	SCR uit	SCR aan	SCR uit	SCR aan	SCR uit	SCR aan	SCR uit	SCR aan	SCR uit	SCR aan	SCR uit	SCR aan
Tijd [%]	9	91	7	93	25	75	29	71	11	89	19	81
Gemiddelde NO <sub>x</sub> /CO <sub>2</sub> [ppm/%]	46	1,9	57	0,4	34	0,8	36	1,3	30	1,9	56	1,5
Totale NO <sub>x</sub> [%]	71%	29%	92%	8%	94%	6%	92%	8%	66%	34%	90%	10%

Tabel 4: Gemiddelde NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> ratio's van gemonitorde machines.

Machine ID	Type_vermogen_stage	NO <sub>x</sub> /CO <sub>2</sub> [ppm/%]
DYN_CS1400_05_NWBDNRE4	Wals_55,4_V	67,5
BOM_BF700C_04_NWBDNRE6	Asfaltspreidmachine_140_V	5,9
DYN_SD2500_01_NWBDNRE6	Asfaltspreidmachine_157_V	4,5
VOG_18003i_08_NWBDNRE5	Asfaltspreidmachine_129_V	9,2
LIE_914LIT_02_NGMDST4R	Graafmachine_105_IV	13,4
LIE_R926WL_03_NGMDST4Q	Graafmachine_140_IV	11,9
WIR_W250_1_02_NWBDNRE6	Asfaltfreesmachine_470_V	11,4
WIR_W250_2_02_NWBDNRE6	Asfaltfreesmachine_283_V	4,9
WIR_W210Fi_01_NWBDNRE7	Asfaltfreesmachine_563_V	76,8

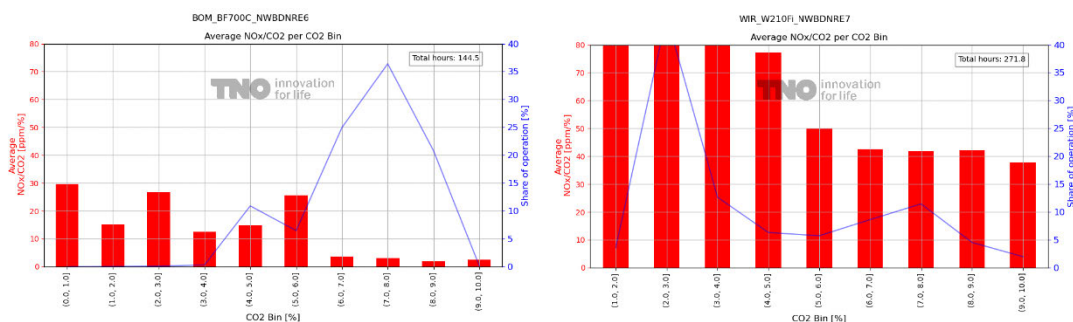
### 3.2.1.2.2 Emissieprestaties over de vermogensrange

De emissieniveaus van machines met SCR-katalysator zijn bij een lage motorbelasting – grofweg onder de 20% motorbelasting – vaak relatief hoog. Dit komt omdat de motorbelasting dan zo laag is dat de SCR-katalysator niet op bedrijfstemperatuur komt. Langdurig stationair draaien is een voorbeeld waarbij sprake is van lage motorbelasting. Zoals eerder genoemd kan de CO<sub>2</sub>-concentratie (%) dienen als indicatie voor de motorbelasting. Door de NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> ratio als functie van de CO<sub>2</sub>-concentratie weer te geven kan een indicatie worden gegeven van de emissieprestaties bij diverse motorbelastingen. Door ook het tijdsaandeel als functie van de CO<sub>2</sub>-concentratie weer te geven kan worden ingeschat tot in welke mate een machine op hoge of lage motorbelasting wordt ingezet.

Figuur 9 geeft de NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> ratio als functie van de CO<sub>2</sub>-concentratie van een NRE6 machine (met SCR) en een NRE7 machine (zonder SCR) weer. De resultaten zijn hierbij geaggregeerd in CO<sub>2</sub>-bins van 1%. Het tijdsaandeel per CO<sub>2</sub>-bin is weergegeven als blauwe lijn. Beide machines hebben lagere emissies bij de hogere CO<sub>2</sub>-bins. Bij de NRE6 machine zijn de NO<sub>x</sub>-emissies in elke CO<sub>2</sub> bin beduidend lager dan bij de NRE7 machine, het verschil is in sterkste mate zichtbaar bij de hogere CO<sub>2</sub> bins, en loopt hier op tot een factor 20. Daarnaast wordt duidelijk dat de NRE6 machine vaak op hogere motorbelastingen wordt ingezet.

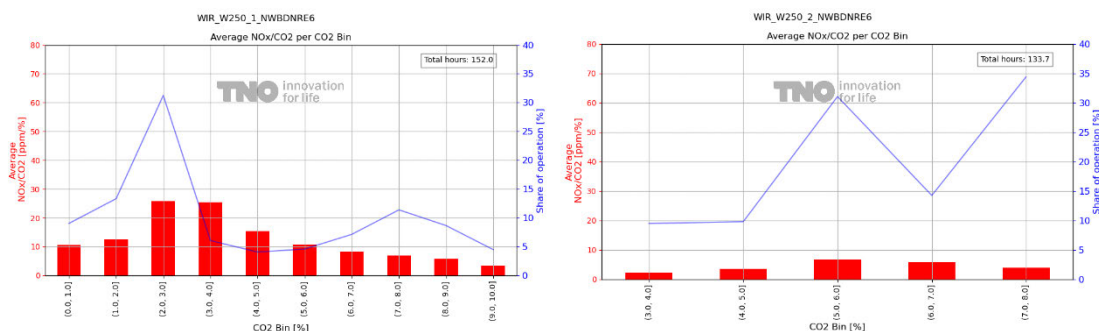
Dit in tegenstelling tot de NRE7 machine, die met name een hele lage motorbelasting heeft. De NRE7 machine heeft een maximaal motorvermogen van 563 kW, een lage motorbelasting bij machines met een hoog motorvermogen is vaker geobserveerd, zie TNO rapport 2023 R10553.

Bij de vergelijking tussen verschillende motoren kan EGR (uitlaatgasrecirculatie) echter invloed hebben omdat EGR leidt tot andere CO<sub>2</sub>-percentages in het uitlaatgas (x-as in de grafiek), bij dezelfde motorbelasting en toerental, voor de NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub>-ratio (y-as), is dit geen probleem.



Figuur 9: NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> ratio (rode balken) als functie van de CO<sub>2</sub>-concentratie van een NRE6 machine met SCR (links) en een NRE7 machine zonder SCR (rechts). De blauwe lijn geeft het tijdsaandeel per CO<sub>2</sub>-bin weer.

Figuur 10 geeft de NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> ratio per CO<sub>2</sub>-bin weer van twee NRE6 motoren (met SCR), deze twee motoren zijn geïnstalleerd in één machine (asfaltfrees), motor W250\_1 heeft een maximaal motorvermogen van 470 kW en voor de W250\_2 is dit 283 kW. De motor met het lagere maximale motorvermogen wordt duidelijk hoger belast en heeft lagere NO<sub>x</sub>-emissies. De hiervoor genoemd NRE7 machine is ook een asfaltfrees, maar dan met één grote motor in plaats van twee “kleinere”. De machine met twee NRE6 motoren heeft in totaal fors lagere NO<sub>x</sub>-emissies.



Figuur 10: NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> ratio (rode balken) als functie van de CO<sub>2</sub>-concentratie van twee NRE6 motoren (met SCR), deze twee motoren zijn geïnstalleerd in één machine, de W250\_1 heeft een maximaal motorvermogen van 470 kW en de W250\_2 283 kW. De blauwe lijn geeft het tijdsaandeel per CO<sub>2</sub>-bin weer.



### 3.2.1.2.3 *Inschatting van absolute emissieniveaus op basis van NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> ratio*

Een vertaalslag van de NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> ratio naar absolute emissieniveaus kan nuttig zijn om de resultaten beter te kunnen vergelijken met bekende waarden of emissieniveaus van andere bronnen.

Een grove inschatting van de grammen NO<sub>x</sub> per kWh - op basis van de NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> ratio - is al toegelicht in paragraaf 3.2.1.2.1. Daarnaast is de NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> verhouding in ppm/% op basis van de molaire massa ook om te rekenen naar gram NO<sub>x</sub> per kg CO<sub>2</sub>, en naar gram NO<sub>x</sub> per liter diesel:

- De omrekening naar gram NO<sub>x</sub> per kg CO<sub>2</sub> 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.

Vanuit de NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> ratio zijn nuttige conclusies te trekken. De rekenmethodiek is zeer eenvoudig doordat alleen de NO<sub>x</sub>-concentraties gedeeld worden door de CO<sub>2</sub>-concentraties en er geen CANbus signalen nodig zijn voor het maken van de berekening. Het laat duidelijk het onderscheid in emissieniveaus zien, de werking van de SCR-katalysator en inzet en emissies bij uiteenlopende motorbelastingen. Vanwege de eenvoud, en de onafhankelijkheid van CANbus-signalen is deze eenheid een interessante optie voor emissie-monitoring.

## 3.2.2 **Monitoren met een NO<sub>x</sub> sensor met connectie met de CANbus**

In totaal zijn er zeven motoren van mobiele werktuigen gemonitord met een zelf in de uitlaat aangebrachte (externe) NO<sub>x</sub>-sensor waarbij er ook verbinding met de CANbus is gemaakt. In deze paragraaf wordt beschreven wat de ervaringen zijn met het maken van CANbus-verbindingen en wat dit toevoegt aan NO<sub>x</sub>-monitoring. Eerst wordt beschreven waarom de verbinding met een CANbus gemaakt is en wat daarmee de praktische ervaringen zijn. Daarna wordt – als vervolg op de vorige paragraaf – verder ingegaan op het effect van een SCR-katalysator die niet functioneert. Vervolgens worden de emissieprestaties van de machines toegelicht.

### 3.2.2.1 **Reden voor een verbinding met een CANbus en een MAF sensor als alternatief**

De belangrijkste reden om verbinding te maken met de CANbus is om signalen te registreren waarmee de gemeten concentraties (van NO<sub>x</sub> en CO<sub>2</sub> in dit geval) vertaald kunnen worden naar absolute emissies, ofwel emissies in grammen. Om de vertaling naar absolute emissies te maken dient de uitlaatgasstroom bepaald te worden. Bij officiële emissiemetingen wordt de uitlaatgasstroom daadwerkelijk gemeten. De apparatuur die daarbij toegepast wordt is niet geschikt voor langdurige monitoring. Daarom wordt gebruik gemaakt van CANbus signalen in combinatie met de gemeten zuurstofconcentratie in het uitlaatgas. Dit gaat om signalen zoals het brandstofverbruik, de inlaatluchtstroom en het motortoerental. Daarnaast kunnen (arbeids-)specifieke massa-emissies (g/kWh) worden berekend als informatie over motortoerental en motorkoppel beschikbaar is via de CANbus. Deze berekeningen zijn toegelicht in TNO rapport 2023 R10553.

Een probleem bij deze methodiek is dat er geen standaardisatie is van signalen die op een CANbus beschikbaar zijn, soms zijn de benodigde signalen niet beschikbaar.

Ook is de kwaliteit en betrouwbaarheid van deze signalen niet altijd bekend. Dit zorgt voor extra installatietijd en ook voor extra tijd in de dataverwerking, bij elke machine die beoordeeld moet worden is maatwerk nodig. Conclusie is dat een alternatief wenselijk is voor de bepaling van absolute emissieniveaus.

Het meest nauwkeurig alternatief om onafhankelijk te worden van CANbus-signalen is - naar verwachting - door de luchtstroom door de inlaat te meten. Dit is mogelijk met een zogenaamde Mass Air Flow (MAF) sensor. Deze luchtstroom, in combinatie met het gemeten zuurstof percentage in het uitlaatgas en de theoretische stoichiometrische lucht/brandstof verhouding kunnen een nauwkeurig inschatting van de uitlaatgasstroom mogelijk maken. In een nog lopende studie wordt hier verder onderzoek naar gedaan. Enkele uitdagingen daarbij zijn de montage van de sensor en de beschikbaarheid van een sensor voor luchtinlaten met grote diameters (die bij mobiele werktuigen vaak voorkomen).

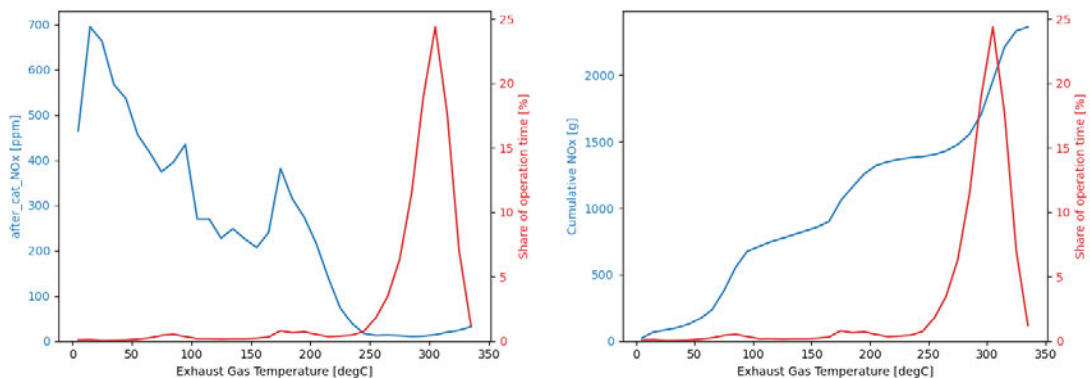
De resultaten zoals hieronder beschreven zijn bepaald aan de hand van beschikbare CANbus-signalen en de zelf geplaatste  $\text{NO}_x/\text{O}_2$ -sensor.

### 3.2.2.2 Impact van ‘SCR-uit’

In paragraaf 3.2.1 is al beschreven dat een goede werking van de SCR-katalysator bepalend is voor verlaging van de  $\text{NO}_x$ -emissieniveaus. Door de absolute  $\text{NO}_x$ -emissies in grammen te berekenen kan de impact nog beter geduid worden.

Figuur 11 geeft in de linker grafiek de  $\text{NO}_x$ -concentratie (blauwe lijn) en het tijdsaandeel (rode lijn) als functie van de uitlaatgastemperatuur weer voor een Stage V machines met een SCR-katalysator (BOM\_BF700C). De grafiek rechts in hetzelfde figuur betreft voor deze machine de cumulatieve  $\text{NO}_x$ -emissie. Uit de grafiek wordt duidelijk dat, hoewel de periode waarover de SCR niet of niet optimaal functioneert (rode lijn tot 240 graden Celsius), deze periode toch dominant is voor de bijdrage aan de totale  $\text{NO}_x$  emissie van deze machine. Andersom is ook waar: in de periode waarin de SCR goed functioneert, is de bijdrage aan de totale  $\text{NO}_x$ -emissie beperkt.

De combinatie van een juiste inzet (zo min mogelijk lage motorlast) van de machine en het geïnstalleerde motorvermogen (niet hoger dan nodig) zijn daarmee zeer relevant voor de uiteindelijke  $\text{NO}_x$ -emissies van de machine. Door de emissieprestaties via emissie monitoring goed te beoordelen kan gestuurd worden op een zo effectief mogelijk inzet van machines.



Figuur 11: **Links:**  $\text{NO}_x$ -concentratie (blauwe lijn) en tijdsaandeel (rode lijn) als functie van de uitlaatgastemperatuur voor Stage V machines met een SCR-katalysator (BOM\_BF700C). **Rechts:** Cumulatieve  $\text{NO}_x$ -emissies (blauwe lijn) en tijdsaandeel (rode lijn) als functie van de uitlaatgastemperatuur voor Stage V machines met een SCR-katalysator (BOM\_BF700C).

### 3.2.2.3 Generiek overzicht emissieprestaties van alle machines

Met behulp van de berekende absolute emissieniveaus kan een overzicht worden gegeven van de totale emissies gedurende de monitoringsperiode, zie Tabel 5. Door per machine de inzet op een bepaald project goed bij te houden, kunnen de emissies per project nauwkeurig bepaald worden. Dit kan dan – indien gewenst – vergeleken worden met de inschatting vooraf, om op deze manier de volgende inschatting vooraf nauwkeuriger te kunnen maken. Daarnaast kan een overzicht van de totale emissies per machine voor vlooteigenaren helpen om te bepalen welke machines de grootste impact op de NO<sub>x</sub>- en CO<sub>2</sub>-emissies hebben, en welke daarmee het meest effectief zijn om maatregelen op te treffen.

Via de hiervoor beschreven analyse op basis van de NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> verhouding wordt vooral ingegaan op NO<sub>x</sub> emissies waarbij rekening wordt gehouden met het geleverde vermogen (in de vorm van CO<sub>2</sub>). Ofwel, indien de CO<sub>2</sub>-emissies hoog zijn, mogen de NO<sub>x</sub>-emissies ook hoger zijn.

In Tabel 4 verschilt de NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> ratio van de DYN\_CS1400 bijvoorbeeld slechts ca. 15% van de WIR\_W210Fi. In Tabel 5 springt de WIR\_W210Fi er daarentegen duidelijk uit qua hoge absolute NO<sub>x</sub>-emissies, ca. 17 keer hoger dan de DYNCS1400. Dit is te verklaren door de grootte van de motor en daarbij benodigde geleverde arbeid, wat ook terug te zien is in de hoge CO<sub>2</sub>-uitstoot. De WIR250, de asfaltfrees met twee NRE6 motoren, heeft in totaal - vanwege de SCR-katalysator - een factor 8 lagere NO<sub>x</sub>-emissies dan de WIR\_W210Fi.

Tabel 5: Overzicht van absolute emissieniveaus per motor gedurende de monitoringsperiode.

Machine ID	Type_vermogen_stage	Inzet	NO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub>
		[uur]	[kg]	[kg]
DYN_CS1400_05_NWBDNRE4	Wals_55,4_V	182	7,9	1.378
BOM_BF700C_04_NWBDNRE6	Asfaltspreidmachine_140_V	147	2,4	4.764
DYN_SD2500_01_NWBDNRE6	Asfaltspreidmachine_157_V	308	3,4	10.669
VOG_18003i_08_NWBDNRE5	Asfaltspreidmachine_129_V	354	6,5	9.001
WIR_W250_1_02_NWBDNRE6	Asfaltfreesmachine_470_V	152	11,1	11.424
WIR_W250_2_02_NWBDNRE6	Asfaltfreesmachine_283_V	134	5,0	10.679
WIR_W210Fi_01_NWBDNRE7	Asfaltfreesmachine_563_V	273	134	24.759

Het vergelijk tussen machines is uiteindelijk beter te maken door de emissies in gram per uur te beoordelen. De grammen NO<sub>x</sub> per liter brandstof zijn ook zeer nuttig, dit kan helpen om op basis van een gemeten machine de emissieprestaties te vertalen naar een vergelijkbare motor op basis van het brandstofverbruik. Daarnaast kunnen de grammen NO<sub>x</sub> per kWh nuttig zijn om een vergelijk te maken met de wettelijke emissielimieten. De emissielimiet geldt echter tijdens de typegoedkeuring bij specifieke motorbelastingpunten inclusief een bepaalde weging, terwijl tijdens bij emissie monitoring in deze studie alle inzet wordt meegenomen. Hierdoor kan een machine een hogere gemiddelde g/kWh-uitstoot hebben dan de limietwaarde tijdens praktijkinzet, maar tijdens de typegoedkeuringstest wel voldoen aan de emissielimiet.



Tabel 6 geeft een overzicht van de hiervoor beschreven eenheden. Hierbij zijn zowel de gemiddelde NO<sub>x</sub>-emissies gegeven als de gemiddelde emissies boven de 20% motorlast. Door de emissies boven de 20% motorbelasting te beoordelen kan beter ingeschat worden of de emissies laag zijn bij een SCR die op bedrijfstemperatuur is, en daarmee in de buurt van de emissielimiet komen.

De NRE6 machines in deze studie hebben het grootste deel van de tijd een motorbelasting boven de 20%, daarom is er voor de meeste machines weinig verschil tussen de gemiddelde waarde en de waarde >20% motorlast. De meeste NRE6 machines hebben gemiddelde emissieniveaus onder de grenswaarde van 0,4 g/kWh. Alleen de Asfaltspreidmachine\_129\_V (VOG\_18003i) en de WIR\_250\_1 zit er gemiddeld boven. Op basis van de NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> ratio in Tabel 4 was dit ook te concluderen. De WIR\_210Fi heeft veruit de hoogste emissies in gram per uur, waar de DYN\_SD2500 de laagste emissies heeft.

Tabel 6: Overzicht van specifieke gemiddelde-, en gemiddelde >20% motorlast-, NO<sub>x</sub>-emissies per motor gedurende de monitoringsperiode tijdens praktijkinzet. De limietwaarde (NO<sub>x</sub> 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.

Machine ID	Type_vermogen_stage	NO <sub>x</sub> [g/kWh]			NO <sub>x</sub> [g/u]		NO <sub>x</sub> [g/l]	
		Limiet-waarde	Gemiddeld	>20% motorlast	Gemiddeld	>20% motorlast	Gemiddeld	>20% motorlast
DYN_CS1400_05_NWBDNRE4	Wals_55,4_V	4,7	3,8	3,2	43	58	13	11
BOM_BF700C_04_NWBDNRE6	Asfaltspreidmachine_140_V	0,4	0,33	0,28	16	15	1,3	1,1
DYN_SD2500_01_NWBDNRE6	Asfaltspreidmachine_157_V	0,4	0,2	0,16	11	8,8	0,8	0,7
VOG_18003i_08_NWBDNRE5	Asfaltspreidmachine_129_V	0,4	0,5	0,4	18	18	1,9	1,7
WIR_W250_1_02_NWBDNRE6	Asfaltfreemachine_470_V	0,4	0,65	0,45	73	113	2,8	2,0
WIR_W250_2_02_NWBDNRE6	Asfaltfreemachine_283_V	0,4	0,3	0,3	37	56	1,3	1,2
WIR_W210Fi_01_NWBDNRE7	Asfaltfreemachine_563_V	3,5	3,6	2,8	490	844	14	11

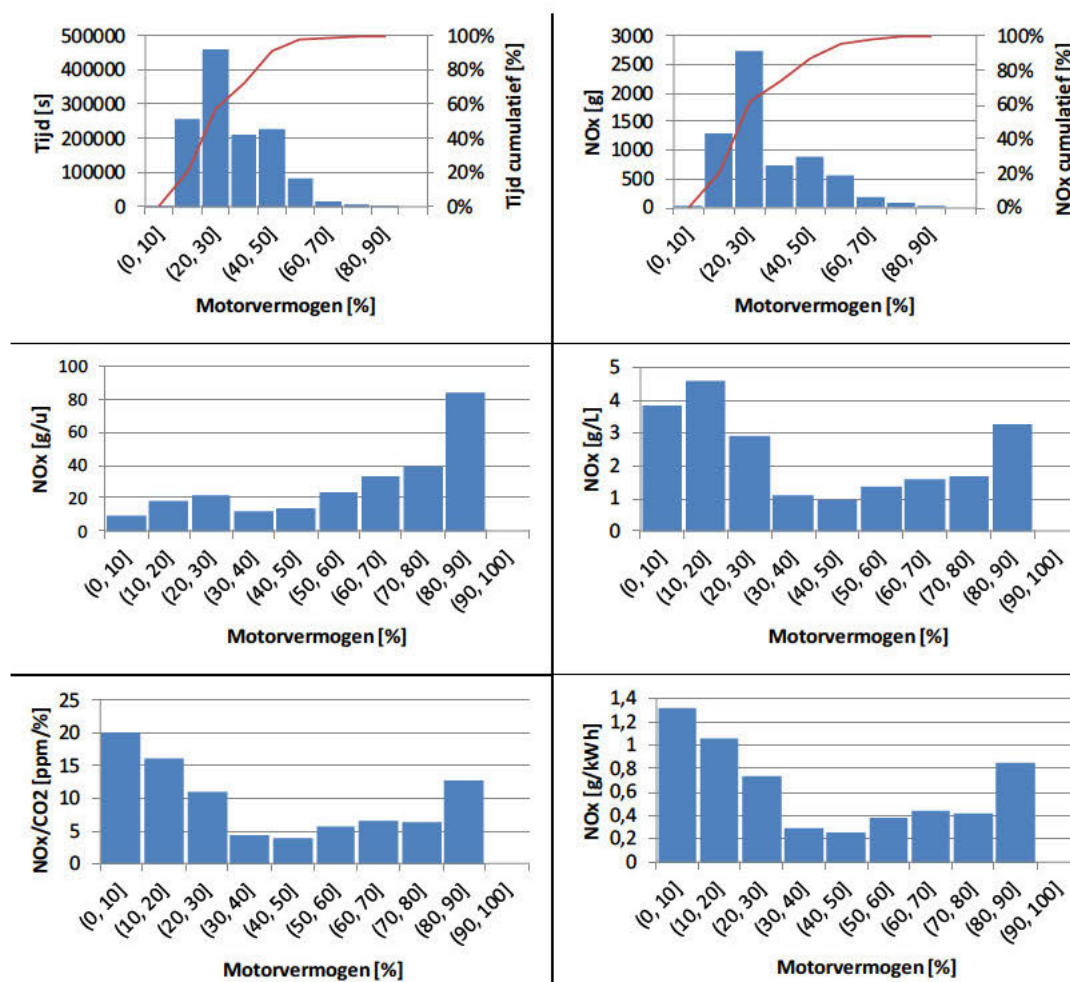
### 3.2.2.4 Detail emissieprestaties per machines

Doordat op basis van de CANbus-signalen het motorvermogen bepaald kan worden, kunnen de emissies ook worden geclusterd per motorbelasting. Hierdoor kan beter worden bepaald in welk gebied qua motorbelasting de emissies laag en hoog zijn en ook hoe vaak de machine wordt ingezet bij die motorbelastingen. Dit is een meer nauwkeurige versie van de NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> verhouding per CO<sub>2</sub>-bin, zoals beschreven in paragraaf 3.2.1.2.2.

In Figuur 12 worden de inzet en emissieprestaties per vermogensbin van de VOG\_18003i weergegeven. Deze machine wordt ingezet op een relatief lage motorbelasting, met als gevolg dat de emissies hoog zijn. Deze machine komt onder de emissielimiet van 0,4 g/kWh in de vermogensbins boven de 30%, terwijl de meeste inzet daaronder plaatsvindt.

De NO<sub>x</sub>-emissies in gram per liter diesel, gram per kWh en NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> geven alle drie een vergelijkbaar beeld van de emissieprestaties over de vermogensrange.

In het kader van emissie-monitoring kan het beoordelen van emissieprestaties over de vermogensrange helpen om te bepalen of eventuele hoge emissies het gevolg zijn van inzet, of ontstaan door een probleem met de motor/nabehandelingssysteem. Daarnaast kan het voor machine-eigenaren voor nuttige inzichten zorgen om te bepalen of een verandering van de inzet tot lagere emissies kan leiden.

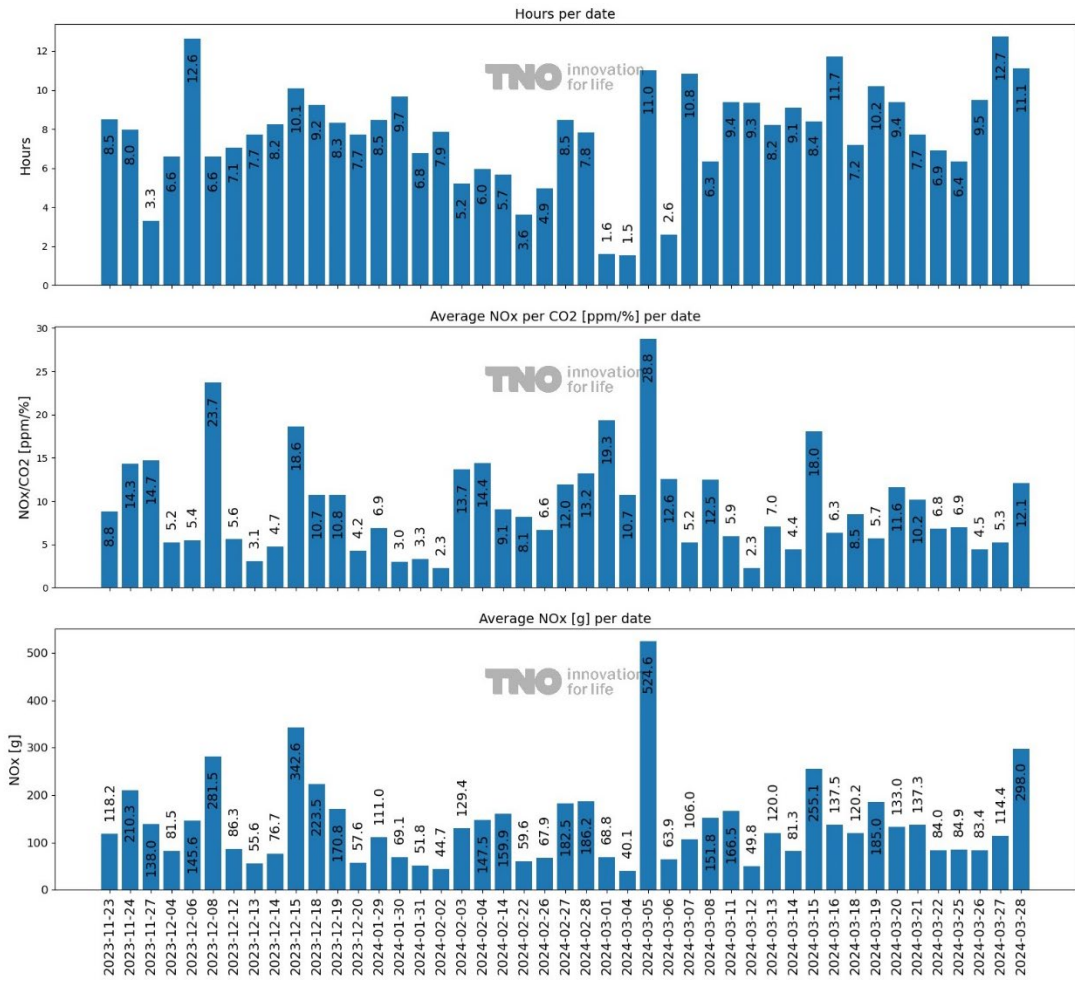


Figuur 12: Inzet en emissieprestaties per vermogensbin van de VOG\_18003i\_08\_NWBDNRE5.

### 3.2.2.5 Emissies variëren van dag tot dag

Vanuit de analyse van AUB (hoofdstuk 2) bleek al duidelijk dat de draaiuren per dag, de motorbelasting en de AdBlue fractie van dag tot dag sterk kunnen variëren. De inzet en emissies per dag kunnen op basis van emissie-monitoring nauwkeurig bepaald worden. Figuur 13 geeft een overzicht van de inzet en emissieprestaties van de VOG\_18003i\_08\_NWBDNRE5 per kalenderdag binnen de monitoringsperiode waarop de machine minimaal een half uur werkzaam is geweest. De inzet per dag varieert tussen 1,5 tot bijna 13 uur. Ook de NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> verhouding varieert sterk per dag, tussen de 2,3 en 29 ppm/%. De hoogste waarde op 5 maart 2024 is het gevolg van een machine inzet met veel dynamiek waar de SCR-katalysator het grootste gedeelte van de dag net niet op bedrijfstemperatuur komt. Deze variaties resulteren ook in grote variatie in de absolute NO<sub>x</sub> emissies per dag, grofweg tussen de 40 en 525 gram NO<sub>x</sub> per dag. Ofwel, gemiddelde emissieprestaties vertellen maar een beperkt verhaal, afhankelijk van de inzet is de variatie enorm.





Figuur 13: Inzet (draaiuren), NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> ratio's en grammen NO<sub>x</sub> per kalenderdag tijdens de monitoringsperiode, met een minimale inzet van een half uur voor de machine "VOG\_18003i\_08\_NWBDNRE5".

## 4 Kortstondige NO<sub>x</sub>-metingen

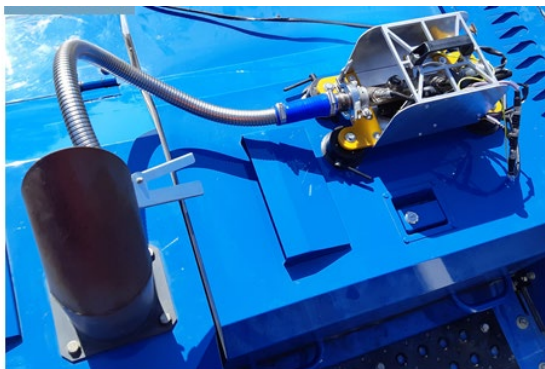
Voor machines waarbij de emissies minder variëren – bijvoorbeeld machines die vaak op dezelfde motorlast worden ingezet, of oudere motoren zonder emissiecontrole-systeem (zoals SCR of EGR) is het langdurig monitoren van emissies niet altijd nodig. In TNO rapport 2023 R10553 zijn de ervaringen rondom kortstondige metingen beschreven. Kortstondige metingen kunnen mogelijk ook een optie zijn om te controleren of er eventuele defecten of manipulaties aanwezig zijn bij een SCR-katalysator. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de mogelijkheden voor kortstondige metingen ten behoeve van de beoordeling van het functioneren van de SCR-katalysator. Dit deel van het onderzoek is echter nog lopend in 2024 (hierbij wordt ook een roetfiltertest meegenomen), waardoor het onderstaande overzicht beknopt is.

Het voordeel van kortstondige metingen is dat er geen of nauwelijks tijd voor installatie van meetapparatuur benodigd is. Er wordt direct in de uitlaatpijp van de machine gemeten waardoor geen aanpassingen nodig zijn aan de machine. Het nadeel van kortstondige metingen is dat het een momentopname is, eventueel defecten of manipulaties kunnen potentieel vlak na de test plaatsvinden.

### 4.1 Toegepaste apparatuur

Voor de kortstondige NO<sub>x</sub>-metingen heeft TNO een draagbaar emissiemeetsysteem ontwikkeld, ook wel de BOEMkit genoemd, zie Figuur 14. Bij de BOEMkit worden dezelfde sensoren toegepast als bij langdurige monitoring, ofwel vooral gebaseerd op toepassing van een NO<sub>x</sub>/O<sub>2</sub> sensor. Naast de sensor(en) voor emissiemetingen 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 stilstand 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.



Figuur 14: De TNO BOEMkit, geïnstalleerd op een machine met zuignappen.

## 4.2 Criteria voor goed- of afkeur

Een belangrijk onderdeel voor een SCR-controle test is de grenswaarde voor afkeur/goedkeur. Figuur 6 in het vorige hoofdstuk geeft voor vier Stage V machines met een SCR-katalysator de NO<sub>x</sub>-concentratie als functie van de uitlaatgastemperatuur weer. Vanaf ca. 180 graden Celsius vindt er een sterke daling plaats waarbij de NO<sub>x</sub>-concentraties van grofweg 200-300 ppm dalen naar onder de 10 ppm bij een temperatuur van rond de 250 graden Celsius, de SCR-katalysator werkt dan optimaal. Bij machines zonder SCR komen waarden onder 200 ppm, ook bij hogere bedrijfstemperaturen nauwelijks voor. Ook voor machines waarbij de SCR in zijn volledigheid niet werkt zullen de concentraties naar verwachting niet onder de 200 ppm komen. Voor een machine die door een defect niet optimaal werkt zijn concentratieniveaus momenteel niet bekend. In het lopende vervolgonderzoek wordt hier verder onderzoek naar gedaan.

## 4.3 Praktische toepasbaarheid

De grootste uitdaging voor een korte test is om de SCR op bedrijfstemperatuur te krijgen. Wanneer de apparatuur met zuignappen aan de machine wordt bevestigd en de test plaats kan vinden tijdens reguliere inzet, zal de uitdaging minder groot zijn.

Indien een dergelijke test – zoals dat bij een APK voor wegvoertuigen het geval is – binnen een korte tijd met vaste apparatuur (apparatuur die niet op de machine geplaatst kan worden) plaats moet vinden bij een keuringsstation, is de opwarming van de SCR-katalysator een uitdaging. Voor het opwarmen van de SCR-katalysator is immers een motorbelasting van grofweg minimaal 20% nodig. De diversiteit in mobiele werktuigen is enorm en niet alle machines kunnen ter plaatse een hoge motorlast leveren.

Een andere mogelijkheid is dat de machine wel met vaste apparatuur wordt gemeten, maar dan op een bouwplaats. Direct na inzet zou de machine dan een test kunnen ondergaan. Een SCR-katalysator is echter wel binnen ca. 5 minuten afgekoeld, de test zal dan ook vrijwel direct na inzet plaats moeten vinden.



## 5 Conclusies en aanbevelingen

Dit onderzoek was gericht op verschillende opties van (emissie)monitoring bij mobiele (bouw)machines met een SCR.

Drie opties zijn nader onderzocht:

1. Monitoren van AUB-getallen en bijbehorende emissies;
2. Emissie-monitoring met een externe NO<sub>x</sub>-sensor, zonder additioneel gebruik van CANbus motorsignalen;
3. Emissie-monitoring met een externe NO<sub>x</sub>-sensor, met gebruik van additionele CANbus signalen.

Het doel was om ervaringen op te doen met al deze mogelijkheden en te laten zien welke data analyses daarmee mogelijk zijn. Hieronder worden de conclusies per optie beschreven.

### **1. Monitoren van AUB-getallen en bijbehorende emissies**

De AUB-methode is een rekenmodel van TNO voor het bepalen van de emissies per machine aan de hand van het aantal draaiuren, het brandstof- en het AdBlue-verbruik. De AUB-methode geeft – in afwezigheid van directe NO<sub>x</sub>-metingen – het meest nauwkeurige beeld van de geproduceerde NO<sub>x</sub>-emissies. De AUB-methode is daarmee een alternatief voor het direct monitoren van emissies. De AUB methode is laagdrempeliger toe te passen dan het monitoren van NO<sub>x</sub> emissies met behulp van een NO<sub>x</sub>-sensor in de uitlaat. Monitoren van de AUB-getallen is wel minder nauwkeurig dan meten in de uitlaat.

In deze studie zijn, via telematica data, AdBlue-, brandstof- en inzetgegevens beschikbaar gekomen van zes Liebherr machines. Een nauwkeurige registratie van de AUB-parameters in de telematica data, idealiter met een hoge tijdsresolutie, leidt tot betere monitoring van emissies. In deze studie was AUB-data per dag het hoogst beschikbare detailniveau. Binnen een dag treden er echter ook variaties op die het eindresultaat beïnvloeden. Deze zijn in de huidige data per dag niet zichtbaar. Indien de data per uur, of zelfs per seconde beschikbaar zou zijn, kan de NO<sub>x</sub>-berekening nog nauwkeuriger gemaakt worden.

### **2. Emissie-monitoring met een externe NO<sub>x</sub>-sensor, zonder gebruik van CANbus data**

**Vanuit de data die een externe (door TNO in de uitlaat aangebrachte) NO<sub>x</sub>-sensor levert kan de NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> ratio worden berekend. Hiermee zijn nuttige conclusies te trekken over de emissieniveaus van een machine.** De rekenmethodiek is zeer eenvoudig doordat alleen de NO<sub>x</sub>-concentraties gedeeld worden door de CO<sub>2</sub>-concentraties en er geen CANbus signalen nodig zijn. De **NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> ratio** laat duidelijk het onderscheid in emissieniveaus zien, de mate van functioneren van de SCR-katalysator en de emissies bij uiteenlopende motorbelastingen. Vanwege de eenvoud en het niet afhankelijk zijn van CANbus-signalen is deze ratio een interessante optie voor emissie-monitoring.

**De werking van een SCR-katalysator kan goed beoordeeld worden door emissie-monitoring met alleen een NO<sub>x</sub>-sensor.** Machines met functionerende SCR-katalysator zijn vanuit de NO<sub>x</sub>-concentraties op basis van de NO<sub>x</sub>-sensor data eenvoudig te herkennen.

Bij een niet-functionerende SCR-katalysator blijven de NO<sub>x</sub>-concentraties veelal boven de 200 ppm, terwijl een goedwerkende SCR-katalysator concentraties van onder de 10 ppm laat zien, een factor 20 verschil.

**Op basis van de NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub>-ratio kan een benadering worden gemaakt van de tijd dat de SCR (niet) optimaal functioneert en de impact daarvan op de NO<sub>x</sub>-emissies.** Bij de gemonitorde machines werkte de SCR voor een relatief groot aandeel optimaal (tussen de 93 en 71% van de tijd). Bij een niet optimale werking is de NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub>-ratio echter 15 tot 140 keer hoger dan bij een optimale werking, zo bleek vanuit de uitgevoerde analyse. De tijd dat de SCR niet optimaal werkt is daarom het meest bepalend voor de totale emissies met een aandeel van 66 tot 92%. De combinatie van de inzet (zo min mogelijk lage motorlast) van de machine en het geïnstalleerde motorvermogen (niet hoger dan nodig) zijn zeer relevant voor de werking van de SCR-katalysator en daarmee de uiteindelijke NO<sub>x</sub>-emissies van een machine. Door de emissieprestaties via emissie monitoring goed te beoordelen kan gestuurd worden op een zo effectief mogelijk inzet van machines.

**3. Emissie monitoring met externe NO<sub>x</sub>-sensor, met gebruik van CANbus data**  
**Gebruik van een externe (door TNO in de uitlaat aangebrachte) NO<sub>x</sub>-sensor met CANbus-connectie leidt tot inzicht in absolute emissies.** De belangrijkste reden om verbinding te maken met de CANbus is om signalen te registreren waarmee de gemeten concentraties (van NO<sub>x</sub> en CO<sub>2</sub>) vertaald kunnen worden naar absolute emissies, ofwel emissies in grammen. Met behulp van de berekende absolute emissieniveaus kan een overzicht worden gegeven van de totale emissies gedurende de monitoringsperiode. Door per machine de inzet op een bepaald project goed bij te houden, kunnen de emissies per project nauwkeurig bepaald worden, de variatie van dag tot dag kan zeer groot zijn. Dit kan dan – indien gewenst – vergeleken worden met de inschatting vooraf, om op deze manier de volgende inschatting vooraf nauwkeuriger te maken. Daarnaast kan een overzicht van de totale emissies per machine voor vlooteigenaren helpen om te bepalen welke machines de grootste impact op de NO<sub>x</sub>- en CO<sub>2</sub>-emissies hebben, en welke daarmee het meest effectief zijn om maatregelen op te treffen.

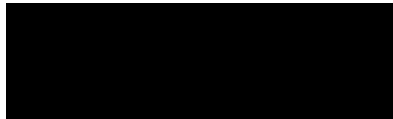
**In algemene zin helpt emissie monitoring met detailinzichten, zoals emissies over de vermogensrange van een machine.** In het kader van emissie monitoring kan het beoordelen van emissieprestaties over de vermogensrange helpen om te bepalen of hoge emissies het gevolg zijn van inzet, of een probleem met de motor en/of het uitlaatgasbehandelingssysteem. De emissies kunnen bijvoorbeeld hoog zijn omdat de machine vaak op een lage motorbelasting ingezet wordt waardoor de SCR-katalysator niet op bedrijfstemperatuur komt. Dit kan voor machine-eigenaren voor nuttige inzichten zorgen om te bepalen of een verandering van de inzet tot lagere emissies kan leiden. Emissies over de vermogensrange is globaal mogelijk met alleen een NO<sub>x</sub>-sensor, maar kan nauwkeuriger worden gedaan met CANbus data.

**Gebruik van een NO<sub>x</sub>-sensor en een CANbus-connectie is complex vanwege niet gestandaardiseerde CANbus signalen, wat tot extra installatietijd en dataverwerkingstijd leidt. Bovendien zijn de benodigde signalen niet altijd beschikbaar.** Naast het gebrek aan standaardisatie is ook de kwaliteit van de signalen niet altijd bekend. Door dit geheel is het per machine(type) echt maatwerk waarbij succes vooraf niet altijd vaststaat. Hierdoor is geconcludeerd dat een alternatief voor de bepaling van absolute emissieniveaus wenselijk is.

**Gebruik van een NO<sub>x</sub>-sensor in combinatie met een MAF-sensor lijkt een goed alternatief voor de CANbus-connectie.** Het meest nauwkeurige alternatief, bij gebruik van een NO<sub>x</sub>-sensor, om onafhankelijk te worden van de CANbus-signalen is - naar verwachting - door de luchtstroom door de inlaat zelf te meten. Dit is mogelijk met een zogenaamde Mass Air Flow (MAF) sensor. Deze optie kan zorgen voor een monitoringsysteem met gestandaardiseerde output. In 2024 zal hier verder onderzoek naar plaatsvinden. Enkele uitdagingen daarbij zijn de montage van de sensor en de beschikbaarheid van een MAF sensor voor luchtinlaten met grote diameters (die bij mobiele werktuigen vaak voorkomen).

# Ondertekening

TNO › Mobility & Built Environment › Den Haag, 7 juni 2024



Chantal Stroek  
Research Manager



Pim van Mensch  
Auteur

Mobility & Built Environment

Anna van Buerenplein 1  
2595 DA Den Haag  
[www.tno.nl](http://www.tno.nl)